

На правах рукописи

Шарафутдинова Анжелика Алексеевна



**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО
СКАНИРОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ ЦИФРОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ**

Специальность 1.6.22. Геодезия

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2023

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Брынь Михаил Ярославович

Официальные оппоненты:

Щербаков Владимир Васильевич

доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», кафедра «Инженерная геодезия», заведующий кафедрой;

Аврунев Евгений Ильич

кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», советник при ректорате по научной деятельности.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **27.09.2023 г. в 11:00** на заседании диссертационного совета ГУ.8 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1171а**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 15.06.2023 г.

УЧЕНЬИЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



КУЗИН
Антон Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. За последние десятилетия произошел резкий прогресс цифровизации, которая получила свое внедрение во многих отраслях, в том числе и в промышленности. Это привело к тому, что для обеспечения качественной и безопасной эксплуатации промышленных предприятий необходимо переходить от информации, представленной на бумажных носителях, к цифровому представлению производственных активов. Инструментом в решении этой задачи является цифровая информационная модель (ЦИМ), которая может содержать в себе необходимую и актуальную информацию для поддержки процессов на этапах жизненного цикла (инженерные изыскания, проектирование, строительство, эксплуатация и ликвидация) промышленного объекта. Одним из методов сбора геометрической и пространственной информации о производственных активах для создания ЦИМ является наземное лазерное сканирование (НЛС), которое позволяет получить значительный объем необходимой информации с наименьшими временными затратами. Несмотря на то, что НЛС и ЦИМ активно применяются на практике уже больше десятилетия, нормативно-техническая база недостаточно охватывает требования к двум этим технологиям. Так, в существующих нормативных документах отсутствуют требования к точности и методике проведения НЛС промышленных объектов. Также отсутствуют требования к точности создания ЦИМ. При этом применение НЛС для создания ЦИМ промышленных объектов имеет ряд особенностей, среди которых можно выделить: большое количество установок станций лазерного сканирования, короткие расстояния между станциями сканирования и большой массив данных, получаемый на выходе. Таким образом, разработка методики НЛС промышленных объектов для создания ЦИМ, учитывающая указанные особенности, представляется актуальной. Тема диссертации соответствует пунктам 7, 12 и 14 паспорта специальности 1.6.22. Геодезия.

Степень разработанности темы исследования. Значительный вклад в разработку и совершенствование технологии НЛС, в том числе и для создания ЦИМ, внесли отечественные ученые: Е.И. Аврунев, Б.Ф. Азаров, М.А. Алтынцев, В.А. Вальков, А.Б. Велижев, М.Г. Выстрчил, И.Н. Горькавый, Н.В. Канашин, Д.В. Крутиков, А.В. Комиссаров, Е.М. Медведев, Т.М. Медведская, А.В. Сере-

дович, В.А.Середович, Т.А. Широкова, В.В. Щербаков, А.А. Шоломицкий, Р.В. Шульц и др. Следует особо отметить труды ученых Канады, Австрии, Германии, Чехии, Франции, таких как: D. Акса, P.J. Besl, A. Gruen, H. Ingensand, D.D. Lichti, N.D. McKay, N. Pfeifer, T. Rabbani, A. Reitdorf, Y. Reshetyuk, D. Schneider, T. Schulz, M.P. Stewart, R. Straiger, M. Tsakiri, G. Vosselman, и др.

Цель работы – разработать методику НЛС, учитывающую особенности геодезической съемки промышленных объектов для повышения точности определения пространственного положения объектов при создании ЦИМ.

Идея работы заключается в построении геодезической сети на основе ее предварительного проектирования и взаимного ориентирования дискретных точечных моделей методом численной оптимизации с использованием ближайших точек.

Задачи исследования:

1. Проанализировать существующие методики НЛС промышленных объектов с выявлением их достоинств и недостатков.

2. Разработать требования к составу и точности ЦИМ промышленного объекта и на их основе обосновать требования к точности НЛС, как методу сбора информации, для создания ЦИМ.

3. Разработать методику проектирования и построения геодезических сетей в ходе выполнения работ на промышленных объектах с учетом взаимного ориентирования дискретных точечных моделей с использованием ближайших точек и выполнить ее проверку на реальном объекте.

4. Разработать методику взаимного ориентирования данных наземного лазерного сканирования на основе метода численной оптимизации.

5. Создать программный алгоритм, реализующий методику взаимного ориентирования на основе метода численной оптимизации, и проверить корректность его работы в сравнении с традиционными методами.

Объектом исследования являются цифровые информационные модели промышленных объектов. **Предметом исследования** выступает методика наземного лазерного сканирования.

Научная новизна работы: 1. Обоснованы требования к точности выполнения НЛС и ЦИМ для решения задач, возникающих в течение жизненного цикла промышленного объекта.

2. Разработана двухуровневая методика проектирования геодезических сетей, состоящая из предрасчета точности положения пунктов опорной сети, координаты которых определяются от исходных пунктов традиционными методами геодезии и предрасчета точности положения пунктов сканерной сети, координаты которых определяются от пунктов опорной сети в ходе лазерного сканирования.

3. Разработана методика построения геодезической сети, предполагающая создание сканерной сети по границам технологических блоков для обеспечения всей территории технологической установки достаточным количеством пунктов с известными координатами и основанная на выполнении взаимного ориентирования точечных моделей с применением итерационного алгоритма ближайших точек и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок.

4. Разработана методика взаимного ориентирования дискретных точечных моделей, основанная на методе Бройдена-Флетчера - Гольдфарба-Шанно с предварительной оптимизацией.

5. Разработана авторизированная программа, позволяющая выполнять проектирование геодезической сети по разработанной методике.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в разработке теоретических основ методики НЛС, позволяющих учитывать особенности промышленного объекта. Практическая значимость работы состоит в том, что разработанная методика НЛС для создания ЦИМ была реализована на реальных промышленных объектах и в дальнейшем может применяться для решения аналогичных практических задач, а также может быть адаптирована для других видов объектов.

Методология и методы исследования. Применялись теоретические и экспериментальные методы, включающие в себя методы сравнительного анализа, теорию ошибок измерений, методы статистических испытаний, метод наименьших квадратов, численные методы оптимизации.

Положения, выносимые на защиту:

1. Требования к точности наземного лазерного сканирования и трехмерного моделирования, в зависимости от вида геодезических работ, следует определять разработанным расчетом, на основе

сформулированных требований к составу и точности элементов цифровой информационной модели, с учетом перехода от допусков, указанных в нормативно-технической документации, к средним квадратическим ошибкам определения пространственного положения точек.

2. Наземное лазерное сканирование промышленных объектов следует выполнять на основе проектирования и дальнейшего построения геодезической сети, включающей опорную и сканерную сети, где сканерная сеть создается по границам технологических блоков и предполагает выполнение взаимного ориентирования точечных моделей с применением итерационного алгоритма ближайших точек и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок.

