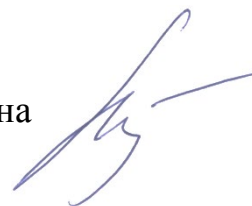


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»  
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Медведская Татьяна Михайловна



Совершенствование методики геодезического мониторинга  
крупногабаритного промышленного оборудования

25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
кандидат технических наук, доцент  
Неволин Анатолий Геннадьевич

Новосибирск – 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....</b>	<b>11</b>
1.1 Общие сведения.....	11
1.2 Технология «холодной» выверки крупногабаритных вращающихся агрегатов.....	13
1.3 Анализ технологии «горячей» выверки.....	22
1.4 Технология «горячей» выверки компании Geoservex.....	24
1.5 Технология кинематических локационных измерений вращающихся промышленных агрегатов.....	27
1.6 Выводы по первому разделу, постановка задач исследования.....	32
<b>2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ.....</b>	<b>36</b>
2.1 Методика построения и анализ точности опорной сети для геодезического мониторинга промышленных агрегатов.....	36
2.2 Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров вращающихся печей.....	47
2.3 Учет ошибок исходных данных в обратной угловой засечке.....	49
2.4 Учет ошибок исходных данных в линейной засечке.....	54
2.5 Учет ошибок исходных данных в прямой угловой засечке.....	59
2.6 Экспериментальные вычисления.....	63
2.7 Выводы по второму разделу.....	65

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....	67
3.1 Разработка алгоритма для анализа точности определения геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы .....	67
3.2 Разработка алгоритма для оценки точности определения длины оси вращения обжиговой печи .....	75
3.3 Разработка алгоритма для оценки взаимного положения центральных точек в сечениях цилиндрического объекта .....	79
3.4 Исследование влияния нагрева обжиговой печи на прямолинейность ее оси вращения .....	85
3.5 Выводы по третьему разделу .....	92
4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ .....	93
4.1 Априорная оценка точности определяемых элементов трехмерных моделей.....	93
4.2 3D-моделирование крупногабаритных промышленных объектов с помощью программы Cyclone.....	100
4.3 Определение кренов сооружений по результатам 3D-моделирования .....	106
4.4 Определение осадок сооружений по результатам тригонометрического нивелирования и 3D-моделирования .....	109
4.5 Определение деформаций поверхностей сооружений по результатам 3D-моделирования .....	112
4.6 3D-моделирование по результатам съемки обжиговой печи № 6 АО «Искитимцемент», выполненной электронным тахеометром.....	116
4.7 3D-моделирование по результатам лазерного сканирования промышленного агрегата .....	123

4.8 Обработка результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отражения сигнала.....	134
4.9 Выводы по четвертому разделу .....	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	146
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	148
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) СХЕМА ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ .....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ВЕДОМОСТЬ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ ОГС ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УРАВНИВАНИЯ.....	174
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ПРОДОЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ БАНДАЖЕЙ.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ТРЕХМЕРНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ.....	176

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Для обжига, сушки и других видов обработки материалов в металлургии и горнодобывающей промышленности применяются вращающиеся крупногабаритные агрегаты (барабанные сушилки, обжиговые печи цилиндрической формы и др.). Отклонения геометрических параметров такого оборудования за пределы допуска могут привести к серьезным авариям. В связи с этим для обеспечения нормального функционирования технологического оборудования необходимо осуществлять геодезический мониторинг, позволяющий оценивать фактическое положение оси агрегата, овальность обечайки и состояние других важных конструктивных элементов.

В настоящее время накоплен существенный опыт в геодезическом обеспечении монтажа и соблюдения проектного положения рассматриваемого оборудования и значительно меньший – геодезического сопровождения выверки геометрических параметров технологического оборудования в процессе эксплуатации. Поэтому существует необходимость обобщения принципов, способов и средств для осуществления геодезического мониторинга крупногабаритного технологического оборудования при его эксплуатации, с последующей разработкой рекомендаций по совершенствованию такого мониторинга.

Определение геометрических параметров промышленных агрегатов, их формы и положения осей вращения выполняются разными способами на основе анализа пространственных данных и 3D-моделирования. Особое значение при этом имеет оценка точности определения геометрических параметров вращающихся обжиговых печей, получаемых из математической обработки результатов геодезических измерений. Рассматриваемые объекты имеют сложную конструкцию, большую длину до 200 м, эксплуатируются в условиях вибрации и значительных температурных воздействий, что затрудняет выполнение геодезических работ. Все это приводит к вопросам о способах определения и оценке точности геометрических параметров конструктивных элементов промышленного

оборудования, их формы и положения осей вращения по результатам геодезических измерений, выполняемых с помощью современных электронных тахеометров и лазерных сканеров, с учетом действия ошибок измерений, ошибок исходных данных и внешних факторов.

Поэтому совершенствование способов геодезического мониторинга крупногабаритных промышленных объектов является актуальной научно-технической задачей.

*Степень разработанности темы.* Значительный вклад в развитие прикладной геодезии применительно к задачам геодезического мониторинга и наблюдения за деформациями инженерных сооружений и технологического оборудования внесли ряд известных ученых: Асташенков А. Г., Баран П. И., Васютинский И. Ю., Жуков Б. Н., Карпик А. П., Ключин Е. Б., Конусов В. Г., Коугия В. А., Комиссаров Д. В., Лебедев Н. Н., Левчук Г. П., Лунев А. А., Маркузе Ю. И., Могильный С. Г., Неволин А. Г., Никитин А. В., Новак В. Е., Петров В. В., Рязанцев Г. Е., Пискунов М. Е., Сотников А. Л., Столбов Ю. В., Тюрин С. В., Уставич Г. А., Шоломицкий А. А., Щербаков В. В., Ямбаев Х. К., Krystowczyk Z., Robertson L. и многие другие.

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационного исследования является совершенствование методики геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования.

Для достижения поставленной цели требовалось решить следующие основные научно-технические задачи:

- проанализировать современное состояние геодезического обеспечения определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования;
- усовершенствовать методику построения опорной геодезической сети (ОГС) для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования;
- выполнить анализ точности параметров предложенной схемы построения опорной геодезической сети, предназначенной для определения геометрических

параметров крупногабаритного технологического оборудования, и разработать способ повышения ее точности;

– провести исследование влияния ошибок измерений, внешних условий и ошибок исходных данных на точность определяемых параметров технологического оборудования при выполнении геодезического мониторинга;

– разработать алгоритмы для вычисления и оценки точности геометрических параметров вращающихся промышленных агрегатов;

– разработать трехмерную компьютерную модель вращающейся обжиговой печи для определения деформаций ее конструктивных элементов;

– провести экспериментальное исследование усовершенствованной методики деформационного мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования на примере производственных предприятий.

*Объект и предмет исследования.* Объектом исследования являются деформации конструктивных элементов вращающихся обжиговых печей.

*Предметом* исследования является методика геодезического мониторинга и анализа точности определения геометрических параметров обжиговых печей.

*Научная новизна* диссертационного исследования заключается в следующем:

– усовершенствована методика построения опорной геодезической сети для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования, позволяющая определять геометрические параметры вращающихся печей с требуемой точностью;

– разработан способ повышения точности опорной геодезической сети за счет регулирования весов угловых и линейных измерений, при котором эллипс ошибок превращается в круг;

– разработан алгоритм априорной оценки точности проведения геодезического мониторинга промышленного оборудования, который позволяет повысить точность определения его геометрических параметров, а также качество наблюдения за деформациями обжиговых печей за счет уменьшения влияния ошибок измерений, ошибок исходных данных и внешних факторов;

– предложена трехмерная компьютерная модель вращающейся обжиговой печи, позволяющая автоматизировать и ускорить процесс выполнения деформационного мониторинга.

*Теоретическая и практическая значимость диссертационной работы.*

*Теоретическая значимость* исследования состоит в совершенствовании методики определения и оценки точности геометрических параметров обжиговых печей, а также анализа деформаций промышленных агрегатов по геодезическим данным.

*Практическая значимость* работы заключается в том, что разработанная методика геодезического мониторинга может быть использована для повышения надежности определения эксплуатационных характеристик крупногабаритного промышленного оборудования и деформационного анализа обжиговых печей и другого технологического оборудования для обеспечения их безаварийной эксплуатации.

*Методология и методы исследования.* В диссертационной работе использовались методы математической обработки пространственных данных, матричной алгебры и трехмерного компьютерного моделирования. Разработанные алгоритмы основаны на теоретических, аналитических и экспериментальных исследованиях и опробованы на производственных объектах.

*Положения, выносимые на защиту:*

– усовершенствованная методика построения опорной геодезической сети, предназначенной для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования, которая позволяет определять геометрические параметры крупногабаритного технологического оборудования с требуемой точностью;

– алгоритм априорной оценки точности обработки пространственных данных, полученных при проведении геодезического мониторинга промышленного оборудования, который позволяет повысить точность определения геометрических параметров данного оборудования и качество наблюдения за деформациями промышленных агрегатов;

– трехмерная компьютерная модель вращающейся обжиговой печи, которая позволяет автоматизировать и ускорить процесс выполнения деформационного мониторинга;

– усовершенствованная методика геодезического мониторинга крупногабаритного технологического оборудования.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.*

Диссертация соответствует областям исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтегазодобывающих комплексов; 11 – Теория и практика математической обработки результатов геодезических измерений и информационное обеспечение геодезических работ. Автоматизированные технологии создания цифровых трехмерных моделей технологических объектов, процессов и явлений по геодезическим данным паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России.

*Степень достоверности и апробация полученных результатов.*

Результаты диссертационного исследования, практические рекомендации и выводы докладывались и обсуждались на следующих научных конгрессах:

– X Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014» (8–18 апреля 2014 г., Новосибирск);

– XI Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015» (13–25 апреля 2015 г., Новосибирск);

– XII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016» (18–22 апреля 2016 г., Новосибирск);

– XIII Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017» (17–21 апреля 2018 г., Новосибирск);

– XV Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2019» (24–26 апреля 2019 г., Новосибирск).

Разработанные способы геодезического мониторинга промышленных агрегатов базируются на теоретических исследованиях и накопленном производственном опыте ведущих российских и зарубежных ученых. Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается экспериментальными расчетами точности, применения трехмерных моделей и материалов геодезического мониторинга действующих производственных объектов. Практическое применение разработок апробировано на промышленных объектах при выверке вращающихся печей обжига в АО «Искитимцемент» и «Ачинскцемент».

*Публикации по теме диссертации.* Основные результаты исследований представлены в одиннадцати научных работах, пять из которых опубликованы в изданиях, входящих в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 176 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка литературы, включающего 205 наименований, содержит 22 таблицы, 55 рисунков и 4 приложения.

# 1 ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ МОНИТОРИНГА КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Общие сведения

Геодезический мониторинг крупногабаритного промышленного оборудования является достаточно трудоемкой и непростой задачей [1–15, 27, 28, 45, 46, 127–129]. Исследуемые объекты (рисунок 1.1) отличаются сложной конструкцией, некоторые из них имеют длину более 100 м и эксплуатируются в условиях вибрации и высоких температур.



Рисунок 1.1 – Вращающиеся обжиговые печи

Для обеспечения нормального функционирования промышленных агрегатов выполняется техническая диагностика, по результатам которой определяются техническое состояние объекта и его эксплуатационные характеристики [47, 48, 130–132, 154]. С этой целью выполняют соответствующие измерения, поиск дефектов и контроль диагностических признаков. К диагностическим признакам относят физический, химический и моральный износ конструкций, деформации и геометрические параметры (пространственное и взаимное положение элементов агрегата). Отклонения геометрических параметров рассматриваемого оборудования за пределы допустимых значений могут привести к серьезным аварийным ситуациям. Контроль геометрических параметров осуществляется, как правило, на основе геодезического мониторинга [1–15, 47–49, 154].

Геодезический мониторинг является важной составляющей системы технического контроля объектов, что обеспечивает качество эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования [130].

Опыт эксплуатации показывает, что весомая часть аварий связана с отклонениями оси вращения агрегата или геометрической оси его корпуса. Современные методы геодезического мониторинга, основанные на применении цифровых нивелиров, электронных тахеометров и лазерных сканеров, позволяют оценивать фактическое положение оси промышленного агрегата, овальность обечайки и состояние других элементов объекта.

Методы выполнения геодезических измерений при наблюдениях за деформациями крупногабаритного промышленного оборудования неоднократно рассматривались в научных публикациях д.т.н., профессора Асташенкова Г. Г., д.т.н., профессора Могильного С. Г., д.т.н., профессора Шоломицкого А. А., к.т.н., доцента Лунева А. А., к.т.н., доцента Сотникова А. Л., к.т.н. Петрова В. В., Тюрина С. В. и многих других авторов [1–15, 27, 28, 40–44, 88, 124–125, 127–129, 133–135, 137–146, 155–189, 191–205]. В то же время имеется необходимость усовершенствования геодезических методов мониторинга исследуемых объектов.

На сегодняшний день существует немало методов и средств геодезических измерений в промышленном производстве [17, 21, 43, 50–54, 57, 72, 87, 102–106, 114–121]. Выбор программы наблюдений зависит от требований к точности, условий эксплуатации, наличия измерительных приборов, периода исследований и многих других факторов.

Цель геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования – обеспечение повышения точности контроля пространственного положения осей и элементов наблюдаемого объекта. Сложность выполнения геодезических измерений заключается в том, что работы на производственной площадке чаще всего выполняются в условиях отсутствия прямой видимости вдоль агрегата, высоких температур, рефракции [110], запыленности и турбулентности воздуха, влияния электромагнитных полей, вибрации от работающих агрегатов и воздействия психологических факторов на состояние наблюдателя.

Точность наведения на визирные цели существенно снижается при геодезических измерениях геометрических параметров работающего оборудования. На точность измерений оказывают влияние перепады температур вдоль объекта наблюдений, а также вибрация и колебания фундаментов агрегата и мест установки измерительного прибора. Для наиболее правильной оценки точности измерений требуются специальные исследования в тех условиях, в которых будут выполняться геодезические наблюдения.

## 1.2 Технология «холодной» выверки крупногабаритных вращающихся агрегатов

При геодезическом мониторинге крупногабаритных вращающихся агрегатов определяют следующие геометрические параметры наблюдаемых объектов:

- прямолинейность оси корпуса;
- цилиндричность корпуса;
- положение роликовых опор;
- радиальные и осевые биения бандажей и венцовой шестерни.

Перечисленные параметры не должны выходить за пределы допустимых значений [154].

Обязательным условием нормальной работы промышленного вращающегося агрегата является соосность бандажей, задающих положение его оси вращения. Несоосность бандажей вызывает ускоренный износ рабочих поверхностей бандажей и опорных роликов, способствует разрушению огнеупорной футеровки, корпуса, что в свою очередь приводит к уменьшению межремонтных периодов и даже аварийной ситуации.

В настоящее время для выполнения геодезических измерений крупногабаритного промышленного оборудования применяются различные технологии.

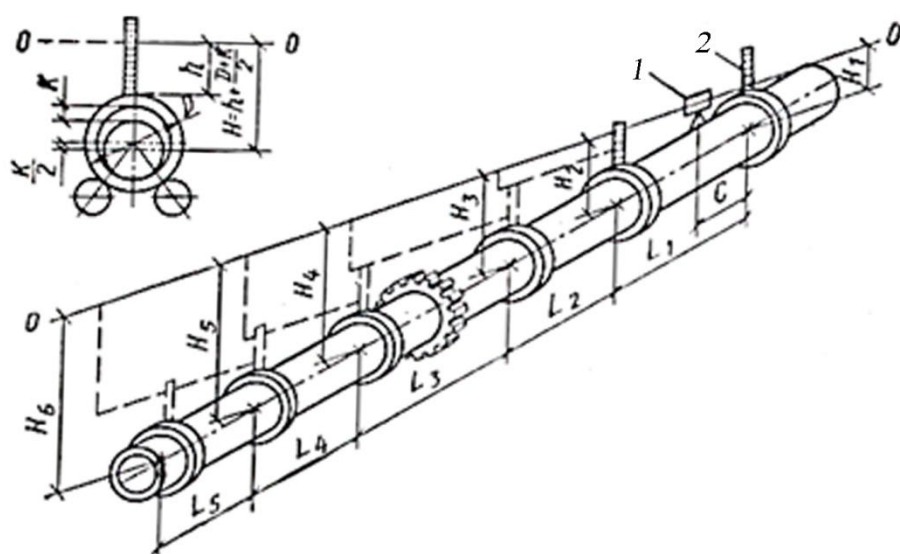
Традиционная технология основана на геометрическом нивелировании, при котором определяется положение оси вращения агрегата в вертикальной плоскости, и методе бокового нивелирования для определения положения оси в плане. Недостатками данной технологии являются невысокая точность определения положения оси и необходимость остановки и охлаждения агрегата.

Определение геометрических параметров вращающихся промышленных агрегатов по методу Оргпроектцемента [117, 154] заключается в проверке положения геометрической оси корпуса наблюдаемого объекта в проекциях на вертикальную и горизонтальную плоскости. При такой технологии геометрическое положение оси вращения агрегата в проекции на вертикальной плоскости определяется по фактическим значениям расстояния от основной линии горизонта до центров вращения корпуса и в сравнении их с расчетными показателями. Выверка осуществляется на холодном объекте с использованием нивелира, устанавливаемого на корпус агрегата в середине пролета между бандажами. Точками отсчета принимаются верхние точки смежных бандажей, на которые устанавливается рейка с миллиметровыми делениями [117].

Для определения расстояния от линии горизонта до центров вращения корпуса печи измеряются диаметры бандажей, диаметральные зазоры посадки бандажей, расстояние между опорами и определяется расстояние от верхней точки

бандажа до линии горизонта. По полученным значениям определяют и сравнивают фактическую и расчетную величины расстояния от основной линии горизонта до центров вращения корпуса агрегата. На основе этого определяют, искривилась ли геометрическая ось вращения объекта в проекции на вертикальную плоскость.

Схема определения положения оси вращения агрегата по методу Оргпроектцемента [117] представлена на рисунке 1.2.



а)



б)

1 – нивелир; 2 – рейка; 3 – теодолит; 4 – мишень, О–О – линия горизонта;  
I–VI – опоры печи;  $c$  – расстояние точки установки теодолита от мишени

Рисунок 1.2 – Схема определения положения оси вращения агрегата по методу Оргпроектцемента: а) в проекции на вертикальную плоскость; б) в проекции на горизонтальную плоскость

Фактическая величина расстояния от линии горизонта до центров вращения корпуса печи определяется по формуле

$$S_{\phi} = \frac{d+k}{2} + R, \quad (1.1)$$

где  $d$  – диаметры бандажей;

$k$  – диаметральный зазор посадки бандажей;

$R$  – расстояние от верхней точки бандажа до линии горизонта.

Расчетная величина определяется по формуле

$$S_{\phi p} = \sum L_{n-1} \sin \alpha + S_{\phi 1}, \quad (1.2)$$

где  $\alpha$  – угол наклона агрегата к горизонту;

$$\sin \alpha = \frac{S_{\phi n} - S_{\phi 1}}{L_1 + L_2 + L_n}, \quad (1.3)$$

где  $L_n$  – расстояние между первым и  $n$ -м бандажом.

Проверка положения геометрической оси вращающегося агрегата в проекции на горизонтальную плоскость основана на том, что положение опорных роликов в проекции на горизонтальную плоскость определяет положение геометрической оси печи в этой же проекции. Данный метод заключается в определении расстояния между центрами осей правого ролика от визирной линии, вынесенной параллельно оси вращения печи. Эта линия выносится с помощью теодолита, установленного для удобства определения опорных роликов. Проверка состоит из измерения расстояния между центрами торцов осей каждой пары опорных роли-

ков с горячего и холодного концов агрегата и расстояния от центров роликов одной стороны объекта (правой и левой) до визирной линии теодолита. Теодолит устанавливают у первой опоры и наводят на мишень, расположенную на последней опоре. Мишень остается на последней опоре до конца измерений. После этого с помощью измерительного инструмента определяют расстояние от центра каждого ролика одной стороны до визирной линии. Полученные размеры сравнивают с базовыми, и на основании этого делают вывод о положении оси вращения агрегата в проекции на горизонтальную плоскость. Одновременно определяют положение опорных роликов.

Недостатками описанной технологии являются необходимость остановки и охлаждения агрегата. Кроме того, измерения на охлажденном оборудовании не дают полноценной информации о состоянии работающего объекта.

Определение геометрических параметров вращающихся промышленных агрегатов по методу Львовского политехнического института заключается в равнозначном смещении геометрических центров бандажей за пределы корпуса агрегата с последующей проверкой расположения этих смещенных центров [73]. В качестве исходных данных используются радиусы бандажей и диаметральные зазоры между внутренней поверхностью бандажа и наружной поверхностью подбандажной прокладки в верхнем положении, измеряемые специальными приборами. Для тождественного смещения геометрических центров бандажей используют искатель смещенного центра с визирной трубой и два с мишенями. До начала измерений уровни приборов проверяют, устанавливая их на поверочной плите в одинаковое положение; при этом плиту необходимо расположить строго горизонтально по уровню с ценой деления 0,08–0,1 мм на 1 м длины. Во время измерений закрепляют инструменты с визирной трубой на одном базовом бандаже и один из инструментов с мишенью на другом базовом бандаже агрегата. В качестве базовых выбирают первый и последний бандажи, что повышает точность измерений. Вращающийся агрегат необходимо расположить так, чтобы венцовая шестерня не мешала визированию. При известных значениях радиуса базового бандажа, на ко-

торый установлен прибор с визирной трубой, диаметального зазора и высоты установки прибора, рассчитывается радиус смещения.

Затем определяется высота установки прибора с мишенью на всех остальных бандажах.

Установив прибор с визирной трубой на первом бандаже по уровню, а прибор с мишенью – на последнем бандаже, ориентируют оптическую ось визирной трубы по центру мишени и фиксируют ее в таком положении на все время выверки. При этом оптическая ось визирной трубы параллельна геометрической оси вращения печи. Затем прибор с мишенью последовательно устанавливают на промежуточных бандажах на высоты, вычисленные ранее, и, наблюдая в окуляр визирной трубы, определяют смещение сетки ее нитей с центра мишени, что указывает на искривление оси корпуса печи. Во время перестановки инструмента с одного бандажа на другой рекомендуется проверять центровку визирной трубы по мишени, оставленной на базовом бандаже [73].

Данный метод наиболее приемлем в условиях производства ремонтных работ, так как обеспечивает необходимую точность и достаточно высокую скорость выполнения выверки.

В современной практике для определения геометрических параметров промышленного оборудования в статическом и динамическом режимах часто используют электронные тахеометры [86, 97, 108, 190]. Измерения в статическом режиме на охлажденном оборудовании не дает полноценной информации о состоянии работающего объекта, а затраты времени на остановку и охлаждение агрегата составляют сутки и даже недели.

Для геодезического обеспечения высокоточного монтажа и выверки крупногабаритного промышленного оборудования в Донецком национальном техническом университете был разработан программно-аппаратный измерительный комплекс «Визир 3D», который является развитием программного обеспечения (ПО) «Маркшейдерские геодезические сети и съемки» (МГСети) [51, 89, 185]. Особенностью рассматриваемого программно-аппаратного комплекса является

его способность работать в реальном режиме времени совместно с электронным тахеометром. Кроме того, «Визир 3D» имеет такие же функциональные возможности, что и ПО МГСети, предназначенное для построения, уравнивания и предрасчета точности планово-высотной основы (ПВО) любой конфигурации, а также обработки результатов тахеометрических съемок. Логической единицей обработки данных является проект геодезических измерений объекта мониторинга, он может включать любое количество отдельных измерений конструктивных элементов промышленного оборудования, в том числе не связанных между собой. Имеется возможность включить в проект теоретическую модель объекта мониторинга (проектные чертежи), что позволяет выполнять анализ соответствия фактического положения конструктивных элементов объекта его проектному положению.

Применение программно-аппаратного комплекса в онлайн-режиме измерений и обработки данных позволяет оперативно, сразу после выполнения измерений, вычислить и проанализировать результаты, и, в случае необходимости, произвести корректировку положения или формы объекта мониторинга.

«Визир 3D» состоит из двух модулей – измерительного прибора и портативного компьютера. Эти модули взаимодействуют между собой по каналам радиосвязи, реализуемым технологией Bluetooth. Измерительный прибор получает от компьютера управляющие команды и выполняет измерения объекта, программный модуль регистрирует и обрабатывает результаты геодезических измерений. Связь между компонентами осуществляется по принципу «клиент – сервер» согласно модификации «point – to – point» [185].

Методика измерений в рассматриваемом программно-аппаратном комплексе имеет отличия от традиционно принятой методики геодезического мониторинга, что обусловлено применением онлайн-обработки измерений.

Если на промышленном оборудовании можно измерить точки, для которых на чертеже указаны проектные значения, то можно перейти от геодезической системы координат в систему координат наблюдаемого объекта. Для этих целей

требуется измерение трех или более базовых точек, не лежащих на одной прямой, координаты которых известны в системе координат объекта мониторинга.

Контроль соответствия геометрических параметров технологического оборудования проектному чертежу или базовой модели объекта может осуществляться как в геодезической системе координат, так и в системе координат исследуемого объекта. При использовании геодезической системы координат важно правильно выбирать точки, определяющие начало и направление координатных осей (рисунок 1.3).

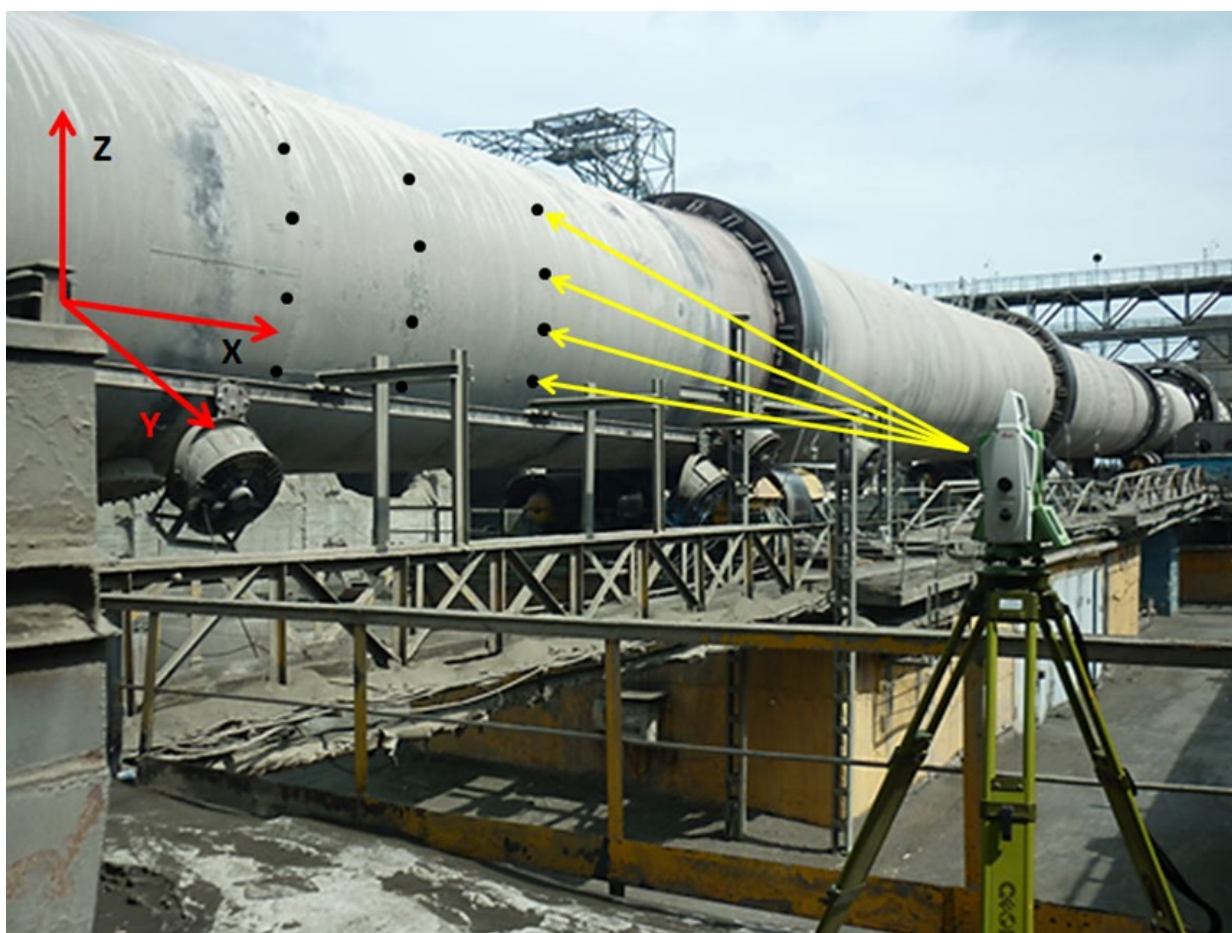


Рисунок 1.3 – Геодезические измерения при выверке обжиговой печи

Выверка оборудования заключается в определении геометрических параметров конструктивных элементов промышленных агрегатов и правильности пространственного положения элементов относительно друг друга.

После перехода в систему координат наблюдаемого объекта (или приведения к требуемой размерности) в программном комплексе на вкладке «Измеренные точки объекта» становится доступной панель инструментов, которая позволяет выполнять операции для определения геометрических параметров отдельных элементов исследуемого объекта и их взаимного положения.

Предусмотренные в программном модуле «Визир 3D» инструменты позволяют выполнить контроль прямолинейности объекта мониторинга, параллельности прямых, плоскостности, параллельности плоскостей, перпендикулярности плоскостей, расположения точек на окружности и цилиндре. Кроме того, есть возможность передачи результатов измерений в систему автоматизированного проектирования (САПР) (AutoCAD или Компас), для дальнейшего анализа и графического определения деформаций. При выполнении этих задач из таблицы «Измеренные точки объекта» отбираются точки, относящиеся к одному или двум исследуемым объектам [51].

На практике часто возникает необходимость выполнения анализа пространственного положения различных конструктивных элементов промышленного оборудования относительно друг друга (соосности валов, параллельности и перпендикулярности нескольких валов или цилиндров и т. д.). Кроме того, на объекте мониторинга не всегда есть возможность измерить базовые точки, необходимые для перехода в систему координат исследуемого оборудования. В данном случае требуется выполнить анализ положения прямых и/или нормалей двух и более объектов. Скалярное произведение векторов прямых (или нормалей) двух объектов дает действительные углы между этими объектами. Последовательное использование этой операции для группы объектов позволяет получить параметры, характеризующие их положение относительно какого-либо определенного объекта или относительно друг друга.

В общем случае для геодезического мониторинга крупногабаритного технологического оборудования требуется создавать опорную геодезическую сеть, сохраняющую свое пространственное положение во время производства измерений исследуемого объекта. Сеть строится из четырех или более пунктов, которые за-

крепляются вокруг промышленного агрегата на расстоянии от него 5–10 м. На самом объекте мониторинга закрепляются 3–4 измерительных марки, которые также не должны менять свое положение до окончания измерений.

ПО «Визир 3D» позволяет определять геометрические параметры крупногабаритного промышленного оборудования, анализировать их на основе проектных показателей и предоставлять корректурные данные для последующего оперативного исправления положения по окончании измерений [185].

Выполненные работы с уникальными по точности объектами показали, что для каждого из этих объектов следует разрабатывать проект геодезического обеспечения, учитывающий вид и точность измерительных приборов, а также геометрию геодезической опорной сети. К обязательным условиям можно отнести выполнение строгого предрасчета точности для проектируемой опорной геодезической сети и методики измерений.

Применение рассматриваемого программно-аппаратного комплекса на действующих производственных объектах подтвердило высокую его эффективность. Разработчики «Визир 3D» отмечают, что использование данного комплекса для выполнения измерений способствует сокращению времени простоя технологического оборудования в десятки раз по сравнению с традиционными способами геодезического мониторинга и обеспечивает более высокую точность выполнения работ [51, 89, 185]. ПО комплекса полностью контролирует процесс измерений, выявляет и отбраковывает ошибочные измерения. Таким образом, использование «Визир 3D» является удачным и перспективным решением для выверки крупногабаритного промышленного оборудования.

### 1.3 Анализ технологии «горячей» выверки

Безопасная работа крупногабаритных вращающихся агрегатов зависит главным образом от изменений геометрии и износа деталей, изменения напряжений, вибрации, колебания температуры и других факторов. В процессе эксплуатации технологическое оборудование подвергается различным механиче-

ским, физическим и климатическим воздействиям, вследствие чего происходит смещение и износ отдельных его элементов. Кроме того, из-за деформаций огнеупорной футеровки вращающегося агрегата обечайка нагревается неравномерно и искривляется ось вращения агрегата [23], что может привести к аварийной ситуации. В связи с этим, актуальным является геодезический мониторинг объектов в процессе эксплуатации без остановки работающего агрегата, нагретого до рабочей температуры. Такую выверку технологического оборудования называют «горячей». Геодезические наблюдения за деформациями агрегатов при их эксплуатации используются достаточно давно [198], но с появлением новых методов и средств измерений, позволяющих выполнять данные работы дистанционно, они становятся наиболее популярными и находят широкое применение на практике [58, 205].

Одним из методов геодезического мониторинга, не требующих остановки и охлаждения машин, является метод измерения параметров агрегата теодолитом с помощью специального приспособления [114]. При этом исследуемый объект продолжает вращаться, но с меньшей скоростью. Прибором визируют на специальное устройство, которое постоянно контактирует с поверхностью машины. Данный метод используется во многих странах мира. Преимуществами технологии являются оперативность, высокая точность, возможность определения положения роликов и др. Недостатки можно отметить следующие: для выполнения работ требуется специальное устройство для тангенциальных измерений цилиндрических объектов, измерения выполняются перпендикулярно температурному градиенту [110], что вносит существенные ошибки в измерения, исполнитель находится в опасной зоне (высокой температуры) и должен касаться вращающихся элементов агрегата.

Для производства геодезических работ по определению геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования необходимы более безопасные методы, которые сочетали бы высокую точность измерений и дистанционное выполнение наблюдений.

## 1.4 Технология «горячей» выверки компании Geoservex

Технология «горячей» выверки польской компании Geoservex считается родоначальницей выверки промышленных агрегатов во время их эксплуатации без остановки производства [114]. Контроль положения оси рассматриваемого технологического оборудования является основной частью геодезического мониторинга вращающихся печей. Методика выполнения измерений основана на производственном опыте многих лет работы компании Geoservex. Ось вращения агрегата определяется путем определения центров сечений обечаек и бандажей.

На рисунке 1.4 показан процесс геодезических измерений вращающейся печи по методике Geoservex [114].



Рисунок 1.4 – Геодезические измерения параметров агрегата по методике Geoservex [114]

Польская компания Geoservex предлагает использовать современные методы «горячей» выверки вращающихся печей на основе линейного сканирования, с применением лазерных дальнометров и часовых цифровых датчиков, подключенных к компьютеру [114]. Полученные в процессе наблюдений данные подвергаются векторизации и аппроксимации, они позволяют с высокой точностью

определять простые и динамические деформации отдельных деталей машины, выполнять геометрическое моделирование деформаций и планировать капитальные и текущие ремонтные работы. Динамические деформации определяются на критических участках корпуса вращающейся печи. В процессе данных работ требуется отличать осевые деформации (кривошип) от радиальных (типа вдавливания покрытия, погрешности формы круглого сечения и т. д.); температурные деформации от деформаций, связанных с динамикой поворотных движений (прогибов).

Для измерения динамической деформации поверхности агрегата и его оси используются портативные лазерные дальномеры DISTO PRO LEICA, BOSCH и др., которые обеспечивают точность 1–2 мм, и цифровые часовые датчики, например SYLVAC. Измерительное оборудование должно иметь функцию непрерывного измерения и возможность записи результатов на компьютер.

Выбор типа измерительного устройства зависит от масштаба ожидаемых деформаций, и, как правило, предполагается, что точность измерения должна составлять порядка 10 % от значения деформации. Условием использования этого метода является доступ к измеряемой поверхности.

Дальномер выполняет функцию линейного сканера, регистрируя расстояния до точек на поверхности вращающейся машины, и эти расстояния фиксируются по времени в компьютере.

Следует отметить, что в то время как типичный геодезический сканер записывает расстояния и углы до стационарных объектов, это обратная ситуация, поскольку линейный сканер является стационарным, но записывает расстояние до движущегося объекта, характеристики угла которого известны (время одного оборота и теоретическая геометрия). Линейное сканирование [114] позволяет быстро и массово собирать данные, касающиеся в этом случае одного переменного расстояния как функции времени или угла поворота относительно начальной точки. Для определенного сечения получаем строку данных о расстояниях и времени измерений, зафиксированных во время многих оборотов агрегата (множе-

ство сверхурочных наблюдений, характеризующих данное сечение). Эти данные напоминают растровую графику, которая должна быть векторизована с использованием известных программ.

Следующим шагом является аппроксимация приведенных данных, благодаря которой известна теоретическая форма сечения, которое должно быть кругом, что упрощает численную задачу. Геометрическое моделирование позволяет определять осевые и радиальные деформации поперечного сечения.

Для пользователей (механиков) рисуется график радиальных деформаций каждого поперечного сечения и сводная диаграмма осевых деформаций для всех поперечных сечений.

Осевые деформации корпуса вращающейся печи искажаются действием опорных роликов. Другими словами, если бы корпус печи не поддерживался (если бы он был подвешен в вакууме), его деформации были бы намного больше. Эти динамические искажения необходимо учитывать и определять по двум алгоритмам.

Первый алгоритм – это измерение циклических прогибов опор фундамента, а второй – измерение изменений прогибов ролика. Измерение выполняется с использованием цифрового датчика часов, соединенного с компьютером. Отклонения роликовых валов являются функцией динамических воздействий, таких, как например, температура. Эти отклонения малы, порядка сотых долей миллиметра, но они однозначно подтверждают деформации. Этот метод особенно ценится и понятен механиками, которые дополнительно проверяют эти данные, измеряя нагрузку на двигатели (переменная сила тока как функция угла поворота печи) [114].

Результаты измерений геометрии тела работающей вращающейся печи являются основой для интерпретации информации, прогнозирующей технические ремонтные работы. Это наблюдение, выполненное без остановки производства, показывает тип и масштаб потенциальной угрозы (зная допуски отклонений, указанных изготовителем). Результаты измерений позволяют судить о происходящих на печи явлениях, таких как потеря огнеупорных кирпичей, повреждения корпуса, увеличение силы тока двигателей, вибрации и т. д.

## 1.5 Технология кинематических локационных измерений вращающихся промышленных агрегатов

В ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет» коллективом авторов: д. т. н, профессором С. Г. Могильным и д. т. н, профессором А. А. Шоломицким – разработана технология кинематических локационных измерений вращающихся промышленных агрегатов [58, 91, 110]. Предлагаемый метод основан на использовании электромагнитного излучения для определения геометрических параметров промышленных установок (вращающихся обжиговых агрегатов, мельниц, сушилок и др.) и их конструктивных элементов в процессе эксплуатации (без остановки производства). Данная методика подразумевает дистанционное локационное измерение (без непосредственного контакта исполнителя с объектом при выполнении работ) на основе измерительного комплекса «Визир 3D» [185]. Измерения выполняются тахеометром в безотражательном режиме, пространственные координаты точек на вращающейся поверхности промышленного агрегата фиксируются по времени, т. е. определяется время для каждого отдельного измерения.

Таким образом, вращающаяся поверхность объекта в некоторый начальный момент времени  $t_0$  в общем случае может быть описана следующим выражением [58]:

$$U(\bar{r}, \bar{\theta}) = 0, \quad (1.4)$$

где  $\bar{r} = |x, y, z|$  – вектор пространственных координат точки на поверхности объекта;

$\bar{\theta}$  – вектор параметров вращающейся поверхности.

При локации поверхности лазерным лучом визирования регистрируются  $\bar{r}_t = |x_t, y_t, z_t|$  – вектор координат точки пересечения луча визирования и вращающейся поверхности в некоторый момент  $t$  текущего времени. Измеренные коор-

динаты точки поверхности переычисляются в те, которые она имела в начальный момент времени  $t_0$ , с помощью следующего оператора [58]:

$$\bar{r}_{t_0} = A(\bar{u})A(w, t - t_0)A^T(\bar{u})(\bar{r}_t - \bar{r}_e)^T + \bar{r}_e, \quad (1.5)$$

где  $A(\bar{u})$  – матрица ортогонального поворота пространственных координат к оси вращения поверхности, определяемой единичным вектором  $\bar{u}$ ;

$w$  – угловая скорость вращения поверхности;

$\bar{r}_e$  – вектор координат точки расположенной на оси вращения;

$A(w, t - t_0)$  – матрица ортогонального поворота пространственных координат вокруг оси вращения за период времени  $t - t_0$

$$A(w, t - t_0) = \begin{vmatrix} \cos w(t - t_0) & -\sin w(t - t_0) & 0 \\ \sin w(t - t_0) & \cos w(t - t_0) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}. \quad (1.6)$$

Вектор  $\bar{r}_{t_0}$  удовлетворяет уравнению (1.4), поэтому имеет место следующая система уравнений [58]:

$$\left. \begin{aligned} U(\bar{r}_{t_0}, \theta) &= 0 \\ \bar{r}_{t_0} &= A(\bar{u})A(w, t - t_0)A^T(\bar{u})(\bar{r}_t - \bar{r}_e) + \bar{r}_e \end{aligned} \right\}. \quad (1.7)$$

Совместное решение системы уравнений (1.7), составленных для достаточного количества измеренных точек на вращающейся поверхности наблюдаемого объекта, позволяет вычислить геометрические и кинематические параметры оборудования.

Выполнение измерений безотражательным электронным тахеометром и математическая обработка результатов по описанному выше алгоритму являются

достаточными для определения геометрических и кинематических параметров промышленного оборудования при его эксплуатации и рабочих нагрузках, без присутствия наблюдателя в опасных зонах.

В процессе геодезического мониторинга на поверхности корпуса промышленного агрегата определяются координаты точек и время их измерения. Электронный тахеометр в автоматическом режиме фиксирует направления, расстояния до точек и время измерений большого количества точек, и это позволяет успешно применять предлагаемый алгоритм математической обработки результатов [58].