3. Взаимное ориентирование дискретных точечных моделей методом Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (*BFGS*) с предварительной оптимизацией обладает сверхлинейной сходимостью и позволяет вычислять оптимальные значения параметров преобразования, а самокорректирующие свойства метода повышают надежность конечных результатов.

Степень достоверности результатов исследования подтверждается согласованностью результатов проектирования опорной сети по разработанной методике, реализованной в среде *Mathcad*, с результатами натурных геодезических построений, уравненных в программном обеспечении *CredoDAT*; совпадением результатов проектирования сканерной сети в соответствии с разработанной методикой, реализованной в автоматизированной программе, с результатами лазерного сканирования, взаимное ориентирование которых было выполнено в программном обеспечении *Cyclone*; соответствием результатов взаимного ориентирования точечных моделей, полученных с использованием разработанной методики, основанной на методе *BFGS*, и классического алгоритма ближайших точек.

Апробация результатов. Основные положения и результаты работы докладывались на 8 всероссийских и международных научно-практических конференциях, посвященных проблемам геодезии: Международная научно-техническая конференция «Транспортное строительство в холодных регионах (*TRANSOILCOLD – 2019*)», г. Санкт-Петербург, 20–23 мая 2019 г.; Международная науч-

но-техническая конференция «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (*CATPID* – 2019), г. Кисловодск, 1–5 октября 2019 г.; III Всероссийская научно-практическая конференция «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. Наука и образование» (ГеоКа – 2019), г. Санкт-Петербург, 6–8 ноября 2019 г.; Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы инженерной геодезии», г. Санкт-Петербург, 14 ноября 2019 г.; III Всероссийская научно-практическая конференция «Совершенствование средств и методов сбора и обработки геопространственной информации и системы подготовки специалистов» (ВНПК – 2020), г. Санкт-Петербург, 15 мая 2020 г.; XVII Международный форум-конкурс студентов и молодых учёных «Актуальные проблемы недропользования», г. Санкт-Петербург, 31 мая – 6 июня 2021 г.; IV Международная научно-практическая конференция «Геодезия, землеустройство и кадастры: проблемы и перспективы развития» г. Омск, 30–31 марта 2022 г.

Практическая реализация. Разработанная методика НЛС внедрена в производственный процесс по выполнению проектов создания ЦИМ промышленных объектов компанией ООО «Пром-геодезия» (подтверждается актом внедрения от 03.06.2022).

Личный вклад автора заключается в проведении анализа зарубежной и отечественной научной и нормативно-технической литературы в области применения НЛС, ЦИМ, проектирования и создания геодезических сетей, обработке результатов лазерного сканирования и применении математических методов численной оптимизации; разработке приведенной в диссертации методики НЛС для создания ЦИМ; применении разработанной автоматизированной программы проектирования геодезических сетей при выполнении НЛС в среде программирования *C#*, *Visual Studio 2019*; разработке методики взаимного ориентирования дискретных точечных моделей методом *BFGS*; проведении экспериментальных исследований, подтверждающих корректность разработанных методик и автоматизированной программы.

Публикации. Результаты диссертационного исследования опубликованы в 14 печатных работах, из них: 4 статьи – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на

соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК); в 2 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура диссертации. Диссертация состоит из оглавления, введения, четырех глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 186 наименований, и 8 приложений. Диссертационное исследование изложено на 198 страницах машинопечатного текста, содержит 29 рисунков и 26 таблиц.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность и благодарность научному руководителю доктору технических наук, профессору Брыню М.Я. за неоценимую помощь, переданные знания и идеи на всех этапах написания диссертации. Автор также выражает благодарность кандидату технических наук Шарафутдинову Р.А. за всестороннюю поддержку и ценные советы в ходе проведения исследований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель, идея, задачи исследований и научная новизна, раскрыта теоретическая и практическая значимость исследования и изложены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен анализ ЦИМ, и задачи, которые могут быть решены с применением ЦИМ. Проведен анализ НЛС промышленных объектов для создания ЦИМ. Определены особенности НЛС промышленных объектов, которые следует учитывать при определении требований к точности измерений, проектировании и построении геодезических сетей, выполнении измерений и выборе способов взаимного и внешнего ориентирования результатов сканирования. Обоснована необходимость разработки методики НЛС, учитывающей вышеуказанные особенности.

Во второй главе представлено теоретическое обоснование методики НЛС промышленных объектов на основе предварительного проектирования и построения геодезической сети и применения итерационного алгоритма ближайших точек. Выполнено исследование практических результатов взаимного ориентирования с ис-

пользованием алгоритма ближайших точек. Сформулированы предложения по учету факторов, влияющих на точность измерений при НЛС промышленных объектов.

В третьей главе представлено теоретическое обоснование взаимного ориентирования дискретных точечных моделей методом *BFGS* с предварительной оптимизацией. Приведены условия работы метода. Отмечено, что метод *BFGS* с предварительной оптимизацией повышает эффективность процесса решения задачи за счет сверхлинейной сходимости.

В четвертой главе приведены результаты реализации разработанной методики НЛС промышленных объектов. На реальных объектах показаны результаты применения НЛС и ЦИМ для решения производственных задач. Приведены результаты проектирования и построения геодезических сетей на промышленном объекте в соответствии с разработанной методикой. Представлены результаты взаимного ориентирования дискретных точечных моделей с применением метода *BFGS*.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Требования к точности наземного лазерного сканирования и трехмерного моделирования, в зависимости от вида геодезических работ, следует определять разработанным расчетом, на основе сформулированных требований к составу и точности элементов цифровой информационной модели, с учетом перехода от допусков, указанных в нормативно-технической документации, к средним квадратическим ошибкам определения пространственного положения точек.

Для различных стадий жизненного цикла в ЦИМ актуализируется информация о каждом элементе трехмерной модели, включающая: уровень проработки элементов модели (*LOD*); уровень проработки информации (*LOI*); уровень проработки точности (*LOA*). Важно отметить, что *LOD*, *LOI* и *LOA* описывают уровень проработки не всей трехмерной модели, а только отдельных ее элементов в зависимости от решаемых задач. Анализ нормативно-технической документации показал, что для стадий инженерных изысканий, проектирования и строительства имеются общие рекомендации, в то время как для стадии эксплуатации требуются дополнительные ис-

следования. В связи с этим в диссертации разработаны дополнения к требованиям эксплуатационной ЦИМ промышленного объекта. Практический опыт показал, что при создании ЦИМ нужен баланс *LOD*, *LOI* и *LOA*, так как для различных задач требуется оптимальное соотношение этих параметров. В связи с этим дополнительные требования к уровням проработки разработаны независимо, в отличие от общепринятой классификации, а именно:

1. Разработаны дополнения к *LOD 500*, регламентирующие требования к отображению таких важных элементов эксплуатационной ЦИМ, как: технологическое оборудование и коммуникации; пути эвакуации; пути прохода персонала и передвижения техники. Предложено включить информацию о пунктах геодезических сетей, развиваемых на территории промышленного объекта, в спецификацию *LOD 500* для решения производственных задач, требующих геодезического обеспечения, таких как: мониторинг технического состояния объектов; разработка проекта реконструкции; планирование ремонтов.