На рисунке 1.5 представлена схема секции вращающейся печи и расположение тахеометра для измерений.

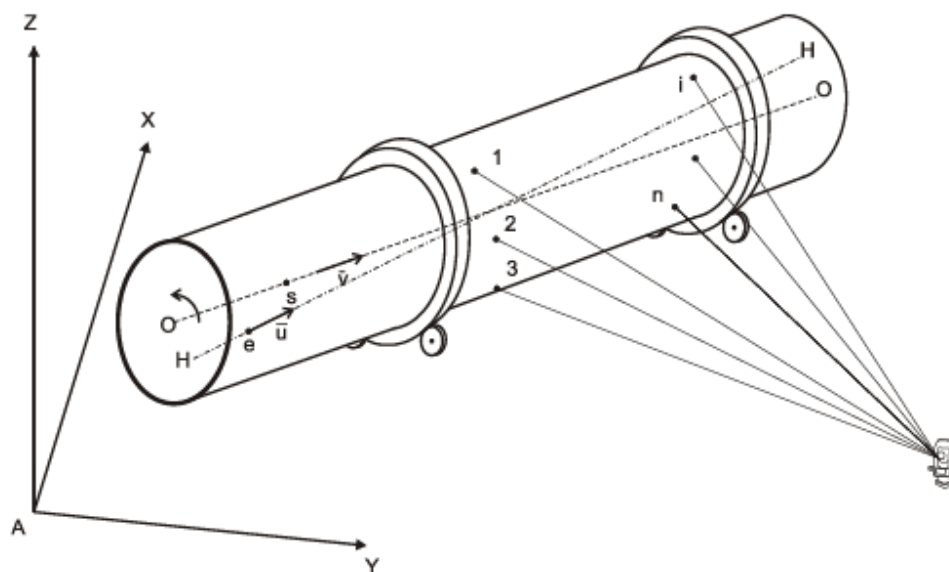


Рисунок 1.5 – Схема кинематических измерений промышленного агрегата

Поверхность рассматриваемого объекта представляет собой цилиндр, поэтому система уравнений (1.7) примет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} (\bar{r}_{t_0} - \bar{r}_s)(\bar{r}_{t_0} - \bar{r}_s)^T - \left[ \bar{v}(\bar{r}_{t_0} - \bar{r}_s)^T \right]^2 - R^2 &= 0 \\ \bar{r}_{t_0} &= A(\bar{u}) A(w, t - t_0) A^T(\bar{u})(\bar{r}_t - \bar{r}_e) + \bar{r}_e \end{aligned} \right\}, \quad (1.8)$$

где  $\bar{r}_S$  – вектор координат точки  $S$ , расположенной на линии  $O-O$  оси симметрии наблюдаемого цилиндрического объекта;

$\bar{v}$  – единичный вектор, направленный по оси этого объекта;

$\bar{r}_e$  – вектор координат точки  $e$ , расположенной на линии  $H-H$  – оси вращения промышленного агрегата;

$R$  – радиус цилиндрической поверхности агрегата.

Совместным решением уравнений (1.8), составленных для всех измеренных точек, вычисляются  $\bar{r}_S$ ,  $\bar{v}$ ,  $R$  – геометрические параметры поверхности наблюдаемого цилиндрического объекта,  $\bar{r}_e$ ,  $\bar{u}$  – кинематические параметры вращающегося агрегата.

На практике описанная выше методика геодезического мониторинга может использоваться для контроля технического состояния технологических промышленных объектов и для выставки агрегатов и их отдельных конструктивных элементов в проектное положение.

В «Визир 3D» авторами включены специализированные модули «Печи» и «Сушилка» [58, 185], оснащенные программными и интерфейсными средствами управления геодезическими измерениями и обработки пространственных данных в реальном режиме времени. Несмотря на схожесть таких объектов, как вращающиеся печи и сушильные агрегаты, каждый из них имеет свои технологические и функциональные особенности. В геометрическом плане сушильный агрегат можно интерпретировать как печь из одной секции, но для вращающихся печей характерно постоянство динамических и тепловых характеристик, они вращаются с одинаковой скоростью, в печах поддерживается высокая температура. В сушильном агрегате скорость вращения и температура изменяются в значительных пределах, это зависит от влажности поступающего сырья.

Для измерительного комплекса «Визир 3D» характерна модульная структура [58], работа с различными устройствами обеспечивается моделью взаимодействия «клиент – сервер» (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – Структура программно-аппаратного комплекса «Визир 3D»

Верхняя часть схемы показывает аппаратную составляющую комплекса. Основной комплекс является работа с одним тахеометром (1), взаимодействие осуществляется по технологии Bluetooth. Управляющая программа и электронный тахеометр обмениваются командами, данными и сообщениями. Для повышения точности измерений, когда ее невозможно добиться путем многократных повторений одиночным тахеометром, возможна работа с двумя тахеометрами (2) в синхронном и асинхронном режимах. Этот вид измерений позволяет выполнять оценку точности каждого измерения в онлайн-режиме. Для составления фотоабрисов измеренных точек комплекс «Визир 3D» может взаимодействовать с камерой (3). Кроме того, камера используется при визуальных обследованиях печей и сушилок для документирования прилегания роликов и бандажей, определения биения и зазоров шестерен и др.

Измерительный комплекс «Визир 3D» управляется дистанционно с помощью внешних устройств (мобильный телефон (4) или контроллер). Управление основано на технологии «human device interface» и реализует ограниченный набор команд, связанных с инициализацией измерений и их обработкой. Эти же функ-

ции можно реализовать с помощью компьютера (ноутбука (5), планшета), а также и дополнительные функции сохранения данных на внешнем компьютере. Большая часть этих возможностей обеспечивается самим комплексом «Визир 3D», а часть реализуется операционной системой.

ПО комплекса «Визир 3D» имеет три уровня: самый нижний уровень (10) обеспечивает выполнение и обработку геодезических онлайн-измерений, а также их уравнивание [58, 185]. Этот уровень обеспечивает создание опорных геодезических сетей для объектов и при правильном выборе системы координат может обеспечить измерение многих объектов.

Второй программный уровень (9) основывается на данных первого уровня и позволяет по координатам точек вычислить прямолинейность агрегатов, параллельность линий и плоскостей, плоскостность, перпендикулярность линий и плоскостей, вычисление радиусов объектов и параметров цилиндров.

В большинстве случаев этих функций достаточно для измерения объектов машиностроения и технологического оборудования в промышленности. Для сложных агрегатов, для которых требуются модели и сложные расчеты, разработаны специализированные модули, которые включают функции измерений характерных точек, моделирование объектов и выработки корректирующих воздействий. Такие модули созданы для измерения и выставки машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) (6), диагностики состояния и выставки вращающихся печей (7) и сушилок (8).

## 1.6 Выводы по первому разделу, постановка задач исследования

Как было рассмотрено ранее в предыдущих подразделах, на данный момент на практике используются различные варианты «холодной» [1–15, 73, 88, 117, 154, 166 и др.] и «горячей» выверки технологического оборудования [58, 91, 110, 114, 185, 205 и др.]. При этом каждый из методов применим для конкретных условий наблюдений и требований точности, большинство из методов «холодной» выверки применяют для определения только геометрической оси агрегатов. В ряде суще-

ствующих методов необходимая точность достигается только на коротких расстояниях и подходит для наблюдений объектов небольшой протяженности.

Исследование традиционных геодезических методов выверки крупногабаритного технологического оборудования [73, 130] показало, что они не могут обеспечить современные требования к точности выполнения геодезических измерений. Применение технологий нивелирования при «холодной» выверке позволяет достигать точности измерений  $\pm 5$  мм только при благоприятных условиях производства работ. Кроме того, данная технология не позволяет получать информацию о положении оси агрегата между бандажами и требует продолжительных измерений.

Современные геодезические компании активно предлагают свои услуги по «холодной» и «горячей» выверке крупногабаритных промышленных агрегатов, о чем свидетельствуют многочисленные корпоративные сайты в сети Интернет [114–118]. Но, ознакомившись с предложениями и материалами по данной теме, можно увидеть, что представленная информация в основном носит рекламный характер и не раскрывает методов и точности геодезических наблюдений промышленных объектов. Наиболее часто рассматривается применение лазерных систем, электронных тахеометров и трекеров. В достаточно полной мере представлена методика применения электронного тахеометра для «холодной» выверки вращающихся агрегатов [21, 122, 123], анализ которой выявил ряд недостатков. Существенным недостатком является то, что данная технология измерений подразумевает выполнение работ в опасных для человека условиях, когда замерщик закрепляет марки на поверхности объекта, находящегося на высоте. Следующим недостатком можно отметить то, что подобные измерения подходят только для технологического оборудования, сооружаемого на низких опорах. В случае, когда высота опор превышает 3 м, работа ограничится измерением бандажей и части обечайки, доступной для наблюдений с подбандажной площадки.

Общим недостатком для всех методов лазерных наблюдений является отсутствие обоснований точности определения геометрических параметров крупно-

габаритного технологического оборудования. Исследования данного вопроса показали, что точность геодезического контроля имеет большую зависимость от геометрической схемы измерений, чем от точности определения углов и расстояний геодезическими приборами [202].

Современные технологии лазерных измерений рассматриваемых объектов [58, 202, 205] являются наиболее подходящими для применения на практике. Выбор наиболее оптимальных параметров съемочных работ может обеспечить достаточно высокую точность выверки. Но, несмотря на многочисленные преимущества, данные технологии имеют также и недостатки, например, продолжительное время производства геодезических работ. Современные тахеометры могут выполнять измерения расстояний до наблюдаемой поверхности за 1,5–2 секунды, что позволяет измерить около 12 000 точек на поверхности агрегата при «горячей» выверке. С учетом работ по созданию геодезической опорной основы и привязкой станций время производства измерений составит более 2,5 дней.

Кроме рассмотренных способов, существует технология линейного сканирования промышленных агрегатов лазерными дальномерами [194], но она не может быть применена для определения кинематических характеристик агрегатов в процессе эксплуатации и достоверно определить геометрические параметры объектов.

В ходе проведенного анализа установлен ряд нерешенных научно-технических задач:

- обоснование необходимой точности построения опорной геодезической сети, предназначенной для выверки технологического оборудования значительной протяженности в условиях резкого перепада температур;
- учет влияния ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров промышленных агрегатов;
- оценка точности определения геометрических параметров обжиговых печей, их формы и положения осей вращения по результатам геодезических измерений, с учетом влияния ошибок измерений и внешних факторов;

– анализ точности определения деформаций промышленных агрегатов на основе трехмерного компьютерного моделирования.

В диссертационной работе требуется определить более рациональные и быстрые способы производства геодезических наблюдений, которые могут быть применены как для «холодной» так и для «горячей» выверки крупногабаритного технологического оборудования. Кроме того, данные способы должны обладать высокой точностью и достаточной информативностью для определения геометрических параметров рассматриваемых агрегатов.

## 2 СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ ОПОРНОЙ СЕТИ ДЛЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ

### 2.1 Методика построения и анализ точности опорной сети для геодезического мониторинга промышленных агрегатов

Для определения геометрических параметров и деформационного мониторинга промышленного оборудования значительных размеров и протяженности необходима специальная высокоточная опорная геодезическая сеть [205].

Опорная сеть создается как линейно-угловое построение способом «свободной» станции с помощью электронного тахеометра в процессе производства геодезических измерений для выверки промышленного агрегата. Пункты опорной сети закрепляются вокруг объекта на жестких конструкциях специальными светоотражающими марками (рисунок 2.1), которые используются в качестве связующих точек между станциями.



Рисунок 2.1 – Способы закрепления опорной геодезической сети

На рисунке 2.2 представлена схема опорной сети вращающейся обжиговой печи. Геодезические измерения обжиговой печи заключаются в определении координат точек, расположенных на сечениях конструктивных элементов объекта (обечаек, бандажей и опорных роликов).

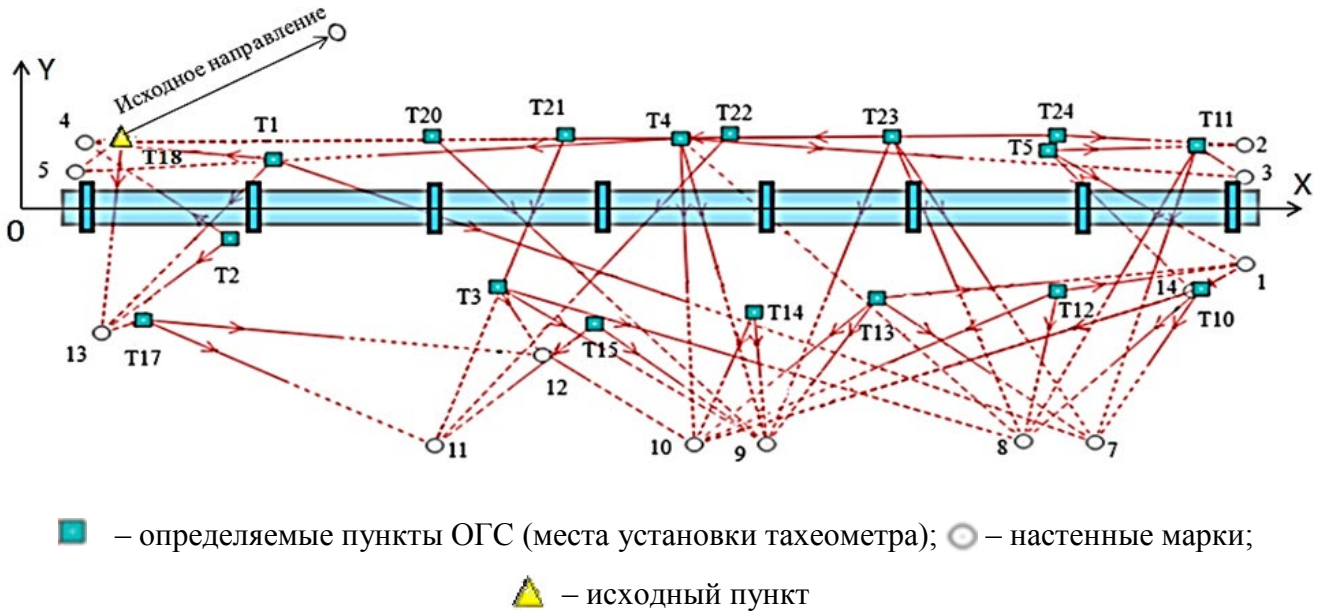


Рисунок 2.2 – Схема опорной геодезической сети обжиговой печи

Из-за большой протяженности промышленного агрегата (до 200 м) измерения выполняются с разных станций, при этом с каждой станции тахеометра осуществляется его привязка к нескольким маркам создаваемой опорной геодезической сети. Эти измерения включаются в уравнивание опорной сети для всей печи в условной системе координат. Таким образом, при последовательном измерении элементов агрегата производится уточнение схемы сети. При наличии большого количества избыточных измерений параметры опорной геодезической сети становятся более точными и достоверными.

Следует отметить, что недостаточная точность создания опорной геодезической сети может повлиять на точность определения геометрических параметров обжигowych печей.

Как отмечалось в публикациях [33, 202], точность определения геометрических параметров вращающихся агрегатов в большей степени зависит от геометрической схемы измерений, чем от точности измерения углов и расстояний. Из-за стесненных условий работы места расположения пунктов опорной сети весьма ограничены. Поэтому изменение положения пунктов не является в данном случае актуаль-

ным для оптимального проектирования сети. Вместе с тем, небольшие перемещения пунктов в ограниченном пространстве ненамного улучшают качество сети.

Рассмотрим линейно-угловую сеть, построенную для выверки вращающейся печи обжига клинкера на АО «Искитимцемент» (приложение А). Данная сеть состоит из 41 пункта, 26 станций и 126 целей для измерения направлений и расстояний. Количество избыточных измерений в данной сети – 85.

Для математической обработки сети и установления условной системы координат задаются один исходный пункт и один исходный дирекционный угол линии, расположенной вдоль агрегата. Уравнивание и оценка точности сети выполнялись по методу наименьших квадратов.

На рисунке 2.3 приведен фрагмент опорной геодезической сети с графическим отображением формы эллипсов ошибок, где настенные марки обозначены цифрами 1–N, а места установки электронного тахеометра – буквой и цифрой, например, T5, T6, T26 и т. д.

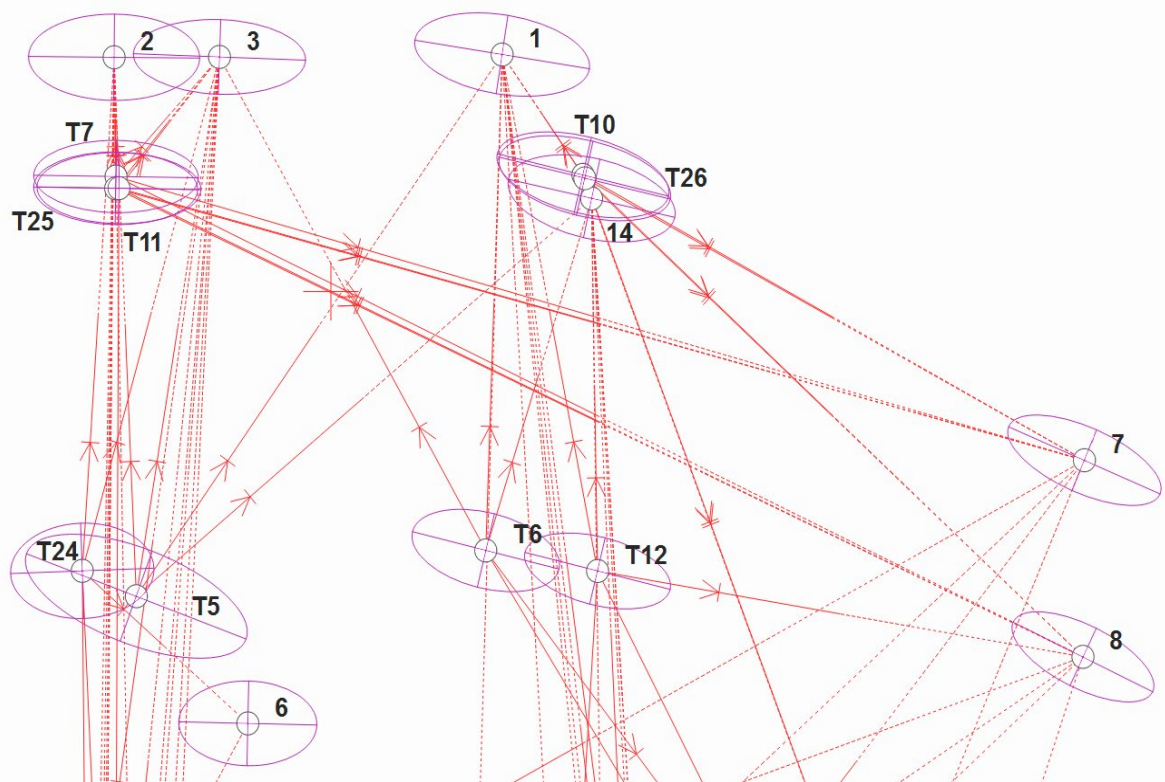


Рисунок 2.3 – Фрагмент схемы опорной геодезической сети на АО «Искитимцемент»

Полная схема опорной сети, построенной на производственном объекте АО «Искитимцемент», приведена в приложении А.

Выполним вначале предрасчет точности данной сети по технологии КРЕДО при условии, что измерения углов производятся электронным тахеометром с ошибкой 1,0", а длин линий – с ошибкой 2,0 мм (рисунок 2.4).

Класс:	2-класс
Параметр	Значение
класс NE	2-класс
углы (СКО), сек	1,0000
направления (СКО), сек	0,7071
СКО линии, м (без ррт)	0,0020
дирекционные углы (СКО), сек	1,0000
допустимая невязка, сек	1,5000
Доверительный коэффициент:	2,0 95,5 %
<input checked="" type="checkbox"/> Расчёт с учётом доверительного коэффициента	

Рисунок 2.4 – Характеристики точности угловых и линейных измерений

Ниже приводится часть таблицы результатов априорной оценки точности, сформированной в программе КРЕДО [70].

Результаты оценки точности положения пунктов ОГС после уравнивания приводятся в таблице 2.1, где  $m$  – средние квадратические ошибки (СКО) определения координат;  $m_x$  – СКО положения пункта по оси  $x$ ;  $m_y$  – СКО положения пункта по оси  $y$ ;  $a$  – большая полуось эллипса ошибок;  $b$  – малая полуось эллипса ошибок;  $\alpha$  – дирекционный угол большой полуоси эллипса ошибок.

Таблица 2.1 – Результаты оценки точности положения пунктов ОГС

Пункт	$m$ , мм	$m_x$ , мм	$m_y$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$\alpha$
1	2,7	2,0	2,2	2,2	1,1	99°22'02"
14	3,4	2,0	2,8	2,8	1,2	105°14'49"
T1	1,6	1,4	0,7	1,4	0,7	175°09'40"
T10	4,4	2,0	3,9	4,1	1,6	110°16'17"

Ведомость оценки точности для всех пунктов опорной сети, полученная на основе ковариационной матрицы координат, приведена в приложении Б.

По итогам проведенного анализа точности ОГС получено, что ожидаемые СКО определения координат находятся в пределах 0,7–4,4 мм в плане и по высоте.

Ошибки взаимного положения некоторых смежных пунктов опорной сети приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Ведомость оценки точности взаимного положения пунктов

Начальный пункт	Конечный пункт	Дирекционный угол	СКО дирекционный угла	Расстояние, м	СКО расстояния	Относительная ошибка	СКО взаимного положения, мм
T7	3	42°07'13"	0°00'03"	8,513	0,000	1:32621	0,0
T25	2	357°48'43"	0°00'02"	6,917	0,001	1:12354	1,0
T24	6	131°24'25"	0°00'02"	12,178	0,000	1:35082	0,0
T23	6	29°19'44"	0°00'02"	18,183	0,001	1:28392	1,0

Детальный анализ точности показывает, что ориентировка средних квадратических эллипсов ошибок в ряде случаев невыгодна для определения координат станций, с которых выполняются измерения геометрических элементов печи. Как видно из рисунка 2.3, большие полуоси эллипсов ошибок направлены перпендикулярно к оси агрегата (например, пункты T7, T11, T24, T25 и др.), что приведет к увеличению ошибки определения места положения центральной точки кругового сечения и его радиуса.

Если большие полуоси эллипсов ошибок направлены вдоль агрегата, то это обстоятельство, в свою очередь, приведет к увеличению ошибки определения длины его оси вращения. Поэтому управление точностью самой сети путем воздействия на форму эллипсов ошибок является актуальной задачей [86].

Одной из важных задач проектирования инженерно-геодезических сетей является обеспечение необходимой точности определяемых элементов. Эта задача связана с вопросом «управления» точностью геодезических сетей на любом из этапов их построения. Важную роль в решении этой задачи может сыграть сред-

ний квадратический эллипс ошибок. Известно, что ориентировка эллипса ошибок не влияет на общую ошибку положения пункта, однако оказывает влияние на ошибку по заданному, наиболее ответственному направлению.

В процессе управления точностью на основе такого критерия целесообразно воздействовать на большую полуось эллипса ошибок. Это обусловлено следующими обстоятельствами.

При воздействии на малую полуось эллипса ошибок не происходит заметного уменьшения общей ошибки положения пункта.

Если принять, например, что размеры полуосей эллипса ошибок имеют соотношение  $A = 3B$ , то общая ошибка положения пункта равна

$$M = \sqrt{(3B)^2 + B^2} = 3,2 B.$$

При уменьшении малой полуоси эллипса ошибок  $B$  в 2 раза получим

$$M = \sqrt{3B^2 + \left(\frac{B}{2}\right)^2} = 3,0 B.$$

Если уменьшить размер большой полуоси эллипса ошибок  $A$  в 2 раза, то получим

$$M = \sqrt{\left(\frac{3}{2}B\right)^2 + B^2} = 1,8 B.$$

Уменьшение большой полуоси приводит к кругу ошибок. Как известно, стремление к кругу ошибок приводит к наименьшей средней квадратической ошибке положения пункта.

В ряде случаев параметры эллипсов ошибок зависят от целого ряда факторов, и задача управления точностью сетей не решается на основе линейного про-

граммирования. Тогда оптимальное решение по управлению точностью геодезических сетей может быть выполнено с помощью ЭВМ и специализированного программного обеспечения путем многовариантного проектирования и анализа выбора параметров эллипсов ошибок.

На форму и ориентировку эллипсов ошибок может оказывать влияние точность угловых и линейных измерений, количество избыточных измерений, форма и конструкция сети, а также соотношение весов для углов и линий [33, 67–69, 76–84].

При построении опорной сети для геодезического мониторинга вращающейся печи наибольшее предпочтение имеет приближение среднего квадратического эллипса к кругу ошибок, когда точность положения пункта является одинаковой по всем направлениям.

Получить желаемое решение можно путем сравнения результатов уравнения и оценки точности, меняя соотношение весов угловых и линейных измерений по формуле

$$g = \frac{m_{\text{лин}}^2}{m_{\text{уг}}^2}, \quad (2.1)$$

где  $m_{\text{лин}}$ ,  $m_{\text{уг}}$  – средние квадратические ошибки линейных и угловых измерений.

В технологии КРЕДО имеется возможность изменить соотношение весов угловых и линейных измерений и добиться лучшей формы и ориентировки эллипсов ошибок в процессе математической обработки сети и ее проектирования [70].

В программе КРЕДО\_DAT реализовано совместное уравнивание линейных и угловых измерений. При этом уравнивание выполняется по методу наименьших квадратов параметрическим способом.

Для достижения целевого решения используется способ итераций по критерию минимизации суммы квадратов поправок в измерения

$$PAx - Pb = Pv, \quad (2.2)$$

где  $P$  – матрица весов;

$A$  – матрица коэффициентов;

$b$  – вектор измеренных значений;

$x$  – искомый вектор поправок в координаты определяемых пунктов;

$v$  – вектор невязок.

При уравнивании определяется вектор  $x$  поправок, при котором сумма квадратов элементов вектора  $Pv$  достигает минимального значения.

В процессе решения системы уравнений поправок в данной технологии используется итерационный алгоритм. Причем на каждой итерации вычисляются поправки в координаты пунктов, а затем коэффициенты уравнений рассчитываются заново, и процесс повторяется. Работа программы заканчивается, если выполняется одно из условий:

- процесс вычислений прерван исполнителем;
- среднее квадратическое значение поправок в координаты в очередной итерации не превосходит заданного значения погрешности, установленной для параметров уравнивания;
- число итераций превышает максимально допустимое значение.

Выбор весов основан на необходимости выполнения нескольких условий, в том числе согласованности уравнений, соответствующих угловым и линейным измерениям.

Для вычисления весов  $P$  используется не только значение допустимой СКО, но и балансовый коэффициент для линейных и угловых уравнений, установленный при настройке параметров уравнивания (рисунок 2.5).

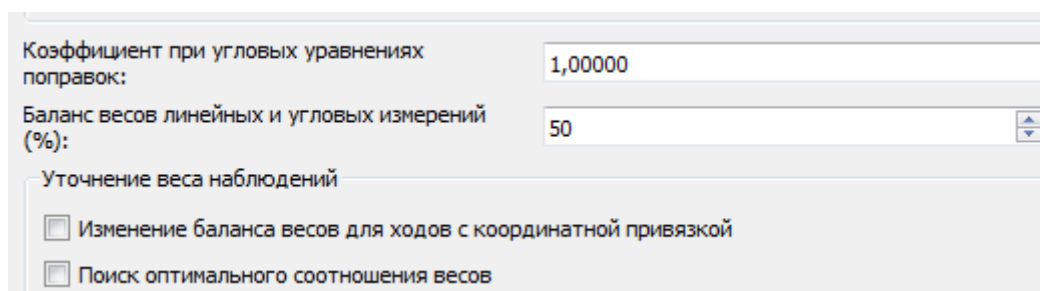


Рисунок 2.5 – Настройка баланса весов угловых и линейных измерений

При установке параметра «Поиск оптимального соотношения весов» запускается большое количество итераций уравнивания. В каждой итерации происходит изменение весов измерений. Так продолжается, пока не будет найдено оптимальное соотношение весов, либо алгоритм определит, что вычислительный процесс расходящийся и оптимальные веса установить невозможно.

Соотношение весов определяет относительную точность линейных и угловых измерений, что позволяет, задав малый весовой коэффициент для угловых уравнений, имитировать безошибочность измерения расстояний, и наоборот, задав большой коэффициент, имитировать безошибочность угловых измерений. Коэффициент может варьироваться в пределах от 0,01 до 10 000, что приводит к изменению влияния веса угловых измерений на результаты уравнивания.

Настройка соотношения весов в режиме проектирования сетей позволяет выбрать точность измерений, оптимальную для обеспечения требуемой точности определения координат пунктов опорной сети, и таким образом повлиять на форму и ориентировку средних квадратических эллипсов ошибок. Предпочтительным вариантом, конечно, является тот, при котором эллипс превращается в круг ошибок, обеспечивающий одинаковую точность положения пунктов по всем направлениям на плоскости.

В качестве эксперимента для получения приемлемых оценок положения пунктов ОГС средствами программы КРЕДО было установлено соотношение весов угловых и линейных измерений равным 48 % (как показано на рисунке 2.6), принимая, что  $g = 0,85$ .

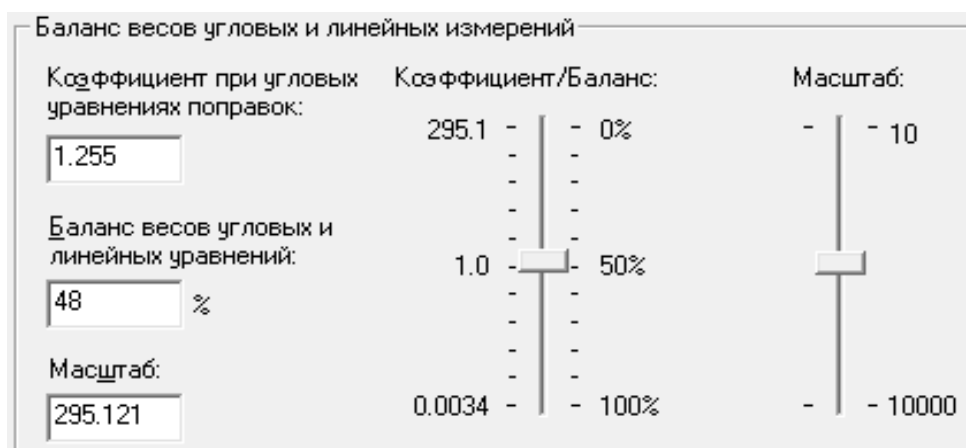


Рисунок 2.6 – Настройка соотношения весов угловых и линейных измерений

В таблице 2.3 представлены результаты оценки точности параметров ОГС после изменения соотношения весов угловых и линейных измерений.

Таблица 2.3 – Точность положения пунктов ОГС при  $g = 0,85$

Пункт	$m$ , мм	$m_x$ , мм	$m_y$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$\alpha$
1	2,2	1,8	1,8	1,8	1,8	136°36'59"
14	2,4	1,8	1,8	1,6	1,6	142°46'35"
T1	1,2	1,1	0,5	1,2	0,5	174°33'27"
T10	2,2	1,4	1,6	2,0	2,0	124°15'54"

На рисунке 2.7 представлен фрагмент опорной геодезической сети, где графически показаны эллипсы ошибок при соотношении весов угловых и линейных уравнений, равном 48 % ( $g = 0,85$ ).

В данном случае (см. рисунок 2.7) при соотношении весов, равном 48 %, эллипсы ошибок в большей степени приближаются к кругу ошибок, что приводит к одинаковым смещениям пунктов по всем направлениям на плоскости. На рисунке 2.3 эллипсы положения пунктов опорной сети были получены при балансе весов угловых и линейных уравнений, равном 50 %, и коэффициенте угловых уравнений поправок, равном 1.

Сравнительный анализ результатов, приведенных на рисунках 2.3 и 2.7, показывает, что не на всех пунктах получен круг ошибок. При высокоточных измерениях углов и линий и большом количестве избыточных измерений изменение

соотношения весов мало влияет на ориентировку эллипса ошибок. Например, на пункте Т5 (см. рисунок 2.7), на котором измерено четыре направления (Т5–1, Т5–14, Т5–3, Т5–2), эллипс ошибок почти не изменился по своей форме и ориентировке. В этом случае целесообразно выполнить дополнительное измерение по направлению большой полуоси эллипса, например, Т5–6 (рисунок 2.8).

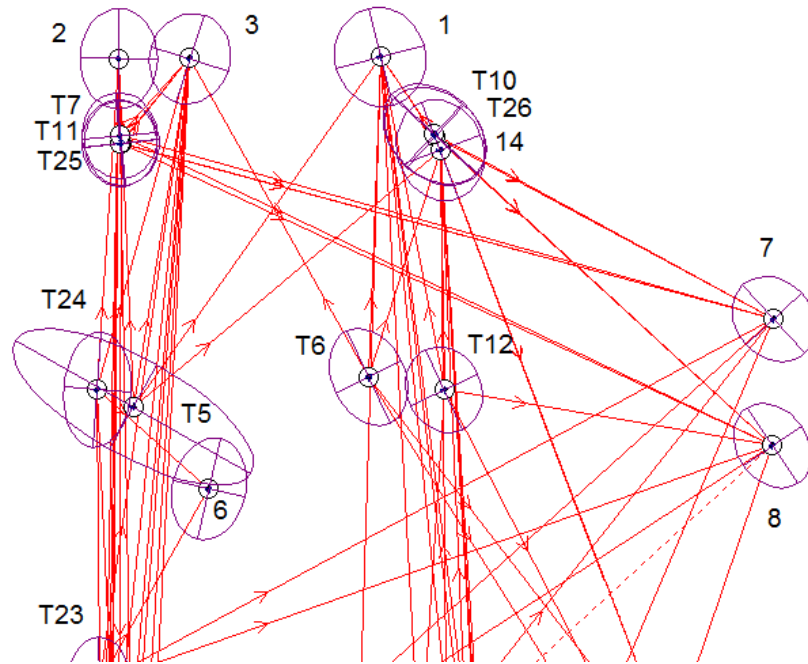


Рисунок 2.7 – Эллипсы ошибок при соотношении весов угловых и линейных уравнений, равном 48 %

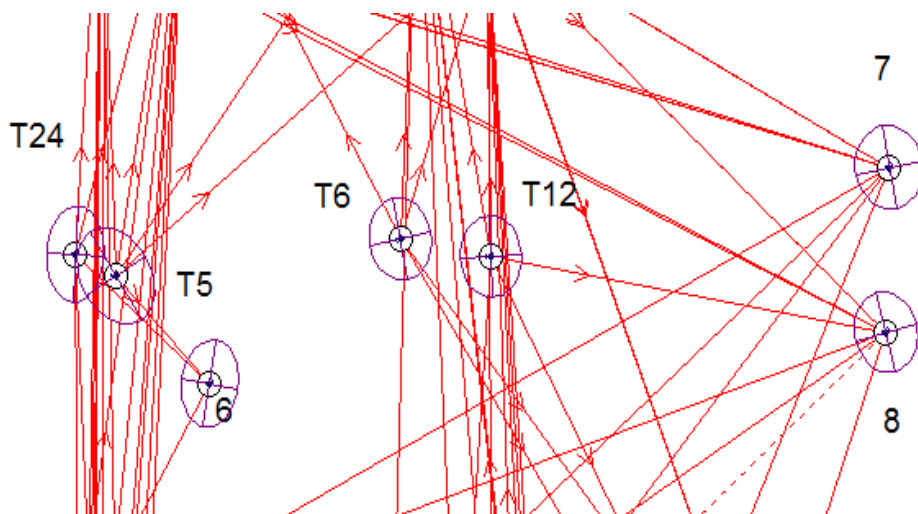


Рисунок 2.8 – Результат обработки сети при дополнительном измерении направления Т5–6

Как видно из рисунка 2.8, дополнительное направление Т5–6 способствовало изменению формы, размеров и ориентировки эллипса ошибок, то есть повышению точности положения пункта Т5.

Рассмотренный метод математической обработки опорной сети позволяет получить на этапе проектирования или окончательного ее уравнивания оптимальные результаты в точности координат определяемых пунктов за счет сравнительного анализа и принятия соответствующего решения по управлению точностью. На основе результатов анализа эллипсов ошибок подбираются наиболее подходящие геодезические инструменты и методика измерений для создания сети необходимой точности с учетом геометрических параметров. Это, в свою очередь, позволит повысить точность выполнения геодезического мониторинга промышленных агрегатов.

## 2.2 Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров вращающихся печей

Важной составляющей геодезических наблюдений крупногабаритных промышленных агрегатов является учет влияния случайных ошибок измерений на координаты станции, определяемой линейно-угловыми построениями. Подобные темы неоднократно рассматривались в научных и учебных публикациях [11, 14, 20, 33, 34, 44, 55, 56, 74, 75, 107, 109, 112, 113, 126 и др.]. Однако для выполнения более детального анализа точности геодезических построений требуется учет влияния ошибок исходных данных.

Известно, что ошибки исходных данных, наряду со случайными ошибками геодезических измерений, могут оказывать существенное влияние на точность определяемых параметров элементов геодезических построений [18–22]. Современные требования к точности выполнения геодезического мониторинга инженерных сооружений и промышленного оборудования очень высокие [35–39, 147–152]. В связи с этим, оценку точности определения геометрических парамет-

ров конструктивных элементов вращающихся печей, сушильных агрегатов, емкостей для хранения нефтепродуктов и другого технологического оборудования целесообразно выполнять с учетом влияния ошибок исходных данных [98, 99].

Под ошибками исходных данных понимаются ошибки, получаемые при построении опорной геодезической сети для мониторинга промышленных агрегатов. Обычно их значения определяются программными средствами при обработке инженерно-геодезической сети в процессе уравнивания и оценки точности.

Примем, что ошибки исходных данных установлены в виде ковариационной матрицы координат  $K^{и.д.}$ , тогда учет их влияния на точность геодезических измерений можно выполнить по известной формуле

$$K^* = UK^{и.д.}U^T, \quad (2.3)$$

где  $K^*$  – ковариационная матрица, обусловленная ошибками исходных данных;  
 $U$  – оператор преобразования (т. е. матрица частных производных от функций, выражающих определяемые координаты по исходным данным);  
 $K^{и.д.}$  – ковариационная матрица координат исходных пунктов.

Формула (2.3), приведенная в трудах д.т.н., профессора Маркузе Ю. И. и д.т.н., профессора Коугия В. А., является универсальной для любых геодезических построений [53, 54, 68, 69, 76–84]. Ковариационная матрица является инвариантом относительно осей координат. При этом важно, чтобы матрица  $K^{и.д.}$  была установлена в полном объеме, с учетом всех ее элементов.

На основании данного алгоритма выполнено исследование влияния ошибок исходных данных на координаты определяемых станций, используемых для выверки оборудования.

### 2.3 Учет ошибок исходных данных в обратной угловой засечке

Рассмотрим алгоритм определения ошибок исходных данных при геодезическом мониторинге крупногабаритного технологического оборудования. В данном случае измерения выполняются электронным тахеометром способом «свободной» станции, при этом прибор устанавливается на любое удобное для измерений место. Координаты такой станции определяются обратной угловой или линейно-угловой засечкой относительно исходных знаков опорной инженерно-геодезической сети.

На рисунке 2.9 представлена схема обратной угловой засечки, где  $A$ ,  $B$  и  $C$  – исходные пункты;  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  – измеряемые углы;  $P$  – определяемый пункт, с которого выполняются геодезические измерения технологического оборудования.

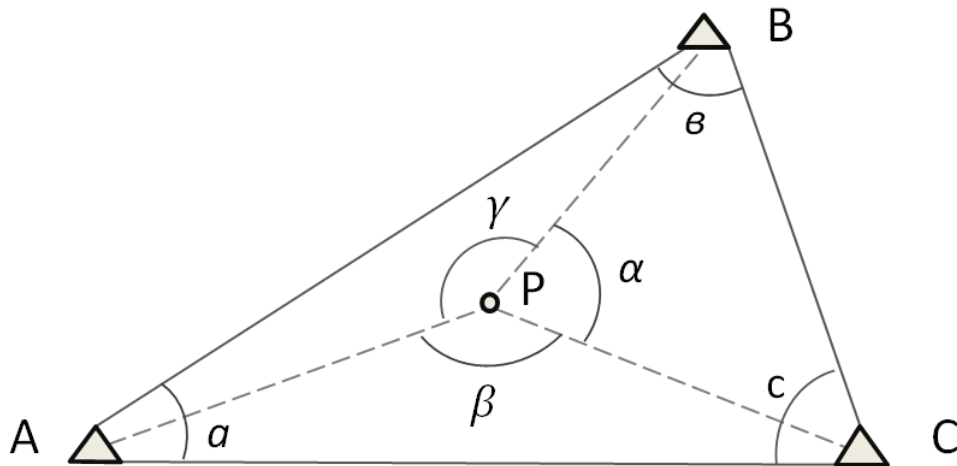


Рисунок 2.9 – Обратная угловая засечка

Для определения координат пункта  $P$  применены следующие формулы:

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \frac{x_A P_a + x_B P_b + x_C P_c}{P_a + P_b + P_c} \\ y_P &= \frac{y_A P_a + y_B P_b + y_C P_c}{P_a + P_b + P_c} \end{aligned} \right\}, \quad (2.4)$$

где

$$\left. \begin{aligned} P_a &= \frac{1}{\operatorname{ctg} a - \operatorname{ctg} \alpha} \\ P_b &= \frac{1}{\operatorname{ctg} b - \operatorname{ctg} \beta} \\ P_c &= \frac{1}{\operatorname{ctg} c - \operatorname{ctg} \gamma} \end{aligned} \right\}. \quad (2.5)$$

Предположим, что известна ковариационная матрица координат исходных пунктов  $A$ ,  $B$ , и  $C$  по результатам математической обработки инженерно-геодезической основы, предназначенной для мониторинга промышленного оборудования. Для упрощения дальнейших выводов представим матрицу  $K^{\text{и.д.}}$  в следующем виде:

$$K_{6 \times 6}^{\text{и.д.}} = \begin{bmatrix} m_{x_A}^2 & & & & & \\ & m_{y_A}^2 & & & & \\ & & m_{x_B}^2 & & & \\ & & & m_{y_B}^2 & & \\ & & & & m_{x_C}^2 & \\ & & & & & m_{y_C}^2 \end{bmatrix}. \quad (2.6)$$

Здесь по главной диагонали матрицы (2.6) расположены квадраты средних квадратических ошибок положения исходных пунктов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ . На основании формулы (2.3) запишем

$$K_{2 \times 2}^* = U_{2 \times 6} K_{6 \times 6}^{\text{и.д.}} U_{6 \times 2}. \quad (2.7)$$

В данном случае матрица  $U_{2 \times 2}$  примет вид

$$U_{2 \times 6} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_P}{\partial x_A} & \frac{\partial x_P}{\partial y_A} & \frac{\partial x_P}{\partial x_B} & \frac{\partial x_P}{\partial y_B} & \frac{\partial x_P}{\partial x_C} & \frac{\partial x_P}{\partial y_C} \\ \frac{\partial y_P}{\partial x_A} & \frac{\partial y_P}{\partial y_A} & \frac{\partial y_P}{\partial x_B} & \frac{\partial y_P}{\partial y_B} & \frac{\partial y_P}{\partial x_C} & \frac{\partial y_P}{\partial y_C} \end{bmatrix}. \quad (2.8)$$

После дифференцирования с учетом функций (2.4) получим

$$U_{2 \times 6} = \frac{1}{T} \begin{bmatrix} P_a & 0 & P_b & 0 & P_c & 0 \\ 0 & P_a & 0 & P_b & 0 & P_c \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

где  $T$  – геометрический параметр обратной засечки

$$T = P_a + P_b + P_c. \quad (2.10)$$

В результате перемножения матриц в правой части формулы (2.7), пренебрегая недиагональными элементами, получим ковариационную матрицу  $K_{2 \times 2}^*$  координат определяемого пункта  $P$ , обусловленную погрешностями исходных пунктов

$$K_{2 \times 2}^* = \frac{1}{T^2} \begin{bmatrix} (P_a^2 m_{x_A}^2 + P_b^2 m_{x_B}^2 + P_c^2 m_{x_C}^2) & \\ & (P_a^2 m_{y_A}^2 + P_b^2 m_{y_B}^2 + P_c^2 m_{y_C}^2) \end{bmatrix}. \quad (2.11)$$

Таким образом, ошибки положения определяемого пункта  $P$  по осям координат  $x$  и  $y$ , обусловленные влиянием ошибок исходных пунктов  $A, B, C$ , выражаются следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} m_{xP} &= \frac{1}{T} \sqrt{P_a^2 m_{x_A}^2 + P_b^2 m_{x_B}^2 + P_c^2 m_{x_C}^2} \\ m_{yP} &= \frac{1}{T} \sqrt{P_a^2 m_{y_A}^2 + P_b^2 m_{y_B}^2 + P_c^2 m_{y_C}^2} \end{aligned} \right\}. \quad (2.12)$$

Пусть  $P_a = P_b = P_c = R$ , тогда  $T = 3R$ , следовательно, формулы (2.12) примут вид

$$\left. \begin{aligned} m_{xP}^2 &= \frac{1}{9} (m_{x_A}^2 + m_{x_B}^2 + m_{x_C}^2) \\ m_{yP}^2 &= \frac{1}{9} (m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2 + m_{y_C}^2) \end{aligned} \right\}. \quad (2.13)$$

Для практических расчетов предположим, что

$$\left. \begin{aligned} m_{x_A} &= m_{x_B} = m_{x_C} = m_{x_{и.д.}} \\ m_{y_A} &= m_{y_B} = m_{y_C} = m_{y_{и.д.}} \end{aligned} \right\}, \quad (2.14)$$

где  $m_{x_{и.д.}}$ ,  $m_{y_{и.д.}}$  – погрешности исходных пунктов по осям координат.

Это позволяет получить упрощенные формулы для оценки координат определяемого пункта с учетом ошибок исходных данных

$$\left. \begin{aligned} m_{xP} &= \sqrt{\frac{1}{3}} m_{x_{и.д.}} \\ m_{yP} &= \sqrt{\frac{1}{3}} m_{y_{и.д.}} \end{aligned} \right\}. \quad (2.15)$$

Общую ошибку положения  $M_{\text{и.д.}}$  определяемого пункта  $P$  за счет погрешностей исходных данных вычислим по следующей формуле, полагая, что  $m_{x_{\text{и.д.}}} = m_{y_{\text{и.д.}}} = m_{\text{и.д.}}$ :

$$M_{\text{и.д.}} = m_{\text{и.д.}} \sqrt{\frac{2}{3}}. \quad (2.16)$$

Пусть ошибки исходных пунктов равны  $m_{\text{и.д.}} = 3$  мм, тогда получим  $M_{\text{и.д.}} \approx 2,4$  мм.

Влияние ошибок исходных пунктов на точность получения отметки определяемого пункта  $P$  можно установить на основе аналогичных рассуждений. Пусть известна ковариационная матрица отметок исходных пунктов в данном построении (см. рисунок 2.9)

$$K_{3 \times 3}^{(H)} = \begin{bmatrix} m_{H_1}^2 & & \\ & m_{H_2}^2 & \\ & & m_{H_3}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

где  $m_{H_1}, m_{H_2}, m_{H_3}$  – ошибки отметок исходных пунктов. Отметку определяемого пункта вычислим по формуле

$$H_P = \frac{1}{3} [(H_1 + \Delta h_1) + (H_2 + \Delta h_2) + (H_3 + \Delta h_3)], \quad (2.18)$$

где  $\Delta h_1, \Delta h_2, \Delta h_3$  – измеренные превышения (тригонометрическим нивелированием). В данном случае матрица  $U$  в формуле (2.3) примет вид

$$U_{1 \times 3} = \left[ \frac{\partial H_P}{\partial H_1} \quad \frac{\partial H_P}{\partial H_2} \quad \frac{\partial H_P}{\partial H_3} \right], \quad (2.19)$$

или

$$U_{1 \times 3} = \frac{1}{3} [1 \ 1 \ 1]. \quad (2.20)$$

Тогда погрешность определения пункта  $P$  по высоте, обусловленная ошибками отметок исходных пунктов, выразится следующей формулой:

$$M_H^2 = \frac{1}{9} (m_{H_1}^2 + m_{H_2}^2 + m_{H_3}^2). \quad (2.21)$$

Принимая, что  $m_{H_1} = m_{H_2} = m_{H_3} = m_{H_{\text{и.д.}}}$ , получим

$$M_H = \sqrt{\frac{1}{3}} m_{H_{\text{и.д.}}}. \quad (2.22)$$

При  $m_{H_{\text{и.д.}}} = 3$  мм получено  $M_H \approx 1,7$  мм.

Приведенный алгоритм позволяет оценить влияние ошибок исходных данных на точность определения координат станций, используемых для геодезического мониторинга промышленных агрегатов.

#### 2.4 Учет ошибок исходных данных в линейной засечке

При геодезическом мониторинге крупногабаритных агрегатов в условиях ограниченного количества направлений на исходные пункты целесообразно использовать не только угловые, но и линейные засечки, позволяющие определять координаты станций для наблюдения за деформациями. При этом возникает вопрос о влиянии разного рода ошибок и, в том числе, погрешностей исходных данных на точность координат определяемых пунктов или станций для измерения геометрических параметров оборудования.

Рассмотрим метод определения ошибок исходных данных при линейных засечках.

Как известно, координаты пункта  $P$  (рисунок 2.10), определяемые из однократной линейной засечки, могут быть вычислены по следующим формулам:

$$x_P = x_B - \frac{k_1(x_B - x_A) - k_2(y_B - y_A)}{c}; \quad (2.23)$$

$$y_P = y_B - \frac{k_1(y_B - y_A) + k_2(x_B - x_A)}{c}; \quad (2.24)$$

где

$$c = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2}; \quad (2.25)$$

$$k_1 = \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2c}; \quad (2.26)$$

$$k_2 = \sqrt{b^2 - k_1^2}. \quad (2.27)$$

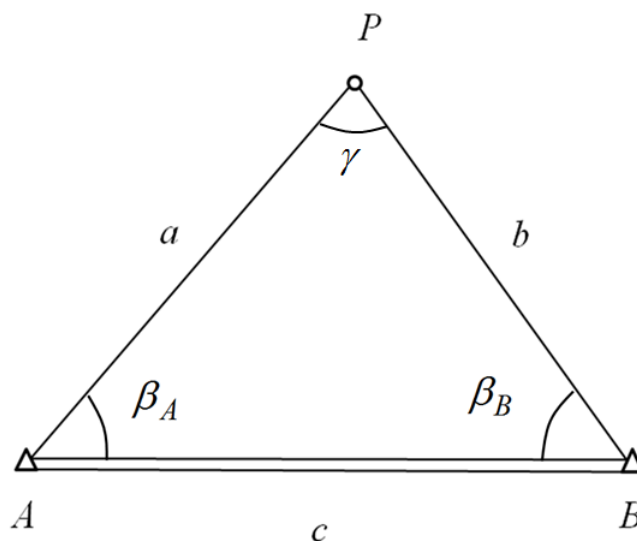


Рисунок 2.10 – Элементы линейно-угловой засечки

Здесь  $A$  и  $B$  – исходные пункты, координаты которых  $x_A, y_A$  и  $x_B, y_B$  не безошибочны;  $a$  и  $b$  – длины измеряемых линий;  $\beta_A, \beta_B$  – измеряемые углы;  $\gamma$  – угол при определяемом пункте  $P$ .

Известно, что оценка точности линейной засечки с учетом влияния случайных ошибок измерений может быть выполнена по следующей формуле:

$$M_P = \frac{ab}{2T} \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{P_0(P_0 - a)(P_0 - b)(P_0 - c)}}, \quad (2.28)$$

где  $M_P$  – ошибка положения пункта  $P$ , определяемого однократной линейной засечкой;

$T$  – знаменатель относительной ошибки измерения линий;

$P_0$  – полупериметр;

$$P_0 = \frac{a + b + c}{2}. \quad (2.29)$$

Для более полной оценки точности следует рассмотреть влияние погрешностей исходных данных. Обычно ошибки исходных данных устанавливаются в ходе уравнивания и анализа точности опорной инженерно-геодезической сети.

Учет влияния ошибок исходных данных в однократной линейной засечке можно выполнить на основе ковариационной матрицы. Пусть известна ковариационная матрица  $K_{4 \times 4}$  координат исходных пунктов в данном построении (см. рисунок 2.10)

$$K_{4 \times 4} = \begin{bmatrix} m_{x_A}^2 & & & \\ & m_{y_A}^2 & & \\ & & m_{x_B}^2 & \\ & & & m_{y_B}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

где элементы по главной диагонали этой матрицы представляют квадраты погрешностей координат исходных пунктов.

Тогда влияние этих погрешностей на координаты определяемого пункта  $P$  можно определить по формуле

$$K_{2 \times 2}^{\text{и.д.}} = U_{2 \times 4} K_{4 \times 4} U_{4 \times 2}, \quad (2.31)$$

где  $K_{2 \times 2}^{\text{и.д.}}$  – ковариационная матрица искомых оценок для линейной засечки;

$U_{2 \times 4}$  – оператор преобразования, который имеет вид

$$U_{2 \times 4} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_P}{\partial x_A} & \frac{\partial x_P}{\partial y_A} & \frac{\partial x_P}{\partial x_B} & \frac{\partial x_P}{\partial y_B} \\ \frac{\partial y_P}{\partial x_A} & \frac{\partial y_P}{\partial y_A} & \frac{\partial y_P}{\partial x_B} & \frac{\partial y_P}{\partial y_B} \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Для упрощения дальнейших выводов примем, что  $a = b$ . Тогда

$$k_1 = \frac{c}{2}; \quad k_2 = c\sqrt{\frac{3}{4}}.$$

С учетом этого матрица  $U_{2 \times 4}$  для линейной засечки примет вид

$$U_{2 \times 4} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{4}} & \frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{4}} \\ \sqrt{\frac{3}{4}} & \frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{4}} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

В результате преобразования в соответствии с (2.3) запишем элементы исходной матрицы  $K_{2 \times 2}^{\text{и.д.}}$  в общем виде

$$K_{2 \times 2}^{\text{и.д.}} = \begin{bmatrix} M_{xP}^2 & M_{xyP}'' \\ & M_{yP}^2 \end{bmatrix}, \quad (2.33)$$

где  $M_{xP}$ ,  $M_{yP}$  – ошибки координат определяемого пункта  $P$ , обусловленные погрешностями исходных данных;  $M_{xyP}''$  – ковариационный момент.

$$\left. \begin{aligned} M_{xP}^2 &= 0,25(m_{x_A}^2 + m_{x_B}^2) + 0,75(m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2) \\ M_{yP}^2 &= 0,75(m_{x_A}^2 + m_{x_B}^2) + 0,25(m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2) \end{aligned} \right\}. \quad (2.34)$$

Ковариационный элемент матрицы (2.33) определяется по следующей формуле:

$$M_{xyP}'' = 0,433(m_{x_A}^2 - m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2 - m_{x_B}^2). \quad (2.35)$$

Таким образом, общая ошибка положения пункта  $P$ , за счет погрешностей исходных данных, составит

$$M_{P_{\text{и.д.}}} = \sqrt{m_{x_A}^2 + m_{x_B}^2 + m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2}. \quad (2.36)$$

Если принять, что  $m_{x_A} = m_{y_A} = m_{x_B} = m_{y_B} = m_{AB}$ , то

$$M_{xP} = M_{yP} = m_{AB} \sqrt{2}. \quad (2.37)$$

Тогда общие влияния погрешностей исходных данных на точность определения координат пункта в линейной засечке составят

$$M_{P_{\text{и.д.}}} = 2m_{AB}. \quad (2.38)$$

В этом случае средний квадратический эллипс ошибок, обусловленный влиянием погрешностей исходных данных, превращается в круг ошибок.

Параметры среднего квадратического эллипса ошибок, обусловленного влиянием погрешностей исходных данных, могут быть вычислены по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} A^2 &= \frac{1}{2} \left( M_{xP}^2 + M_{yP}^2 + \sqrt{(M_{xP}^2 - M_{yP}^2)^2 + 4M_{xyP}^2} \right) \\ B^2 &= \frac{1}{2} \left( M_{xP}^2 + M_{yP}^2 - \sqrt{(M_{xP}^2 - M_{yP}^2)^2 + 4M_{xyP}^2} \right) \\ \operatorname{tg} 2\varphi &= \frac{2M_{xyP}''}{M_{xP}^2 - M_{yP}^2} \end{aligned} \right\}, \quad (2.39)$$

где  $A$  и  $B$  – полуоси среднего квадратического эллипса ошибок;

$\varphi$  – дирекционный угол большой полуоси  $A$  эллипса погрешностей.

Полученные формулы можно использовать для расчета ошибок исходных данных и учета их влияния на координаты определяемого пункта в линейной засечке.

## 2.5 Учет ошибок исходных данных в прямой угловой засечке

Рассмотрим действие ошибок в прямой угловой засечке.

Координаты пункта  $P$  (см. рисунок 2.10), определяемого из решения однократной прямой угловой засечки, можно вычислить по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} x_P &= \frac{x_A \operatorname{ctg} \beta_B + x_B \operatorname{ctg} \beta_A - y_A + y_B}{N} \\ y_P &= \frac{y_A \operatorname{ctg} \beta_B + y_B \operatorname{ctg} \beta_A + x_A - x_B}{N} \end{aligned} \right\}, \quad (2.40)$$

где  $N = \operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B$ .

Для оценки точности координат определяемого пункта запишем формулы в общем виде

$$\left. \begin{aligned} m_{X_P}^2 &= \left( \frac{\partial X_P}{\partial \beta_A} \right)^2 m_{\beta_A}^2 + \left( \frac{\partial X_P}{\partial \beta_B} \right)^2 m_{\beta_B}^2 \\ m_{Y_P}^2 &= \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \beta_A} \right)^2 m_{\beta_A}^2 + \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \beta_B} \right)^2 m_{\beta_B}^2 \\ m_{XY}^2 &= \left( \frac{\partial X_P}{\partial \beta_A} \right) \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \beta_A} \right) m_{\beta_A}^2 + \left( \frac{\partial X_P}{\partial \beta_B} \right) \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \beta_B} \right) m_{\beta_B}^2 \end{aligned} \right\}, \quad (2.41)$$

где  $m_{X_P}$ ,  $m_{Y_P}$  – ошибки по осям координат определяемого пункта  $P$ ;

Продифференцировав  $X_P$  и  $Y_P$  по  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , получим

$$\frac{\partial X_P}{\partial \beta_A} = \frac{-X_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2},$$

$$\frac{\partial X_P}{\partial \beta_B} = \frac{-X_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2},$$

$$\frac{\partial Y_P}{\partial \beta_A} = \frac{-Y_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2},$$

$$\frac{\partial Y_P}{\partial \beta_B} = \frac{-Y_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} + \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2}.$$

После подстановки результатов дифференцирования в формулу (2.41), получим:

$$\begin{aligned}
 m_{X_P}^2 &= \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{X_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right)^2 m_{\beta_A}^2 + \\
 &+ \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{X_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right)^2 m_{\beta_B}^2 ; \\
 m_{Y_P}^2 &= \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{Y_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right)^2 m_{\beta_A}^2 + \\
 &+ \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{Y_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right)^2 m_{\beta_B}^2 ; \\
 m_{XY}'' &= \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{X_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right) \times \\
 &\times \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_A^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{Y_B \operatorname{ctg} \beta_A^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_A^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right) m_{\beta_A}^2 + \\
 &+ \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (X_A \operatorname{ctg} \beta_B + X_B \operatorname{ctg} \beta_A - Y_A + Y_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{X_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right) \times \\
 &\times \left( \frac{\operatorname{ctg} \beta_B^2 (Y_A \operatorname{ctg} \beta_B + Y_B \operatorname{ctg} \beta_A - X_A + X_B)(1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{(\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B)^2} - \frac{Y_A \operatorname{ctg} \beta_B^2 (1 + \operatorname{tg} \beta_B^2)}{\operatorname{ctg} \beta_A + \operatorname{ctg} \beta_B} \right) m_{\beta_B}^2 .
 \end{aligned}$$

Как известно, влияние случайных ошибок угловых измерений в данном построении можно выразить следующей компактной формулой:

$$M_P = \frac{m_{\beta}''}{\rho'' \sin \gamma} \sqrt{a^2 + b^2} ,$$

где  $m''_{\beta}$  – ошибка измерения углов на исходных пунктах  $A$  и  $B$ ;

$\gamma$  – угол при определяемом пункте  $P$ .

Для учета влияния погрешностей исходных данных, установленных в ковариационной матрице  $K_{4 \times 4}$  (2.30) координат, определим элементы преобразующей матрицы  $U_{2 \times 4}$  (2.34). После дифференцирования выражения (2.40) по исходным данным оператор преобразования для угловой засечки примет вид

$$U_{2 \times 4} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} \operatorname{ctg} \beta_B & -1 & \operatorname{ctg} \beta_A & 1 \\ 1 & \operatorname{ctg} \beta_B & -1 & \operatorname{ctg} \beta_A \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

В результате перемножения матриц по общему алгоритму (2.31) получим следующие формулы для учета влияния погрешностей исходных данных в прямой угловой засечке:

$$\left. \begin{aligned} M_{xP}^2 &= \frac{1}{N^2} (m_{x_A}^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_B + m_{x_B}^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_A + m_{y_A}^2 + m_{y_B}^2) \\ M_{yP}^2 &= \frac{1}{N^2} (m_{y_A}^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_B + m_{y_B}^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_A + m_{x_A}^2 + m_{x_B}^2) \end{aligned} \right\}, \quad (2.43)$$

где  $M_{xP}^2$ ,  $M_{yP}^2$  – диагональные элементы ковариационной матрицы  $K_{2 \times 2}^{\text{и.д.}}$  (2.31), представляющие квадраты ошибок положения пункта  $P$ , обусловленные погрешностями исходных пунктов в угловой засечке.

Элемент  $M''_{xy}$ , составляющий ковариационную матрицу (2.31), в этом случае равен

$$M''_{xy} = \frac{1}{N^2} (m_{x_A}^2 \operatorname{ctg} \beta_B - m_{y_A}^2 \operatorname{ctg} \beta_B - m_{x_B}^2 \operatorname{ctg} \beta_A + m_{y_B}^2 \operatorname{ctg}^2 \beta_A). \quad (2.44)$$

При равных значениях ошибок исходных данных, выраженных величиной  $m_{AB}$ , получим

$$M_{x_P} = M_{y_P} = \frac{m_{AB}}{N} \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \beta_A + \operatorname{ctg}^2 \beta_B + 2}. \quad (2.45)$$

Тогда общая ошибка положения пункта  $P$ , обусловленная погрешностями исходных данных, равна

$$M_{P_{\text{ид}}} = \sqrt{2} \frac{m_{AB}}{N} \sqrt{\operatorname{ctg}^2 \beta_A + \operatorname{ctg}^2 \beta_B + 2}. \quad (2.46)$$

Полученные формулы (2.43), (2.44), (2.45) и (2.46) можно использовать для расчета ошибок исходных данных и учета их влияния на координаты определяемого пункта в прямой угловой засечке.

## 2.6 Экспериментальные вычисления

Место положения тахеометра для измерения геометрических параметров промышленного агрегата может определяться методом обратной угловой или, при ограниченной видимости, методом линейной засечки от точек опорной сети, которая содержит некоторые ошибки, называемые ошибками исходных данных.

Рассчитаем действие случайных ошибок, а также ошибок исходных данных и определим их влияние на координаты определяемого пункта в линейной засечке.

Пусть точность измерения длин сторон засечки равна  $T = 20\,000$ , кроме того, примем  $a = b = 20$  м,  $c = 30$  м, тогда ошибка положения пункта  $P$ , обусловленная случайными ошибками измерений и вычисленная по формуле (2.36), равна  $M_P = 0,8$  мм.

Принимая, что ошибки исходных пунктов равны 2 мм, влияние этих ошибок (2.46) на положение пункта  $P$ , определяемого линейной засечкой, составит  $M_{P_{\text{и.д.}}} = 4$  мм.

Отметим, что влияние ошибок исходных данных на координаты пункта, определяемого линейной засечкой, является существенным по сравнению с действием случайных ошибок измерений.

Используя те же числовые значения, что и в предыдущем примере, рассмотренном для линейной засечки, вычислим влияние случайных ошибок в угловой засечке, в результате получим  $M_P = 0,1$  мм. При этом влияние погрешностей исходных данных на положение пункта  $P$ , вычисленное по формуле (2.46), составило  $M_{P_{\text{и.д.}}} = 4$  мм.

Следует отметить, что для более строгого решения и получения надежных результатов по учету влияния ошибок исходных данных целесообразно учитывать все элементы ковариационной матрицы координат исходных пунктов, не ограничиваясь только элементами ее главной диагонали.

Полученная ошибка 4 мм сопоставима с точностью определения геометрических параметров обжиговой печи и может значительно повлиять на определяемые характеристики.

Согласно требованиям нормативных документов, допуск на определение прямолинейности оси печи составляет  $\pm 3$  мм [154]. Следовательно, при использовании ОГС для выверки прямолинейности оси печи ошибки определения координат должны быть не более 1–2 мм.

Анализ точности опорной сети во втором цикле геодезических наблюдений обжиговой печи показал, что при использовании опорных пунктов, координаты которых были определены в первом цикле наблюдений, ошибки исходных данных составляют от 1,2 до 4,7 мм, результаты приведены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Результаты оценки точности положения пунктов ОГС в последующем цикле наблюдений

Пункт	$m$ , мм	$m_x$ , мм	$m_y$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$\alpha$
1	2,5	2,1	2,1	2,3	1,7	136°36'00"
14	3,4	2,7	2,7	2,8	1,6	142°46'20"
T1	1,2	1,1	0,5	1,2	0,5	174°33'28"
T10	4,7	3,5	4,1	4,0	2,1	124°15'44"

Из таблицы 2.4 видно, что ошибки имеют значительную величину, не удовлетворяющую нормативным требованиям. Объясняется это тем, что в условиях данного производства (вибрации и резкого перепада температур) невозможно обеспечить сохранность и устойчивость опорных пунктов ОГС. Кроме того, при эксплуатации вращающейся обжиговой печи происходит небольшое ее смещение в пространстве, что также влияет на результаты измерений, но не влияет на ее эксплуатационные характеристики. Важными параметрами для геодезического мониторинга являются деформации отдельных конструктивных элементов агрегата и оси его вращения, которые можно определить относительно продольной оси.

Повышение качества ОГС для геодезического мониторинга вращающихся печей и других подобных объектов следует ожидать при соблюдении следующих рекомендаций:

- сократить количество опорных точек и устанавливать их вне зоны влияния резкого перепада температур;
- для каждого цикла измерений объекта создавать условную систему координат, что позволит оптимизировать и минимизировать перемещение роликов для выравнивания оси вращения печи.

## 2.7 Выводы по второму разделу

На основе выполненного исследования точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования предложена методика управления точностью положения пунктов ОГС путем выбора

оптимального соотношения весов угловых и линейных измерений, при котором эллипс ошибок стремится к кругу. Управление точностью сети достигается за счет изменения формы и ориентировки эллипсов ошибок.

Предложенный алгоритм математической обработки опорной сети позволяет получить на этапе проектирования или окончательного ее уравнивания оптимальные результаты в точности координат определяемых пунктов. На основе результатов анализа эллипсов ошибок выбираются оптимальные средства и методика измерений для создания ОГС требуемой точности с учетом геометрических условий. Это позволяет получить необходимую точность определения геометрических параметров вращающегося агрегата при геодезическом мониторинге.

Исследование точности линейно-угловых построений показало, что пренебрегая ошибками исходных данных при определении геометрических параметров технологического оборудования, можно получить некорректные результаты в процессе геодезического мониторинга. Предложены алгоритмы учета ошибок исходных данных в обратной угловой, прямой угловой и линейной засечках, которые позволяют оценить влияние ошибок исходных данных на точность определения координат станций, используемых для геодезического мониторинга обжиговых печей и других крупногабаритных агрегатов.

Для повышения точности параметров опорной геодезической сети рекомендуется соблюдение следующих условий:

- минимизировать количество пунктов в ОГС и устанавливать их вне зоны влияния резкого перепада температур;
- в каждом цикле наблюдений необходимо выполнять математическую обработку геодезических измерений в условной системе координат, вычисляя деформации относительно продольной оси, что позволит минимизировать перемещение роликов для выравнивания оси вращения обжиговой печи.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫШЛЕННЫХ АГРЕГАТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

#### 3.1 Разработка алгоритма для анализа точности определения геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы

Современные методы геодезических измерений с использованием электронных тахеометров и наземных лазерных сканеров позволяют сократить время выполнения работ и повысить точность геодезического мониторинга крупногабаритного технологического оборудования. Эта тема неоднократно освещалась во многих публикациях известных авторов: Шоломицкого А. А., Могильного С. Г., Лунева А. А., Сотникова А. Л., Петрова В. В., Тюрина С. В., Krystowczyk Z. и др. [30, 51, 58, 64, 89–95, 122, 123, 141–146, 166–170, 179, 185–188, 196–203]. Однако имеется необходимость уточнения алгоритмов определения и оценки точности геометрических параметров объектов мониторинга.

Геометрические параметры конструктивных элементов промышленных агрегатов можно определить на основе математического анализа полученных пространственных данных и трехмерного компьютерного моделирования исследуемых объектов. Важное значение при этом имеет оценка точности параметров, получаемых из математической обработки результатов геодезических измерений [8–11, 19, 31, 32, 59, 60, 65, 80–82, 85, 97, 156–164].

В данном случае ставится задача вычисления и оценки точности геометрических параметров вращающихся промышленных агрегатов по результатам геодезических наблюдений, выполненных в статическом режиме.

Определение геометрических параметров конструктивных элементов обжиговых печей и подобных агрегатов, их формы и положения осей вращения предлагается выполнить с помощью математического анализа пространственных данных и 3D-моделирования объектов мониторинга.

Для определения радиуса встроеной окружности, расположенной в сечении объекта цилиндрической формы, на основе критерия метода наименьших квадратов минимизирована следующая функция:

$$\sum_{i=1}^n \{R_i - f_i(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k)\}^2 = \min, \quad (3.1)$$

где  $R_i$  – результат измерения;

$f_i(l_1, l_2, l_3, \dots, l_k)$  – функция, определяющая значение, которое принимается как истинное (наиболее вероятное) значение результата измерения;

$n$  – количество выполненных измерений.

Данную задачу можно рассматривать как задачу оптимизации с определением параметров  $l_1, l_2, l_3, \dots, l_k$ , отвечающих условию (3.1).

Так как объект наблюдения имеет цилиндрическую форму с определенными точками на его поверхности (рисунок 3.1), то эта задача сводится к аппроксимации фактической кривой, полученной в заданном сечении конструктивного элемента агрегата, с помощью сглаживающей окружности (рисунок 3.2).

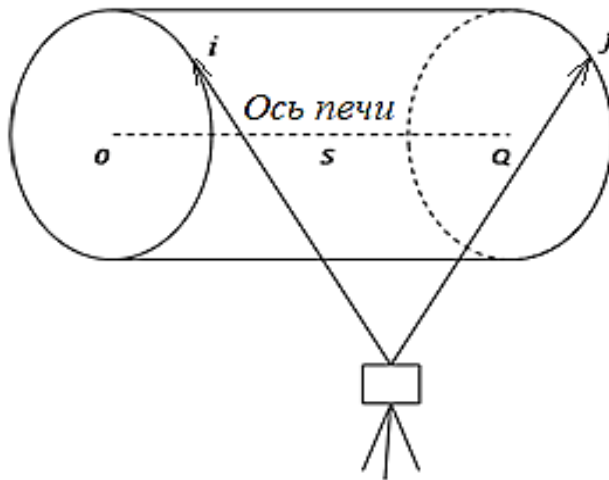


Рисунок 3.1 – Конструктивный элемент обжиговой печи

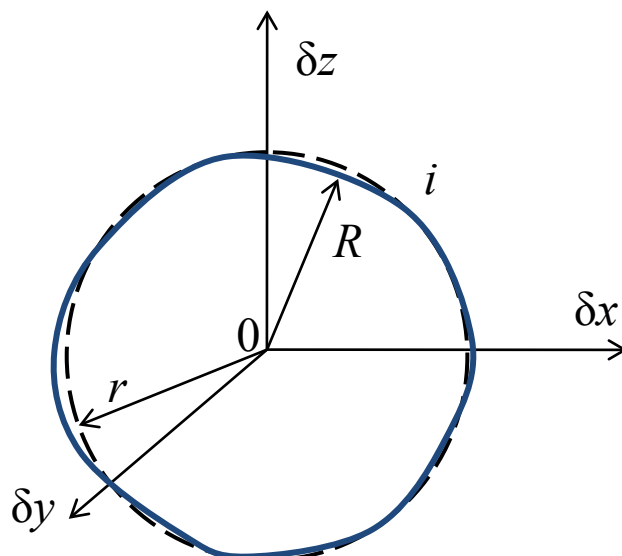


Рисунок 3.2 – Сглаживание фактической кривой с помощью окружности

Для определения радиуса  $r$  аппроксимирующей окружности использована следующая функция:

$$F = \sum_{i=1}^n (R_i - r)^2, \quad (3.2)$$

где  $R_i$  – радиус-вектор текущей точки  $i$  на поверхности исследуемого цилиндрического объекта. По результатам исследования функции (3.2) на экстремум, с учетом критерия (3.1), имеем

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \quad (3.3)$$

или

$$r = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sqrt{\delta x_i^2 + \delta y_i^2 + \delta z_i^2}, \quad (3.4)$$

где  $\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$  – центральные координаты текущей точки  $i$  на поверхности конструктивного элемента агрегата в заданном сечении (см. рисунок 3.2);

$$\left. \begin{aligned} \delta x_i &= x_i - x_O \\ \delta y_i &= y_i - y_O \\ \delta z_i &= z_i - z_O \end{aligned} \right\}. \quad (3.5)$$

В данном случае  $x_i, y_i, z_i$  – координаты точки  $i$ , полученные с помощью безотражательного электронного тахеометра или наземного лазерного сканера;

$x_O, y_O, z_O$  – координаты центра тяжести фактической кривой (точки  $O$ , являющейся центром симметрии сглаживающей окружности на заданном сечении рассматриваемого объекта, см. рисунок 3.2)

$$x_O = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad y_O = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}; \quad z_O = \frac{\sum_{i=1}^n z_i}{n}. \quad (3.6)$$

Среднее квадратическое отклонение  $M$  сглаживающей окружности от точек фактической кривой можно получить из следующей формулы:

$$M = \sqrt{\frac{F}{n}}. \quad (3.7)$$

Ошибка  $M$  показывает точность аппроксимации корпуса промышленного агрегата с помощью цилиндра в заданном его сечении.

Для анализа точности определения радиуса  $r$  аппроксимирующей окружности составлено выражение – уравнение окружности (функция) в пространственной системе координат

$$r = \frac{1}{n} \sum_1^n \sqrt{\{(x_i - x_O)^2 + (y_i - y_O)^2 + (z_i - z_O)^2\}}, \quad (3.8)$$

где  $x_0, y_0, z_0$  – координаты центра тяжести фактической кривой, точки  $O$ , которая является центром симметрии сглаживающей окружности в сечении исследуемого объекта;

$x_i, y_i, z_i$  – координаты точки  $i$  на поверхности объекта в заданном сечении.

По результатам дифференцирования (3.8) и перехода к средним квадратическим ошибкам, с учетом (3.5) и (3.6) получена упрощенная формула для анализа точности определения радиуса сглаживающей окружности

$$m_r^2 = \frac{1}{r^2 \cdot n^4} \sum_{i=1}^n (\delta x_i^2 \cdot m_x^2 + \delta y_i^2 \cdot m_y^2 + \delta z_i^2 \cdot m_z^2), \quad (3.9)$$

где  $m_r$  – СКО определения  $r$ ;

$m_x, m_y, m_z$  – средние квадратические ошибки определения точки  $i$  на поверхности агрегата;

$\delta x_i, \delta y_i, \delta z_i$  – центральные координаты текущей точки  $i$  на поверхности объекта в определенном сечении;

$n$  – количество выполненных измерений.

На основе исследования подтверждается, что точность определения радиуса значительно возрастает при увеличении количества измерений.

В опубликованных материалах [167] утверждается, что отклонения формы конструктивных элементов и самих агрегатов от окружности имеют значительную величину, а их радиусы на отдельных участках могут иметь разницу до 20 мм.

В процессе 3D-моделирования поверхности объекта мониторинга, отличной от цилиндрической, следует определить ее образующую, приближенную к овальной кривой. В качестве такого овала можно применить математическую кривую в виде эллипса, которая с требуемой точностью определяет реальную модель исследуемого объекта.

При определении параметров эллипса примем, что ось  $x$  системы координат направлена вдоль оси вращения промышленного оборудования. Это позволит

рассматривать элементы данной кривой в плоскости  $yz$ , что не повлияет на результаты анализа точности, так как ковариационная матрица инвариантна относительно осей координат.

Далее составлена функция

$$F' = \sum_{i=1}^n (R_i - f(\alpha_i, A, B, \varphi))^2, \quad (3.10)$$

где  $f(\alpha_i, A, B, \varphi)$  – функция, определяющая радиус-вектор кривой второго порядка;  
 $A$  – большая полуось эллипса;  
 $B$  – малая полуось эллипса;  
 $\varphi$  – угол, ориентирующий большую полуось относительно оси  $z$ ;  
 $\alpha_i$  – направление радиуса-вектора  $R_i$  для точки  $i$  на поверхности агрегата.

Для минимизации представленной функции (3.10) и вычисления искомых параметров целесообразно применить градиентные методы, например, метод наискорейшего спуска, обладающий устойчивым решением, который основывается следующем алгоритме:

$$G^{k+1} = G^k - \lambda^k \nabla F^k, \quad (3.11)$$

где  $G^{k+1}$  – результат решения на  $(k+1)$ -итерации;  
 $G^k$  – результат решения на шаге  $k$ ;  
 $\lambda^k$  – положительный параметр, который определяет длину шага движения к минимуму функции;  
 $\nabla F^k$  – градиент функции  $F^k$  на шаге  $k$ , определяющий направление спуска для достижения цели

$$F^k = \sum_{i=1}^n (R_i - f_i(\alpha_i, A^k, B^k, \varphi^k))^2. \quad (3.12)$$

В данном случае  $A^k, B^k, \varphi^k$  – параметры эллипса, полученные на шаге  $k$  во время поиска.

Для ускорения процесса итераций начальные параметры эллипса рекомендуется вычислять по следующим формулам:

$$\left. \begin{aligned} A^o &= \left\{ \frac{1}{n} ([R^2 \cos^2 \alpha] + [R^2 \sin^2 \alpha]) + L \right\}^{1/2} \\ B^o &= \left\{ \frac{1}{n} ([R^2 \cos^2 \alpha] + [R^2 \sin^2 \alpha]) - L \right\}^{1/2} \\ \operatorname{tg} 2\varphi^o &= \frac{2[R^2 \sin \alpha \cos \alpha]}{[R^2 \cos^2 \alpha] - [R^2 \sin^2 \alpha]} \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

где

$$L = \left\{ ([R^2 \cos^2 \alpha] - [R^2 \sin^2 \alpha])^2 + 4[R^2 \sin \alpha \cos \alpha]^2 \right\}^{1/2}. \quad (3.14)$$

В формулах (3.13) и (3.14) квадратные скобки означают сумму всех элементов.

Для примера выполним сглаживание совокупности точек, расположенных на поверхности объекта мониторинга, с помощью подеры эллипса ошибок (математической кривой второго порядка), уравнение которой имеет вид

$$P_i^2 = A^2 \cos^2(\alpha_i - \varphi) + B^2 \sin^2(\alpha_i - \varphi), \quad (3.15)$$

где  $P_i$  – радиус-вектор данной кривой.

Для определения направления наискорейшего спуска составлен градиент функции  $F'$  (3.12):

$$\nabla F' = \begin{bmatrix} \frac{\partial F'}{\partial A} \\ \frac{\partial F'}{\partial B} \\ \frac{\partial F'}{\partial \varphi} \end{bmatrix}. \quad (3.16)$$

С учетом функции (3.15), компоненты, входящие в формулу (3.16), примут вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial F'}{\partial A} &= 2A \sum_{i=1}^n \cos^2(\alpha_i - \varphi) \varepsilon_i \\ \frac{\partial F'}{\partial B} &= 2B \sum_{i=1}^n \sin^2(\alpha_i - \varphi) \varepsilon_i \\ \frac{\partial F'}{\partial \varphi} &= (A^2 - B^2) \sum_{i=1}^n \sin^2(\alpha_i - \varphi) \varepsilon_i \end{aligned} \right\}, \quad (3.17)$$

где

$$\varepsilon_i = 1 + \frac{R_i}{P_i}. \quad (3.18)$$

Следует отметить, что направление спуска и длина шага движения должны уточняться при каждой итерации. При этом длина шага  $\lambda^k$  вычисляется минимизированием функции  $G^{k+1}$  в (3.11) по направлению  $\nabla F^k$ .

При определении коэффициента  $\lambda^k$  использован упрощенный алгоритм [19, 66, 152, 172], основанный на квадратической интерполяции

$$\lambda^k = \frac{F^k W^k}{W^k W^k}, \quad (3.19)$$

где

$$W^k = (\nabla F^k)^T \nabla F^k \cdot F^k. \quad (3.20)$$

Используя разработанные алгоритмы аппроксимации результатов геодезических измерений, можно определить параметры эллипса и окружности, которые послужат основой для 3D-моделирования поверхностей конструктивных элементов обжиговых печей и других агрегатов цилиндрической формы. Полученные таким образом трехмерные модели поверхности объектов мониторинга могут служить основой для вычисления отклонений его геометрических параметров от проектных значений программными средствами на основе сравнительного анализа.

Полученные алгоритмы позволяют получить модели поверхностей, близкие к реальной форме конструктивных элементов обжиговых машин и других промышленных агрегатов, а также выполнять анализ точности их геометрических параметров и определять величину отклонений от проектных данных для последующего объективного принятия мер по устранению недостатков.

### 3.2 Разработка алгоритма для оценки точности определения длины оси вращения обжиговой печи

Рассмотрим методику оценки точности длины осевой линии цилиндрического объекта, заданной координатами центральных точек. За основу примем разработанный выше алгоритм определения координат центров тяжести для объектов цилиндрической формы. Пусть известна ковариационная матрица координат двух центров  $O$  и  $Q$  окружностей такого объекта, полученная по выше приведенным формулам. Запишем эту матрицу для данных пунктов в общем виде:

$$K_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} m_{x_O}^2 & m_{x_O y_O}'' & m_{x_O z_O}'' & m_{x_O x_Q}'' & m_{x_O y_Q}'' & m_{x_O z_Q}'' \\ m_{x_O y_O}'' & m_{y_O}^2 & m_{y_O z_O}'' & m_{y_O x_Q}'' & m_{y_O y_Q}'' & m_{y_O z_Q}'' \\ m_{x_O z_O}'' & m_{y_O z_O}'' & m_{z_O}^2 & m_{z_O x_Q}'' & m_{z_O y_Q}'' & m_{z_O z_Q}'' \\ m_{x_O x_Q}'' & m_{y_O x_Q}'' & m_{z_O x_Q}'' & m_{x_Q}^2 & m_{x_Q y_Q}'' & m_{x_Q z_Q}'' \\ m_{x_O y_Q}'' & m_{y_O y_Q}'' & m_{z_O y_Q}'' & m_{x_Q y_Q}'' & m_{y_Q}^2 & m_{y_Q z_Q}'' \\ m_{x_O z_Q}'' & m_{y_O z_Q}'' & m_{z_O z_Q}'' & m_{x_Q z_Q}'' & m_{y_Q z_Q}'' & m_{z_Q}^2 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

где  $m^2_{x_O}, m^2_{y_O}, m^2_{z_O}, m^2_{x_Q}, m^2_{y_Q}, m^2_{z_Q}$  – квадраты средних квадратических ошибок центральных точек  $O$  и  $Q$ , остальные элементы матрицы (3.21) представляют ковариационные моменты.