2. Предложено для решения задач геодезического мониторинга объектов ввести новый уровень детализации *LOD 550*, согласно которому объекты геодезического мониторинга в ЦИМ отражаются с их реальными деформациями и дефектами, что позволит выполнять анализ развития деформаций (таблица 1).

3. Разработаны требования к *LOA* пространственного положения элементов эксплуатационной ЦИМ, учитывающие, что требования предъявляются не ко всему элементу, а к характерным точкам на поверхности элемента, ответственным за поведение конструкции во время эксплуатации (таблица 2). Установлено, что точность определяется как ошибка во взаимном пространственном положении конструкций на реальном объекте и элементов ЦИМ.

4. Разработана спецификация *LOI* элементов ЦИМ, основанная на группах атрибутивной информации (основной, технической, технологической и эксплуатационной), характеризующей конкретный объект, и не зависящая от *LOD* (таблица 3).

В связи с тем, что не существует типовых промышленных объектов и в решении различных задач применяются различные контролируемые допуски, требования к точности НЛС и трехмерного моделирования предлагается определять специальным расче-

том, основанным на переходе: 1) от характеристик точности, указанных в нормативно-технической документации (проектных, строительных и эксплуатационных), к предельным СКО определения положения точек; 2) предельных СКО определения положения точек к СКО определения положения точек. В случае, если характеристики точности измерений заданы значениями допусков Δ , то для перехода к СКО m_p определения положения точек необходимо предварительно вычислить предельное СКО δ . Учитывая, что допуском является разность между наибольшим и наименьшим предельными размерами конструкции, половина допуска и есть δ . Следовательно, переход от Δ к δ можно осуществить по формуле $\delta = \Delta / 2$. Далее переход от δ к m_p выполняется по формуле $m_p = \delta / 2,5$. При этом следует учитывать, что m_p включает в себя СКО НЛС $m_{\text{НЛС}}$ и СКО трехмерного моделирования объектов m_{3d} и может быть выражена формулой 1:

$$m_p = \sqrt{m_{\text{НЛС}}^2 + m_{3d}^2} . \quad (1)$$

Будем считать, что $m_{\text{НЛС}}$ и m_{3d} – независимые величины, тогда, применив принцип равных влияний, согласно которому влияние каждого источника ошибок на общую ошибку функции одинаково, окончательно получим $m_{\text{НЛС}} = m_{3d} = m_p / \sqrt{2}$. При этом (2):

$$m_{\text{НЛС}} = \sqrt{m_{\text{исх}}^2 + m_{\text{изм}}^2} , \quad (2)$$

где $m_{\text{исх}}$ – СКО положения исходных пунктов, $m_{\text{изм}}$ – СКО измерений. В случае, если ошибки $m_{\text{исх}}$ пренебрегаемо малы, то $m_{\text{изм}} = m_{\text{НЛС}}$. Отметим, что $m_{\text{изм}}$ при выполнении НЛС содержит в себе ошибки определения пунктов геодезической сети $m_{\text{ГС}}$, ошибки сканирования $m_{\text{скан}}$, а также ошибки взаимного $m_{\text{ВЗО}}$ и внешнего $m_{\text{ВНО}}$ ориентирования результатов лазерного сканирования. Таким образом (3):

$$m_{\text{изм}} = \sqrt{m_{\text{ГС}}^2 + m_{\text{скан}}^2 + m_{\text{ВЗО}}^2 + m_{\text{ВНО}}^2} . \quad (3)$$

Анализ нормативно-технической документации показал, что на сегодняшний день существует четыре основных вида геодезических работ, которые возможно выполнить методом НЛС: топографическая съемка; исполнительная съемка; обмерные работы; наблюдения за деформациями. В связи с этим обоснованы требования к точности НЛС при проведении каждого из приведенных видов геодезических работ (рисунок 1).

2. Наземное лазерное сканирование промышленных объектов следует выполнять на основе проектирования и дальнейшего построения геодезической сети, включающей опорную и сканерную сети, где сканерная сеть создается по границам технологических блоков и предполагает выполнение взаимного ориентирования точечных моделей с применением итерационного алгоритма ближайших точек и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок.

При НЛС промышленной установки предлагается выполнять измерения и их дальнейшее взаимное ориентирование отдельно для каждого технологического блока. Тогда в ходе выполнения внешнего ориентирования отдельных блоков внутри технологической установки в требуемую систему координат необходимо соблюдать условие отсутствия коллизий двух моделей отдельных блоков. Для решения этой задачи разработана двухуровневая методика проектирования и построения опорной и сканерной сети. При этом предложено создавать сканерную сеть по границам технологических блоков для обеспечения всей территории технологической установки достаточным количеством пунктов с известными координатами. Внешнее ориентирование предложено выполнять аналитически с использованием специальных марок (рисунок 2). Проектирование опорной сети предлагается выполнять методом наименьших квадратов параметрическим способом, основанным на следующих принципах: 1) выполнять проектирование для пространственной сети с учетом того, что измерения производятся электронным тахеометром; 2) моделирование опорной сети выполнять относительно исходных пунктов, имеющих на промышленном объекте; 3) моделировать «результаты измерений» с учетом «ошибок измерений» методом Монте-Карло; 4) СКО положения пунктов вычислять на основе многократного уравнивания параметрическим способом. С каждого пункта опорной сети предлагается выполнять определение координат центров специальных марок, относительно которых производится внешнее ориентирование единой точечной модели в заданную систему координат. Тогда СКО m_c определения простран-

ственного положения центра марки электронным тахеометром вычисляется из выражения 4:

$$m_c = \sqrt{m_p^2 + m_{изм}^2}, \quad (4)$$

где m_p – СКО положения пунктов опорной сети, $m_{изм}$ – СКО измерений полярным способом горизонтальных углов, наклонных и зенитных расстояний, равное $m_{изм} = \sqrt{m_D^2 + 2(D^2 m_\beta^2 (1/\rho^2))}$, где m_D – СКО измерения наклонных расстояний, m_β – СКО измерения углов, D – наклонное расстояние от прибора до центра марки, ρ – число секунд в радиане.

Разработанная методика проектирования сканерной сети предполагает следующие этапы:

1) определение приближенных пространственных координат станций лазерного сканирования и вычисление СКО определения положения лазерного сканирования (5):

$$m_{скан} = \sqrt{m_D^2 + m_\beta^2 D^2 + m_z^2 D^2}, \quad (5)$$

где m_β , m_z – СКО измерения лазерным сканером горизонтальных углов и зенитных расстояний соответственно, выраженных в радианах;

2) вычисление СКО определения положения центров специальных марок лазерным сканером (6):

$$m_{с.скан} = \sqrt{m_c^2 + \left((0,22e^{0,03D}) e^{(5,9D^{0,615}) \Delta\varphi(\Delta\theta)_{угл}} \right)^2}, \quad (6)$$

где $\Delta\varphi(\Delta\theta)_{угл}$ – угловое разрешение сканирования, выраженное в радианах. В случае, если $m_{с.скан}$ определяется по техническим характеристикам прибора (обозначим параметр как $m_{с.скан.тех}$), то

$$m_{с.скан} = \sqrt{m_c^2 + m_{с.скан.тех}^2};$$

3) вычисление СКО $m_{i,St_{i,j}}$ преобразования координат начальной и конечной станций лазерного сканирования, с которых выполняется определение центров марок, из выражения 7:

$$m_{i,St_{i,j}} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k m_{с.скан} / \sqrt{k}, \quad (7)$$

где k – количество марок, центры которых определены со станции лазерного сканирования;

4) вычисление СКО взаимного ориентирования по подобранной аппроксимирующей функции методом наименьших квадратов (рисунок 3) исходя из исследования зависимости значений $m_{\text{Вз.ор}}$ от расстояния D между смежными станциями лазерного сканирования (8):

$$m_{\text{Вз.ор}} = 5 \cdot 10^{-9} x^3 + 2 \cdot 10^{-6} x^2 + 6 \cdot 10^{-5} x + 0,0112. \quad (8)$$

5) вычисление СКО определения положения $m_{p.Si}$ наиболее слабого пункта хода сканерной сети по формуле 9:

$$m_{p.Si} = \frac{m_{\text{Вз.ор}} + \sqrt{m_{t.Si_i}^2 + m_{t.Si_j}^2}}{2} \cdot \sqrt{n}, \quad (9)$$

где n – количество станций лазерного сканирования между двумя пунктами опорной сети.

Аналогичные вычисления производятся для каждого хода сканерной сети между всеми пунктами опорной сети и вычисляются $m_{p.Si}$ наиболее слабых пунктов. Для проверки работы разработанной методики проектирования и построения геодезической сети было выполнено сравнение с результатами уравнивания опорной и сканерной сетей, построенных на промышленном объекте (таблица 4). При проектировании геодезической сети, а также при выполнении измерений следует учитывать факторы, влияющие на точность НЛС. В связи с этим сформулированы предложения по выполнению НЛС промышленных объектов, учитывающие: ошибки измерения расстояний, зависящие от угла падения лазерного луча на поверхность объекта (таблица 5); выбор разрешения сканирования в зависимости от размера наименьшего объекта измерений, расстояния до объекта, коэффициента отражения поверхности и угла падения лазерного луча (таблица 6).

3. Взаимное ориентирование дискретных точечных моделей методом Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) с предварительной оптимизацией обладает сверхлинейной сходимостью и позволяет вычислять оптимальные значения параметров преобразования, а самокорректирующие свойства метода повышают надежность конечных результатов.

Обозначим через $\mathbf{W}=\{w_1, \dots, w_n\}$ – начальную и $\mathbf{Q}=\{q_1, \dots, q_n\}$ – подвижную дискретные точечные модели. Предположим, что с каждой точкой q_i подвижной модели сопоставлена точка w_i начальной модели. При этом каждая точка q_i, w_i описана вектором координат. Условием задачи преобразования трехмерных данных будем считать оценку семи параметров преобразования: трех угловых параметров $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ образующих матрицу поворота \mathbf{R} , трех параметров смещения t_x, t_y, t_z , образующих вектор \mathbf{t} , и коэффициент масштабирования S . Тогда, оптимизацией будет являться процесс нахождения вектора параметров преобразования, подставляя значения, которых в выражение 10 будет достигаться экстремумом целевой функции 11.

$$f(\mathbf{R}, S, \mathbf{t}) = (\mathbf{R}\mathbf{S}\mathbf{Q} + \mathbf{t}) - \mathbf{W}. \quad (10)$$

Иными словами, в соответствии с принципом метода наименьших квадратов вычисление параметров преобразования для равноточных измерений должно удовлетворять условию:

$$F(\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, S, t_x, t_y, t_z) = [v^2] = \min, \quad (11)$$

где $v = \sqrt{(q_{1i} - w_{1i})^2 + (q_{2i} - w_{2i})^2 + (q_{3i} - w_{3i})^2}$ – отклонение подвижной модели от начальной.

Для решения задачи преобразования трехмерных данных была разработана методика вычисления параметров преобразования, основанная на методе *BFGS* (рисунки 4, 5). Так как метод *BFGS* итеративный, то требуется установить начальные значения параметров преобразования ξ_0 . При этом параметры преобразования имеют разную размерность и значения угловых и линейных параметров сильно различаются. Так, значения угловых параметров не превысят 2π , при этом значения линейных параметров – десятки метров. Тогда в процессе вычислений длина шага может принимать малые значения, что в свою очередь приведет к большому количеству итераций для нахождения оптимальных параметров преобразования и минимизации $F(\xi_k)$. В связи с этим предложено выполнять предварительную оптимизацию, заключающуюся в совмещении центров масс двух точечных моделей. Для этого необходимо вычислить центры масс W_{cm} начальной и Q_{cm} подвижной модели и определить начальный вектор \mathbf{t}_0 смещения подвижной модели относительно

осей координат $\mathbf{t}_0 = \mathbf{W}_{cm} - \mathbf{Q}_{cm} = [t_{0x} \ t_{0y} \ t_{0z}]$. Угловые параметры $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ предлагается принимать равными нулю, а коэффициент масштабирования равным единице.

После выполнения предварительной оптимизации и установки начальных параметров выполняются следующие вычисления:

1) Вычисление значения $f(\xi_k)$ при начальных параметрах (k – номер итерации) и значения целевой функции

$$F(\xi_k) = \sum_{i=1}^{x,y,z} \sum_{n=1}^N \left(f(\xi_k) \cdot f(\xi_k) \right).$$

2) Нахождение частных производных функции $f(\xi_k)$ по параметрам преобразования

$$\frac{\partial f(\xi_k)}{\partial \xi} = \left[\frac{\partial f}{\partial \alpha_x}, \frac{\partial f}{\partial \alpha_y}, \frac{\partial f}{\partial \alpha_z}, \frac{\partial f}{\partial S}, \frac{\partial f}{\partial t_x}, \frac{\partial f}{\partial t_y}, \frac{\partial f}{\partial t_z} \right].$$

3) Вычисление значение градиента функции $\nabla F(\xi_k)$ при начальных параметрах. В силу того, что в поставленной задаче оптимизации пространство является семимерным, $F(\xi_k)$ не может быть строго положителен, в связи с этим предлагается вычислять $\nabla F(\xi_k)$ с помощью оператора векторизации (рисунок 1).