Данная матрица  $K_{6 \times 6}$  содержит необходимую информацию для строгой оценки длины осевой линии  $S_{OQ}$  рассматриваемого объекта. На основании определенных свойств ковариационных матриц получена формула для вычисления искомой оценки длины осевой линии

$$m^2_{S_{OQ}} = U_{1 \times 6}^{(S)} \times K_{6 \times 6} \times U_{6 \times 1}^{(S)}, \quad (3.22)$$

где  $m^2_{S_{OQ}}$  – средняя квадратическая ошибка длины пространственной линии;

$U_{1 \times 6}^{(S)}$  – оператор преобразования.

Данный оператор  $U_{1 \times 6}^{(S)}$  представляет частные производные от функции, выражающей длину линии  $S_{OQ}$ , по координатам пунктов  $O(x_O, y_O, z_O)$  и  $Q(x_Q, y_Q, z_Q)$

$$U_{1 \times 6}^{(S)} = \left[ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial x_O} \quad \frac{\partial S_{OQ}}{\partial y_O} \quad \frac{\partial S_{OQ}}{\partial z_O} \quad \frac{\partial S_{OQ}}{\partial x_Q} \quad \frac{\partial S_{OQ}}{\partial y_Q} \quad \frac{\partial S_{OQ}}{\partial z_Q} \right]. \quad (3.23)$$

Выразим длину пространственной линии  $S_{OQ}$  через координаты данных пунктов

$$S_{OQ}^2 = x_Q^2 - 2x_Qx_O + x_O^2 + y_Q^2 - 2y_Qy_O + y_O^2 + z_Q^2 - 2z_Qz_O + z_O^2. \quad (3.24)$$

Далее выполним дифференцирование формулы (3.24) согласно (3.23)

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial S_{OQ}}{\partial x_O} &= \frac{1}{2S_{OQ}} (2x_O - 2x_Q) = -\frac{1}{S_{OQ}} \Delta x_{OQ} \\ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial y_O} &= -\frac{1}{S_{OQ}} \Delta y_{OQ} \\ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial z_O} &= -\frac{1}{S_{OQ}} \Delta z_{OQ} \\ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial x_Q} &= \frac{1}{S_{OQ}} \Delta x_{OQ} \\ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial y_Q} &= \frac{1}{S_{OQ}} \Delta y_{OQ} \\ \frac{\partial S_{OQ}}{\partial z_Q} &= \frac{1}{S_{OQ}} \Delta z_{OQ} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

С учетом частных производных (3.25) формула (3.23) примет вид

$$U_{OQ}^{(S)} = \frac{1}{S_{OQ}} [-\Delta x_{OQ}, -\Delta y_{OQ}, -\Delta z_{OQ}, \Delta x_{OQ}, \Delta y_{OQ}, \Delta z_{OQ}]. \quad (3.26)$$

Таким образом, искомую оценку  $m_{S_{OQ}}$  длины оси вращения цилиндра получим после перемножения матриц в правой части формулы (3.22).

Для упрощения расчетов по оценке точности длины осевой линии цилиндрического объекта предположим, что матрица  $K_{6 \times 6}$  имеет диагональный вид, то есть ошибки положения центральных точек независимы

$$K_{6 \times 6} = \begin{bmatrix} m_{xO}^2 & & & & & \\ & m_{yO}^2 & & & & \\ & & m_{zO}^2 & & & \\ & & & m_{xQ}^2 & & \\ & & & & m_{yQ}^2 & \\ & & & & & m_{zQ}^2 \end{bmatrix}. \quad (3.27)$$

Выполним перемножение данных матриц (3.26) и (3.27) по алгоритму (3.22). Умножение слева на ковариационную матрицу дает

$$U_{1 \times 6}^{(S)} \cdot K_{6 \times 6} = D_{1 \times 6} = \frac{1}{S_{OQ}} \begin{bmatrix} m_{xO}^2 (-\Delta x_{QO}), m_{yO}^2 (-\Delta y_{QO}), m_{zO}^2 (-\Delta z_{QO}) \\ m_{xQ}^2 (\Delta x_{QO}), m_{yQ}^2 (\Delta y_{QO}), m_{zQ}^2 (\Delta z_{QO}) \end{bmatrix}.$$

Далее запишем:

$$m_{S_{OQ}}^2 = D_{1 \times 6} \cdot U_{6 \times 1}^{(S)}$$

или в развернутом виде:

$$m_{S_{OQ}}^2 = \frac{1}{S_{OQ}^2} \left( \Delta x_{QO}^2 (m_{xO}^2 + m_{xQ}^2) + \Delta y_{QO}^2 (m_{yO}^2 + m_{yQ}^2) + \Delta z_{QO}^2 (m_{zO}^2 + m_{zQ}^2) \right). \quad (3.28)$$

Полагая, что ошибки положения центральных точек  $O$  и  $Q$  имеют одинаковые значения и равны некоторой величине  $m$ , формула (3.28) примет вид

$$m_{S_{OQ}}^2 = \frac{2m^2}{S_{OQ}^2} (\Delta x_{QO}^2 + \Delta y_{QO}^2 + \Delta z_{QO}^2) \quad (3.29)$$

или

$$m_{S_{OQ}} = m\sqrt{2}. \quad (3.30)$$

Формула (3.30) является упрощенной по сравнению с формулой (3.28) и, естественно, приводит к приближенным результатам.

Таким образом, ошибка  $m_{S_{OQ}}$  длины оси вращения агрегата при  $m = 3,5$  мм, вычисленная по формуле (3.30), будет равна  $m_{S_{OQ}} = 3,5\sqrt{2} \approx 4,9$  мм, что в относительной мере для расстояния 10 м составит 1 : 2 000.

Для более строгой оценки и надежного анализа точности длин осевых линий цилиндрических объектов следует использовать формулу (3.22) с учетом всех элементов ковариационной матрицы  $K_{6 \times 6}$  координат (3.21). Это позволит также получить корректную оценку взаимного положения центров тяжести цилиндрического объекта в заданных сечениях.

### 3.3 Разработка алгоритма для оценки взаимного положения центральных точек в сечениях цилиндрического объекта

Одним из важных геометрических параметров промышленных агрегатов является пространственное положение осей вращения данных объектов. Для оценки точности пространственного положения оси технологического оборудования целесообразно применить элементы ковариационной матрицы  $K_{6 \times 6}$  (3.21) координат двух центров вращения, расположенных в точках  $O$  и  $Q$ .

Центральные точки сечений цилиндрического объекта определяют пространственное положение оси вращения, которое зависит от ошибок взаимного

положения точек, образующих линию оси, то есть ошибок в длине и направлении этой линии.

Погрешности взаимного положения двух пространственных пунктов можно выразить посредством приращений их координат. Согласно общему алгоритму линейного преобразования корреляционных матриц, можно записать следующую формулу для оценки взаимного положения центральных точек, расположенных в сечениях объекта цилиндрической формы:

$$K_{3 \times 3}^{\Delta} = U_{3 \times 6}^{\Delta} K_{6 \times 6} U_{6 \times 3}^{\Delta}, \quad (3.31)$$

где  $K_{6 \times 6}$  – корреляционная матрица центральных точек  $O$  и  $Q$ ;

$U_{3 \times 6}^{\Delta}$  – преобразующая матрица (матрица Якоби).

$$U_{3 \times 6}^{\Delta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial x_O} & \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial y_O} & \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial z_O} & \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial x_Q} & \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial y_Q} & \frac{\partial \Delta x_{OQ}}{\partial z_Q} \\ \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial x_O} & \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial y_O} & \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial z_O} & \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial x_Q} & \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial y_Q} & \frac{\partial \Delta y_{OQ}}{\partial z_Q} \\ \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial x_O} & \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial y_O} & \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial z_O} & \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial x_Q} & \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial y_Q} & \frac{\partial \Delta z_{OQ}}{\partial z_Q} \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Поскольку

$$\left. \begin{aligned} \Delta x_{OQ} &= x_Q - x_O \\ \Delta y_{OQ} &= y_Q - y_O \\ \Delta z_{OQ} &= z_Q - z_O \end{aligned} \right\}, \quad (3.33)$$

тогда, после дифференцирования имеем

$$U_{3 \times 6}^{\Delta} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.34)$$

В результате перемножения матриц по алгоритму (3.31) выразим искомую матрицу  $K_{3 \times 3}^{\Delta}$  в общем виде

$$K_{3 \times 3}^{\Delta} = \begin{bmatrix} m_{\Delta x OQ}^2 & m''_{\Delta xy OQ} & m''_{\Delta xz OQ} \\ & m_{\Delta y OQ}^2 & m''_{\Delta yz OQ} \\ & & m_{\Delta z OQ}^2 \end{bmatrix}. \quad (3.35)$$

Здесь элементы по главной диагонали данной матрицы представляют квадраты ошибок приращений координат. Отсюда ошибка взаимного положения центральных точек цилиндра равна

$$M^{\Delta} = \sqrt{m_{\Delta x OQ}^2 + m_{\Delta y OQ}^2 + m_{\Delta z OQ}^2}, \quad (3.36)$$

где

$$\left. \begin{aligned} m_{\Delta x OQ}^2 &= m_{xO}^2 - 2m_{xOxQ} + m_{xQ}^2 \\ m_{\Delta y OQ}^2 &= m_{yO}^2 - 2m_{yOyQ} + m_{yQ}^2 \\ m_{\Delta z OQ}^2 &= m_{zO}^2 - 2m_{zOzQ} + m_{zQ}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (3.37)$$

Полагая, что корреляционная матрица  $K_{6 \times 6}$  является диагональной, получим упрощенную формулу для оценки взаимного положения центральных точек. Предварительно обозначим

$$\left. \begin{aligned} U_{3 \times 6}^{\Delta} \cdot K_{6 \times 6} &= V_{3 \times 6} \\ K_{3 \times 3}^{\Delta} &= V_{3 \times 6} \cdot U_{6 \times 3}^{\Delta} \end{aligned} \right\}.$$

Затем умножим преобразующую матрицу  $U_{3 \times 6}^{\Delta}$  слева и справа на корреляционную матрицу  $K_{6 \times 6}$  диагонального вида

$$U_{3 \times 6}^{\Delta} \times K_{6 \times 6} = V_{3 \times 6} = \begin{bmatrix} -m_{xO}^2 & 0 & 0 & m_{xQ}^2 & 0 & 0 \\ 0 & -m_{yO}^2 & 0 & 0 & m_{yQ}^2 & 0 \\ 0 & 0 & -m_{zO}^2 & 0 & 0 & m_{zQ}^2 \end{bmatrix};$$

$$V_{3 \times 6} \times U_{6 \times 3}^{\Delta} = K_{3 \times 3}^{\Delta} = \begin{bmatrix} (m_{xO}^2 + m_{xQ}^2) & 0 & 0 \\ & (m_{yO}^2 + m_{yQ}^2) & 0 \\ & & (m_{zO}^2 + m_{zQ}^2) \end{bmatrix}.$$

Таким образом, получим

$$M^{\Delta} = \sqrt{(m_{xO}^2 + m_{xQ}^2) + (m_{yO}^2 + m_{yQ}^2) + (m_{zO}^2 + m_{zQ}^2)}, \quad (3.38)$$

где  $M^{\Delta}$  – ошибка взаимного положения центральных точек  $O$  и  $Q$  объекта в 3D-пространстве.

Иначе, погрешность  $M_{вз}$  взаимного положения конечных точек  $O$  и  $Q$  на оси агрегата можно выразить формулой

$$M_{вз} = \sqrt{SpK_{3 \times 3}^{\Delta}}, \quad (3.39)$$

где  $SpK_{3 \times 3}^{\Delta}$  – след ковариационной матрицы  $K_{3 \times 3}^{\Delta}$  (3.35).

При равноточных измерениях получим упрощенную формулу для априорной оценки точности пространственного положения осевой линии цилиндрического объекта

$$M^{\Delta} = m \sqrt{6}. \quad (3.40)$$

Отсюда ошибка взаимного положения центральных точек  $O$  и  $Q$  цилиндрического объекта при тех же параметрах, принятых выше, составляет

$$M^{\Delta} = m \sqrt{6} = 3,5 \sqrt{6} \approx 8,6 \text{ мм.}$$

Данная величина 8,6 мм является суммарной ошибкой взаимного положения точек  $O$  и  $Q$ , обусловленной погрешностями длины и направления оси вращения агрегата.

Определим среднюю квадратическую ошибку направления осевой линии между двумя смежными сечениями конструктивного элемента промышленного агрегата, дирекционный угол  $a$  которой равен

$$a = \arctg \frac{y_Q - y_O}{x_Q - x_O}. \quad (3.41)$$

На основании определенных свойств ковариационной матрицы координат получено в общем виде

$$m^2_{a_{OQ}} = U_{1 \times 4}^{(a)} \cdot K_{4 \times 4} \cdot U_{4 \times 1}^{(a)}, \quad (3.42)$$

где  $m_{a_{OQ}}$  – средняя квадратическая погрешность дирекционного угла осевой линии агрегата;

$U_{1 \times 4}^{(a)}$  – оператор преобразования, который представляет частные производные от функции, выражающей дирекционный угол  $a$  данной линии, по координатам пунктов  $O(x_O, y_O)$  и  $Q(x_Q, y_Q)$

$$U_{1 \times 4}^{(a)} = \left[ \frac{\partial a_{OQ}}{\partial x_O} \quad \frac{\partial a_{OQ}}{\partial y_O} \quad \frac{\partial a_{OQ}}{\partial x_Q} \quad \frac{\partial a_{OQ}}{\partial y_Q} \right]. \quad (3.43)$$

После дифференцирования формулы (3.41) согласно (3.43) получим

$$U_{1 \times 4}^{(a)} = \frac{1}{S_{ij}} [\sin a \quad -\cos a \quad -\sin a \quad \cos a].$$

На основе формулы (3.42) получим искомую оценку направления осевой линии агрегата

$$m^2_{a_{OQ}} = \frac{\rho^2}{S_{OQ}^2} \left( \sin^2 a m^2_{x_O} + \cos^2 a m^2_{y_O} + \sin^2 a m^2_{x_Q} + \cos^2 a m^2_{y_Q} \right). \quad (3.44)$$

При равноточных измерениях формула примет следующий вид:

$$m_a = \frac{m}{S_{OQ}} \rho \sqrt{2}, \quad (3.45)$$

где  $m$  – ошибка определения координат точек  $O$  и  $Q$ .

При условии, что  $m = 3,5$  мм, как было принято выше, получим следующее значение:  $m_{a_{OQ}} = 1,7'$  для линии длиной  $S_{OQ} = 10$  м.

Погрешность в направлении оси объекта является одним из контролируемых параметров и требует точности определения уклонов для горизонтально расположенных объектов и кренов для вертикальных сооружений.

### 3.4 Исследование влияния нагрева обжиговой печи на прямолинейность ее оси вращения

В металлургической, цементной и горной промышленности применяются крупногабаритные вращающиеся агрегаты сложных конструкций и разной длины от 30 до 250 м. Особенностью данного оборудования является то, что в процессе эксплуатации его корпус может нагреваться до высоких температур (до 500 °С). На этапе ввода агрегата в промышленную эксплуатацию или после проведения ремонтных работ (замене конструктивных элементов), которые выполнялись на остановленном и охлажденном оборудовании, необходимо выполнить «холодную» выверку промышленного объекта для определения положения его оси.

На практике доказано, что после выравнивания оси агрегата в холодном состоянии требуется ее корректировка после нагрева. В литературе [154] представлен упрощенный алгоритм, учитывающий только температурное расширение бандажа вращающейся печи. Исследование, приведенное в [203], предполагает более точный учет деформации оси промышленного агрегата в результате нагрева его корпуса. По итогам исследований выявлено, что на пятиопорном промышленном оборудовании отклонения оси вращения при нагревании объекта до рабочей

температуры могут составлять до 10 мм, что намного превышает допустимое значение  $\pm 3$  мм, установленное [154]. На практике методика коррекции вращающихся промышленных агрегатов из-за температурных деформаций практически не применялась, это объяснялось трудностями измерения температуры на вращающемся объекте. Появление бесконтактных способов измерения температуры в дискретных точках пирометром или некоторого участка тепловизором позволило решить эту проблему. Теперь по итогам измерений значений температуры можно строить температурные модели вращающихся агрегатов и решать на их основе прикладные задачи [50, 111].

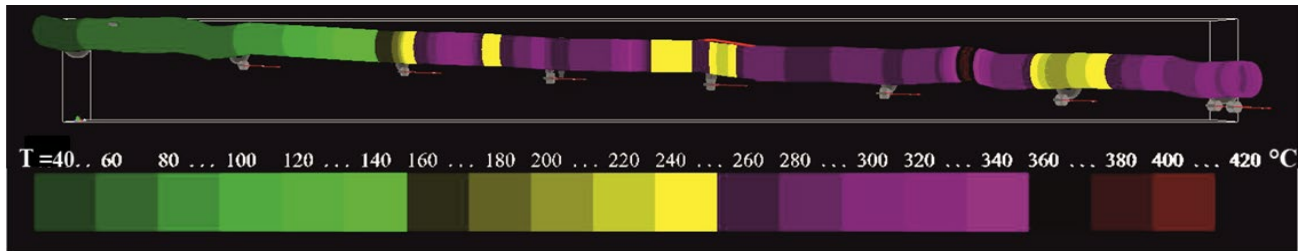
Задача данного исследования – определение граничных условий, при которых следует производить коррекцию осей промышленного оборудования из-за нагрева, после этапа его «холодной» выверки [23]. Решение задачи основано на результатах производственных работ, выполненных при геодезическом мониторинге вращающихся печей (ВП) на АО «Искитимцемент» в 2016 г. (ВП № 6, рисунок 3.3) и на АО «Ачинскцемент» в 2017 г. (ВП № 3).



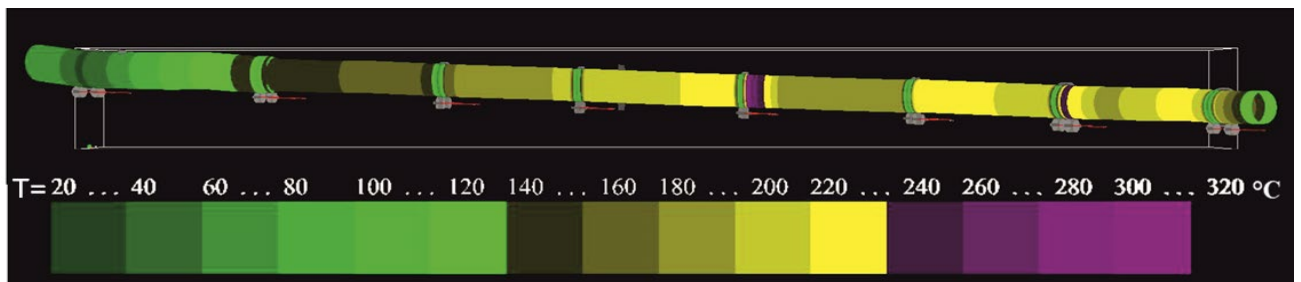
Рисунок 3.3 – Измерения элементов ВП № 6

На производственных участках выполнялись дискретные измерения температуры корпусов вращающихся печей с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ , для этого использовался пирометр Raytek Raynger ST, который имеет одноточечный лазерный прицел, позволяющий выделять нужную область измерений. Замеры температуры произ-

водились для каждого конструктивного элемента технологического оборудования (обечаек, бандажей и роликов) во время нормальной работы агрегата. Всего было выполнено порядка 100 измерений для каждого объекта мониторинга. По итогам наблюдений построены линейные температурные модели промышленных агрегатов, показанные на рисунке 3.4.



*a)*



*б)*

Рисунок 3.4 – Нагрев корпуса обжиговой печи ( $T$ , °C):

*a)* Искитимцемент ВП № 6; *б)* Ачинскцемент ВП № 3

Различие температурных моделей близких по размеру вращающихся обжиговых печей может быть вызвано качеством их футеровки. Для ВП № 3 Ачинскцемент определена более низкая температура ее корпуса, чем для печи ВП № 6 Искитимцемент. Это связано с тем, что за три месяца до исследований производились ремонтные работы на ВП № 3, включающие восстановление формы вращающихся конструктивных элементов агрегата, частичный ремонт футеровки и «холодную» выверку оборудования. Для ВП № 6 Искитимцемент получены более высокие показатели температуры корпуса, почти на 100°С, и выявлены температурные аномалии в зоне обжига. Полученные результаты измерений свидетельствуют о плохом состо-

янии огнеупорной футеровки промышленного агрегата, который часто останавливался для восстановления разрушенных и выпавших частей футеровки.

На основе температурных характеристик выполнено моделирование вертикальных деформаций осей вращения работающих агрегатов, идеально выравненных при «холодной» выверке. От нагрева корпуса печи его радиус увеличится на  $\Delta R$ , по правилу сложения векторов получено изменение высоты центра бандажа  $\Delta H$  по следующей формуле:

$$\Delta H = \alpha R \Delta T \cos \beta, \quad (3.46)$$

где  $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}$  – температурный коэффициент линейного расширения для стали,  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$R$  – радиус бандажа, мм;

$\Delta T$  – разница температур между самым холодным бандажом, обычно это бандаж № 1, и текущим бандажом,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$\beta$  – половина центрального угла (рисунок 3.5), для печей 28–32 $^{\circ}$ , в расчетах принято среднее значение  $\beta = 30^{\circ}$ .

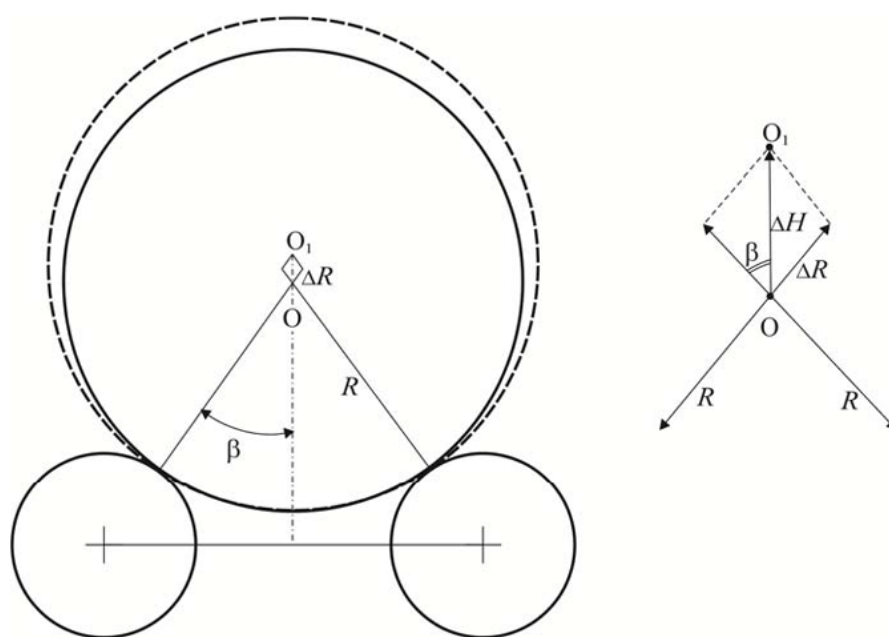


Рисунок 3.5 – Модель вертикальных деформаций

На рисунке 3.5 точка  $O$  показывает центр вращения бандажа после «холодной» выверки промышленного агрегата;  $O_1$  – центр вращения бандажа после нагрева корпуса печи до рабочей температуры; окружность, показанная штриховой линией, – сечение бандажа после нагрева;  $\Delta H$  – смещение центра бандажа, параметр, определяющий деформации оси промышленного агрегата в вертикальной плоскости.

На рисунке 3.6 показан график вертикальных деформаций оси печи № 6 при нагревании объекта до рабочей температуры.

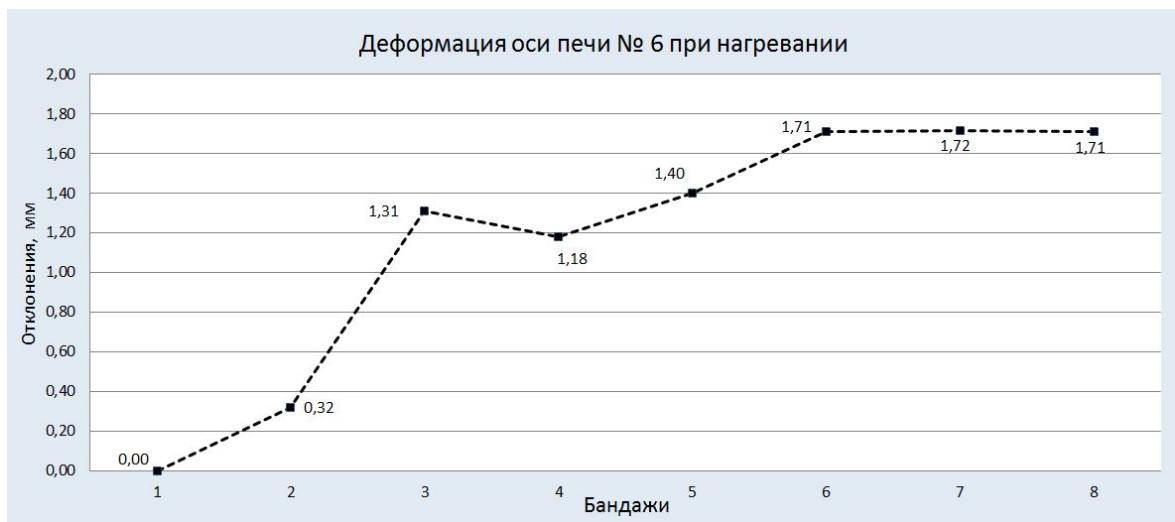


Рисунок 3.6 – Вертикальные температурные деформации оси ВП № 6

В таблице 3.1 представлены расчеты вертикальных температурных деформаций для обжиговой печи № 6.

Таблица 3.1 – Геометрические параметры обжиговой печи № 6

Бандаж	1	2	3	4	5	6	7	8
$R$ , мм	2 679,7	2 661,5	2 730,4	2 652,6	2 657	3 037,1	3 046,6	3 029,9
$T$ , °С	43,0	53,0	83,0	80,0	87,0	90,0	90,0	90,0
$\Delta T$ , °С	0,0	10,0	40,0	37,0	44,0	47,0	47,0	47,0
$\Delta H$ , мм	0,0	0,3	1,3	1,2	1,4	1,7	1,7	1,7

На рисунке 3.7 показаны вертикальные температурные деформации оси ВП № 3, расчеты приведены в таблице 3.2.

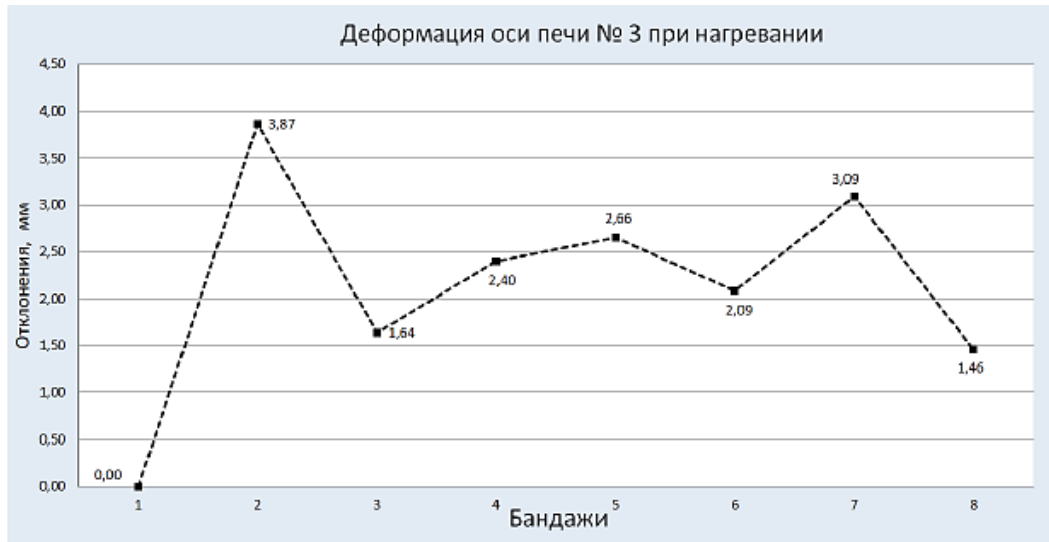


Рисунок 3.7 – Деформация оси обжиговой печи № 3 при нагревании

Таблица 3.2 – Геометрические параметры обжиговой печи № 3

Бандаж	1	2	3	4	5	6	7	8
$R$ , мм	3 150,1	3 050,7	3 035,2	3 041,7	3 044,0	3 047,1	3 101,8	3 048,0
$T$ , °C	37,0	98,0	63,0	75,0	79,0	70,0	85,0	60,0
$\Delta T$ , °C	0,0	61,0	26,0	38,0	42,0	33,0	48,0	23,0
$\Delta H$ , мм	0,0	3,9	1,6	2,4	2,7	2,1	3,1	1,5

Исследования показали нелинейный характер температурных деформаций. Это связано с неравномерным нагревом конструктивных элементов вращающихся агрегатов, который может быть вызван несколькими причинами. Первая причина – это качество и техническое состояние огнеупорной футеровки печи. При эксплуатации вращающегося агрегата футеровка изнашивается неравномерно по длине объекта, это, в свою очередь, приводит к неравномерному нагреванию его конструктивных элементов. Вторая причина заключается в конструктивных особенностях бандажей, например, «плавающая» конструкция бандажей уменьшает площадь контакта с подбандажной обечайкой, нагретой до высоких температур, и поэтому нагревается слабее. И наоборот, сварные бандажи имеют большую площадь соприкосновения с подбандажной обечайкой, и в связи с этим нагреваются гораздо сильнее. Когда на агрегате имеются бандажи двух видов, они будут

иметь большой перепад температур и вызывать неравномерные деформации конструктивных элементов. На печи № 3 имеется вварной бандаж № 2, высокая температура которого приводит к существенным деформации оси агрегата на 3,9 мм (см. рисунок 3.7).

В результате моделирования вертикальных деформаций осей промышленных агрегатов, нагретых до рабочей температуры, получены значения деформаций в большинстве меньше допустимых величин  $\pm 3,0$  мм, определенных нормативными документами [154, 130–132], что свидетельствует о том, что корректировка печей не требуется. Однако необходимо учесть, что эти допуски установлены почти 30 лет назад, и с тех пор появились новые технологии и способы, основанные на лазерных измерениях и позволяющие определить координаты центров конструктивных элементов агрегатов с точностью  $\pm 1,0$  мм [205, 166]. Поэтому деформации размером 2,0–3,9 мм не выглядят маленькими и допустимыми. В публикациях [73, 130] отмечается, что отклонение осей промышленного оборудования на 2–3 мм от прямой приводит к увеличению потребляемой мощности привода агрегата и способствует быстрому разрушению огнеупорной футеровки.

Предлагается следующий алгоритм действий после производства «холодной» выверки технологического оборудования. После разогрева вращающейся печи и выхода ее на рабочий режим требуется выполнить измерения температуры бандажей агрегата и моделирование температурных деформаций осей (как показано на рисунках 3.6 и 3.7). Если график деформаций имеет вид, близкий к линейному, с точностью до  $\pm 1,0$  мм, то корректировку положения оси производить не следует. При отклонениях более  $\pm 1,0$  мм необходимо выполнить оптимальную корректировку промышленного агрегата, при этом вычислить такое положение оси, чтобы передвигек роликов было минимальное количество [23].

Вторым вариантом этой методики может быть производство технического аудита технологического оборудования по сокращенному способу «горячей» выверки [166], в котором предполагается только измерение бандажей агрегата.

### 3.5 Выводы по третьему разделу

На основе математического анализа пространственных данных и полученных алгоритмов выполнено исследование точности определения геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы по результатам геодезических измерений.

Для моделирования поверхности, близкой к цилиндрической, предложен способ определения ее образующей на основе кривой второго порядка. В качестве такой кривой может служить математическая кривая в виде эллипса, которая с максимальной точностью определяет реальную модель объекта.

Предложенные алгоритмы аппроксимации результатов геодезических измерений, представленные в диссертационной работе, позволяют определить параметры эллипса и его подеры, которые являются образующими для построения оптимальной поверхности объекта мониторинга. Полученные таким образом овалы модели поверхности агрегата могут служить основой для определения и анализа отклонений его параметров от проектных данных.

Результаты исследования влияния нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения показали, что неравномерный нагрев вращающегося промышленного агрегата может приводить к существенным деформациям оси его вращения. Предложены алгоритмы определения и анализа вертикальных температурных деформаций оси вращения печи, даны рекомендации по «горячей» выверке промышленного оборудования.

## 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРУПНОГАБАРИТНОГО ПРОМЫШЛЕННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ДАННЫМ НА ОСНОВЕ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ

### 4.1 Априорная оценка точности определяемых элементов трехмерных моделей

Трехмерное моделирование и анализ деформаций по пространственным данным в инженерно-геодезической и маркшейдерской практике стало возможным благодаря развитию программно-технических комплексов и применению современной измерительной и вычислительной техники. Для определения геометрических параметров инженерных сооружений можно использовать наземные лазерные сканеры. Этому вопросу посвящен целый ряд публикаций [57, 59, 61–63, 136 и др.] Однако, несмотря на активное развитие лазерной локации в Российской Федерации и внедрение трехмерных лазерных сканеров, данная технология является пока еще дорогостоящей и требующей высокой квалификации специалистов.

В настоящее время на российском рынке появился ряд моделей безотражательных электронных тахеометров (БЭТ), позволяющих использовать их наряду с лазерными сканерами с достаточной точностью и эффективностью [16, 94, 108, 140, 174, 175, 190]. При этом наибольшее значение приобретают методы рациональной обработки пространственных данных.

Для обработки данных геодезического мониторинга, полученных с помощью БЭТ, и выполнения 3D-моделирования становится возможным использовать специальное программное обеспечение, предназначенное для 3D сканеров [62, 96]. К таким программам относятся: Credo 3D Scan, TerraScan, RapidForm, 3DReshaper, Cyclone и другие, позволяющие манипулировать большими объемами пространственных данных.

Пространственное положение инженерных сооружений вообще, и промышленного оборудования в частности, как правило, определяют способом полярной съемки на основе угловых и линейных измерений.

На рисунке 4.1 показаны следующие измерения:  $\beta_i$  – горизонтальный угол;  $\nu_i$  – угол наклона;  $S_i$  – наклонное расстояние до определяемой точки  $i$ .

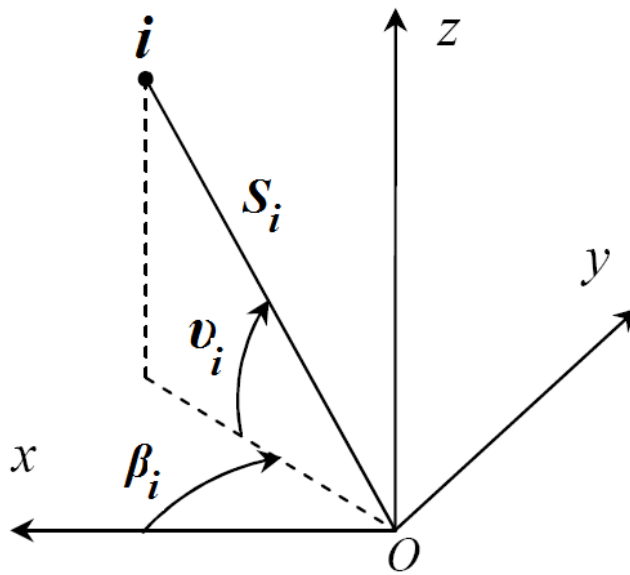


Рисунок 4.1 – Определение пространственного положения точки  $i$

Для анализа точности пространственного положения определяемых точек, расположенных на поверхности наблюдаемых промышленных объектов, следует рассмотреть априори действие случайных ошибок измерений, выполняемых при геодезическом мониторинге.

Как известно, наиболее полным критерием оценки точности положения пункта в 3D-пространстве является ковариационная матрица координат

$$K_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} m_x^2 & m_{xy}'' & m_{xz}'' \\ & m_y^2 & m_{yz}'' \\ & & m_z^2 \end{bmatrix},$$

где  $m_x, m_y, m_z$  – средние квадратические ошибки определяемой точки на поверхности объекта по осям координат;  $m''_{xy}, m''_{xz}, m''_{yz}$  – корреляционные моменты.

Установим элементы матрицы  $K_{3 \times 3}$ , которые определяют погрешности функций измеряемых величин, то есть координат  $X_i, Y_i$  и  $Z_i$  точек на поверхности исследуемого объекта. Запишем такие функции

$$\left. \begin{aligned} f x_i &= X_i = X_A + S_i \cdot \cos \beta_i \cos \nu_i; \\ f y_i &= Y_i = Y_A + S_i \cdot \sin \beta_i \cos \nu_i; \\ f z_i &= Z_i = Z_A + S_i \cdot \sin \nu_i. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Для оценки этих функций напишем в общем виде

$$\left. \begin{aligned} m_{x_i}^2 &= \left( \frac{\partial f x_i}{\partial S_i} \right)^2 m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial f x_i}{\partial \beta_i} \right)^2 m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial f x_i}{\partial \nu_i} \right)^2 m_{\nu_i}^2; \\ m_{y_i}^2 &= \left( \frac{\partial f y_i}{\partial S_i} \right)^2 m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial f y_i}{\partial \beta_i} \right)^2 m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial f y_i}{\partial \nu_i} \right)^2 m_{\nu_i}^2; \\ m_{z_i}^2 &= \left( \frac{\partial f z_i}{\partial S_i} \right)^2 m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial f z_i}{\partial \beta_i} \right)^2 m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial f z_i}{\partial \nu_i} \right)^2 m_{\nu_i}^2, \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где  $m_{S_i}$  – средняя квадратичная ошибка измерения длины линии  $S_i$ ;

$m_{\beta_i}$  – средняя квадратичная ошибка измерения горизонтального угла  $\beta_i$ ;

$m_{\nu_i}$  – средняя квадратичная ошибка измерения угла наклона  $\nu_i$ .

После дифференцирования функций (4.1) и подстановки результатов в формулы (4.2), получены искомые диагональные элементы ковариационной матрицы  $K_{3 \times 3}$

$$\left. \begin{aligned}
 m_{x_i}^2 &= \cos^2 \beta_i \cos^2 v_i m_{S_i}^2 + S_i^2 \sin^2 \beta_i \cos^2 v_i \frac{m_{\beta_i}^2}{\rho^2} + S_i^2 \cos^2 \beta_i \sin^2 v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}; \\
 m_{y_i}^2 &= \sin^2 \beta_i \cos^2 v_i m_{S_i}^2 + S_i^2 \cos^2 \beta_i \cos^2 v_i \frac{m_{\beta_i}^2}{\rho^2} + S_i^2 \sin^2 \beta_i \sin^2 v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}; \\
 m_{z_i}^2 &= \sin^2 v_i m_{S_i}^2 + S_i^2 \cos^2 v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Отсюда общая ошибка  $M_{xyz}$ , в виде радиуса сферы вероятного положения точки, равна

$$M_{xyz}^2 = m_{S_i}^2 + \frac{S_i^2}{\rho^2} (m_{\beta_i}^2 \cos^2 v_i + m_{v_i}^2). \quad (4.4)$$

Для определения недиагональных элементов ковариационной матрицы  $K_{3 \times 3}$  напишем в общем виде:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{xy}^2 &= \left( \frac{\partial fx}{\partial S_i} \right) \left( \frac{\partial fy}{\partial S_i} \right) m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial fx}{\partial \beta_i} \right) \left( \frac{\partial fy}{\partial \beta_i} \right) m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial fx}{\partial v_i} \right) \left( \frac{\partial fy}{\partial v_i} \right) m_{v_i}^2; \\
 m_{xz}^2 &= \left( \frac{\partial fx}{\partial S_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial S_i} \right) m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial fx}{\partial \beta_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial \beta_i} \right) m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial fx}{\partial v_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial v_i} \right) m_{v_i}^2; \\
 m_{yz}^2 &= \left( \frac{\partial fy}{\partial S_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial S_i} \right) m_{S_i}^2 + \left( \frac{\partial fy}{\partial \beta_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial \beta_i} \right) m_{\beta_i}^2 + \left( \frac{\partial fy}{\partial v_i} \right) \left( \frac{\partial fz}{\partial v_i} \right) m_{v_i}^2.
 \end{aligned} \right\} \quad (4.5)$$

После определения частных производных и подстановки их в формулы (4.5) получим

$$\left. \begin{aligned}
 m''_{xy} &= \cos \beta_i \sin v_i \sin \beta_i \cos v_i m_{S_i}^2 - S_i^2 \sin \beta_i \cos^2 v_i \cos \beta_i \frac{m_{\beta_i}^2}{\rho^2} + \\
 &+ S_i^2 \cos \beta_i \sin^2 v_i \sin \beta_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}; \\
 m''_{xz} &= \cos \beta_i \sin^2 v_i m_{S_i}^2 - S_i^2 \cos \beta_i \sin v_i \cos v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}; \\
 m''_{yz} &= \sin \beta_i \cos v_i \sin v_i m_{S_i}^2 - S_i^2 \sin \beta_i \sin v_i \cos v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}.
 \end{aligned} \right\} (4.6)$$

Выше приведенные формулы позволяют определить точность пространственного положения точек, расположенных на поверхности исследуемого объекта (например, при выверке вращающейся печи). Кроме того, данные формулы являются основой для анализа ошибок определения радиуса сглаживающей окружности, аппроксимирующей объект цилиндрической формы на заданном сечении его поверхности.