4) Определение направления спуска $d_k = -\mathbf{H}_k \cdot \nabla F(\xi_k)$ и нахождение следующего вектора параметров преобразования через рекуррентное соотношение $\xi_{k+1} = \xi_k + k_k d_k$, где $k_k > 0$ – длина шага, настраиваемая с помощью линейного поиска, который удовлетворяет сильным условиям Вольфе. Для исследования функции $F(\xi_k)$ предлагается k_k находить с помощью построения графика, где по оси абсцисс – значение k , а по оси ординат – значение $F(\xi_k)$ при k . Тогда возможно определить поведение функция на каждой итерации и подобрать оптимальное значение k . В дальнейшем эти исследования возможно применить для разработки автоматического алгоритма вычисления оптимального k на каждой итерации.

5) Определение вектора шага алгоритма на итерации $S_k = \xi_{k+1} - \xi_k$ и вектора изменения градиента на итерации $y_k = \nabla F(\xi_{k+1}) - \nabla F(\xi_k)$.

6) Вычисление матрицы Гессе на итерации $\mathbf{H}_{k+1} = (\mathbf{I} - \rho_k s_k y_k^T) \mathbf{H}_k (\mathbf{I} - \rho_k y_k s_k^T) + \rho_k s_k s_k^T$, где $\rho_k = 1 / y_k^T s_k$ и \mathbf{I} – единичная матрица размера 7×7 .

7) Повторение итерационного процесса до тех пор, пока не выполнится условие $(F(\xi_k) - F(\xi_{k-1})) / F(\xi_{k-1}) \leq \varepsilon$. Замена критерия $F(\xi_k) - F(\xi_{k-1})$ (наиболее распространен в литературе) относительным соотношением, выполнена для того, чтобы избежать ложной сходимости, которая может произойти, когда истинное значение ξ_k^* слишком мало.

Разработанная методика взаимного ориентирования была реализована в программной среде *Mathcad* (таблицы 7, 8). Для проверки работы методики было выполнено сравнение с результатами взаимного ориентирования классическим алгоритмом *ICP*, которое показало соответствие результатов, полученных двумя методами. Выполнив анализ полученных результатов, отмечена сверхлинейная сходимость метода *BFGS* с предварительной оптимизацией. На основе исследования полученных результатов на каждой итерации отмечены самокорректирующие свойства методики, что, в свою очередь, повышает надежность конечных результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Выполнен анализ современного состояния методики НЛС промышленных объектов для создания ЦИМ с целью решения производственных задач на различных стадиях жизненного цикла, который показал, что существующая обобщенная методика, состоящая из последовательных этапов выполнения работ, требует дополнений, учитывающих требования к точности измерений и условия съемки промышленных объектов.

2. Разработаны дополнительные требования к уровням детализации (*LOD*), информации (*LOI*) и точности (*LOA*) элементов ЦИМ, удовлетворяющие решению различных производственных задач.

3. Обоснованы требования к точности выполнения лазерного сканирования и трехмерного моделирования, которые для каждого

объекта определяются специальным расчетом, основанным на переходе: от характеристик точности, указанных в нормативно-технической документации (проектных, строительных и эксплуатационных), к предельным СКО определения положения точек; от предельных СКО определения положения точек к СКО определения положения точек.

4. Выполнен расчет требований к точности НЛС при проведении таких геодезических работ как: топографическая съемка; исполнительная съемка; обмерные работы; наблюдения за деформациями.

5. Разработана методика проектирования и построения геодезической сети для последующего внешнего ориентирования результатов НЛС промышленного объекта, предполагающая: проектирование и предрасчет точности положения пунктов опорной сети, координаты которых определяются от исходных пунктов традиционными методами геодезии; проектирование и предрасчет точности положения пунктов сканерной сети, координаты которых определяются от пунктов опорной сети в ходе лазерного сканирования. В ходе проектирования опорной сети предложено моделировать «результаты измерений» с учетом «ошибок измерений» методом Монте-Карло и СКО положения пунктов вычислять на основе многократного уравнивания параметрическим способом. В ходе проектирования сканерной сети предложено создавать сеть по границам технологических блоков для исключения коллизий при взаимном ориентировании всех технологических блоков в единую модель. Разработанная методика проектирования и построения сканерной сети основана на выполнении взаимного ориентирования моделей с применением итерационного алгоритма ближайших точек и выполнении внешнего ориентирования аналитическим методом с использованием специальных марок.

6. Разработаны предложения по выполнению НЛС промышленных объектов, учитывающие: ошибки измерения расстояний, зависящие от угла падения лазерного луча на поверхность объекта; выбор разрешения сканирования; выбор расстояния между станциями лазерного сканирования; методику съемки объекта; методику

взаимного ориентирования моделей технологических блоков в единую модель.

7. Разработана методика взаимного ориентирования дискретных точечных моделей с применением метода *BFGS*, предполагающая выполнение предварительной оптимизации, вычисление значения целевой функции и градиента целевой функции на итерации через оператор векторизации, поиск длины шага с соблюдением сильных условий Вольфе и построение графиков для определения оптимального значения длины шага на итерации.

8. Разработаны автоматизированные программы проектирования геодезической сети, включающие в себя: программу проектирования опорной сети, реализованную в программной среде *Mathcad*; программу проектирования сканерной сети, написанную на языке программирования *C#* в среде *Visual Studio 2019*, на которую было получено авторское свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

9. В программной среде *Mathcad* реализована методика взаимного ориентирования точечных моделей, основанная на методе *BFGS* с предварительной оптимизацией. Для проверки работы разработанной методики было выполнено сравнение с результатами взаимного ориентирования классическим алгоритмом *ICP*, которое показало соответствие результатов, полученных двумя методами.

10. Выполнены экспериментальные исследования элементов разработанной методики НЛС для создания ЦИМ промышленных объектов в ходе реализации проектов на реальных объектах и решения различных производственных задач.

Перспективным направлением развития научных исследований по тематике диссертации является развитие теоретических основ оценки точности результатов взаимного ориентирования дискретных точечных моделей с применением итерационных алгоритмов ближайших точек, а также оценки точности трехмерного моделирования по результатам лазерного сканирования.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кузнецова, А.А. Применение наземного лазерного сканирования для выявления отклонений конструкций от их проектных значений / А.А. Кузнецова // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 12. – С. 2–7.

2. Шарафутдинова, А.А. Опыт применения наземного лазерного сканирования и информационного моделирования для управления инженерными данными в течение жизненного цикла промышленного объекта / А. А. Шарафутдинова, М.Я. Брынть // Вестник СГУГиТ. – 2021. – Т. 26. – № 1. – С. 57–67.

3. Шарафутдинова, А. А. Методика проектирования и построения геодезической сети при наземном лазерном сканировании крупных промышленных объектов / А. А. Шарафутдинова, М.Я. Брынть // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27. – № 2. – С. 72–85.

4. Шарафутдинова, А.А. Требования к точности наземного лазерного сканирования для решения инженерно-геодезических задач с помощью цифрового информационного моделирования / А.А. Шарафутдинова, М.Я. Брынть // Геодезия и картография. – 2021. – Т. 82. – № 8. – С. 2–12.

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

5. Kuznetsova, A. The Use of Terrestrial Laser Scanning for the Development and Control the Design Documentation of Reconstruction Projects / А. Kuznetsova // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2019. – № 50. – P. 177–184.

6. Kuznetsova, A. The Terrestrial laser scanning during the industrial object construction results analysis / А. Kuznetsova, M.Ja. Bryn // IOP conference series: materials science and engineering. – 2019. – P. 044008.

Свидетельство:

7. Шарафутдинова, А.А. Проектирование геодезической сети при выполнении наземного лазерного сканирования / А.А. Шарафутдинова, М.Я. Брынть // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.: правообладатель Петербургский гос. ун-т. путей сообщения Императора Александра I. – рег. № 2022616904 от 18.04.22. – М.: Роспатент, 2022.

Таблица 1 – Разработанные требования к *LOD 550* элементов трехмерной модели

Уровень проработки	Требования к отображению элементов трехмерной модели
550	Элементы контроля в трехмерной модели выполнены с высоким уровнем проработки, с максимально детальным графическим представлением и наполнением атрибутивной информацией. Элементы контроля графически представлены на основе результатов геодезического мониторинга, содержащих информацию о точных размерах, формах, местоположении, деформациях, ориентации и дефектах с подробной информацией об эксплуатационных характеристиках. К элементам контроля также может быть приложена дополнительная информация. Конструкции, не подлежащие геодезическому мониторингу, должны быть смоделированы на уровне <i>LOD 500</i>

Таблица 2 – Разработанная спецификация *LOA* элементов трехмерной модели

Уровень проработки	Требования к отображению информации об элементе трехмерной модели
100	Элементы ЦИМ расположены в пространстве в соответствии с проектной документацией, с отображением проектных размеров. Пространственное положение элементов не учитывает отклонения от проекта.
200	Элементы ЦИМ расположены в пространстве в соответствии с исполнительной документацией или обмерной документацией и отражают реальное пространственное положение и размеры с точностью, установленной к исполнительной съемке или обмерных работ.
300	Элементы модели расположены в пространстве в соответствии с результатами наблюдений за деформациями и отражают изменение формы объекта за определенный период времени с точностью, установленной к выполнению наблюдений за деформациями.

Таблица 3 – Разработанная спецификация *LOA* элементов трехмерной модели

Уровень проработки	Требования к отображению информации об элементе трехмерной модели
100	Элементы модели содержат общие параметры, включающие: технологическую позицию, тип объекта, назначение и месторасположение
200	Элементы модели содержат общие параметры в соответствии с <i>LOI 100</i> , а также технические и технологические параметры. С точки зрения технической информации элементы модели должны содержать следующие параметры: марку, массу, завод-изготовитель, год выпуска, год ввода в эксплуатацию, материал компонентов, основные габаритные размеры и так далее. С точки зрения технологической информации элементы модели должны содержать следующие параметры: рабочее давление, рабочую температуру, наименование среды, агрессивность среды и тому подобное.
300	Элементы модели содержат общие параметры в соответствии с <i>LOI 100</i> , технические и технологические параметры в соответствии с <i>LOI 200</i> и эксплуатационную информацию. С точки зрения эксплуатационной информации элементы модели должны содержать следующие параметры: сведения о ремонте, сведения о мониторинге технического состояния и так далее.

Таблица 4 – Результаты проектирования и построения геодезической сети согласно разработанной методике

	Опорная сеть			Сканерная сеть		
	Наиболее слабый пункт	m_p мм	m_c мм	$m_{\text{Вз.оп}}$ мм	$m_{\text{Вн.оп}}$ мм	$m_{p,St}$ мм
Проектирование	<i>St7</i>	6,0	6,7	10	-	17
Построение	<i>St7</i>	9,1	10,1	11	5	12