Как было получено ранее в данной работе, радиус  $r$  аппроксимирующей окружности в сечении объекта цилиндрической формы вычисляется по следующей формуле

$$r = \frac{1}{n} \sum_1^n \sqrt{\{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2\}},$$

где  $x_i, y_i, z_i$  — координаты точки  $i$  на поверхности агрегата цилиндрической формы;

$x_0, y_0, z_0$  — координаты центра сглаживающей окружности на заданном сечении объекта

$$x_O = \frac{[x]}{n}; \quad y_O = \frac{[y]}{n}; \quad z_O = \frac{[z]}{n}.$$

При равноточных измерениях можно утверждать, что ошибки положения центральной точки в заданном сечении объекта выражаются следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} m_{xO} &= \frac{m_{x_i}}{\sqrt{n}}; \\ m_{yO} &= \frac{m_{y_i}}{\sqrt{n}}; \\ m_{zO} &= \frac{m_{z_i}}{\sqrt{n}}. \end{aligned} \right\}$$

где  $m_{x_i}, m_{y_i}, m_{z_i}$  – ошибки определения координат точек, расположенных на поверхности агрегата, вычисляемые по формулам (4.3);

$n$  – количество точек.

Тогда общая средняя квадратическая ошибка определения центра сглаживающей окружности равна

$$M_o = \sqrt{m_{x_o}^2 + m_{y_o}^2 + m_{z_o}^2}$$

или

$$M_o = \sqrt{\frac{1}{n}(m_{x_i}^2 + m_{y_i}^2 + m_{z_i}^2)},$$

где  $M_o$  – радиус сферы вероятного положения определяемой точки в трехмерном пространстве.

Если принять априори, что точность определения координат на поверхности цилиндрического агрегата с помощью БЭТ в безотражательном режиме равна  $m_{x_i} = m_{y_i} = m_{z_i} = 5$  мм, то ошибки координат его центра тяжести, вычисляемого по шести измерениям, можно считать равными  $m_{x_o} = m_{y_o} = m_{z_o} = 2$  мм. Тогда общая средняя квадратическая ошибка определения центра сглаживающей окружности равна  $M_o = 3,5$  мм при минимальном количестве измерений.

Для оценки точности радиуса встроенной окружности имеем

$$m_r^2 = \frac{1}{r^2 n^4} \left\{ \sum_{i=1}^n (x_i - x_o)^2 m_x^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - y_o)^2 m_y^2 + \sum_{i=1}^n (z_i - z_o)^2 m_z^2 \right\}, \quad (4.7)$$

где  $m_r$  – средняя квадратическая ошибка определения радиуса аппроксимирующей окружности;

$m_x, m_y, m_z$  – средние квадратические ошибки определения координат точек на поверхности объекта;

$x_i, y_i, z_i$  – координаты точки  $i$  на поверхности агрегата.

Ошибка  $m_r$  определения радиуса  $r$  сглаживающей окружности, как видно из формулы (4.7), зависит от точности измерений, их количества  $n$  и размеров цилиндрического объекта.

В таблице 4.1 приведены ошибки определения радиуса цилиндрического объекта диаметром  $D = 5$  м ( $r = 2,5$  м) при условии, что точность определения координат на поверхности агрегата равна  $m = 5$  мм.

Таблица 4.1 – Ошибки радиуса при разном количестве  $n$  измерений

Ошибка определения радиуса	$D = 5$ м; $m = 5$ мм				
	$n = 3$	$n = 6$	$n = 12$	$n = 18$	$n = 24$
$m_r$ , мм	1,65	0,34	0,07	0,04	0,02

На рисунке 4.2 представлен график накопления ошибок определения радиуса сглаживающей окружности.

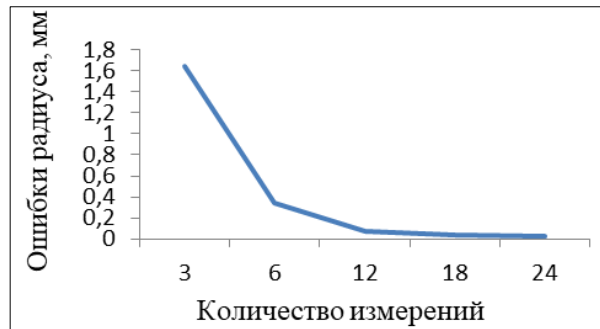


Рисунок 4.2 – Зависимость ошибок определения радиуса от количества выполненных измерений

Очевидно, что лучшие результаты аппроксимации и определения радиуса или диаметра кругового сечения достигаются по 24 измеренным точкам, равномерно расположенным по окружности.

#### 4.2 3D-моделирование крупногабаритных промышленных объектов с помощью программы Cyclone

Для 3D-моделирования технологического оборудования и определения геометрических параметров промышленных агрегатов использовался программный комплекс Cyclone фирмы Leica Geosystems [96, 195]. Программное обеспечение Cyclone предназначено для манипуляции огромным количеством пространственных данных, то есть облаком точек, полученных дистанционно лазерным сканером. В ряде случаев такое множество точек является избыточным, поэтому с помощью БЭТ могут быть получены только необходимые данные, которые легко интерпретировать и визуализировать в программе Cyclone.

В данном случае предметом исследования является применение программы Cyclone при мониторинге крупногабаритных агрегатов по геодезическим данным, полученным с помощью БЭТ в безотражательном режиме, не требующем отражателей или призм. Вместе с тем, ставится задача по проверке алгоритмов, разработанных в диссертации для определения геометрических параметров крупногабаритного промышленного оборудования, а именно обжиговых печей, барабанных

сушилок, объектов нефтегазовой промышленности, вертикальных и горизонтальных резервуаров, турбоагрегатов и других сооружений.

Схема построения трехмерных моделей в программном комплексе Leica Cyclone представлена на рисунке 4.3.

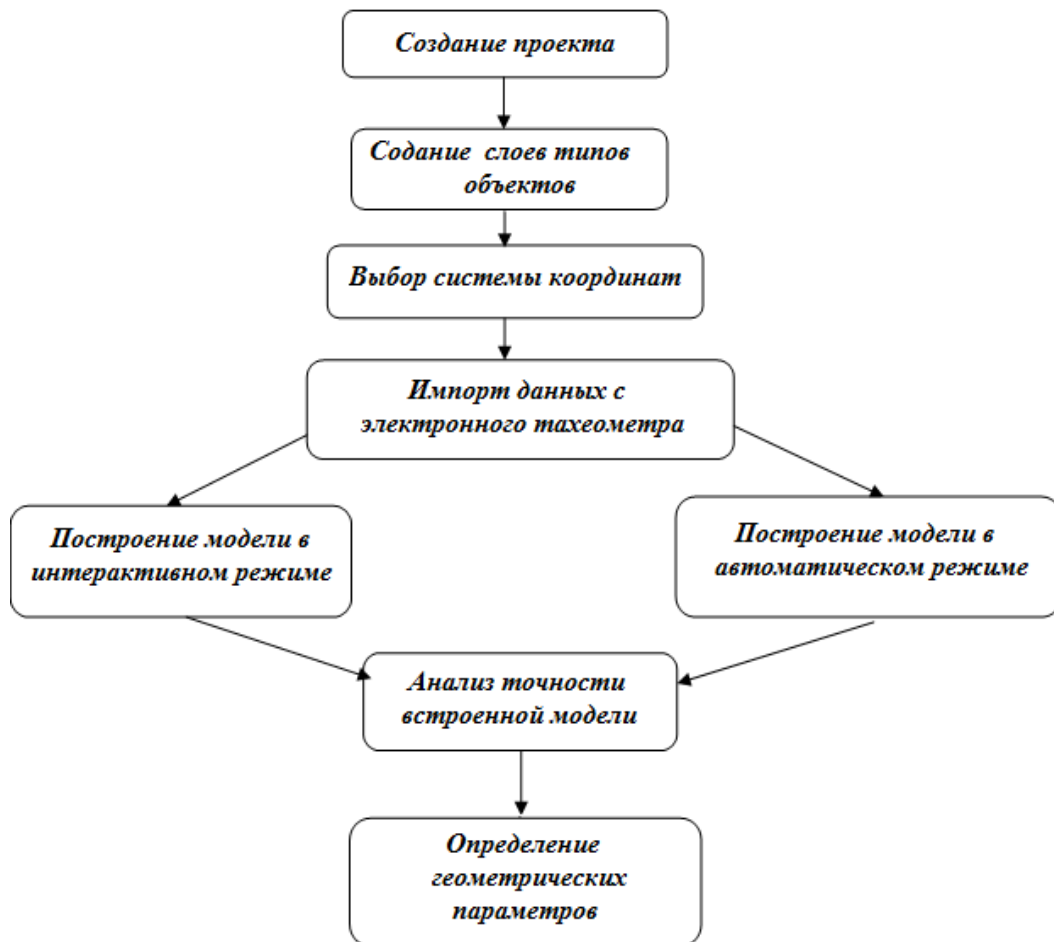


Рисунок 4.3 – Схема построения трехмерных моделей в Cyclone

Рассмотрим сначала решение этой задачи на основе моделей объектов цилиндрической формы.

В качестве проектной модели (I) для сравнительного анализа и проверки теоретических выводов, приведенных в данной работе, взят объект цилиндрической формы диаметром 5 м и длиной 10 м, для которого аналитически вычислены координаты 12 точек (таблица 4.2), расположенных по его двум крайним образующим (сечениям).

Таблица 4.2 – Исходные данные для первой модели

Наименование точек на поверхности цилиндра	Координаты точек для модели I, м		
	$x_i$	$y_i$	$z_i$
C1	1,768	1,768	0,0
C2	0,0	2,500	0,0
C3	-1,768	1,768	0,0
C4	1,768	-1,768	0,0
C5	0,0	-2,500	0,0
C6	-1,768	-1,768	0,0
V1	1,768	1,768	10,0
V2	0,0	2,500	10,0
V3	-1,768	1,768	10,0
V4	1,768	-1,768	10,0
V5	0,0	-2,500	10,0
V6	-1,768	-1,768	10,0

Координаты точек, приведенных в таблице 4.2, принимаются за исходные (проектные) данные для встраивания цилиндра с помощью программы Cyclone. Результатом такой аппроксимации, на основе функции вписывания в заданную область с помощью данного ПО, является объект, представленный на рисунке 4.4.

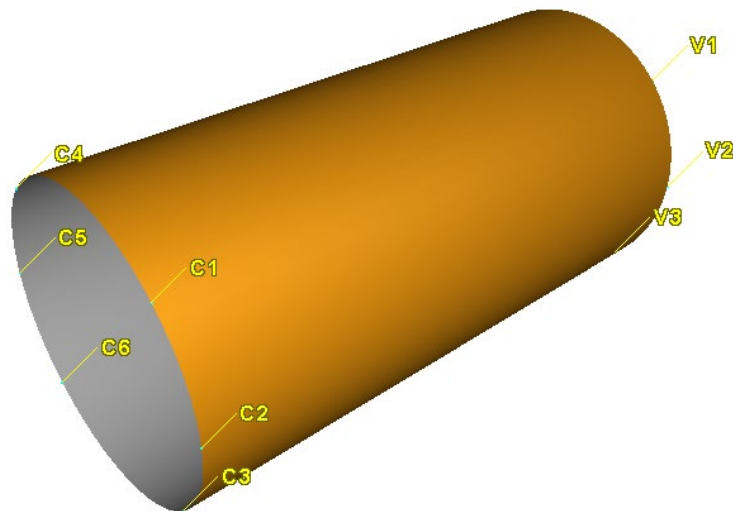


Рисунок 4.4 – Тестовая компьютерная модель цилиндра (I)

Точность встраивания такого цилиндра в область, заданную координатами двенадцати точек, по данным таблицы 4.2, с помощью программы Cyclone оказалась безошибочной. Координаты центральной точки первого пояса (C1–C6), то есть нача-

ло оси вращения цилиндра, составили:  $x_0 = 0,000$ ,  $y_0 = 0,000$ ,  $z_0 = 0,000$ . Для центра тяжести второго пояса (V1–V6) данного цилиндра получены следующие координаты:  $x_0 = 0,000$ ,  $y_0 = 0,000$ ,  $z_0 = 10,000$ , которые полностью соответствуют проектным (исходным) данным.

При этом длина оси искомого цилиндра и его диаметр, полученные в Cyclone, также соответствуют проектным данным, то есть 10 м и 5 м соответственно.

Таким образом, полученные результаты встраивания с помощью Cyclone для модели I полностью соответствуют результатам, вычисленным по формулам (3.8), (4.7), предложенным автором диссертации.

Тестирование проектной модели объекта цилиндрической формы показало, что аппроксимация результатов измерений с помощью программы Cyclone получается безошибочно с теми же параметрами даже по шести точкам C1–C6, расположенным с одной стороны цилиндра, которые размещаются по двум сечениям (левого и правого) на десятиметровом расстоянии друг от друга (рисунок 4.5).

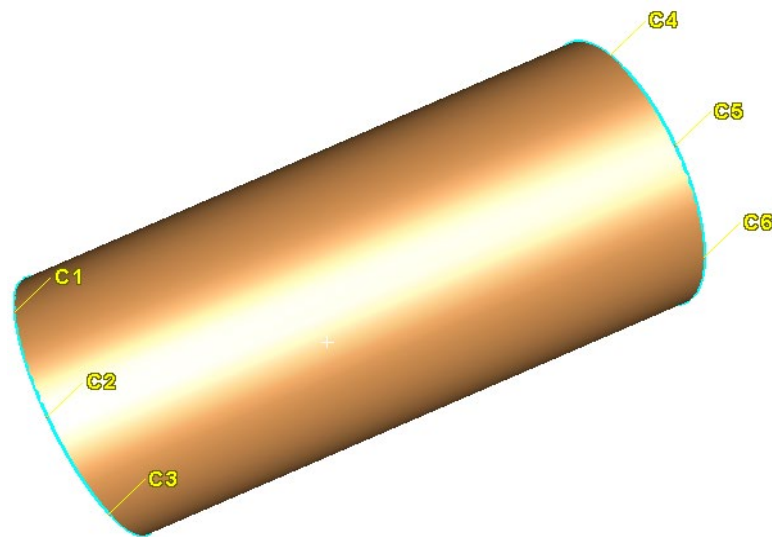


Рисунок 4.5 – 3D-модель проектного объекта, построенного с помощью Cyclone по шести точкам

Возможность такого моделирования позволяет выполнять съемку объекта только с одной стороны в случае ограниченного доступа к нему. Такая ситуация

возникает, например, при определении положения осей опорных роликов в процессе выверки вращающихся агрегатов (сушильных, обжиговых печей).

Для проверки работы программы Cyclone по аппроксимации объектов цилиндрической формы смоделированы новые координаты шести точек 1–V6, приведенные в таблице 4.3, измененные только по правой образующей.

Таблица 4.3 – Исходные данные для второй экспериментальной модели

Наименование точек на поверхности цилиндра	Координаты точек для модели II, м		
	$x_i$	$y_i$	$z_i$
C1	1,768	1,768	0,0
C2	0,0	2,500	0,0
C3	-1,768	1,768	0,0
C4	1,768	-1,768	0,0
C5	0,0	-2,500	0,0
C6	-1,768	-1,768	0,0
V1	1,760	1,760	10,0
V2	0,0	2,500	10,0
V3	-1,760	1,760	10,0
V4	1,768	-1,760	10,0
V5	0,0	-2,500	10,0
V6	-1,762	-1,760	10,0

В результате эксперимента по второй модели получен новый аппроксимированный объект с диаметром по правой (верхней) образующей 4,992 м и длиной 10,003 м. СКО встраивания этого цилиндра посредством Cyclone в область, заданную координатами двенадцати точек по данным таблицы 4.3, составила 5 мм. Максимальная абсолютная ошибка при этом равна 7 мм.

Координаты центральной точки первого пояса (C1–C6) модели II, то есть начало оси вращения цилиндра, установленные посредством Cyclone, получились  $x_0 = -0,002$ ,  $y_0 = 0,000$ ,  $z_0 = -0,002$ . Для центра тяжести второго пояса (V1–V6) данного цилиндра получены следующие координаты:  $x_0 = 0,004$ ,  $y_0 = 0,004$ ,  $z_0 = 10,001$ . Модель цилиндра II показана на рисунке 4.6.

В таблице 4.4 приведены для сравнения результаты вычисления параметров, полученных по программе Cyclone и формулам, предложенным автором диссертации.

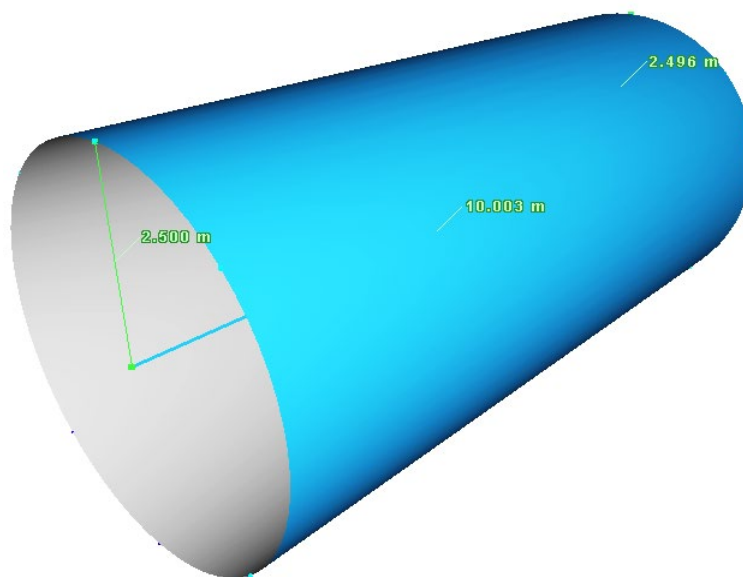


Рисунок 4.6 – Экспериментальная модель цилиндра (II),  
полученная в Cyclone по 12 точкам

Таблица 4.4 – Результаты определения геометрических параметров  
экспериментальной модели II цилиндрического объекта

Пояс цилиндра для модели II	Результаты вычисления по программе Cyclone, мм					Результаты вычисления по формулам автора, мм				
	Координаты центра окружности			Радиус $r$	Длина оси цилиндра $S$	Координаты центра окружности			Радиус $r$	Длина оси цилиндра $S$
	$x_0$	$y_0$	$z_0$			$x_0$	$y_0$	$z_0$		
Нижний (левый)	-2	0	-2	2 496	10 003	0	0	0	2 500	10 003
Верхний (правый)	4	4	10 001	2 496		0	0	10 000	2 493	

Как видно из таблицы 4.4, наибольшее отклонение координат центральных точек, полученных по программе Cyclone, от вычисленных по формулам (3.8), (3.9), предложенным автором диссертации, составило 4 мм.

Полагая, что точность определения координат точек на поверхности объекта равна 5 мм, средняя квадратическая ошибка  $m_r$  определения радиуса  $r$  аппроксимирующей окружности в заданном сечении цилиндра, вычисленная по формуле (4.7), составляет 0,3 мм при минимальном количестве измерений  $n = 6$ .

Следует отметить, что точность результатов аппроксимации, полученных с помощью программы Cyclone, и их отклонения от фактических значений не превосходят случайных ошибок измерений, выполняемых с помощью БЭТ в безотражательном режиме, или, по крайней мере, сопоставимы с точностью таких измерений.

Все это позволяет утверждать о возможности применения программы Cyclone для моделирования и анализа деформаций сооружений цилиндрического типа, таких как водонапорные башни, нефтеналивные, нефтехимические резервуары и др. Предложенный алгоритм 3D-анализа может быть использован также при выверке и определении геометрических параметров промышленных агрегатов, гидрогенераторов, круговых подъемных кранов, дымовых труб и т. д.

#### 4.3 Определение кренов сооружений по результатам 3D-моделирования

Деформационный анализ крупногабаритных промышленных объектов для определения их вертикальности предлагается выполнять на основе их взаимного положения и сравнения трехмерных моделей с проектными данными или полученными в разных циклах наблюдений.

Как известно, сущность определения крена объекта башенного типа заключается в определении координат точек по верхнему и нижнему ярусам способом полярной засечки. По определенным координатам вычисляются радиусы и координаты центров круговых сечений для верхнего и нижнего поясов. Затем по координатам центральных точек верхнего  $(x_0^g, y_0^g)$  и нижнего сечения  $(x_0^h, y_0^h)$  можно определить наклон всего сооружения в проекции на горизонтальную плоскость

$$K_x = x_0^g - x_0^h; \quad K_y = y_0^g - y_0^h; \quad K = \sqrt{K_x^2 + K_y^2},$$

где  $K$  – общий (линейный) крен сооружения;

$K_x, K_y$  – частные крены.

Направление общего крена вычисляется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} \frac{K_y}{K_x},$$

где  $\alpha$  – дирекционный угол направления общего крена.

В относительной мере крен сооружения выражается величиной  $i$

$$i = \frac{K}{s},$$

где  $s$  – длина осевой линии (или высота) сооружения.

Полагая, что ошибка положения центральной точки сечения объекта равна  $M_O$ , точность определения линейного крена сооружения можно вычислить по формуле  $m_K = 2 M_O$ .

Рассмотрим выше приведенные модели цилиндров I и II, построенные в Cyclone для определения крена по предложенному методу.

Для сравнения экспериментальной (второй) модели с проектной (истинной) моделью I цилиндра (рисунок 4.4) построена совмещенная модель, приведенная на рисунке 4.7.

Для данных моделей цилиндрических объектов дополнительно получены следующие характеристики (таблица 4.5), вычисленные с помощью Cyclone и подтвержденные аналитическими расчетами по формулам:

$$V = \pi r^2 S; \quad A = 2 \pi r S,$$

где  $V$  – объем;

$A$  – площадь боковой поверхности;

$S$  – длина или высота объекта.

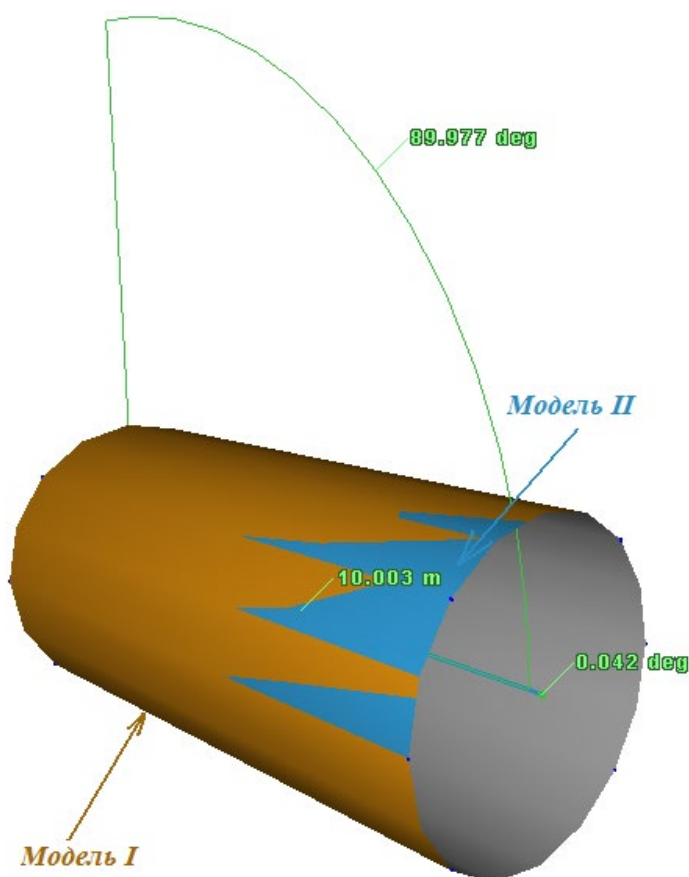


Рисунок 4.7 – Совмещенная модель двух цилиндров с углами отклонения их осей вращения

Таблица 4.5 – Дополнительные параметры двух моделей цилиндрических объектов

Модель I		Модель II		Модель II – Модель I	
Площадь $A, \text{ м}^2$	Объем $V, \text{ м}^3$	Площадь $A, \text{ м}^2$	Объем $V, \text{ м}^3$	Площадь $\Delta A, \text{ м}^2$	Объем $\Delta V, \text{ м}^3$
157,099	196,399	156,883	195,804	-0,216	-0,595

Отклонение (-0,595) фактического объема от проектного можно считать деформационным объемом, возникающим за счет изменения формы и пространственного положения объекта. Отклонение площади  $\Delta A$  боковой поверхности от проектной также является деформационной характеристикой.

Взаимное положение цилиндров, показанное на рисунке 4.7 с помощью углов разворота второго объекта относительно первого (проектного), непосред-

ственно вычислено программой Cyclone. Здесь величина  $0,042^\circ$  определяет угол между осями вращения данных объектов. Отклонение оси второй модели цилиндра от горизонтальной плоскости равно  $89,977^\circ$ .

Поскольку первая модель является проектной и вертикальной по расположению, то на основе сравнительного анализа параметров второй модели можно вычислить значения результирующего крена и его составляющих. В рассматриваемой модели II общий крен оси вращения этого цилиндра оказался равным 7 мм, а его составляющие, полученные также программой Cyclone, равны 6 и 4 мм.

Общий крен трехмерной модели сооружения определяется как отклонение центральной точки верхнего яруса от вертикальной оси. В данном примере (рисунок 4.7) угол  $0,042^\circ$  ( $2' 52''$ ) является таким отклонением.

Предложенный алгоритм определения кренов можно применить для цилиндрических объектов вертикального расположения, например, для дымовых труб, резервуаров для хранения продуктов нефтегазопромысла, металлических и бетонных колонн и других сооружений башенного типа.

На основе трехмерного моделирования промышленных агрегатов с помощью Cyclone и сравнения параметров «твердотельных» компьютерных моделей можно выполнить оценку их положения как в плане, так и по высоте.

#### 4.4 Определение осадок сооружений по результатам тригонометрического нивелирования и 3D-моделирования

Определение осадок промышленных резервуаров с применением трехмерного лазерного сканирования рассматривалось в целом ряде научных статей и монографий [61, 63, 95, 136 и др.]. В данном случае рассматривается точность определения общей осадки резервуара по результатам тригонометрического нивелирования и 3D-моделирования.

Как известно, тригонометрическое нивелирование с применением электронных тахеометров получило распространение при наблюдениях за деформациями и осадками различных инженерных сооружений [190, 191 и др.].

Для надежного определения осадок промышленных резервуаров целесообразно выполнять измерения не менее чем с трех станций по осадочным маркам, закрепленным на нижнем ярусе [87]. Алгоритмы определения и оценки точности пространственных координат точек или осадочных марок рассмотрены в третьем разделе данной диссертационной работы.

Определение общей осадки вертикального сооружения с помощью 3D-моделирования предлагается выполнять по центральной точке его нижнего кругового сечения.

Рассмотрим точность определения общей осадки (РВС, дымовой трубы и др.) на основе трехмерного моделирования таких объектов по результатам геодезических измерений. На рисунке 4.8 представлена схема измерений объекта мониторинга с помощью электронного тахеометра.

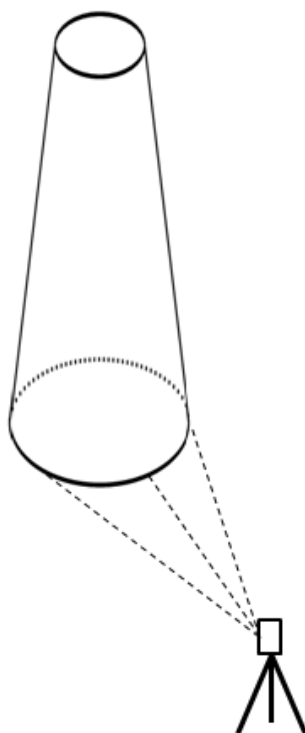


Рисунок 4.8 – Наблюдение за осадкой объекта башенного типа

Подсчитать ожидаемую ошибку определения осадки сооружения можно по выше предложенному алгоритму. Пусть точность измерения углов и линий с помощью БЭТ равны соответственно  $m_{v_i} = 5''$  и  $m_{S_i} = 5$  мм. Тогда погрешность определения отметки осадочной марки на поверхности объекта, вычисленная по данной формуле на 100 м расстояния от электронного тахеометра, равна

$$m_{z_i} = \sqrt{\sin^2 v_i m_{S_i}^2 + S_i^2 \cos^2 v_i \frac{m_{v_i}^2}{\rho^2}} \approx 3,9 \text{ мм.} \quad (4.8)$$

При условии, что выполнены измерения для 12 осадочных марок по нижнему ярусу исследуемого сооружения, ошибка определения отметки его центральной точки кругового сечения составит

$$m_{z_0} = 3,9 / \sqrt{12} = 1,1 \text{ мм.}$$

Поэтому ошибка определения осадки в этом случае, как разность равноточных высотных отметок центральных точек, определенных из двух циклов наблюдений  $(z_0, z_i)$ , составит

$$M_h = \sqrt{m_{z_0}^2 + m_{z_i}^2} = 1,6 \text{ мм.}$$

Отметим, что ожидаемая ошибка (1,6 мм) определения осадки получена без учета влияния погрешностей исходных данных и зависит от длины визирования, количества и точности измерений, выполняемых с помощью электронных тахеометров в безотражательном режиме на основе полярного способа съемки.

Отметим также, что сравнительный анализ результатов измерений по двум и более циклам наблюдений позволяет вычислить общую осадку исследуемого объекта по его трехмерным компьютерным моделям.

Обратимся к выше приведенным моделям двух цилиндрических объектов для определения общей осадки на основе сравнительного анализа. Если считать, что модель II (см. рисунок 4.6) цилиндрического объекта получена по результатам второго цикла наблюдений, то его осадка, в соответствии с отметкой  $z_0$  центральной точки, определенной по нижнему поясу, равна  $-2$  мм (см. таблицу 4.4).

Таким образом, величину средней осадки цилиндрического объекта можно определять с достаточной точностью по высотной отметке центральной точки, расположенной в нижнем ярусе его кругового сечения.

#### 4.5 Определение деформаций поверхностей сооружений по результатам 3D-моделирования

Необходимо отметить, что с помощью безотражательного электронного тахеометра можно получить качественные цифровые трехмерные модели объектов, например, ангаров, металлических резервуаров типа РГС или РВС, градирен и других инженерных сооружений для анализа их деформаций (горизонтальных перемещений и кренов).

Трехмерное моделирование на основе геодезических данных, полученных с помощью БЭТ, позволяет также исследовать деформации поверхностей инженерных сооружений шарообразного и куполообразного вида и устанавливать их геометрические параметры. Для детального анализа состояния поверхности потребуется наибольшая плотность определяемых точек.

Ниже приведена проектная TIN-модель куполообразного перекрытия (рисунок 4.9), полученная с помощью Cyclone по проектным координатам 115 точек, равномерно расположенных по шести ярусам.

Триангуляционная модель данного купола в виде «Сверху» приведена на рисунке 4.10.

Для сравнительного анализа, с целью определения технического состояния фактической поверхности купола, построена TIN-модель по результатам геодезических измерений, выполненных с помощью электронного тахеометра.

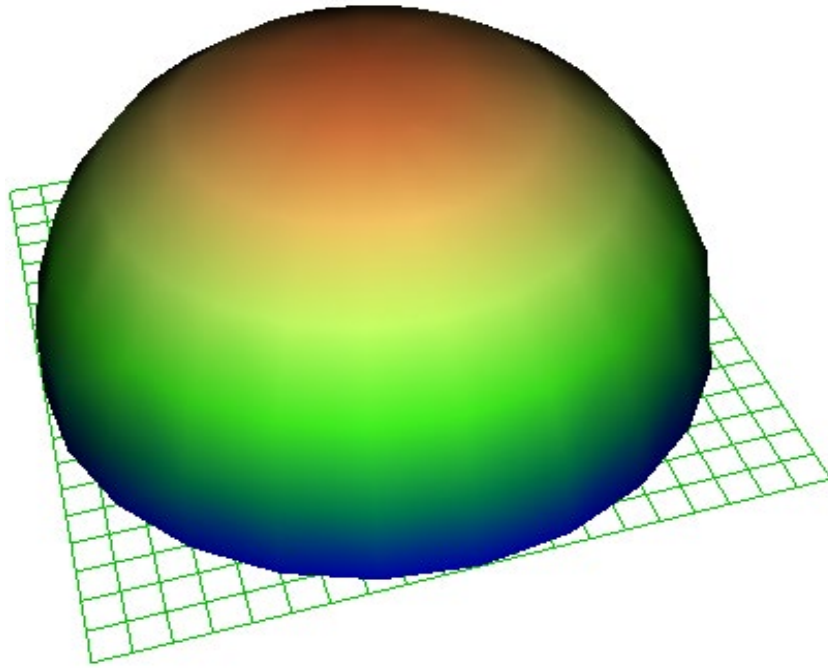


Рисунок 4.9 – 3D-модель проектного объекта куполообразной формы

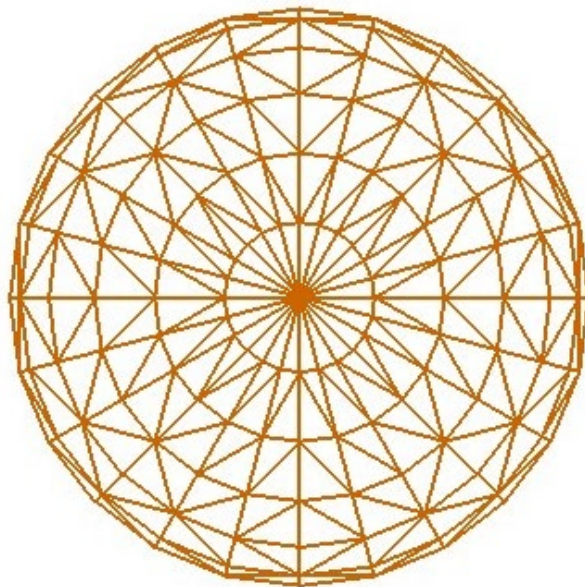


Рисунок 4.10 – Вид сверху TIN-модели объекта куполообразного перекрытия

Для большей наглядности результатов мониторинга рассмотрим совмещенные модели двух поверхностей, приведенных на рисунке 4.11. Фактическая модель поверхности купола оказалась внутри проектного купола.

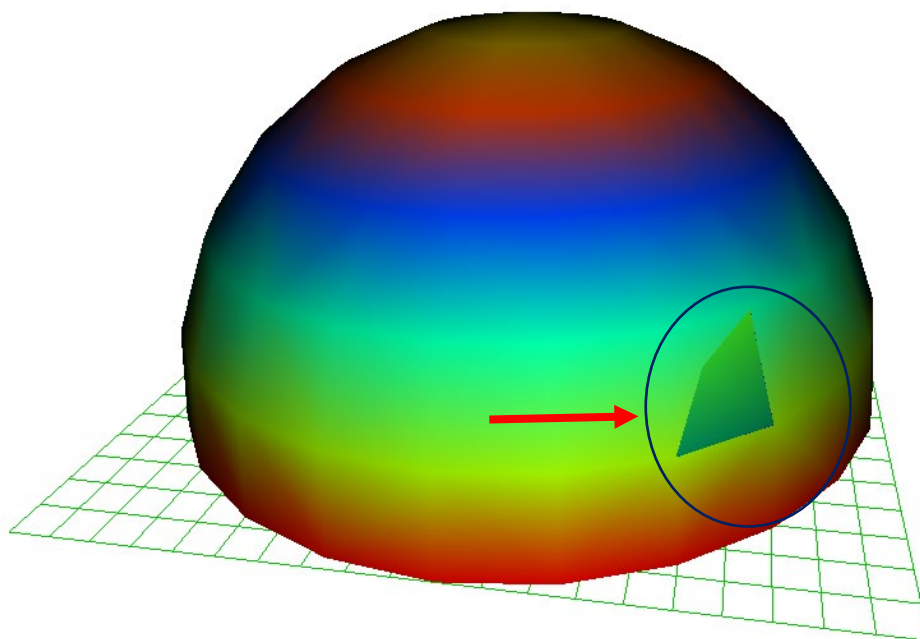


Рисунок 4.11 – Совмещенная 3D-модель двух куполообразных поверхностей

На рисунке 4.11 показан участок деформированной поверхности, расположенный внутри проектной поверхности купола. Числовые значения деформации участка поверхности данного купола приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты отклонения фактической поверхности от проектной

X, м	Y, м	Z1, м	Z2, м	Delta, м
60,0	0,0	78,937	78,930	-0,007
60,0	10,0	77,927	77,919	-0,008
60,0	20,0	76,148	76,143	-0,005
60,0	30,0	73,188	73,182	-0,006
60,0	40,0	68,292	68,284	-0,008
60,0	50,0	60,286	60,282	-0,004

Значения, приведенные в колонке Delta таблицы 4.6, являются отклонениями фактической от проектной поверхности купола вдоль горизонтального пояса перекрытия, то есть поперечного сечения. Степень доверия полученным результатам (Delta) соответствует точности координат, определяемых с помощью БЭТ полярным способом. Выше была принята априорная ошибка определения координат, равная 5 мм, хотя точность современных БЭТ выше в несколько раз.

Применение TIN-поверхностей и метода сравнительного анализа позволяет оценить техническое состояние исследуемого объекта с необходимой полнотой и точностью.

Для общего анализа деформации поверхностей куполообразных или шарообразных объектов, а также полусферических резервуаров, куполов зданий, можно рассматривать изменение их фактических объемов, вычисляемых по цифровым (TIN или Mesh) моделям. Так, проектный объем, вмещаемый куполом на рисунке 4.11, оказался равным  $V_{\text{проект}} = 702\,117,700 \text{ м}^3$ , а фактический, определенный по измеренным данным в программе Cyclone, составляет  $V_{\text{факт}} = 634\,097,103 \text{ м}^3$ . Программой Cyclone определяется также объем, заключенный между сравниваемыми поверхностями, аналогично вычислению объемов перемещаемых земляных масс по цифровой модели рельефа местности.

Отметим, что все геометрические параметры объекта (высота, длина, площадь поверхности, наклон объекта и др.) вычисляются автоматически по его цифровой модели. Кроме того, по цифровой модели можно определять геометрические параметры интерактивно.

Таким образом, определение геометрических параметров крупногабаритных промышленных агрегатов и объектов цилиндрической, полусферической, куполообразной и даже прямоугольной формы можно выполнять по геодезическим данным на основе 3D-моделирования с применением программы Cyclone. Это позволяет автоматизировать и ускорить процесс обработки данных, полученных с помощью электронных тахеометров, точность которых может превышать точность некоторых моделей лазерных сканеров. Тем более, в новых моделях безотражательных электронных тахеометров появляются различные режимы сканирования, что приведет к большей эффективности предложенной методики для геодезического мониторинга с точки зрения экономической целесообразности.

Вместе с тем, достигается сокращение средств и времени для выполнения анализа пространственных данных при геодезическом мониторинге крупногабаритных промышленных объектов.

Рассмотренная методика определения и оценки точности геометрических параметров, осадок и деформаций крупногабаритных промышленных объектов по геодезическим данным с применением Cyclone может быть распространена на другие программы 3D-моделирования, например, AutoCad Civil 3D, Bentley, TerraSolid, Technodigit 3DReshaper, Credo и др.

#### 4.6 3D-моделирование по результатам съемки обжиговой печи № 6 АО «Искитимцемент», выполненной электронным тахеометром

Геодезический мониторинг обжиговой печи АО «Искитимцемент» выполнялся в 2016 г. тахеометром Leica TM30 (рисунок 4.12) в режиме «холодной» выверки. По результатам измерений выполнено трехмерное компьютерное моделирование конструктивных элементов промышленного агрегата для анализа его геометрических параметров.



Рисунок 4.12 – Обжиговая печь № 6 АО «Искитимцемент»

В таблице 4.7 приведены координаты точек, расположенных на поверхности обечайки на участке длиной в 9,403 м вращающейся печи № 6.

Таблица 4.7 – Результаты измерений обечайки для печи № 6

Наименование точек на поверхности обечайки	Координаты точек, м		
	$x_i$	$y_i$	$z_i$
O1_1	63,1743	1,5984	-17,2967
O1_2	63,1848	1,9972	-16,7614
O1_3	63,1773	2,2827	-15,8180
O1_4	63,2981	2,0690	-14,6951
O2_1	58,0819	2,1629	-14,6847
O2_2	58,0848	2,2864	-15,4730
O2_3	58,0730	2,1062	-16,3347
O2_4	58,0601	1,5407	-17,1390
O3_1	53,7957	1,4765	-17,0569
O3_2	53,8902	2,0705	-16,3161
O3_3	53,9514	2,3083	-15,3861
O3_4	53,9014	2,1146	-14,3972

На основе результатов измерений выполнено моделирование поверхности обечайки (элемента цилиндрической формы) по двенадцати точкам с помощью программы Cyclone, как показано на рисунке 4.13.

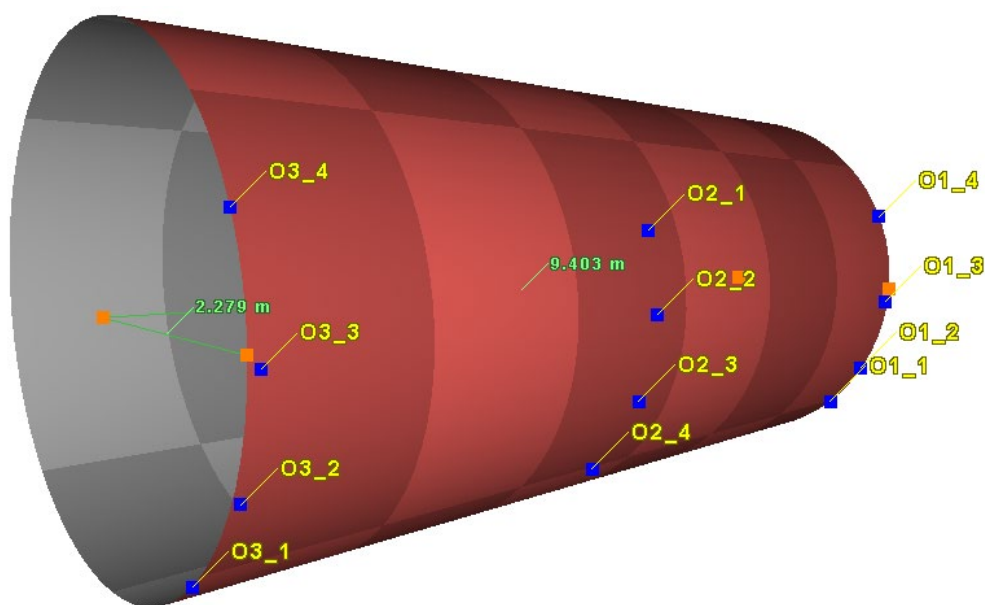


Рисунок 4.13 – Модель поверхности обечайки обжиговой печи № 6  
АО «Искитимцемент»

Погрешность встраивания цилиндра в Cyclone по 12 точкам, обозначенным на рисунке 4.13 синими маркерами, расположенным с одной стороны объекта, со-

ставила 6 мм. При этом средний радиус встроенного цилиндра на длине 9,403 м оказался равным 2,279 м. Среднее значение радиуса для данной обечайки, полученное независимо в программном комплексе «Визир 3D» [89], составило 2,275 м. Расхождение в 4 мм объясняется использованием для моделирования в Cyclone минимального количества измеренных точек (24), в отличие от модели, полученной в «Визир 3D», для построения которой использовалось в десятки раз больше точек. Полученные результаты подтверждают состоятельность методики трехмерного моделирования в программе Cyclone для определения геометрических параметров обжиговой печи.

Для моделирования бандажа обжиговой печи № 6 использовались 18 точек, результаты измерения которых приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты измерений для бандажа обжиговой печи № 6

Наименование точек на поверхности бандажа	Координаты точек, м		
	$x_i$	$y_i$	$z_i$
B8_1	162,4558	-2,4601	17,9166
B8_2	162,0543	-2,5055	-17,9623
B8_3	161,5421	-2,5478	-18,0033
B8_4	161,4756	-3,0324	-19,6571
B8_5	161,9336	-3,0305	-19,6445
B8_6	162,4135	-3,0282	-19,6245
B8_7	162,3111	-2,1980	-21,7607
B8_8	161,8588	-2,1833	-21,7616
B8_9	161,3857	-2,1664	-21,7620
B8_10	162,3322	2,0000	-21,9549
B8_11	161,9389	1,9708	-21,9550
B8_12	161,4066	1,9627	-21,9548
B8_13	161,4771	3,0246	-19,8481
B8_14	161,9612	3,0243	-19,8444
B8_15	162,3884	3,0245	-19,8380
B8_16	162,4542	2,4477	-17,8980
B8_17	162,1111	2,4735	-17,9172
B8_18	161,5514	2,5055	-17,9375

В таблице 4.8 представлены координаты точек по результатам измерений, выполненных с двух сторон поверхности бандажа № 8, на рисунке 4.14 показан продольный профиль бандажа № 8.

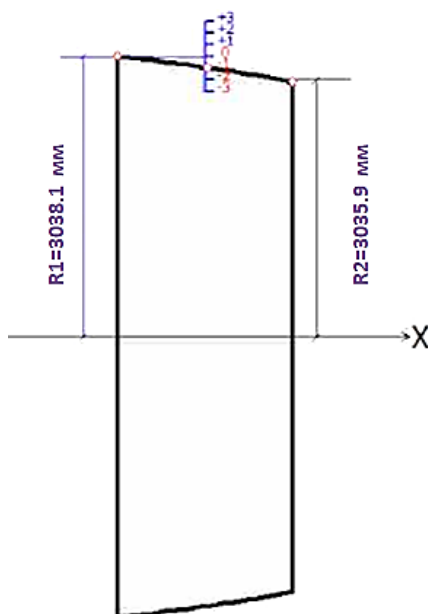


Рисунок 4.14 – Продольный профиль бандажа № 8

В результате моделирования поверхности бандажа с помощью Cyclone (рисунок 4.15), по данным таблицы 4.8, получен средний радиус встроенного цилиндра  $r = 3,030$  м. СКО встраивания цилиндра по 18 точкам оказалась равной 2 мм.

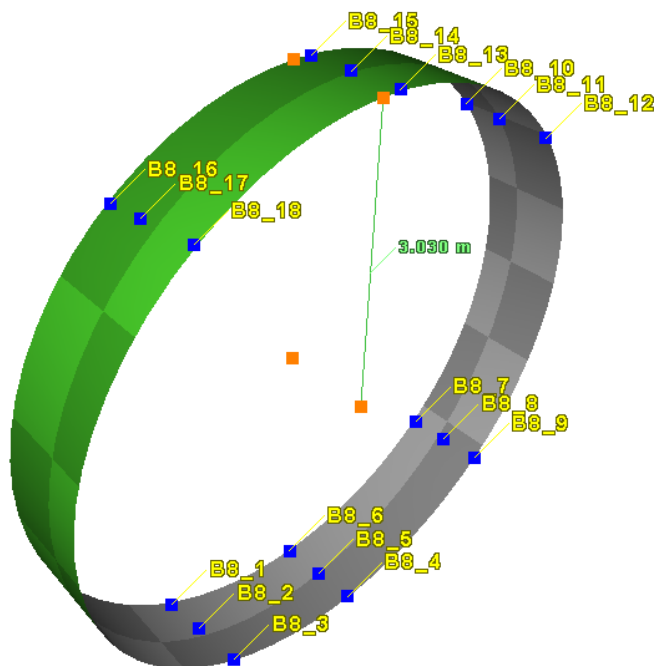


Рисунок 4.15. Модель поверхности бандажа № 8 обжиговой печи  
АО «Искитимцемент»

Согласно геометрическим параметрам, вычисленным с помощью специального программного обеспечения «Визир 3D», средний радиус данного бандажа № 8 равен 3,037 м. Таким образом, расхождение составило 7 мм.

В таблице 4.9 приводится сравнительный анализ радиусов бандажей обжиговой печи, определенных в программных комплексах «Визир 3D» и Cyclone.

Таблица 4.9 – Параметры бандажей обжиговой машины

Радиусы бандажей	Номера бандажей							
	1	2	3	4	5	6	7	8
R, мм ПО «Визир 3D»	2 686,5	2 679,6	2 729,1	2 677,1	2 682,3	3 049,7	3 041,6	3 037,2
R, мм ПО «Cyclone»	2 689,0	2 663,0	2 731,0	2 673,0	2 683,5	3 038,0	3 041,0	3 030,5
$\Delta R$ , мм	2,5	-16,6	1,9	-4,1	1,2	-11,7	-0,6	-6,7
СКО встраивания, мм	2,0	1,0	2,0	1,0	3,0	1,0	2,0	2,0

Радиусы бандажей 2–7 получены по девяти точкам односторонней съемки. Это обстоятельство повлияло на результаты определения радиусов некоторых бандажей, например, 2 и 6. Точность аппроксимации с помощью Cyclone может быть повышена за счет увеличения количества измеряемых точек, расположенных с двух сторон обжиговой печи. Продольные профили бандажей 2–7 показаны в приложении В.

Выполним моделирование ролика промышленного агрегата с помощью Cyclone по данным, приведенным в таблице 4.10.

Таблица 4.10 – Результаты измерений для ролика № 15 обжиговой печи № 6

Наименование точек на поверхности ролика	Координаты точек, м		
	$x_i$	$y_i$	$z_i$
R15_1	161,5735	-2,3016	-22,2814
R15_2	162,1185	-2,2704	-22,2843
R15_3	162,6432	-2,2513	-22,2877
R15_4	162,6096	-2,6992	-22,9311
R15_5	162,0568	-2,6942	-22,9222
R15_6	161,5419	-2,6940	-22,9165
R15_7	161,5120	-2,4299	-23,5591
R15_8	162,0088	-2,4499	-23,5641
R15_9	162,5538	-2,4709	-23,5724

На рисунке 4.16 показан продольный профиль ролика № 15.

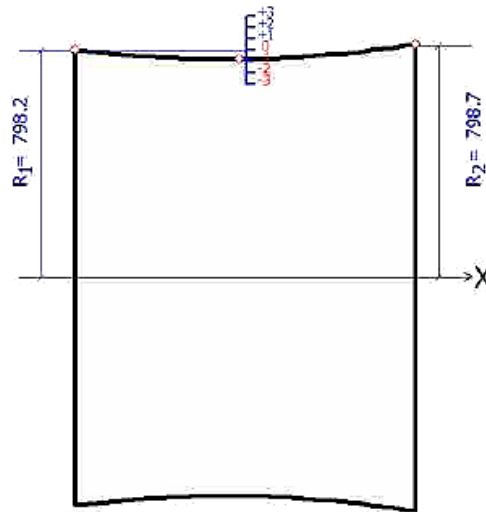


Рисунок 4.16 – Продольный профиль ролика № 15

На рисунке 4.17 приведена модель поверхности опорного ролика № 15, полученная по девяти измеренным точкам, расположенным с одной стороны объекта. По результатам моделирования получен радиус 0,798 5 м с погрешностью встраивания 2 мм. По материалам обработки данных с помощью программы «Визир 3D» этот радиус оказался также равен 0,798 5 м.

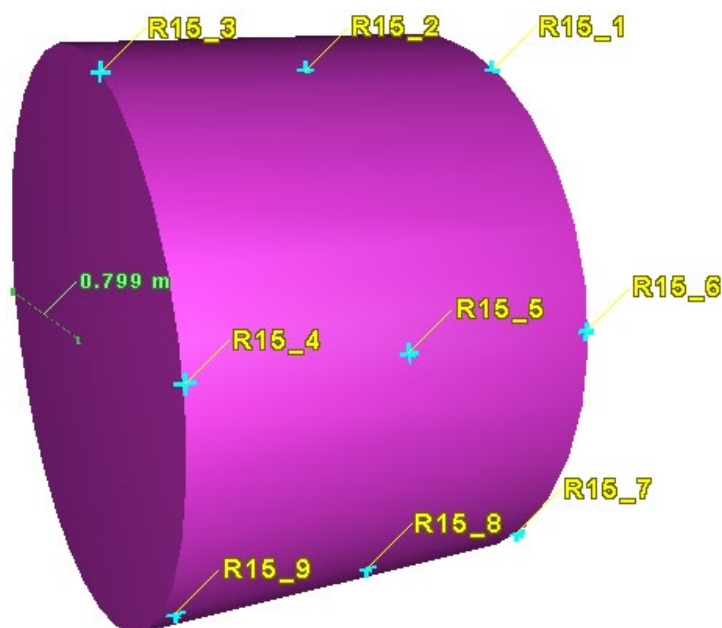


Рисунок 4.17 – Модель поверхности ролика № 15 обжиговой печи

В таблице 4.11 приведены радиусы роликов для сравнения результатов, полученных в программах «Визир 3D» и Cyclone по девяти измеренным точкам.

Таблица 4.11 – Параметры роликов для печи обжига № 6

Радиусы роликов	Номера роликов				
	8	11	12	15	16
$R$ , мм ПО «Визир 3D»	822,6	828,4	827,1	798,5	840,2
$R$ , мм ПО «Cyclone»	820,0	828,0	824,0	798,5	831,0
$\Delta R$ , мм	-2,6	-0,4	-3,1	0	-9,2
СКО встраивания, мм	2,0	3,0	2,0	2,0	4,0

По результатам геодезического мониторинга определено, что большинство опорных роликов печи № 6 имеют небольшой «седловидный» износ, как показано на рисунке 4.16. Наилучшие результаты компьютерного моделирования получаются при симметричном расположении точек наблюдения на поверхности роликов.

По итогам проведенного исследования разработана трехмерная компьютерная модель вращающейся обжиговой печи (приложение Г), на основе которой можно выполнять деформационный анализ ее оси и конструктивных элементов. Все это дает право на существование предложенной методики определения геометрических параметров промышленных агрегатов и подтверждает состоятельность алгоритмов обработки результатов геодезического мониторинга технологического оборудования.

Таким образом, предложенная методика построения и анализа трехмерных компьютерных моделей может применяться для определения геометрических параметров обжигowych печей, цилиндрических резервуаров, гидрогенераторов, сооружений башенного типа и других подобных промышленных объектов и технологического оборудования.

#### 4.7 3D-моделирование по результатам лазерного сканирования промышленного агрегата

В настоящее время технология наземного лазерного сканирования (НЛС) широко используется для решения задач инженерной геодезии в различных областях строительства и промышленности [61, 63, 136]. Данная технология имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерений, например: повышение скорости работ и уменьшение трудозатрат. Изображения, получаемые с помощью лазерного сканирования, несут большой объем информации, что позволяет говорить о полной автоматизации процесса сбора данных об объекте.

Помимо высокой степени автоматизации, наземное лазерное сканирование обладает также следующими достоинствами по отношению к другим способам получения пространственной информации:

- трехмерная визуализация в режиме реального времени;
- неразрушающий метод получения информации;
- принцип дистанционного получения информации;
- высокая производительность НЛС сокращает время полевых работ при создании цифровых моделей объектов, что делает данную технологию более экономически выгодной по сравнению с другими;
- работы можно выполнять при любых условиях освещения, то есть днем и ночью, так как сканеры являются активными съемочными системами;
- высокая степень детализации;
- многоцелевое использование результатов лазерного сканирования и др.

Вместе с тем, следует отметить общий недостаток для всех методов лазерной выверки промышленного технологического оборудования – отсутствие обоснования точности для определения параметров исследуемых объектов.

Появление новых более производительных моделей сканеров, совершенствование возможностей программного обеспечения способствуют расширению сфер применения лазерного сканирования и требуют разработки новых методик

при проведении работ по изысканию, проектированию, строительству и эксплуатации инженерных сооружений и промышленного оборудования.

Применение лазерного сканирования для определения геометрических параметров вращающихся обжиговых печей рассмотрим на примере производства геодезических наблюдений, выполненных сканером RIEGL VZ400 на цементном заводе АО «Искитимцемент».

Паспортные характеристики сканера:

- средняя дальность измерений составляет 400 м;
- точность измерения расстояний – 3 мм;
- точность определения координат – 5 мм;
- угловое разрешение инклинометра –  $0,008^\circ$ .

Наблюдаемый агрегат располагался на опорах высотой до 12 м, съемка производилась с двух сторон объекта. На рисунке 4.18 показан процесс сканирования на станции (рисунок 4.18, *а*) и фрагмент полученной точечной пространственной модели (рисунок 4.18, *б*) [57].

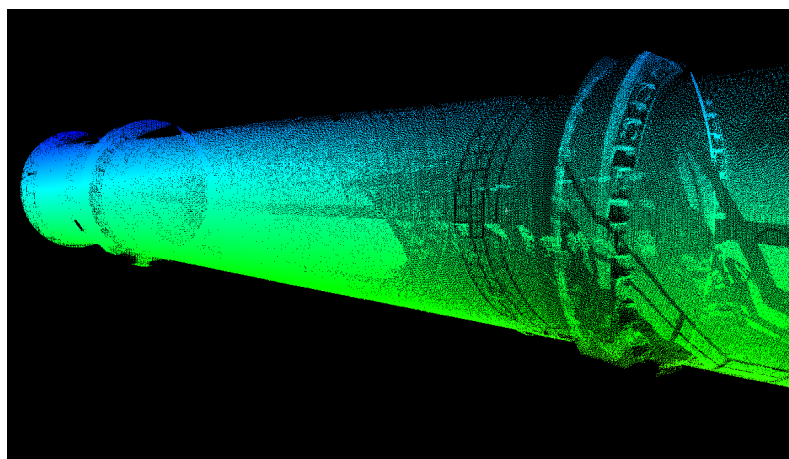
*а)**б)*

Рисунок 4.18 – Сканирование объекта и фрагмент полученной точечной модели: *а*) процесс сканирования; *б*) облако точек

На производственной площадке выполнены измерения печи на девяти станциях сканера с установленной средней плотностью сканирования шесть измере-

ний на  $100 \text{ см}^2$  и средней скоростью – десять минут на станцию. При съемке учитывалось, что в поле зрения каждой станции сканирования должна попадать часть конструкции наблюдаемого объекта. Кроме того, требовалось выполнение условия перекрытия снимков с соседними станциями (минимум 50 %) для последующей обработки данных и создания опорной сканерной сети. Следует отметить, что у сканеров RIEGL предусмотрена такая функция, и это значительно упрощает процесс съемки исследуемых объектов, так как позволяет исключить этап предварительного создания опорной геодезической сети.

Для уравнивания результатов сканирования и расчета СКО измерений облака точек использовалось программное обеспечение Riscan PRO. После уравнивания общая СКО всех станций (после объединения сканов) составила 4 мм.

На следующем шаге обработки данных лазерного сканирования задана рабочая система координат, при этом выполнялось условие, чтобы одна из координатных осей совпала с направлением оси исследуемого агрегата. Для построения векторной модели применялся способ пространственной нерегулярной триангуляции (TIN) (рисунок 4.19) [57].

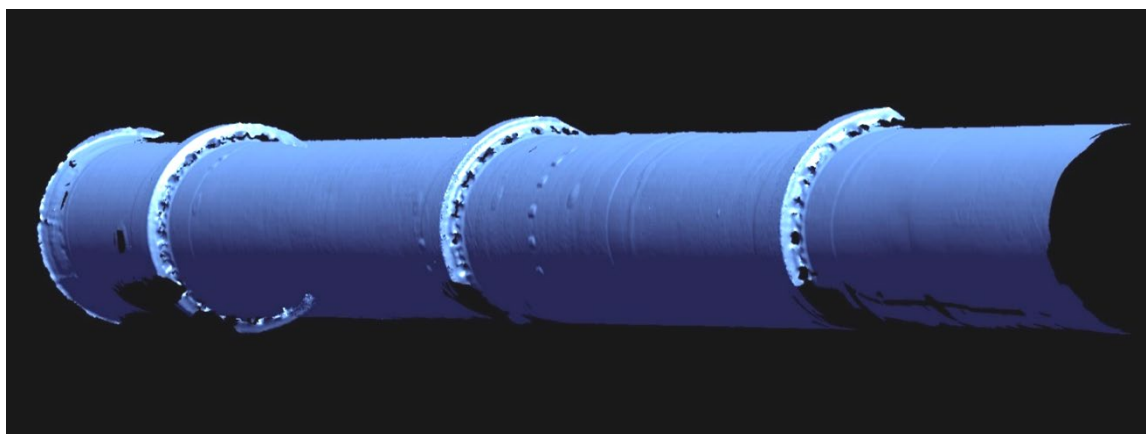


Рисунок 4.19 – Трехмерная компьютерная модель объекта по результатам лазерного сканирования

В данном исследовании использовалась программа Rapidform XOR3, так как она имеет достаточный функционал инструментов для построения TIN-моделей.

Полученная компьютерная модель обжиговой печи охватывает измерениями примерно  $210^\circ$  тела объекта. На основе TIN-модели с шагом в один метр построены поперечные сечения агрегата. В точки сечений методом наименьших квадратов вписаны окружности (рисунок 4.20).

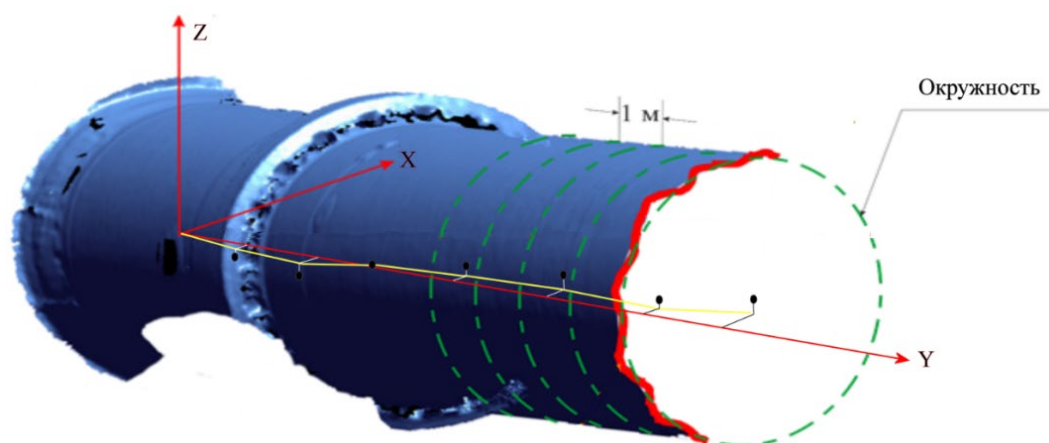


Рисунок 4.20 – Построение сечений объекта

Задав направление осей координат, при котором ось  $y$  направлена вдоль оси печи, отклонения центра окружности от геометрической оси объекта (в горизонтальной и вертикальной плоскостях) определяются смещением координат  $\Delta x$  и  $\Delta z$ .

По результатам лазерного сканирования выполнена оценка точности определения геометрических параметров конструктивных элементов агрегата. Параметры бандажей определялись путем сканирования части его поверхности в  $30^\circ$  дуги окружности цилиндра. В таблицах 4.12 и 4.13 представлены значения СКО измерений параметров бандажа, выполненных с точностью определения координат точек, равной 5 мм [57]. Необходимо отметить, что повышение точности за счет большого количества точек измерений будет актуальным только в том случае, когда ошибки измерений не будут содержать систематическую составляющую.

Таблица 4.12 – Точность измерений при сканировании бандажа с одной стороны

Количество точек измерений	СКО параметров цилиндрического объекта, мм				
	$m_{x_0}$	$m_{z_0}$	$m_{v_x}$	$m_{v_z}$	$m_r$
440	9,48	24,13	1,45	4,82	5,85
860	6,91	17,68	1,03	3,54	4,39
1 700	4,97	12,73	0,73	2,54	3,21
3 380	3,55	9,09	0,52	1,82	2,31

Таблица 4.13 – Точность измерений при сканировании бандажа с двух сторон

Количество точек измерений	СКО параметров цилиндрического объекта, мм				
	$m_{x_0}$	$m_{z_0}$	$m_{v_x}$	$m_{v_z}$	$m_r$
880	5,12	17,06	1,02	3,41	0,17
1 720	3,66	12,50	0,73	2,50	0,12
3 400	2,60	9,00	0,51	1,80	0,09
6 760	1,84	6,42	0,37	1,28	0,06

Исследование точности определения параметров печи при «холодной» выверке показало, что современные лазерные сканеры позволяют достоверно оценить качество установки агрегата и обеспечить информацией для его эффективной регулировки. Лазерное сканирование позволяет сократить время полевых работ и процесс получения результатов.

Кроме того, использование лазерного сканирования позволяет получить наиболее полную информацию о геометрии элементов агрегата. Данный метод имеет большие перспективы для выполнения геодезического мониторинга обжиговых печей.

Метод лазерного сканирования можно применить и при «горячей» выверке печей. На рисунке 4.21 представлена схема сканирования бандажа работающего вращающегося агрегата [57].

При сканировании участка бандажа (красные точки на рисунке 4.21) фиксируется время выполнения скана, когда объект поворачивается на определенный угол, производится следующий снимок. Сканирование продолжается, пока бандаж не сделает полный оборот.

Рассмотрим случай, когда в одном скане определено 1 200 точек, а точность измерения расстояний составляет 5 мм.

На рисунке 4.22 показан процесс сканирования вращающегося промышленного агрегата.

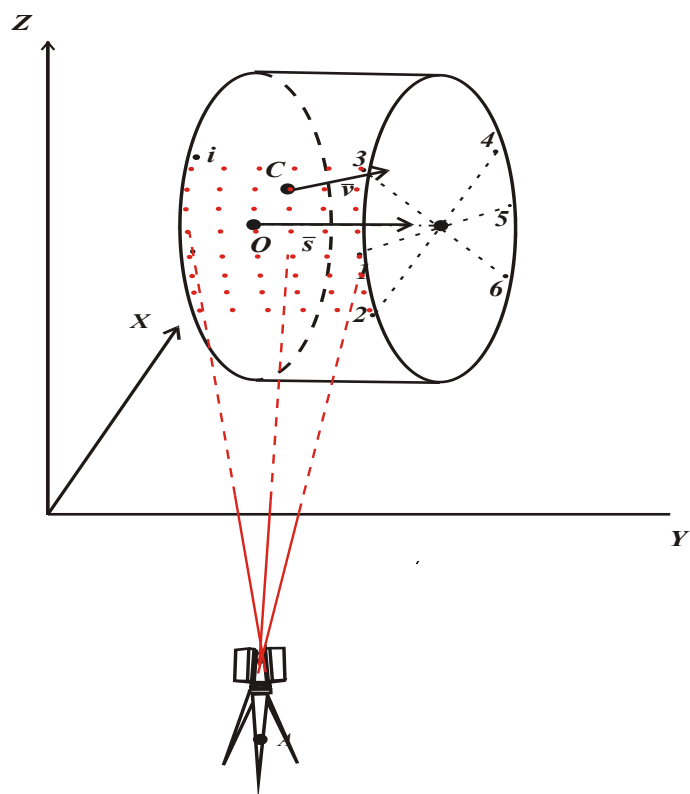


Рисунок 4.21 – Схема сканирования банджа вращающегося агрегата



Рисунок 4.22 – Сканирование вращающегося агрегата

Сканер был установлен на опоре, расположенной рядом с объектом неработающей печи.

Определение параметров печи основано на результатах измерений пространственных координат точек на поверхности наблюдаемого объекта и моментов времени измерений.

В общем случае поверхность работающей печи в начальный момент времени  $t_0$  описывается уравнением (1.4), представленным в первом разделе диссертации.

При измерениях осуществляется регистрация  $\bar{r}_i$  – вектора координат точки пересечения сканирующего луча и поверхности вращающейся печи в некоторый момент текущего времени  $t$  (рисунки 4.23 и 4.21).

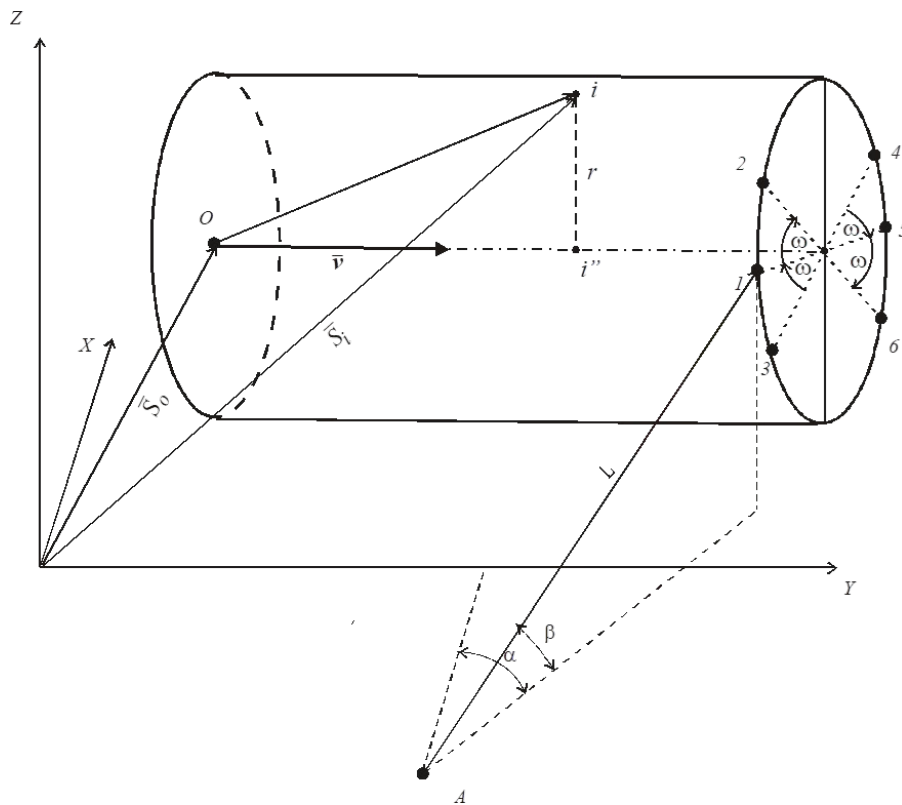


Рисунок 4.23 – Геометрическая схема измерений объекта

Определение геометрических и кинематических параметров элементов агрегата осуществляется путем совместного решения системы уравнений, состав-

ленных для достаточного количества измеренных точек на поверхности вращающегося объекта.

Так как все основные конструктивные элементы обжиговой печи имеют цилиндрическую форму, рассмотрим цилиндрический объект радиусом  $R$ . Предположим, что его геометрическая ось проходит через точку  $O$ , имеющую направляющий единичный вектор  $\bar{s}$ .

Исследуемый объект вращается вокруг оси, которая проходит через точку  $C$  и имеет направляющий вектор  $\bar{v}$ . Из точки  $A$  из сканера выходит луч под углами  $\alpha$  и  $\beta$ , и пересекает поверхность цилиндра в точке  $i$ , координаты которой рассчитываются по следующим формулам [57]:

$$\left. \begin{aligned} x_i &= x_A + L \cos \alpha \cos \beta; \\ y_i &= y_A + L \sin \alpha \cos \beta; \\ z_i &= z_A + L \sin \beta. \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

В векторной форме уравнение цилиндра имеет следующий вид:

$$|\bar{r}_i - \bar{r}_O|^2 - |\bar{s} \times (\bar{r}_i - \bar{r}_O)|^2 - R^2 = 0, \quad (4.10)$$

где  $\bar{r}_O$  – вектор координат точки  $O$  на оси цилиндра;

$\bar{r}_i$  – вектор координат точки на его поверхности.

В момент времени  $t$  при повороте цилиндра на угол  $u_t$  вектор координат  $\bar{r}_i$  определяется следующим выражением:

$$\bar{r}_i = \bar{r}_c + A(\bar{v}, u_t)(\bar{r}_i - \bar{r}_c), \quad (4.11)$$

где  $A(\bar{v}, u_t)$  – ортогональная матрица поворота, заданная  $\bar{v}$  и  $u_t$

$$u_t = 2\pi \frac{t - t_0}{w}, \quad (4.12)$$

где  $w$  – время одного оборота исследуемого объекта;

$t_0$  – время начала измерений.

Подставив выражение (4.11) в уравнение цилиндра (4.10), получим следующую формулу:

$$|\bar{r}_c + A(\bar{v}, u_t)(\bar{r}_l - \bar{r}_c) - \bar{r}_0|^2 - |\bar{s} \times (\bar{r}_l - \bar{r}_0)|^2 - R^2 = 0. \quad (4.13)$$

Координаты точки пересечения лазерного луча с вращающейся поверхностью объекта получаем совместным решением уравнений (4.9) и (4.13) относительно расстояния  $L$ . Таким образом, задав параметры положения цилиндра, скорость его вращения и время измерений, получим координаты точек поверхности объекта. По полученным данным можно определить геометрические и кинематические параметры элементов агрегата.

Параметры бандажа вращающейся обжиговой печи по вычисленным координатам рассчитываются на основе уравнения (4.13) выражением [57]

$$\left. \begin{aligned} \varphi_i &= |\bar{r}_c + A(\bar{v}, u_t)(\bar{r}_l - \bar{r}_c) - \bar{r}_0|^2 - |\bar{s} \times (\bar{r}_l - \bar{r}_0)|^2 - R^2 = \varepsilon_i; \\ (i &= 1, \dots, n), \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

где  $n$  – количество измеренных точек;

$\varepsilon_i$  – невязка, вызванная погрешностями измерений.

При разложении в ряд (4.14) получено

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \varphi_i}{\partial \bar{r}_c} \delta \bar{r}_c + \frac{\partial \varphi_i}{\partial \bar{r}_0} \delta \bar{r}_0 + \frac{\partial \varphi_i}{\partial \bar{v}} \delta \bar{v} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial \bar{s}} \delta \bar{s} + \frac{\partial \varphi_i}{\partial R} \delta R + l_i &= \varepsilon_i; \\ (i &= 1, \dots, n), \end{aligned} \right\} \quad (4.15)$$

где  $\delta\bar{r}_c, \delta\bar{r}_0, \delta R$  – поправки в приближенные величины искомых параметров;

$l_i$  – невязка уравнения (4.13) при подстановке приближенных значений.

Оценка точности определяемых параметров выполнялась решением выражения (4.15) по методу наименьших квадратов, как корень из их дисперсии (СКО при наличии случайных ошибок измерений) [57].

Согласно рассмотренному методу выполнена развертка измерений лазерного сканера во времени. На рисунке 4.24 представлен массив точек одного снимка элементов печи, на который попали две секции обечайки и три бандажа, на рисунке 4.25 показана развертка этих элементов во времени.

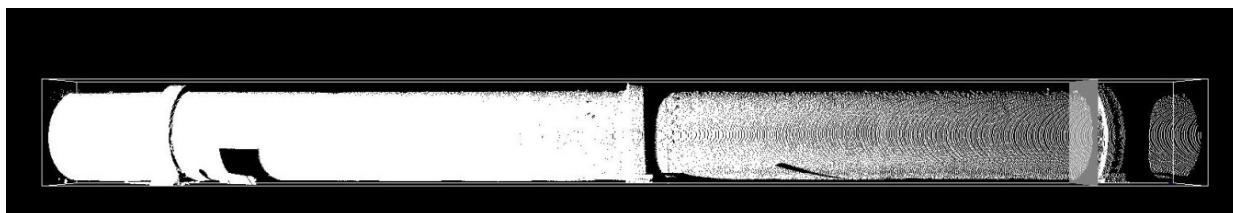


Рисунок 4.24 – Исходный скан элементов печи

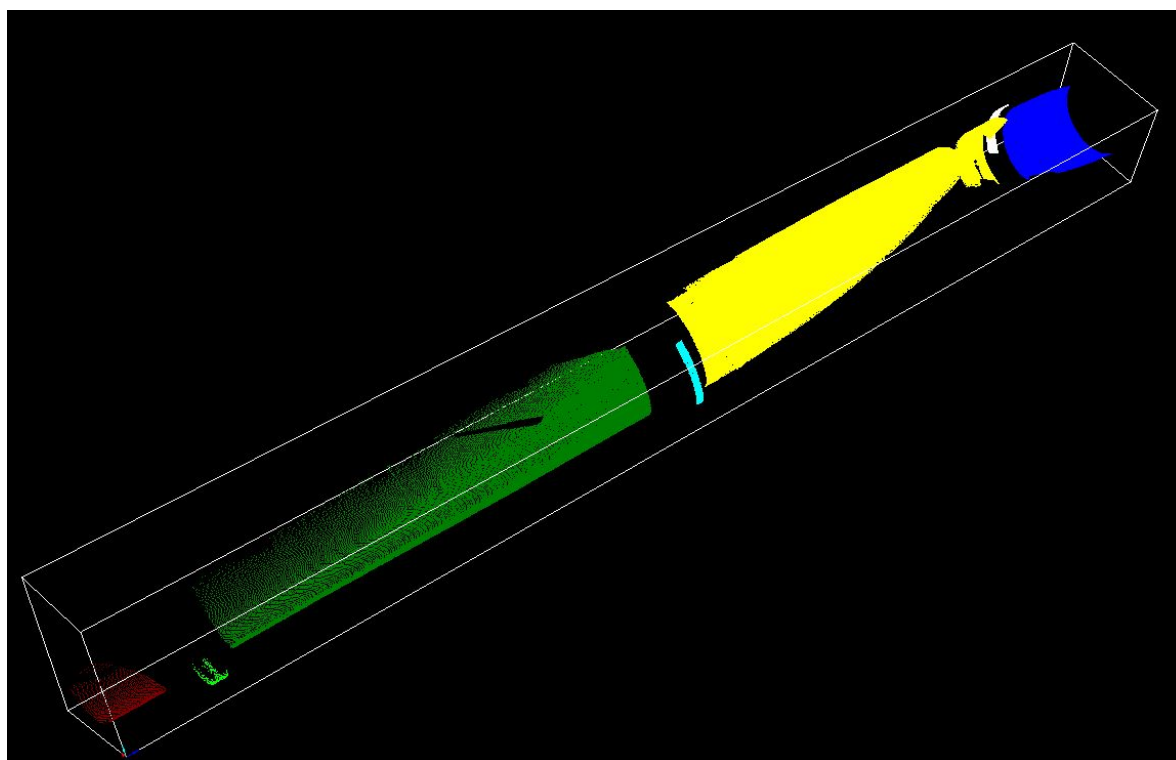


Рисунок 4.25 – Скан, развернутый во времени

На рисунке 4.25 видно, что за время выполнения сканирования объект выполнил почти полный оборот вокруг своей оси. Следует отметить, что часть точек исходного скана была удалена вручную, так как они могли повлиять на результаты определения параметров исследуемых элементов, это точки, принадлежащие другим объектам – перилам ограждающих конструкций, столбам электропередачи, подбандажным башмакам и т. п.

В таблицах 4.14 и 4.15 представлены значения ожидаемой оценки точности параметров элементов объекта цилиндрической формы при различных вариантах сканирования и расчетов [57].

Таблица 4.14 – Точность определения параметров цилиндра без определения центра вращения и направления оси вращения

Параметры исследуемого объекта	Количество сканов на объекте				Количество сканов, измеренных с двух сторон объекта			
	1	2	3	6	1+1	2+2	3+3	6+6
	СКО, мм							
Геометрический центр	16,60	6,55	4,85	3,40	11,35	4,60	3,40	2,40
Направление геометрической оси	3,20	1,30	0,95	0,70	2,25	0,95	0,70	0,50
Радиус	3,90	0,50	0,20	0,05	0,10	0,05	0,05	0,05

Таблица 4.15 – Точность определения параметров исследуемого объекта с вычислением центра вращения и направления оси вращения

Параметры исследуемого объекта	Количество сканов на объекте				Количество сканов, измеренных с двух сторон			
	2	3	4	6	2+2	3+3	4+4	6+6
	СКО, мм							
Геометрический центр	10,15	7,70	5,75	4,70	6,80	5,15	4,15	3,10
Центр вращения	12,0	8,90	7,15	5,50	8,30	6,20	5,00	3,90
Направление геометрической оси	1,95	1,45	1,20	0,90	1,35	1,00	0,85	0,60
Направление оси вращения	2,75	1,30	1,00	0,80	1,90	0,95	0,70	0,55
Радиус	2,750	2,250	1,950	1,600	0,005	0,005	0,050	0,050

В ходе работы были отмечены преимущества применения лазерного сканирования при геодезическом мониторинге вращающихся печей, а также выявлены некоторые его несовершенства. Точность создания ОГС с помощью лазерного сканирования значительно уступает высокоточным построениям опорных сетей, выполненных с помощью электронных тахеометров. К недостаткам также можно отнести ошибки связывания сканов, отсутствие автоматизации идентификации отдельных конструктивных элементов объекта, то есть выделения из общего массива данных точек, принадлежащих отдельным частям промышленного агрегата – обечайкам, бандажам и роликам.

Следует отметить, что для сканирования работающего вращающегося агрегата можно использовать только сканеры RIEGL, так как только данные лазерные сканеры позволяют извлечь из облака точек время их измерения. Для совершенствования методики НЛС для «горячей» выверки промышленных агрегатов требуется разработка специального программного обеспечения для управления процессом сканирования с учетом времени вращения наблюдаемого объекта.

Исследование технологии НЛС на практике показало, что ее можно рекомендовать для определения геометрических параметров крупногабаритного промышленного оборудования.

#### 4.8 Обработка результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отражения сигнала

Использование результатов измерения НЛС позволяет получить целый ряд дополнительных материалов для изыскания, проектирования, строительства и мониторинга инженерных сооружений и промышленного технологического оборудования [61, 63, 100, 101, 136]. К таким материалам относятся весьма детальные точечные модели исследуемых объектов и их конструктивных элементов, которые имеют различные интенсивности отражений лазерного импульса. Для совершенствования обработки результатов лазерного сканирования в САПР возникает необходимость классификации точек по коэффициентам отраженного сигнала.

Интенсивность отраженных импульсов представляет собой значения энергии сигналов, вернувшихся в приемник НЛС. Эти значения зависят от дальности излучения прибора, отражательной способности исследуемого объекта, состояния атмосферы и многих других условий [100, 135, 136].

Показатели интенсивности отраженных импульсов позволяют выявлять различные объекты и их элементы на местности, а также определять их некоторые свойства, состояние и взаимное расположение [136]. Становится важной задача классификации пространственного массива точек, то есть разделения этих точек по определенным типам.

При построении топографического плана по результатам НЛС можно выделить несколько типов данных, например, точки, относящиеся к земной поверхности, растительности, сооружениям и т. д. При обработке материалов НЛС программными средствами на сканах видно не только площадные объекты, но и объекты линейного типа [100].

Известно, что по точкам отражения от поверхности объекта строится его цифровая модель с высокой полнотой и точностью. Трехмерные компьютерные модели можно также создавать по определенным точкам, отобраным по значениям интенсивности лазерных отражений, свойственных различным объектам местности, инженерным сооружениям и технологическому оборудованию.

В связи с этим необходимо разработать методику классификации пространственных данных по результатам лазерного сканирования.

Классификация лазерных точек подразумевает установление принадлежности каждой из точек или группы точек тому или иному объекту. Наличие такой информации позволит автоматизировать дальнейший процесс обработки результатов НЛС и выделять целый ряд объектов и их элементов из трехмерного массива точек.

Результаты НЛС отображаются в программном обеспечении разными видами цветного кодирования точек с учетом расстояния, угла отражения, освещенности и других условий. Современные информационные технологии обработки про-

пространственных данных позволяют применить параметры стиля классификации и другие параметры стилей, которые позволяют создавать реалистичный вид точечной модели.

В программных средствах с помощью настройки стилей отображения можно устанавливать различные режимы просмотра пространственных данных, а также варианты их фильтрации. Группы точек могут быть представлены в соответствии с определенным для них кодом, который был присвоен им при классификации. Таким образом, классификация позволяет отображать массив точек согласно присвоенной им цветовой кодировкой. Это особенно важно, когда требуется выделить на скане различные элементы исследуемой территории или промышленного объекта. Кроме того, способом классификации можно выявить и отобразить состояние поверхностей инженерных сооружений, например, с учетом их влажности и температуры.

Стиль точек можно скорректировать таким образом, чтобы отфильтровать нежелательные «шумы» (ошибочные точки) из общего массива пространственных данных. После фильтрации и корректировки данных НЛС становится возможной автоматизация дальнейших процессов обработки массивов точек, а также 3D-моделирования, например, разработки трехмерной цифровой модели промышленного оборудования.

Для графического отображения и статистического анализа результатов НЛС целесообразно использовать гистограммы распределений, так как рассматриваемые материалы представлены в виде огромного массива пространственных данных, насчитывающих сотни тысяч и более точек.

В этом случае гистограммы определяют распределение лазерных точек в зависимости от значений коэффициентов отраженного сигнала. Частота таких распределений результатов НЛС выражается столбиковыми диаграммами, разделенными по интервалам или классам для выбранной совокупности коэффициентов отражений.