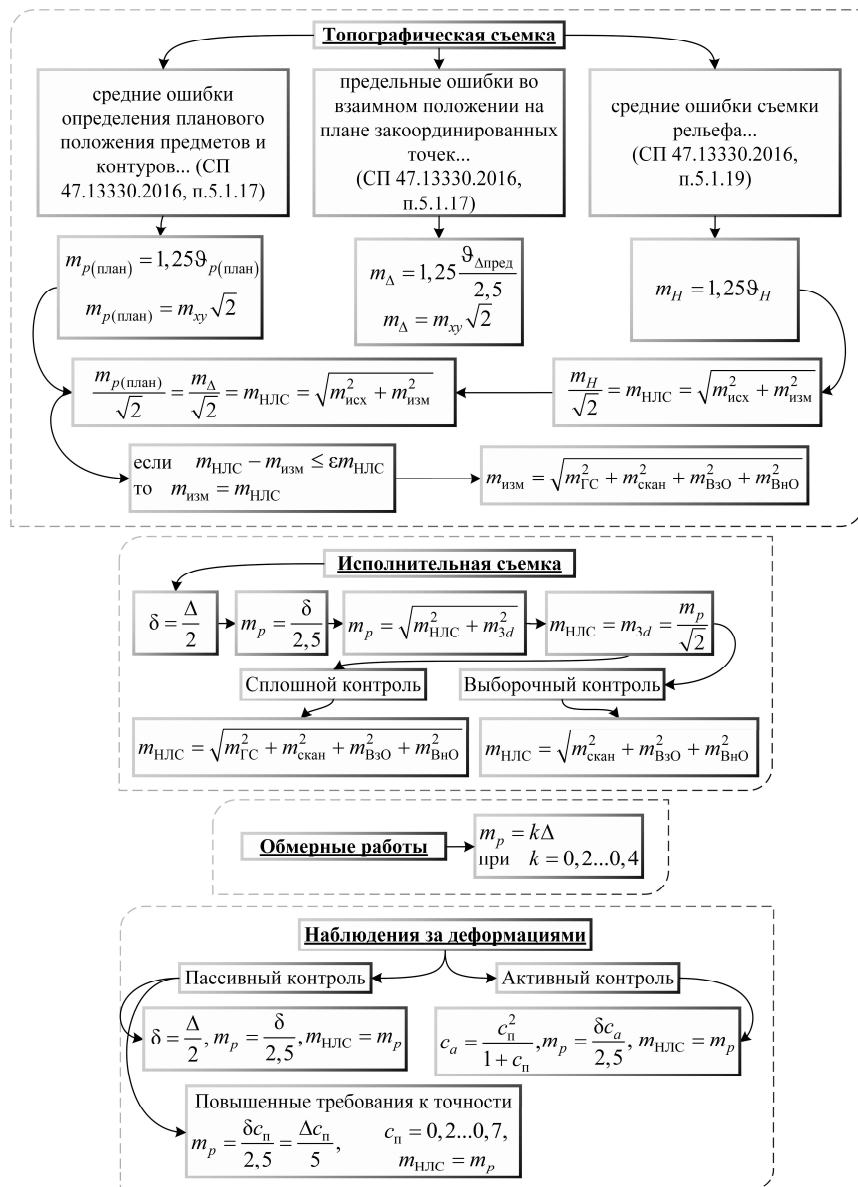


Рисунок 1 – Переход от заданных характеристик точности к требуемой точности НЛС

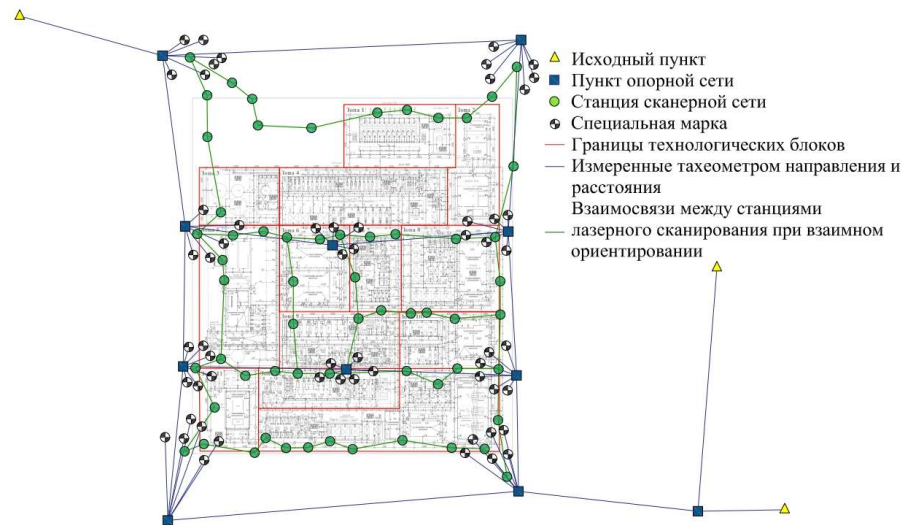


Рисунок 2 – Пример схемы геодезической сети при НЛС промышленного объекта

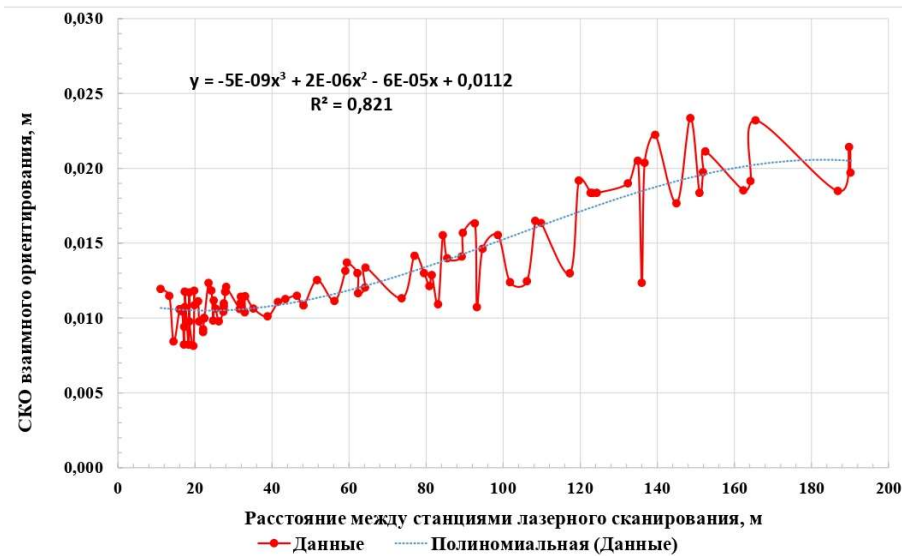


Рисунок 3 – Подбор уравнения тренда

Таблица 5 – Влияние угла падения лазерного луча γ на поверхность объекта и расстояния R до объекта на ошибку ΔR измерения расстояния

γ , град	D , м	ΔD , мм	γ , град	D , м	ΔD , мм	γ , град	D , м	ΔD , мм
10°	20	0,4	10°	40	0,9	10°	60	1,3
45°		2,1	45°		5,0	45°		7,5
80°		14,0	80°		28,0	80°		42,0

Таблица 6 – Требуемое разрешение сканирования при съемке промышленных объектов

Коэффициент отражения поверхности объекта, %	Требуемое разрешение сканирования в зависимости от наименьшего измеряемого объекта, м				
	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050
0,10 (чугун, кирпич)	0,0007	0,0014	0,0021	0,0028	0,0035
0,30 (бетон)	0,0021	0,0042	0,0063	0,0084	0,0105
0,50 (железобетон)	0,0035	0,0070	0,0105	0,0141	0,0176
0,70 (сталь, оцинкованное железо, белая краска)	0,0049	0,0098	0,0148	0,0197	0,0247