Среднее значение определяемого коэффициента рассчитано по следующей формуле [100]:

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N DK_i, \quad (4.16)$$

где  $N$  – общее количество лазерных точек;

$D$  – вес коэффициента  $K$  лазерного отражения, который зависит от отражающей поверхности и других условий.

Дисперсия результатов гистограммы определена по формуле

$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DK_i - \mu)^2. \quad (4.17)$$

Стандартное отклонение (Std. Dev.) рассчитывается следующей формулой:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (DK_i - \mu)^2}. \quad (4.18)$$

В случае когда гистограмма лазерных отражений имеет два и более пика, следует считать, что на скане имеется несколько объектов или элементов с подобными отражающими свойствами.

Количество столбцов (Bars) гистограммы регулируется ее растяжением или сжатием, как интерактивно, так и аналитически вводом числовых значений.

Для анализа методики классификации коэффициентов интенсивности лазерных отражений выполнены экспериментальные исследования на основе результатов НЛС реальных объектов местности.

Для примера рассмотрим небольшую совокупность лазерных точек (Count = 12), представленных на рисунке 4.26, для произвольной поверхности.

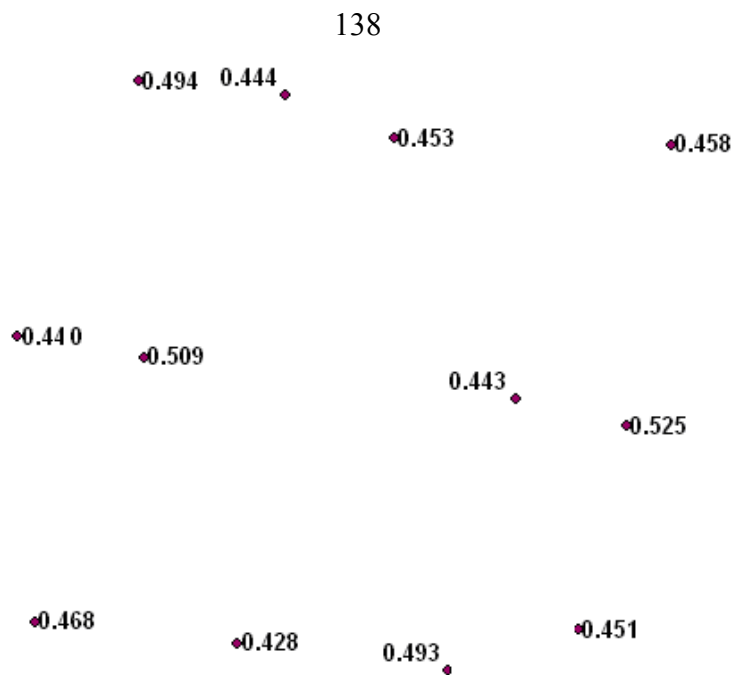


Рисунок 4.26 – Точки лазерных отражений

Гистограмма лазерных отражений для данных точек показана на рисунке 4.27, где приведены дополнительные статистические результаты.

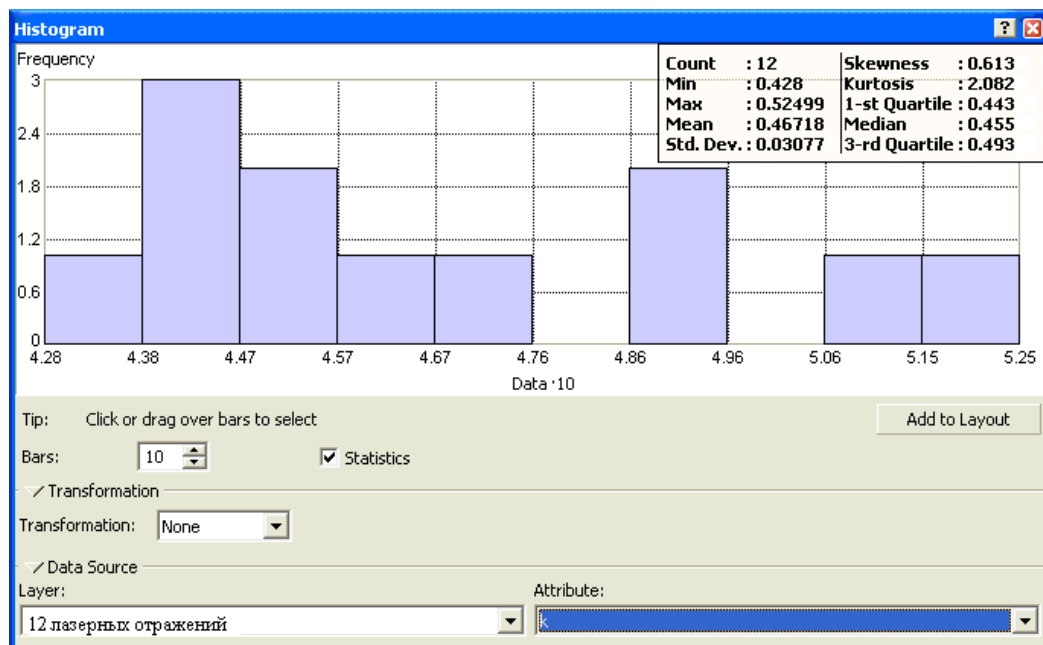


Рисунок 4.27 – Гистограмма лазерных отражений для 12 лазерных точек

Гистограмма лазерных отражений позволяет также выполнить классификацию совокупности лазерных точек по их отражениям (например, см. рису-

нок 4.27), где по вертикальной оси показана частота проявления (Frequency) или количество точек, а по другой оси – значения коэффициентов отражения по определенным диапазонам.

Как следует из рисунка 4.28, усредненное значение коэффициента лазерного отражения равно 0,442 461 и находится в диапазоне между 0,438 и 0,447. В данном случае частота проявления указанного диапазона соответствует 3,00.

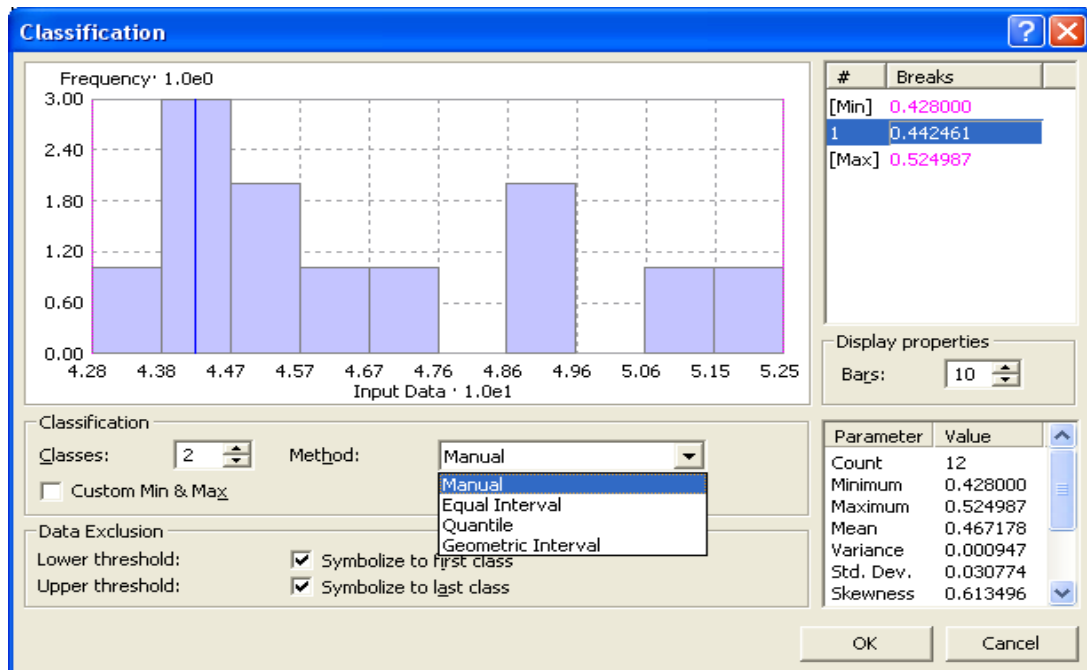


Рисунок 4.28 – Классификация лазерных отражений  
в интерактивном режиме (Manual)

Полученное значение коэффициента лазерного отражения имеет среднее квадратическое отклонение (Std. Dev.) 0,03. Исходя из этого,  $K = 0,44 \pm 0,03$ .

В качестве дополнительных статистических данных приведены также минимальное (Min = 0,428000), максимальное (Max = 0,524987) значения, Variance = 0,000947 и др.

$$\text{Variance} = \frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (K_j - \mu)^2. \quad (4.19)$$

Рассмотренная методика классификации результатов наземного лазерного сканирования применима и для больших массивов пространственных данных.

Зависимость показателей отраженного сигнала от вида сканированных поверхностей была подтверждена на основе экспериментальных исследований. Опытным путем выявлено, что по результатам НЛС можно определить уровень влажности поверхности, на основе этого параметра можно выполнять анализ значений влагонасыщения, теплоизоляции стен инженерных сооружений и опор технологического оборудования, а также судить об их прочности и долговечности.

Поверхности инженерных сооружений имеют определенную влажность, если они построены из традиционных материалов, таких как дерево, бетон и кирпичи. По результатам НЛС можно выполнять анализ изменения влажности поверхностей инженерных сооружений.

В СГУГиТ было выполнено сканирование сухой и влажной поверхности стены здания НЛС. Для получения наиболее достоверных результатов измерения производились несколько раз. В результате экспериментальных исследований получены несколько массивов точек для сухой и влажной поверхности стены.

Информация о результатах НЛС приведена на рисунках 4.29 и 4.30. По итогам измерений видно, что интенсивности (Intensity) отраженного сигнала для сухой и влажной поверхности имеют различные значения.

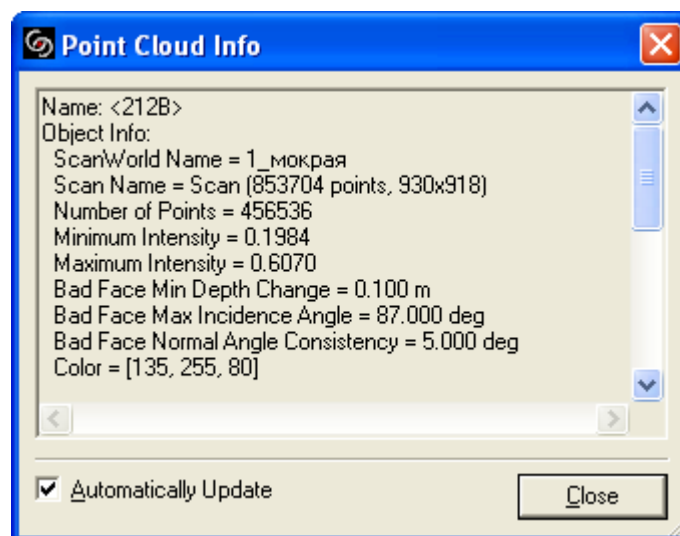


Рисунок 4.29 – Сведения о результатах НЛС влажной поверхности

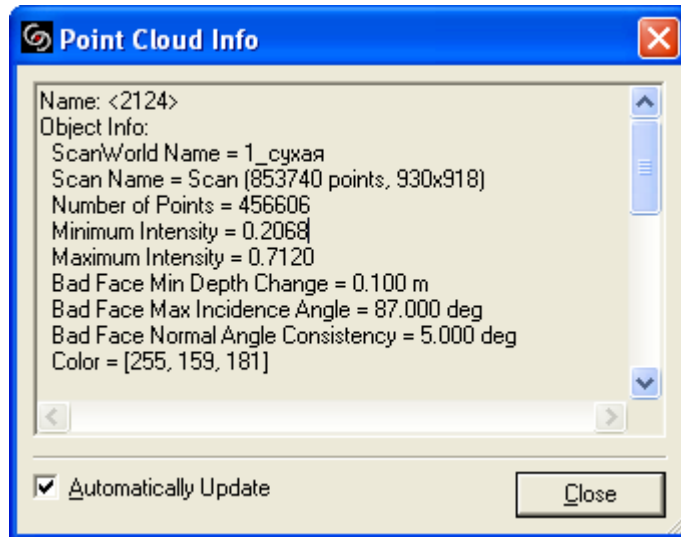


Рисунок 4.30 – Сведения о результатах НЛС сухой поверхности

Для графического представления и статистического анализа результатов НЛС построены гистограммы распределений для сухой и влажной поверхностей (рисунки 4.31, 4.32) с целью дальнейшей классификации совокупности лазерных точек по их отражениям.

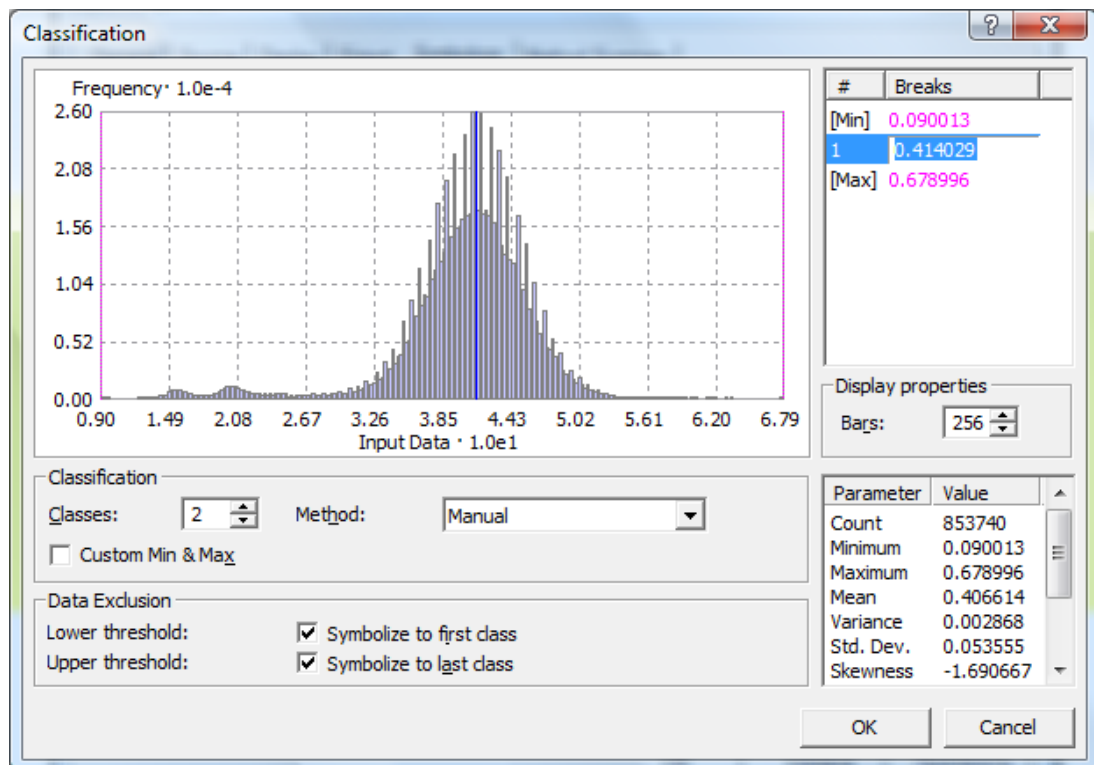


Рисунок 4.31 – Гистограмма распределений для сухой стены

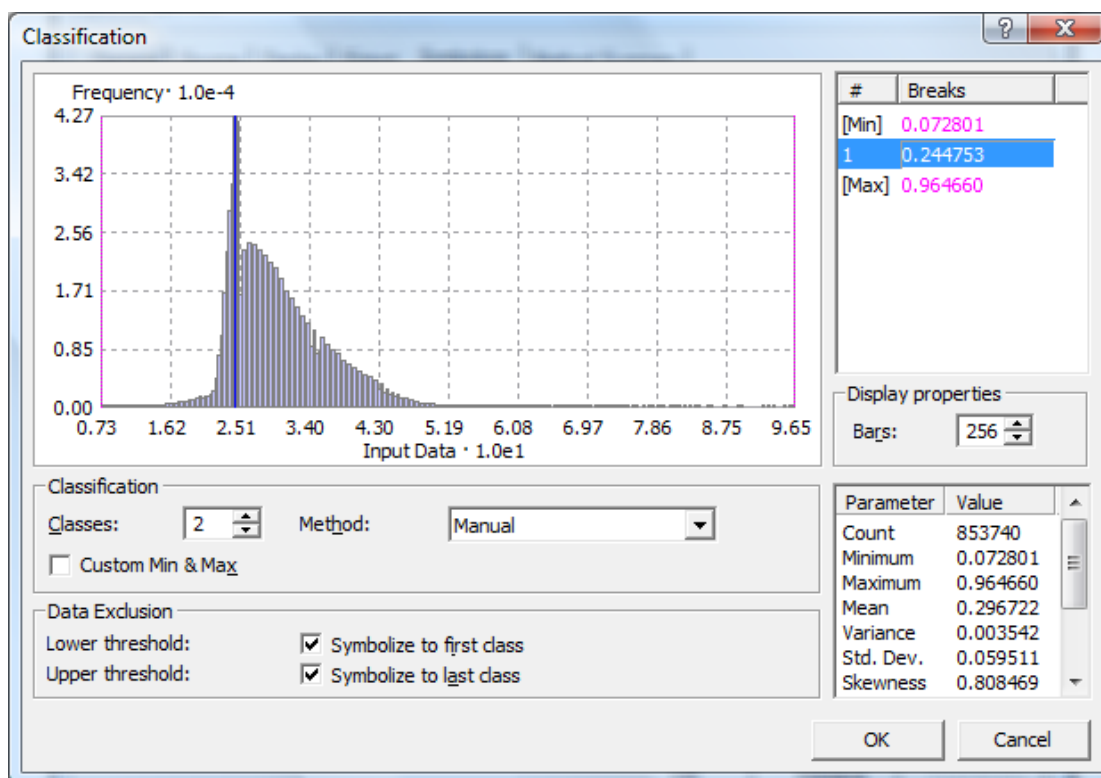


Рисунок 4.32 – Гистограмма распределений для влажной стены

Полученные гистограммы показывают распределение количества лазерных точек в зависимости от значений коэффициентов отраженного сигнала. Частота распределения данных НЛС выражается в виде столбиковых диаграмм, разделенных по интервалам.

На основе гистограмм лазерных отражений можно выполнить классификацию совокупности лазерных точек по их отражениям (например, см. рисунки 4.31, 4.32), где по горизонтальной оси показано усредненное значение коэффициента отражения.

В таблице 4.16 представлены усредненные значения показателя интенсивности отраженного сигнала по результатам измерений влажной и сухой поверхности.

Анализ полученных данных показал, что интенсивность отраженного сигнала при влажной поверхности наблюдаемого объекта уменьшилась приблизительно в 1,6 раза.

Таблица 4.16 – Значения отраженного сигнала сухой и влажной поверхности

Номер приема	Средний показатель интенсивности сигнала	
	Сухой поверхности	Влажной поверхности
1	0,421	0,249
2	0,392	0,292
3	0,402	0,240
4	0,400	0,235
5	0,404	0,238
Среднее значение	0,404	0,251

Нормативный срок безаварийной эксплуатации конструктивного элемента инженерного сооружения определяется как максимально допустимый срок работы несущего элемента под статической нагрузкой [37, 38, 149]. Согласно нормативным требованиям, каменные стены облегченной кладки из кирпича, шлакоблоков и ракушечника имеют нормативный срок эксплуатации 100 лет [38, 149]. В ходе анализа влажности стены, принимая значение среднего показателя интенсивности отраженного сигнала 0,404 сухой стены за нулевое значение влажности, получено, что 0,251 влажной стены составит 62,75 % от первоначального. Соответственно значение влажности данной мокрой стены будет равно 37,25 %.

Зная влажность стен, можно вычислить значение их теплопроводности по следующей формуле:

$$\lambda_w = \lambda_0 + kW, \quad (4.20)$$

где  $\lambda_w$  – теплопроводность;

$\lambda_0$  – теплопроводность полностью сухого материала;

$k$  – коэффициент, равный 0,005;

$W$  – влажность.

Получено, что теплопроводность рассматриваемой стены равна 0,84 Вт/м×К.

Анализ вычисленных значений влажности и теплопроводности показал, что срок эксплуатации исследуемого здания может уменьшиться из-за высокой влажности стен на 20–30 лет.

Результаты экспериментального исследования привели к выводам, что предложенные алгоритмы анализа значений интенсивности отраженного сигнала позволят определить влажность поверхностей инженерных сооружений в процентном соотношении, а также рассчитать теплопроводность и срок безаварийной их эксплуатации.

Применение НЛС для контроля состояния инженерных сооружений позволит значительно снизить временные затраты, сократить расходы на ремонт и строительство, перенести технологию проектирования на качественно новый уровень, повысить уровень автоматизации и общую производительность труда [101].

Предложенную методику использования материалов НЛС можно применить для геодезического мониторинга земляных и бетонных плотин, фундаментов зданий и сооружений, а также опор крупногабаритного промышленного оборудования.

#### 4.9 Выводы по четвертому разделу

В результате проведенной работы усовершенствована методика определения и оценки точности геометрических параметров крупногабаритного промышленного оборудования по геодезическим данным на основе 3D-моделирования. Предложены алгоритмы определения деформаций, вертикальности (кренов) и осадок инженерных сооружений по результатам полярной съемки, тригонометрического нивелирования и 3D-моделирования средствами программы Cyclone. Дана априорная оценка точности определяемых элементов трехмерных моделей с учетом влияния случайных ошибок измерений. На основе 3D-моделирования по геодезическим данным можно выполнять определение геометрических параметров крупногабаритных промышленных агрегатов и объектов цилиндрической, полусферической, куполообразной и даже прямоугольной формы. Это позволяет

автоматизировать и ускорить процесс обработки данных, полученных с помощью электронных тахеометров, точность которых может превышать точность некоторых моделей лазерных сканеров. Следует отметить, что новые модели безотражательных электронных тахеометров имеют различные режимы сканирования, которые позволяют добиться большей эффективности предложенной методики геодезического мониторинга с точки зрения экономической целесообразности.

Предложенный алгоритм определения и оценки точности геометрических параметров, осадок и деформаций крупногабаритных объектов по геодезическим данным с применением Cyclone может быть распространен на другие программы 3D-моделирования, например, AutoCad Civil 3D, Bentley, TerraSolid, Technodigit 3DReshaper, Credo и др.

Проведенное исследование технологии наземного лазерного сканирования для определения геометрических параметров технологического оборудования показало ее состоятельность и перспективность. Применение НЛС позволяет значительно сократить время выполнения геодезического мониторинга и обеспечивает достаточно высокую точность определения параметров работающих агрегатов.

Предложенная методика статистического анализа и классификации результатов НЛС позволяет получить качественные и количественные характеристики инженерных сооружений и автоматизировать дальнейший процесс камеральной обработки пространственных данных в специальном программном обеспечении и системах автоматизированного проектирования (Cyclone, MicroStation, AutoCad Civil 3D и др.).

В качестве недостатка технологии НЛС можно выделить недостаточную точность создания опорной геодезической сети и сшивки сканов.

Ограничением применения технологии лазерного сканирования для «горячей» выверки оборудования является то, что только сканеры фирмы RIEGL позволяют извлечь из облака точек данные о времени измерения каждой точки. Для синхронизации измерений во времени и учета времени вращения агрегата требуется специальное ПО, управляющее процессом сканирования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований в диссертационной работе получены следующие результаты:

– выполнен анализ современного состояния геодезического обеспечения определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования, на основании которого сформулированы цель и задачи научного исследования диссертационной работы;

– усовершенствована методика построения опорной геодезической сети для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования, позволяющая определять геометрические параметры вращающихся печей с нормированной точностью;

– выполнен анализ точности параметров предложенной схемы построения опорной геодезической сети для определения геометрических параметров обжиговой печи, который показал, что форма и ориентировка средних квадратических эллипсов ошибок оптимальны для определения координат станций и соответствуют нормированной точности;

– предложен способ повышения точности опорной геодезической сети за счет регулирования весов угловых и линейных измерений, при котором эллипс ошибок стремится к кругу;

– проведены исследования влияния ошибок измерений, внешних условий и ошибок исходных данных на точность определяемых параметров технологического оборудования при выполнении геодезического мониторинга, на основании которых разработан алгоритм априорной оценки точности геодезического мониторинга промышленного оборудования, позволяющий повысить точность определения его геометрических параметров и качество наблюдения за деформациями обжиговых печей за счет уменьшения влияния ошибок измерений, ошибок исходных данных и внешних факторов;

– предложена трехмерная компьютерная модель вращающейся обжиговой печи, позволяющая автоматизировать и ускорить процесс выполнения деформационного мониторинга с использованием электронных тахеометров и наземных лазерных сканеров;

– проведены экспериментальные исследования усовершенствованной методики деформационного мониторинга крупногабаритного технологического оборудования на примере производственных предприятий АО «Искитимцемент» и АО «Ачинскцемент», которые показали высокую эффективность предложенных технологических решений, позволяющих с нормированной точностью определять геометрические параметры обжиговых печей в условиях действующего производства.

Перспектива дальнейших исследований заключается в совершенствовании методики геодезического мониторинга крупногабаритного технологического оборудования в области полной автоматизации процессов выполнения геодезических измерений.

Разработанная методика геодезического мониторинга может быть использована для повышения надежности определения эксплуатационных характеристик крупногабаритного промышленного оборудования и деформационного анализа обжиговых печей и других объектов цилиндрической и овальной формы (линий валопроводов, турбоагрегатов атомных и тепловых электростанций).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аввакумов, С. И. Особенности диагностирования металлургического оборудования [Текст] / С. И. Аввакумов, В. А. Сидоров, А. Л. Сотников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2002. – № 3. – С. 96–99.
- 2 Асташенков, Г. Г. Геодезические работы при эксплуатации крупногабаритного промышленного оборудования [Текст] : учеб.-метод. пособие / Г. Г. Асташенков. – М. : Недра, 1986. – 151 с.
- 3 Асташенков, Г. Г. Интервальные оценки параметров осей прямолинейных инженерных объектов значительной протяженности [Текст] / Г. Г. Асташенков, Е. И. Тимошенко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1992. – № 5. – С. 16–23.
- 4 Асташенков, Г. Г. Многокритериальные задачи при определении оптимального положения оси промышленного агрегата значительной протяженности [Текст] / Г. Г. Асташенков, Е. И. Тимошенко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1988. – № 1. – С. 25–29.
- 5 Асташенков, Г. Г. О базовой проблеме геодезических наблюдений за осадками зданий и инженерных сооружений [Текст] // Успехи современного естествознания. – 2008. – № 8. – С. 54–55.
- 6 Асташенков, Г. Г. Определение оптимального положения оси вращающейся печи при эксплуатации [Текст] / Г. Г. Асташенков, Е. И. Тимошенко // Применение геодезических методов при строительстве и эксплуатации инженерных сооружений : межвуз. сб. – Новосибирск, 1979. – Т. 7. – С. 57–62.
- 7 Асташенков, Г. Г. Определение оптимального положения оси корпуса вращающейся печи [Текст] / Г. Г. Асташенков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1988. – № 2. – С. 39–45.
- 8 Асташенков, Г. Г. Определение оптимальной оси промышленного объекта значительной протяженности с учетом минимального количества сдвижек

[Текст] / Г. Г. Асташенков, Е. И. Тимошенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 7. – С. 77–81.

9 Асташенков, Г. Г. Разработка математической модели процесса деформаций крупногабаритных промышленных агрегатов с точки зрения геодезического контроля их прямолинейности [Текст] / Г. Г. Асташенков, Диб Фархан // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1994. – № 1. – С. 13–21.

10 Асташенков, Г. Г. Рациональные способы оптимального положения осей вытянутых инженерных сооружений и промышленных агрегатов [Текст] / Г. Г. Асташенков, Е. И. Тимошенко // Изв. вузов. Строительство и архитектура. – 1981. – № 10. – С. 82–92.

11 Асташенков, Г. Г. Теоретическое обоснование геодезических методов определения начальных деформаций осей крупногабаритных промышленных агрегатов на упругоподатливых фундаментах [Текст] : монография / Г. Г. Асташенков ; Федеральное агентство по образованию Российской Федерации, Новосибирский гос. архитектурно-строительный ун-т (Сибстрин). – Новосибирск : НГАСУ, 2006. – 132 с.

12 Асташенков, Г. Г. Учет коэффициента податливости основания фундаментов вращающихся печей при эксплуатации [Текст] / Г. Г. Асташенков // Изв. вузов. Строительство. – 2012. – № 3. – С. 82–85.

13 Ахмедшин, Р. И. Системы мониторинга оборудования и технологических процессов в металлургическом производстве [Текст] / Р. И. Ахмедшин, П. Л. Алексеев // Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация». – 2008. – № 11. – С. 96–101.

14 Ашраф, А. Бешр. Разработка и совершенствование технологий определения деформаций инженерных сооружений с помощью современных высокоточных геодезических способов и средств измерений [Текст]: дис. ... канд. техн. наук / А. Бешр Ашраф. – Новосибирск, 2010. – 205 с.

15 Баран, П. И. Геодезические работы при монтаже и эксплуатации оборудования [Текст]. – М. : Недра, 1990. – 233 с.

16 Беспалов, Ю. И. Исследование точности измерения превышений электронными тахеометрами [Текст] / Ю. И. Беспалов, С. Г. Мирошниченко // Геодезия и картография. – 2009. – № 3. – С. 12–13.

17 Библиотека цементного завода [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://prostroyamat.ru/tags/vyverka> (дата обращения: 21.01.2018).

18 Большаков, В. Д. Геодезия. Изыскания и проектирование инженерных сооружений [Текст] / В. Д. Большаков, Е. Б. Ключин, И. Ю. Васютинский : практикум. – М. : Недра, 1991. – 238 с.

19 Большаков, В. Д. Теория математической обработки геодезических измерений [Текст] / В. Д. Большаков, П. А. Гайдаев. – М. : Недра, 1965. – 274 с.

20 Большаков, В. Д. Уравнивание геодезических построений [Текст] / В. Д. Большаков, Ю. И. Маркузе, В. В. Голубев. – М. : Недра, 1989.

21 «Бум Техно», ЗАО разрабатывает и внедряет технологии выверки вращающихся печей [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.korabel.ru/news/comments/bum\\_tehno\\_zao\\_razrabativaet\\_i\\_vnedryaet\\_tehnologii\\_viverki\\_vrashchayushchihsya\\_pechey.html](http://www.korabel.ru/news/comments/bum_tehno_zao_razrabativaet_i_vnedryaet_tehnologii_viverki_vrashchayushchihsya_pechey.html).

22 Васютинский, И. Ю. Геодезические приборы при строительномонтажных работах [Текст] / И. Ю. Васютинский, Г. Е. Рязанцев, Х. К. Ямбаев. – М. : Недра, 1982. – 272 с.

23 Влияние нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения [Текст] / А. А. Шоломицкий, П. С. Ковалев, Т. М. Медведская, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 18–26.

24 Вовк, И. Г. Моделирование формы и оценка размеров систем в прикладной геоинформатике [Текст] // Вестник СГГА. – 2013. – Вып. 2 (22). – С. 17–26.

25 Воеводин, В. В. Матрицы и вычисления [Текст] / В. В. Воеводин, Ю. А. Кузнецов. – М. : Наука, 1984.

26 Вшивкова, О. В. О комплексном подходе к решению рефракционной проблемы [Текст] / О. В. Вшивкова // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2005. – № 4. – С. 41–46.

27 Ганьшин, В. Н. Измерение вертикальных смещений сооружений и анализ устойчивости реперов [Текст] / В. Н. Ганьшин, А. Стороженко, Н. А. Буденков. – М. : Недра, 1981.

28 Геодезические измерения при изучении деформаций крупных инженерных сооружений [Текст] / Д. Ш. Михеев и др. – М. : Недра, 1977.

29 Геодезические разбивочные работы [Текст] / Н. Г. Видуев, П. И. Баран, С. П. Войтенко и др. – М. : Недра, 1973. – 216 с.

30 Геодезическое обеспечение высокоточного монтажа и выверки технологического оборудования [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников, И. С. Фролов, Е. Е. Кужненко // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. – 2011. – № 2. – С. 34–45.

31 Голубев, В. В. Основы теории ошибок [Текст] / В. В. Голубев. – М. : МИИГАиК, 2005.

32 Голубев, В. В. Теория математической обработки геодезических измерений [Текст] / В. В. Голубев : учеб. для вузов. – М. : МИИГАиК, 2016. – 422 с.

33 Горяинов, И. В. О наилучшей конфигурации обратной линейно-угловой засечки и необходимом количестве пунктов для достижения заданной точности [Текст] / И. В. Горяинов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 4. – С. 41–47.

34 Горяинов, И. В. Экспериментальные исследования применения обратной линейно-угловой засечки для оценки стабильности пунктов плановой деформационной геодезической сети [Текст] / И. В. Горяинов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 1. – С. 28–39.

35 ГОСТ 21436–2004. Изделия огнеупорные и высокоогнеупорные для футеровки вращающихся печей. Технические условия [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2005.

36 ГОСТ 21780–2006. Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Расчет точности [Текст]. – М. : Центр метрологии нормирования и стандартизации в строительстве, 2008.

37 ГОСТ 24846–2012. Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений [Электронный ресурс] : межгосударственный стандарт. – Режим доступа: [https://standartgost.ru/g/ГОСТ\\_24846-2012](https://standartgost.ru/g/ГОСТ_24846-2012).

38 ГОСТ 31937–2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния [Текст]. – М. : Стандартинформ, 2014.

39 ГОСТ 34518–2019. Печи промышленные и агрегаты тепловые. Правила организации и производства работ, контроль выполнения и требования к результатам работ [Электронный ресурс] : межгосударственный стандарт. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200163937>.

40 Гуляев, Ю. П. Алгоритм оценивания параметров динамической модели и прогнозирования процесса перемещений наблюдаемых точек сооружения [Текст] / Ю. П. Гуляев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 1984, № 3. – С. 26–32.

41 Гуляев, Ю. П. Задачи экологического и деформационного мониторинга [Текст] / Ю. П. Гуляев, А. И. Каленицкий // Геодезия и картография. – 1999. – № 3. – С. 49–53.

42 Гуляев, Ю. П. Идентификация динамической модели деформации сооружения по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1983. – № 4. – С. 35–41.

43 Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений [Текст] / Ю. П. Гуляев. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.

44 Дворецкий, Н. П. Исследование точности угловых измерений в условиях строительства АЭС [Текст] / Н. П. Дворецкий // Энергетическое строительство. – 1982. – № 5. – С. 70–71.

45 Жуков, Б. Н. Геодезический контроль инженерных объектов промышленных предприятий и гражданских комплексов [Текст]: учеб. пособие / Б. Н. Жуков, А. П. Карпик. – Новосибирск : СГГА, 2006. – 144 с.

46 Жуков, Б. Н. Геодезический контроль сооружений и оборудования промышленных предприятий [Текст] : монография / Б. Н. Жуков. – Новосибирск : СГГА, 2003. – 356 с.

47 Жуков, Б. Н. Роль, теория и практика геодезического контроля технического состояния зданий и сооружений [Текст] / Б. Н. Жуков // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 11–17.

48 Жуков, Б. Н. Руководство по геодезическому контролю сооружений и оборудования промышленных предприятий при их эксплуатации [Текст] / Б. Н. Жуков. – Новосибирск : СГГА, 2004. – 376 с.

49 Зайцев, А. К. Геодезические методы исследования деформаций сооружений [Текст] / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев. – М. : Недра, 1991. – 272 с.

50 Захаренко, В. Измерение и визуализация температуры корпуса вращающейся печи [Электронный ресурс] / В. Захаренко, В. Никоненко. – Режим доступа: [http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/2005-/38\\_40\\_OTA\\_04\\_05.pdf](http://www.rmo.ru/ru/nmoborudovanie/nmoborudovanie/2005-/38_40_OTA_04_05.pdf).

51 Измерительный комплекс «Визир 3D» на предприятиях Украины: Геодезический контроль и выверка технологического оборудования [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, В. Н. Ревуцкий, В.А. Пригаров // Геопрофиль. – 2009. – № 3 (6). – С. 12–19.

52 Изотов, А. А. Исследование земной рефракции и методов геодезического нивелирования [Текст] / А. А. Изотов, Л. П. Пеллинен // Труды ЦНИИГАиК. – М. : Геодезиздат, 1955. – Вып. 102. – 176 с.

53 Инженерная геодезия [Текст] : учеб. пособие. Часть II / Е. С. Богомоллова, М. Я. Брынь, В. А. Коугия, О. Н. Малковский, В. И. Полетаев, О. П. Сергеев, Е. Г. Толстов; под ред. В. А. Коугия. – СПб. : Петербургский государственный университет путей сообщения, 2008. – 93 с.

54 Инженерная геодезия и геоинформатика: краткий курс [Текст] : учеб. / М. Я. Брынь, Е. С. Богомоллова, В. А. Коугия, Б. А. Левин, С. И. Матвеев,

В. И. Полетаев, О. П. Сергеев, Е. Г. Толстов ; под ред. В. А. Коугия. – СПб. ; М. ; Краснодар : Лань, 2015. – 285 с.

55 Инженерная геодезия. Геодезические сети [Текст] : учеб. пособие / В. С. Ермаков, Е. Б. Михаленко, Н. Н. Загрядская, Н. Д. Беляев, Ф. Н. Духовской. – СПб. : СПбГПУ, 2003. – 40 с.

56 Исследование влияния вибрации на точность измерений цифровыми нивелирами и электронными тахеометрами [Текст] / А. Бешр Ашраф, В. Г. Сальников, М. Е. Рахымбердина, А. Н. Теплых // Геодезия и аэрофотосъемка. – № 3. – 2012. – С. 123–126.

57 Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.

58 Кинематические локационные измерения вращающихся агрегатов [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. А. Лунев, А. Л. Сотников, И. С. Фролов // Наукові праці Донец. нац. тех. ун-та. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вип. 1 (18). – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – С. 3–14.

59 Комиссаров, А. В. Исследование точности построения цифровой модели рельефа по данным наземного лазерного сканирования [Текст] / А. В. Комиссаров // ГЕО-Сибирь-2006. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 24–28 апреля 2006 г.). – Новосибирск : СГГА, 2006. Т. 1, ч. 2. – С. 12–14.

60 Комиссаров, Д. В. Априорная оценка точности результатов наземного лазерного сканирования для топографической съемки [Текст] / Д. В. Комиссаров, А. В. Середович // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 1, ч. 2. – С. 134–137.

61 Комиссаров, Д. В. Использование технологии трехмерного лазерного сканирования при строительстве, эксплуатации и проектировании инженерных

сооружений [Текст] / Д. В. Комиссаров, А. В. Середович // Стр-во и город. хоз-во Сибири. – 2004. – № 10. – С. 72–73.

62 Комиссаров, Д. В. Обзор программных продуктов для обработки данных наземного лазерного сканирования [Текст] / Д. В. Комиссаров, А. В. Иванов // ГЕО-Сибирь-2005. Науч. конгр. : сб. материалов в 7 т. (Новосибирск, 25–29 апреля 2005 г.). – Новосибирск : СГГА, 2005. Т. 1, ч. 1. – С. 205–206.

63 Комиссаров, Д. В. Опыт применения технологии лазерного сканирования при проектировании и контроле монтажа фасадов зданий [Текст] / Д. В. Комиссаров, О. А. Дементьева // ГЕО-Сибирь-2007. III Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 25–27 апреля 2007 г.). – Новосибирск : СГГА, 2007. Т. 1, ч. 2. – С. 126–128.

64 Комплексная инспекция вращающихся печей в процессе эксплуатации [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Е. И. Шморгун, Е. Е. Кужненко // Вісник Криворізького технічного університету. Зб. наук. праць. – Вип. 28. – 2011. – С. 43–46.

65 Контроль грубых ошибок измерений и исходных данных [Текст] / Ю. И. Маркузе, Лэ Ань Куонг, Нгуен Тхи Тху, Динь Хай Нам // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 7. – С. 11–16.

66 Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] / Г. Корн, Т. Корн. – М. : Наука, 1974. – 832 с.

67 Коугия, В. А. Сравнение методов обнаружения и идентификации грубых ошибок измерений [Текст] / В. А. Коугия // Геодезия и картография. – 1998. – № 5. – С. 23–27.

68 Коугия, В. А. Современные проблемы уравнивания инженерно-геодезических сетей [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. А. Коугия, В. И. Павлов. – СПб. : Изд-во НМСУ «Горный», 2012. – 105 с.

69 Коугия, В. А. Строгое уравнивание линейной засечки [Текст] / В. А. Коугия // Геодезия и картография. – 1979. – № 5. – С. 25–26.

70 Кредо-Диалог [Электронный ресурс]. – Электрон. дан. – М., 2010. – Режим доступа: <http://www.credo-dialogue.com>.

71 Крот, П. В. Активный контроль крутильных колебаний и вибрации в прокатных станах [Текст] / П. В. Крот, И. Ю. Приходько // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2009. – № 3 (18). – С. 44–60.

72 Кудрявцев, С. А. Определение осадок фундаментов высотных зданий в г. Хабаровске [Текст] / С. А. Кудрявцев, А. В. Никитин, А. Р. Едигарян, А. В. Кажарский // *Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. научн. тр. ; под ред. В. С. Шварцфельда*. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, Вып. 3. – 2015. – С. 163–166.

73 Кузьо, И. В. Расчет и контроль установки агрегатов непрерывного производства [Текст] // И. В. Кузьо, Т. Г. Шевченко. – Львов : Вища школа, 1987. – 176 с.

74 Куштин, И. Ф. Геодезия: обработка результатов измерений [Текст] : учеб. пособие. – М. : ИКЦ «МарТ». – Ростов н/Д. : Издат. центр «МарТЧ», 2006. – 288 с.

75 Левчук, Г. П. Прикладная геодезия: Основные методы и принципы инженерно-геодезических работ [Текст] : учеб. для вузов / Г. П. Левчук, В. Е. Новак, В. Г. Конусов. – М. : Недра 1981. – 438 с.

76 Маркузе, Ю. И. Алгоритмы для уравнивания геодезических сетей на ЭВМ [Текст] / Ю. И. Маркузе. – М. : Недра, 1989. – 248 с.

77 Маркузе, Ю. И. Геодезия. Вычисление и уравнивание геодезических сетей [Текст] / Ю. И. Маркузе, Е. Г. Бойко, В. В. Голубев. – М. : Картгеоцентр – Геодезиздат, 1994.

78 Маркузе, Ю. И. Исследование алгоритма для анализа деформаций геодезических пунктов при наблюдении за горизонтальными смещениями гидротехнических сооружений [Текст] / Ю. И. Маркузе, Лэ Ань Куонг // *Геодезия и картография*. – 2017. – Т. 78. – № 7. – С. 23–30.

79 Маркузе, Ю. И. Исследование исходной матрицы обратных весов неизвестных при рекуррентном способе уравнивания измерений [Текст] / Ю. И. Маркузе, Лэ Ань Куонг, Чан Тиен Ранг // Геодезия и картография. – 2016. – № 11. – С. 7–10.

80 Маркузе, Ю. И. Математическая обработка геодезических измерений [Текст] / Ю. И. Маркузе // Итоги науки и техники. Сер. Геодезия и аэросъемка. – Т. 23. – М. : ВИНТИ, 1985.

81 Маркузе, Ю. И. Основы уравнивательных вычислений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. И. Маркузе. – М. : Недра, 1990. – 240 с.

82 Маркузе, Ю. И. Теория математической обработки геодезических измерений [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. И. Маркузе, В. В. Голубев ; под общ. ред. Ю. И. Маркузе. – М. : Академический Проект Альма Матер, 2010. – 247 с.

83 Маркузе, Ю. И. Уравнивание геодезических сетей с контролем грубых ошибок [Текст] / Ю. И. Маркузе // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1986. – № 5. – С. 9–18.

84 Маркузе, Ю. И. Уравнивание и оценка точности плановых геодезических сетей [Текст] / Ю. И. Маркузе. – М. : Недра, 1982.

85 Маркузе, Ю. И. Эффективный алгоритм для анализа деформаций [Текст] / Ю. И. Маркузе // Геодезия, 225 лет МИИГАиК. – М. – С. 306-317.

86 Медведская, Т. М. Исследование точности опорных сетей для геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования [Текст] / Т. М. Медведская // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 2. – С. 56–65.

87 Медведская, Т. М. Особенности геодезических наблюдений за деформациями объектов нефтяной промышленности [Текст] / Т. М. Медведская // 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. 109–113.

88 Микольский, Ю. Н. Выверка и центровка промышленного оборудования, изд. 2-е, перераб. и доп. [Текст] / Ю. Н. Микольский, В. М. Кравченко. – Киев : «БудІвельник», 1979. – 188 с.

89 Могильный, С. Г. Трьохкоординатний вимірювальний комплекс «Визир 3D» [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Є. І. Шморгун; гол. ред. О. А. Мінаєв (голова) // Наукові праці Донец. нац. тех. ун-та. Серія: «Гірничо-геологічна». – Вип. 9 (143). – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – С. 13–25.

90 Могильный, С. Г. Геодезический мониторинг и выверка металлургического оборудования [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, И. С. Фролов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 132–143.

91 Могильный, С. Г. Новая технология определения геометрических и кинематических параметров вращающихся печей в процессе их эксплуатации [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, И. С. Фролов // Сучасні досягнення геодезичної науки і виробництва. Зб. наук. праць. – Львів : Видавництво національного університету «Львівська політехніка». – 2011. – Вип. 1 (21). – С. 125–130.

92 Мониторинг деформаций сооружений в сочетании с технологией трехмерного моделирования [Текст] / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова, В. А. Середович, А. В. Середович, Г. Н. Ткачева, С. С. Студенков // Геодезия и картография. – 2006. – № 6. – С. 12–14.

93 Мониторинг деформационных процессов строительных и инженерных объектов [Электронный ресурс]. – Центр «Геодинамика». МИИГАиК. – Режим доступа: <http://www.geodinamika.ru/main/engineer/deformation-monitoring>.

94 Назаров, И. А. Исследование влияния угла падения лазерного луча и отражающих свойств поверхности на точность измерения расстояний безотражательным электронным тахеометром [Электронный ресурс] // Интернет-вестник

ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. – 2011. – Вып. 2 (16). – Режим доступа: <http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=548>.

95 Наземное лазерное сканирование [Текст] : монография / А. В. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с.

96 Неволин, А. Г. 3D моделирование крупногабаритных промышленных агрегатов с помощью программного комплекса CYCLONE [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // 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. 223–230.

97 Неволин, А. Г. Анализ точности геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы по результатам геодезических измерений [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 13–24 .

98 Неволин, А. Г. Влияние ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров крупногабаритного технологического оборудования [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 13–19.

99 Неволин, А. Г. К вопросу о влиянии ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров технологического оборудования [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Вестник СГУГиТ. – 2019. – Т. 24, № 1. – С. 16–27.

100 Неволин, А. Г. Классификация результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отраженного сигнала [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейде-

рия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 166–171.

101 Неволин, А. Г. Обработка результатов наземного лазерного сканирования с учетом коэффициента отражения сигнала [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Вестник СГГА. – 2014. – Вып. 1 (25). – С. 47–53.

102 Некоторые направления развития и объекты использования методов высокоточной прикладной геодезии [Текст] / И. Ю. Васютинский, В. В. Ознамец, С. П. Буюкян, А. А. Жидков // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. № 1. – С. 40–44.

103 Никитин, А. В. Геодезический контроль строительства опор мостов [Текст] / А. В. Никитин // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 1. – С. 70–80.

104 Никитин, А. В. Контроль пространственного положения сооружений башенного типа [Текст] / А. В. Никитин, В. И. Никитин // Проектирование развития региональной сети железных дорог : сб. науч. тр. ; под ред. В. С. Шварцфельда. – Хабаровск : ДВГУПС. – 2014. – Вып. 2. – С. 193–198.

105 Никитин, А. В. Система контроля пространственной информации в мостостроении [Текст] / А. В. Никитин, В. С. Хорошилов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 11 (53). – Ч. 5. – С. 95–98.

106 Никитин, А. В. Способ определения крена объектов инфраструктуры железных дорог [Текст] / А. В. Никитин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 9 (51). – Ч. 2. – С. 149–153.

107 Никонов, А. В. Исследование влияния стабильности положения исходной геодезической основы на точность обратной линейно-угловой засечки [Текст] / А. В. Никонов, И. Н. Чешева, Г. В. Лифашина // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 63–69.

108 Никонов, А. В. Исследование точности измерения расстояний электронными тахеометрами в безотражательном режиме [Текст] / А. В. Никонов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 1 (29). – С. 43–54.

109 Никонов, А. В. К вопросу о точности обратной линейно-угловой засечки на малых расстояниях [Текст] / А. В. Никонов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 1. – С. 93–100.

110 О влиянии рефракции при кинематических локационных измерениях вращающихся печей [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, Т. М. Медведская, А. В. Мартынов // Маркшейдерия и недропользование. – 2018. – № 5 (97). – С. 47–51.

111 Обнаружение пережога на вращающейся печи [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.hgh-infrared.com/ru/primeneniye/Promyshlennaya-termografiya/Obnaruzheniye-perezhoga-na-vraschayuschejsya-pechi>.

112 Овчинников, С. С. Влияние электромагнитных полей на точность показаний электронных геодезических приборов [Текст] / С. С. Овчинников // Вестник СГГА. – 2010. – Вып. 2 (13). – С. 18–23.

113 Определение средней квадратической ошибки измерения превышения на станции цифровым нивелиром [Текст] / А. В. Никонов, Е. Л. Соболева, Н. М. Рябова, Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 1. – С. 77–84.

114 Официальный сайт компании Geoservex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.geoservex.com/>.

115 Официальный сайт компании ThyssenKrupp [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.thyssenkrupp.com/en/products/> (дата обращения: 21.01.2018).

116 Официальный сайт ООО «Промышленная геодезия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://promgeo.com/services/kiln> (дата обращения: 25.01.2018).

117 Официальный сайт ТОО «ОРГПРОЕКТЦЕМЕНТ.KZ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://sporc.ru/>.

118 Официальный сайт фирмы Cemex [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.cemex.com> (дата обращения: 21.01.2018).

119 Пат. 2031756 Российская Федерация МПК В22D 11/16. Способ контроля положения направляющих элементов установки непрерывной разливки металла и устройство для его осуществления [Текст] / Лебедев В. И. [и др.]. – № 92014462/02; заявл. 24.12.1992; опубл. 27.03.1995.

120 Пат. 2429450 Российская Федерация МПК51 G01C 3/00 / А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, А. В. Куликов. Способ определения погрешности измерения расстояний наземным лазерным сканером [Текст] ; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия» (СГГА). – 2010107063/28 ; заявл. 25.02.2010 ; опубл. 20.09.2011. – Бюл. № 26. – 6 с. : ил.

121 Пат. 92655, Украина. Спосіб визначення параметрів поверхні обертових агрегатів, G01B 9/00/ [Текст] / С. Г. Могильний, А. А. Шоломицький, а 200901785, Заявл. 02.03.2009; Опубл. 25.11.2010.

122 Петров, В. В. Контроль геометрических характеристик вращающихся печей [Текст] / В. В. Петров, С. В. Тюрин, А. Н. Копытов // Цемент и его применение. – 2010. – № 2. – С. 78–82.

123 Петров, В. В. Технология контроля геометрических характеристик вращающихся печей [Текст] / В. В. Петров, С. В. Тюрин // Целлюлоза. Бумага. Картон. – 2005. – № 7. – С. 66–70.

124 Пискунов, М. Е. Методика геодезических наблюдений за деформациями сооружений [Текст] / М. Е. Пискунов. – М. : Недра, 1980. – 248 с.

125 Поклад, Г. Г. Геодезия [Текст] : учеб. пособие для вузов / Г. Г. Поклад, С. П. Гриднев. – М. : Академический проект, 2007. – 592 с.

126 Применение геодезических засечек, их обобщенные схемы и способы машинного решения [Текст] / [П. И. Баран, В. И. Мицкевич, Ю. В. Полищук и др.]. – М. : Недра, 1986. – 165 с.

127 Применение современных автоматизированных геодезических приборов для мониторинга гидротехнических сооружений ГЭС [Текст] / В. Г. Сальников, В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова, Т. А. Хлебникова // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 108–124.

128 Пронин, А. Технологические аспекты использования информационно-измерительных систем при геодезическом мониторинге динамических сооружений [Текст] / А. Пронин, Ю. Федосеев // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2009. – № 2 (33).

129 Раинкин, В. Я. Определение деформации сооружения башенного типа посредством измерения горизонтальных и вертикальных углов с одного опорного пункта [Текст] / В. Я. Раинкин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1972. – № 3. – С. 23–25.

130 Руководство по выверке технологического оборудования металлургической промышленности [Текст] / Т. Г. Шевченко, С. Г. Хропот, В. П. Пивоваров, А. А. Игнатов, В. Ф. Меньшиков. – М. : Министерство металлургии СССР, 1991. – 212 с.

131 Руководство по геодезическому обеспечению монтажа и эксплуатации технологического оборудования цементной промышленности [Текст]. – М. : Недра, 1983.

132 Руководство по наблюдениям за деформациями оснований фундаментов зданий и сооружений [Текст]. – М. : Стройиздат, 1985. – 160 с.

133 Рязанцев, Г. Е. Применение оптических измерительных систем на основе современных электронных тахеометров для контроля за деформациями

наземных зданий и сооружений [Текст] / Г. Е. Рязанцев, И. С. Бубман // ОФМГ. – 2003. – № 4.

134 Рязанцев, Т. Е. Современные автоматизированные системы контроля деформаций высотных зданий [Текст] / Т. Е. Рязанцев, С. П. Буюкяп, И. А. Седельникова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2005. – № 2.

135 Середович, А. В. Измерение колебаний инженерных объектов на основе данных наземного лазерного сканирования [Текст] / А. В. Середович, А. Р. Мифтахудинов, А. В. Иванов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2013. IX Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 15–26 апреля 2013 г.). – Новосибирск : СГГА, 2013. Т. 2. – С. 137–139.

136 Середович, А. В. Сравнительная характеристика и области применения современных наземных лазерных сканеров [Текст] / А. В. Середович // Вестник СГГА. – 2005. – Вып. 10. – С. 107–109.

137 Сидоров, В. А. Выбор средств технического диагностирования механического оборудования [Текст] / В. А. Сидоров, А. Л. Сотников // Вибрация машин: измерение, снижение, защита: материалы Межд. науч.-техн. конф., 13–15 мая 2003 г., Донецк. – Донецк : ДонНТУ, 2003. – С. 25–30.

138 Симонян, В. В. Геодезический мониторинг зданий и сооружений [Текст] / В. В. Симонян, Н. А. Шмелин, А. К. Зайцев ; под ред. В. В. Симоняна. – М. : НИУ МГСУ, 2015. – 140 с.

139 Скрипников, В. А. Прикладная геодезия. Геодезические работы при определении осадок инженерных сооружений автоматизированными системами и приборами [Текст] : учеб. пособие / В. А. Скрипников, М. А. Скрипникова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – 106 с.

140 Скрипникова, М. А. Возможности применения автоматизированных высокоточных электронных тахеометров при измерении деформаций инженерных сооружений [Текст] / М. А. Скрипникова // ГЕО-Сибирь-2010. VI Междунар.

науч. конгр. : сб. материалов в 6 т. (Новосибирск, 19–29 апреля 2010 г.). – Новосибирск : СГГА, 2010. Т. 1, ч. 1. – С. 131–134.

141 Сотников, А. Л. Диагностирование технического состояния вращающихся агрегатов [Текст] / А. Л. Сотников, А. А. Шоломицкий, П. П. Якобсон // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2013. – № 3. – С. 77–88.

142 Сотников, А. Л. Контроль соосности оборудования МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников // *Бюллетень науч.-техн. и эконом. инфор. «Черная металлургия» ОАО «Черметинформация»*. – 2006. – № 11. – С. 52–55.

143 Сотников, А. Л. Отклонения роликов зоны вторичного охлаждения от технологической оси МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2006. – № 2. – С. 43–48.

144 Сотников, А. Л. Развитие теоретических основ обеспечения параметрической точности машин непрерывного литья заготовок [Текст] / А. Л. Сотников // *Инновационные перспективы Донбасса : тезисы докл. 2-й Межд. науч.-практ. конф., 25–26 мая 2016 г., Донецк*. В 8 т. Т. 3. *Инновационные технологии изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов*. – Донецк : ДонНТУ, 2016. – С. 42–46.

145 Сотников, А. Л. Расчет долговечности подшипников качения механизма качания кристаллизатора МНЛЗ [Текст] / А. Л. Сотников, Н. А. Родионов, А. С. Парфенюк // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2014. – № 1. – С. 71–78.

146 Сотников, А. Л. Технический аудит оборудования машин непрерывного литья заготовок [Текст] / А. Л. Сотников // *Современные тенденции ТОиР. Диагностика оборудования горно-металлургического и энергетического комплексов: тезисы докладов Межд. науч.-практ. конф., 2013 г., Мариуполь*. – Мариуполь : ММК им. Ильча, 2013. – С. 57–59.

147 СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. [Электронный ресурс]: Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/871001219>.

148 СП 126.13330.2017. Геодезические работы в строительстве [Электронный ресурс] : свод правил // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/550965720>.

149 СП 43.13330.2012. Сооружения промышленных предприятий. Актуализированная редакция СНиП 2.09.03-85 (с изменениями № 1, 2) [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200092709>.

150 СП 47.13330.2012. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 11-02-96 [Текст]. – М., 2013.

151 СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 [Текст]. – М., 2013.

152 Справочник геодезиста [Текст] : в 2х кн. Кн. 1 / под ред. В. Д. Большакова, Г. П. Левчука. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1985. – 455 с.

153 Справочник по инженерной геодезии [Текст] / под общ. ред. Н. Г. Видуева. – Киев : Вища школа, 1978. – 376 с.

154 СТОиР. Система технического обслуживания и ремонта технологического оборудования предприятий промышленности строительных материалов. Выпуск I. Цементная промышленность. Ч. I. Оргпроектцемент. 1989. – 236 с.

155 Столбов, Ю. В. Геодезические измерения осадок фундаментов [Текст] / Ю. В. Столбов // Геодезические методы контроля качества в строительстве : межвуз. сб. науч. тр. – Куйбышев : Куйбышев. гос. ун-т. – 1984. – С. 84–88.

156 Столбов, Ю. В. Исследование и обоснование допусков на геодезические работы при монтаже промышленных сооружений [Текст] : дисс. ... канд. техн. наук / Ю. В. Столбов. – М. : МИСИ, 1975. – 141 с.

157 Столбов, Ю. В. К вопросу о точности контрольных геодезических измерений при приемке строительных конструкций [Текст] / Ю. В. Столбов, В. В. Столбов // Вопросы применения геодезии в строительстве : сб. трудов. – Омск, 1975. – Вып. 49. – С. 72–76.

158 Столбов, Ю. В. Контроль точности монтажа технологического оборудования нефтехимических предприятий [Текст] / Ю. В. Столбов // Геодезические работы в строительстве и мелиорации. – М. : ВАГО АН СССР, 1980. – С. 96–99.

159 Столбов, Ю. В. Методология учета точности геодезических, строительных и монтажных работ при проектировании и возведении зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов // Топографо-геодезические работы и совершенствование их технологий : сб. науч. тр. – Омск, 1993. – С. 32–36.

160 Столбов, Ю. В. Назначение точности возведения строительных конструкций с учетом ответственности зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, С. Ю. Столбова // Вестник СибАДИ. – 2006. – Вып. 4. – С. 134–137.

161 Столбов, Ю. В. О влиянии погрешностей геодезического контроля на надежность возведения сборных зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов // Вопросы применения геодезии в строительстве : сб. трудов. – Омск, 1975. – Вып. 49. – С. 77–80.

162 Столбов, Ю. В. О точности геодезического контроля при возведении сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, В. В. Столбов // Вопросы строительства и эксплуатации автомобильных дорог : сб. науч. тр. – Омск : Западно-Сибирское кн. изд-во, 1974. – Вып. 5. – С. 162–164.

163 Столбов, Ю. В. Прикладная геодезия. Геодезические разбивочные работы при строительстве зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, Ю. В. Столбова. – Омск : СибАДИ, 2016. – 43 с.

164 Столбов, Ю. В. Экономическое обоснование допусков на геодезические и строительные-монтажные работы при возведении зданий и сооружений [Текст] / Ю. В. Столбов, С. Ю. Столбова, О. Ю. Хуторная // Землеустроительное и кадастровое обеспечение комплексного развития территории и недвижимости : сб. трудов. – Омск : ИПК Макшеевой Е. А., 2010. – С. 131–135.

165 Сундаков, Я. А. Геодезические работы при возведении крупных промышленных сооружений и высотных зданий [Текст] / Я. А. Сундаков. – М. : Недра, 1980. – 343 с.

166 Технология контроля и выставки вращающихся агрегатов [Текст] / А. А. Шоломицкий, А. А. Лунев, А. Л. Сотников, В. Н. Машичев // *Металлургические процессы и оборудование*. – 2013. – № 2 (32). – С. 39–49.

167 Точность определения геометрических параметров вращающихся агрегатов при «холодной» выверке [Текст] / С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Середович, А. А. Лунев // *Материалы международной научной конференции «Современные технологии и развитие политехнического образования»*, г. Владивосток, 14–18 сентября 2015 г., Научное электронное издание ФГАОУ ВПО «ДФУ», 2015. – С. 245–249.

168 Тюрин, С. В. Определение скорости вращения по многократным измерениям дальностей до объекта [Текст] / С. В. Тюрин. – СПб., 2005. – 8 с. – Деп. в ВИНТИ 22.11.05, № 1519В2005.

169 Тюрин, С. В. Применение метода сингулярного разложения для обработки данных с датчика расстояний при наблюдениях за вращающимися объектами [Текст] / С. В. Тюрин. – СПб., 2005. – 20 с. – Деп. в ВИНТИ 22.11.05, Ksi 520В2005.

170 Тюрин, С. В. Уравнивание свободных пространственных сетей. Современные проблемы геомеханики, геотехнологии, маркшейдерского дела и геодезии [Текст] / С. В. Тюрин. – СПб. : Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет), 2004. – С. 193–197.

171 Уставич, Г. А. Влияние внешних факторов при наблюдениях за оборудованием [Текст] / Г. А. Уставич // *Геодезия и картография*. – 1979. – № 5. – С. 31–33.

172 Уставич, Г. А. Геодезия. В 2-х кн. Кн. 1 [Текст] : учебник для вузов / Г. А. Уставич. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 352 с.

173 Уставич, Г. А. Некоторые вопросы технологии выполнения высокоточного нивелирования цифровыми нивелирами [Текст] / Г. А. Уставич, С. А. Бабасов // *Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2014. X Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия»* : сб. материалов

в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 1. – С. 17–23.

174 Уставич, Г. А. Определение крена сооружений башенного типа СРС-приемниками и тахеометрами [Текст] / Г. А. Уставич // Геодезия и картография. – 2003. – № 9. – С. 30–33.

175 Учет корректного показателя преломления атмосферы в результатах измерений современными дальномерами и электронными тахеометрами [Текст] / А. В. Кошелев, А. П. Карпик, С. С. Овчинников, А. А. Дубинина // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 1 (17). – С. 67–71.

176 Федоренко, М. А. Формирование отклонений пространственного положения рабочих органов вращающегося оборудования [Текст] / М. А. Федоренко // Технология машиностроения. – 2008. – № 1. – С. 46–48.

177 Хасенов, К. Б. Выверка строительных конструкций с использованием лазерных приборов [Текст] / К. Б. Хасенов, А. Г. Гольцев, О. Д. Салпышев // Вестник СГГА. – 2012. – Вып. 3 (19). – С. 14–18.

178 Хиллер, Бернд. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга [Текст] / Бернд Хиллер, Х. К. Ямбаев // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.

179 Хорошилов, В. С. Оптимизация выбора методов и средств геодезического обеспечения монтажа технологического оборудования [Текст] / В. С. Хорошилов // Вестник СГГА. – 2006. – Вып. 11. – С. 117–125.

180 Хропот, С. Г. Эффективные средства геодезического контроля установки вращающейся печи [Текст] / С. Г. Хропот // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 1988. – № 6. – С. 49–55.

181 Чибуничев, А. Г. Исследование цилиндрических поверхностей фотограмметрическими методами [Текст] / А. Г. Чибуничев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофото-съемка. – 1992. – № 1. – С. 56–63.

182 Швигер, Фолькер. Оценка качества инженерно-геодезических работ в строительстве [Текст] / Фолькер Швигер, Ли Чжан, Йюрген Швейцер // Вестник СГГА. – 2011. – Вып. 3 (16) – С. 25–45.

183 Шевченко, Т. Г. Влияние конструктивных особенностей крупногабаритных агрегатов на точность установки их инженерно-геодезическими методами [Текст] / Т. Г. Шевченко, К. Р. Третьяк // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1985. – № 6. – С. 50–57.

184 Шеховцев, Г. А. Теоретические основы одностороннего координатного способа определения крена сооружения башенного типа [Текст] / Г. А. Шеховцев, Р. П. Шеховцева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – № 5. – С. 30–31.

185 Шоломицкий, А. А. Высокоточный измерительный комплекс «Визир 3D» [Текст] / А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников // Prostoiev.NET. – 2014. – № 1. – С. 52–58.

186 Шоломицкий, А. А. Контроль геометрических параметров машины непрерывного литья заготовок [Текст] / А. А. Шоломицкий, А. Л. Сотников, В. И. Адаменко // Metallургические процессы и оборудование. – 2007. – № 3. – С. 27–30.

187 Щербаков, В. В. Автоматизация геодезического обеспечения строительства и ремонта железных и автомобильных дорог: современное состояние и перспективы развития [Текст] / В. В. Щербаков // 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. 42–45.

188 Щербаков, В. В. Контроль геометрических параметров в процессе строительства и ремонта железных дорог [Текст] / В. В. Щербаков, А. А. Земерова, С. А. Комягин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XIV Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов (Новосибирск, 23–27 апреля 2018 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2018. – С. 64–70.

189 Щербаков, В. В. Цифровые модели пути – основа геодезического обеспечения проектирования, строительства (ремонта) и эксплуатации железных дорог [Текст] / В. В. Щербаков, О. В. Ковалева, И. В. Щербаков // Геодезия и картография. – 2016. – № 3. – С. 12–16.

190 Электронные тахеометры компании «НАВГЕОКОМ» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.navgeocom.ru/catalog/taheom/index.htm>.

191 Ямбаев, Х. К. Геодезическое инструментоведение [Текст] / Х. К. Ямбаев. – М. : Академический проект, 2011. – 585 с.

192 Ямбаев, Х. К. Инженерно-геодезические инструменты и системы [Текст]: учеб. пособие для вузов. – М. : МИИГАиК, 2012 – 462 с.: ил.

193 Ямбаев, Х. К. Некоторые аспекты цифровой технологии геодезического мониторинга и диагностики несущих конструкций уникальных инженерных сооружений [Текст] / Х. К. Ямбаев. // Вестник СГУГиТ – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 138–153.

194 Addresses the benefits of choosing to use a hot kiln alignment service [Electronic resource] / Z. Krystowczyk, Kai Zheng, Yun Zhang, Chen Zhao and Lei Liu. Rotary Kiln Cylinder Deformation Measurement and Feature Extraction Based on EMD Method // Engineering Letters. – 2015. – № 23 (4). – PP. 283–291. – Mode of access: <https://www.geoservex.com/publikacje/Get%20In%20Line%20-%20by%20Z.%20Krystowczyk%20Geoservex%20-%20World%20Cement.pdf>.

195 Cyclone CloudWorx for AutoCAD & Bentley CloudWorx [Электронный ресурс] : сайт компании Leica Geosystem AG. – Режим доступа: [http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs\\_6517.htm](http://www.leicageosystem.com/hds/en/lgs_6517.htm).

196 Deformation analysis with total least squares [Text] / M. Acar and others // Nat. Hazards Earth Syst. Sci., № 6. – 2006. – PP. 663–669.

197 Josef, By. Killn Alignment Method Allows Corrections While Operating [Text] / By Josef, L. Robertson // Rock Products, 1987. – PP. 21–22.

198 Krystowczyk, B. Ausrichten von Drehofen und Korrektur der Tragrollen-Verdrehungen während des Betriebes [Text] / B. Krystowczyk // Zement Kalk Gips International, № 5. – 1983. – PP. 288–292.

199 Krystowczyk, B. Nasz biznes z Hindusami [Text] / B. Krystowczyk, Z. Krystowczyk // Geodeta, № 4, KWIECIEN 2002. – PP. 1–7.

200 Krystowczyk, Z. Geometry Measurement Of Killn Shell in Dynamic Condition [Text] / Z. Krystowczyk // Cemend & Building Materials, № 16, June 2004. – PP. 34–37.

201 Measurement of dam deformations by terrestrial interferometric techniques [Electronic resource] / M. Alba, L. Fregonese, and others // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing. – 2008. – PP. 133–139. – Mode of access: [http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/1\\_pdf/23.pdf](http://www.isprs.org/congresses/beijing2008/proceedings/1_pdf/23.pdf).

202 Mogilny, S. Precision Analysis of Geometric Parameters for Rotating Machines During Cold Alignment [Text] / S. Mogilny, A. Sholomitskii // International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017 Procedia Engineering. – 2017. – PP. 1709–1715.

203 Prystupa, O. Effect of temperature on the position of the axis rotation of the rotary kiln [Electronic resource] / O. Prystupa, I. Krutyankov. – Mode of access: [http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2014/10/08\\_THE-EFFECT-OF-TEMPERATURE-ON-THE-POSITION-OF-THE-AXIS-OF-ROTATION-OF-THE-ROTARY-KILN.pdf](http://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2014/10/08_THE-EFFECT-OF-TEMPERATURE-ON-THE-POSITION-OF-THE-AXIS-OF-ROTATION-OF-THE-ROTARY-KILN.pdf).

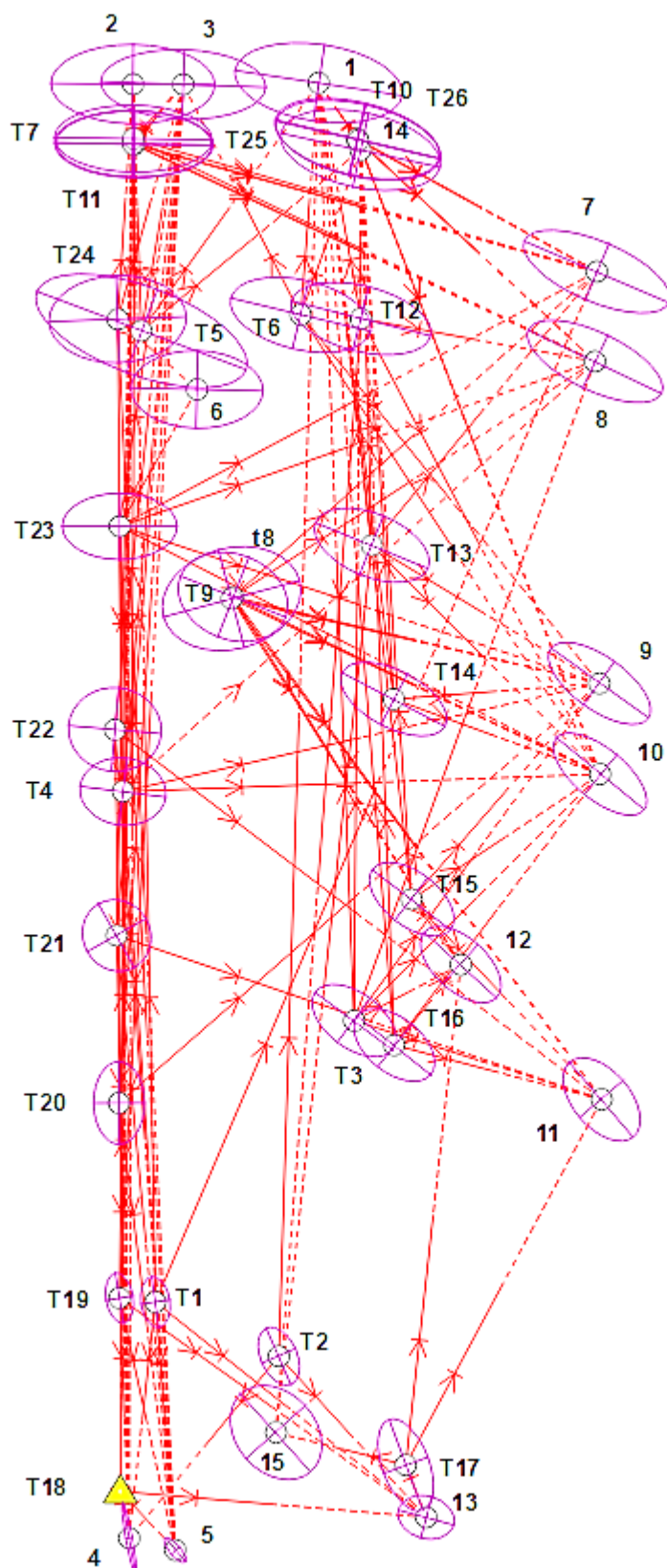
204 RIEGL VZ-400 [Electronic resource]. – Mode of access: [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegldownloads/10\\_DataSheet\\_VZ-400\\_2017-06-14.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_VZ-400_2017-06-14.pdf).

205 The Analysis of Methods for Determining the Geometric Parameters of Rotating Machines [Text] / S. G. Mogilny, A. A. Sholomytskiy, V. A. Seredovich, A. V. Seredovich, A. V. Ivanov // 2nd International Workshop «Integration of Point- and Area-wise Geodetic Monitoring for Structures and Natural Objects. Proceedings 23th-24th march 2015, Studgart, Germany. – P. 119.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## СХЕМА ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

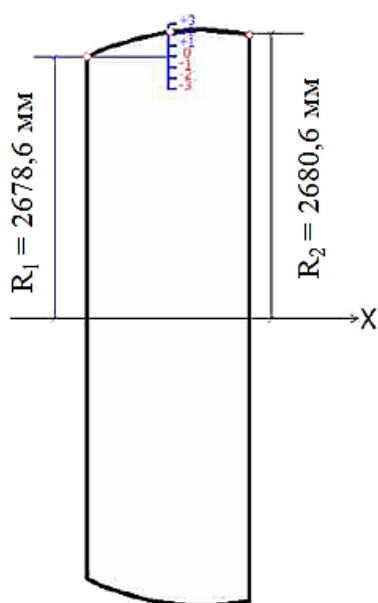
ВЕДОМОСТЬ ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ ПОЛОЖЕНИЯ ПУНКТОВ ОГС  
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ УРАВНИВАНИЯ

Пункт	$m$ , мм	$m_x$ , мм	$m_y$ , мм	$a$ , мм	$b$ , мм	$\alpha$
1	2,7	2,0	2,2	2,2	1,1	99°22'02"
2	2,4	1,8	1,6	1,8	0,8	90°30'34"
3	2,3	1,6	1,6	1,6	0,7	92°02'18"
4	1,7	1,7	0,3	1,7	0,1	169°43'28"
5	0,7	0,5	0,5	0,7	0,2	139°36'51"
6	2,2	1,7	1,4	1,8	1,4	91°17'53"
7	2,2	1,5	1,6	1,7	0,6	113°02'19"
8	2,1	1,5	1,5	1,7	0,8	115°32'08"
9	1,9	1,5	1,3	1,6	1,1	125°51'20"
10	1,2	0,8	0,9	1,1	0,5	129°54'11"
11	1,1	0,8	0,8	1,0	0,6	139°29'59"
12	1,1	0,8	0,7	0,9	0,6	144°43'51"
13	1,5	0,6	1,4	1,4	0,6	106°48'19"
14	3,4	2,0	2,8	2,8	1,2	105°14'49"
15	1,4	1,1	0,9	1,1	0,8	20°05'20"
T1	1,6	1,4	0,7	1,4	0,7	175°09'40"
T2	0,7	0,5	0,4	0,6	0,3	154°15'27"
T3	1,0	0,7	0,8	0,9	0,5	129°01'36"
T4	1,1	0,7	0,8	0,8	0,6	97°11'46"
T5	2,5	1,1	2,0	2,5	0,9	110°37'09"
T6	1,5	0,7	1,4	1,4	0,7	103°37'29"
T7	1,6	0,6	1,5	1,5	0,6	90°48'20"
t8	1,4	0,9	1,1	1,1	0,8	108°46'44"
T9	1,9	1,0	1,6	1,7	0,9	71°02'58"
T10	4,4	2,0	3,9	4,1	1,6	110°16'17"
T11	2,4	2,1	1,5	2,2	1,0	132°56'07"
T12	1,5	0,7	1,3	1,4	0,6	103°46'05"
T13	1,3	0,7	1,1	1,2	0,6	110°51'45"
T14	1,2	0,7	1,0	1,1	0,6	116°51'38"
T15	1,1	0,7	0,8	0,9	0,5	127°00'06"
T16	2,2	1,6	1,5	1,6	1,0	131°45'51"
T17	2,5	2,2	1,2	1,8	1,1	0°08'53"
T19	1,2	1,1	0,4	1,1	0,4	170°32'18"
T20	1,9	1,8	0,6	1,8	1,1	0°00'57"
T21	1,8	1,6	0,8	1,6	1,2	156°17'18"
T22	2,1	1,9	1,0	1,9	1,8	95°31'21"
T23	1,9	1,5	1,2	1,5	0,6	89°50'52"
T24	2,4	2,0	1,3	2,0	1,1	87°57'12"
T25	2,2	1,8	1,2	2,0	0,8	112°59'30"
T26	2,5	1,7	1,9	2,0	0,8	103°09'39"

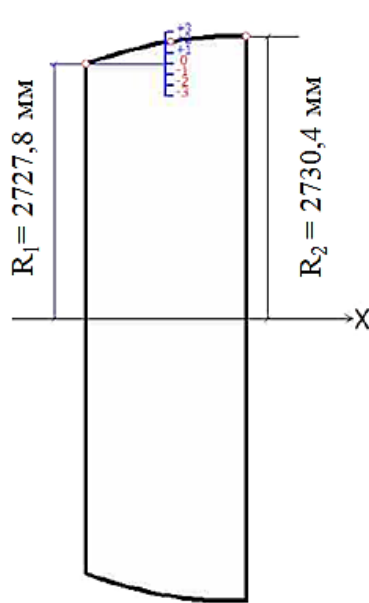
## ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

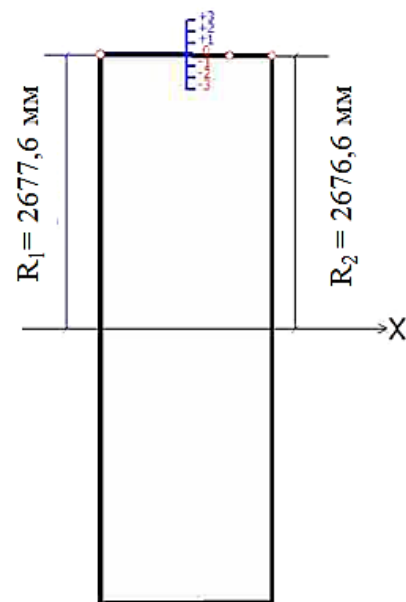
## ПРОДОЛЬНЫЕ ПРОФИЛИ БАНДАЖЕЙ



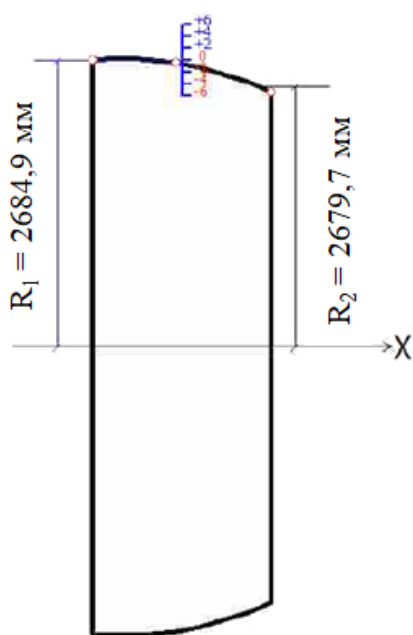
Бандаж №2



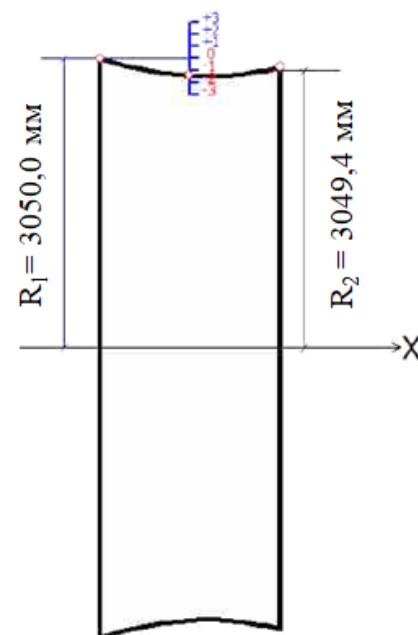
Бандаж №3



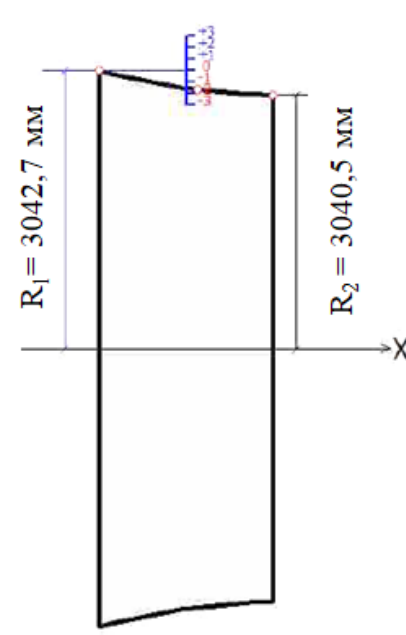
Бандаж №4



Бандаж №5



Бандаж №6

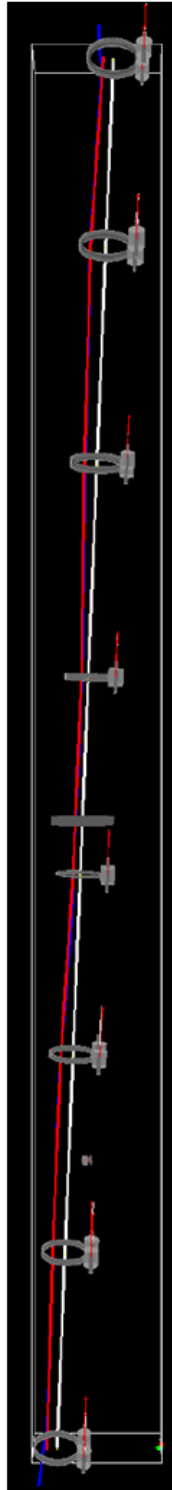


Бандаж №7

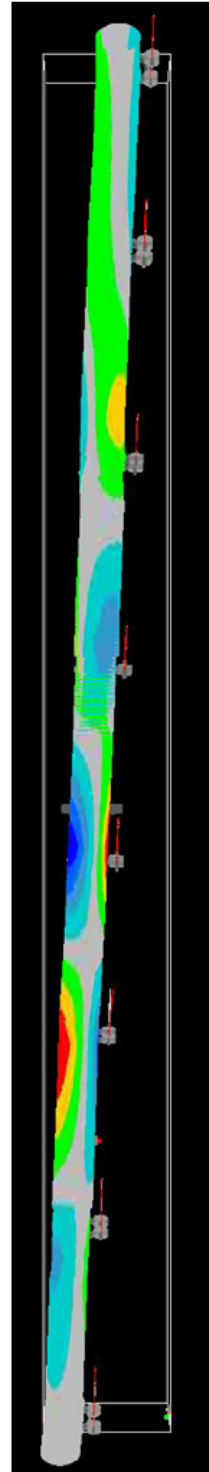
ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ТРЕХМЕРНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ  
ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ОБЖИГОВОЙ ПЕЧИ



Положение осей в пространстве



Модель корпуса печи