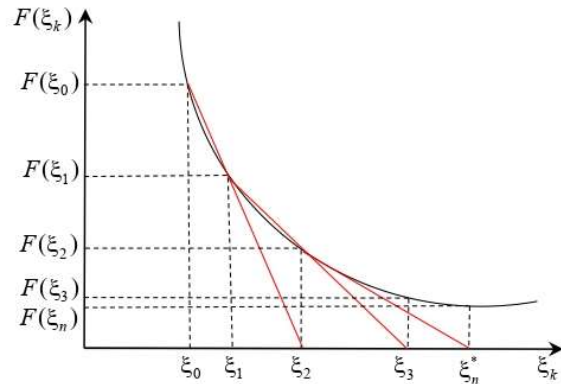


Рисунок 4 – Геометрическая интерпретация минимизации $F(\xi_k)$ методом *BFGS*

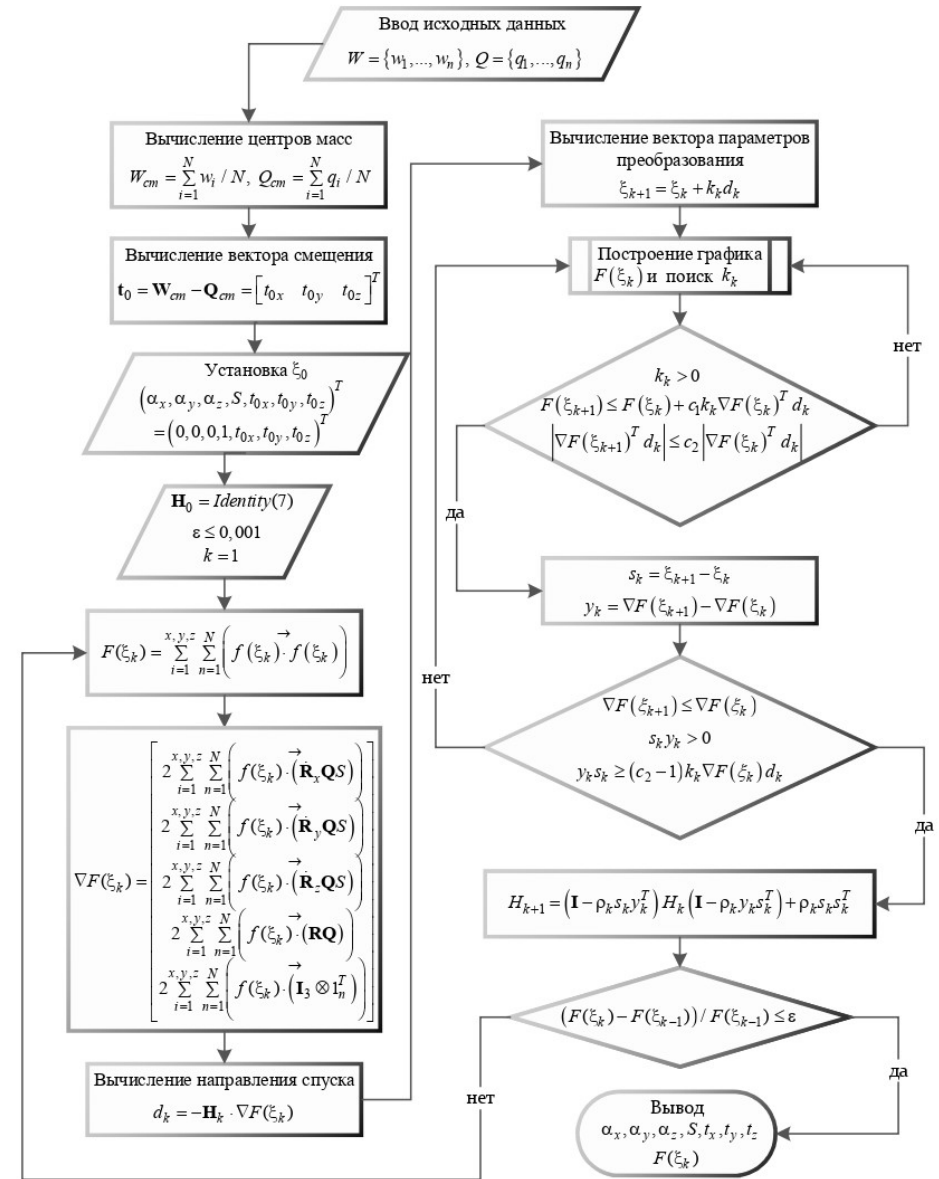


Рисунок 5 – Методика взаимного ориентирования с применением метода *BFGS*

Таблица 7 – Результаты вычислений параметров преобразования методом *BFGS* на каждой итерации

№ итерации	Значение $F(\xi)$	Значение $\nabla F(\xi)$	Значение $ H $	Значения начальных параметров	Значения искомых параметров
0	3115,336	24018,206	1		
1	1286,862	2402,439	$6,4 \cdot 10^{-6}$		
2	1274,265	1436,275	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$\alpha_x = 0$	$\alpha_x = 0,000019$
3	1267,568	1576,061	$1,0 \cdot 10^{-14}$	$\alpha_y = 0$	$\alpha_y = 0,00002$
4	102,505	4517,816	$4,7 \cdot 10^{-17}$	$\alpha_z = 0$	$\alpha_z = -0,2601422$
5	4,829	1131,467	$4,6 \cdot 10^{-22}$	$S = 1$	$S = 1,0000452$
6	1,62	312,086	$3,0 \cdot 10^{-22}$	$t_x = -6,521$	$t_x = 0,0026355$
7	0,005	31,148	$2,4 \cdot 10^{-23}$	$t_y = -9,546$	$t_y = 0,0007921$
8	0,003	27,006	$2,0 \cdot 10^{-24}$	$t_z = 11,674$	$t_z = 11,6754446$
9	0,001	4,405	$1,7 \cdot 10^{-24}$		

Таблица 8 – Сравнение результатов взаимного ориентирования с применением разработанной методики, основанной на методе *BFGS* и классического алгоритма *ICP*

№ точки	Расхождение координат подвижной модели $Q_{BFGS} - Q_{ICP}$			Значение $F(\xi)$	
	$\Delta x, \text{ м}$	$\Delta y, \text{ м}$	$\Delta z, \text{ м}$	<i>ICP</i>	<i>BFGS</i>
1	$1,13 \cdot 10^{-3}$	$-7,43 \cdot 10^{-5}$	$4,31 \cdot 10^{-6}$	0,0004	0,001
2	$8,01 \cdot 10^{-4}$	$-8,67 \cdot 10^{-4}$	$6,39 \cdot 10^{-6}$		
3	$3,21 \cdot 10^{-3}$	$-1,45 \cdot 10^{-3}$	$-2,41 \cdot 10^{-5}$		
4	$4,57 \cdot 10^{-4}$	$-1,16 \cdot 10^{-3}$	$6,16 \cdot 10^{-6}$		
5	$1,67 \cdot 10^{-4}$	$-3,67 \cdot 10^{-3}$	$-1,46 \cdot 10^{-5}$		
6	$-1,21 \cdot 10^{-4}$	$-6,86 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-6}$		
7	$-1,1 \cdot 10^{-3}$	$-3,17 \cdot 10^{-3}$	$-1,43 \cdot 10^{-5}$		
8	$-5,97 \cdot 10^{-4}$	$-4,78 \cdot 10^{-4}$	$-2,47 \cdot 10^{-6}$		
9	$-3 \cdot 10^{-3}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$-1,82 \cdot 10^{-6}$		
10	$-1,62 \cdot 10^{-3}$	$8,53 \cdot 10^{-4}$	$1,99 \cdot 10^{-5}$		
11	$-1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$-3,96 \cdot 10^{-6}$		
12	$-2,75 \cdot 10^{-3}$	$1,89 \cdot 10^{-3}$	$-6,79 \cdot 10^{-6}$		
13	$2,43 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-3}$	$-7,67 \cdot 10^{-6}$		
14	$1,91 \cdot 10^{-3}$	$3,87 \cdot 10^{-3}$	$2,49 \cdot 10^{-5}$		
15	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$9,79 \cdot 10^{-4}$	$7,04 \cdot 10^{-6}$		
16	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$4,34 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-6}$		