

На правах рукописи

Медведская Татьяна Михайловна



Совершенствование методики геодезического мониторинга  
крупногабаритного промышленного оборудования

25.00.32 – Геодезия

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Новосибирск – 2019

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

Научный руководитель – кандидат технических наук, доцент Неволин Анатолий Геннадьевич.

Официальные оппоненты:

Столбов Юрий Викторович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет», профессор кафедры проектирования дорог;

Щербаков Владимир Васильевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой инженерной геодезии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (г. Хабаровск).

Защита состоится 3 декабря 2019 г. в 15-00 на заседании диссертационного совета Д 212.251.02 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

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

Автореферат разослан 10 октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 60 × 84 1/16.

Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 127.

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

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

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

*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 гео-

дезических 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., Когугия 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 геометри-

ческих 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.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* представлены актуальность темы, цель и задачи диссертации, степень разработанности темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы. Освещены методики и результаты исследования, степень их достоверности и апробация полученных результатов.

*В первом разделе* выполнен анализ существующих способов проведения геодезического мониторинга крупногабаритного промышленного оборудования, в том числе применительно к вращающимся обжиговым печам (рисунок 1).

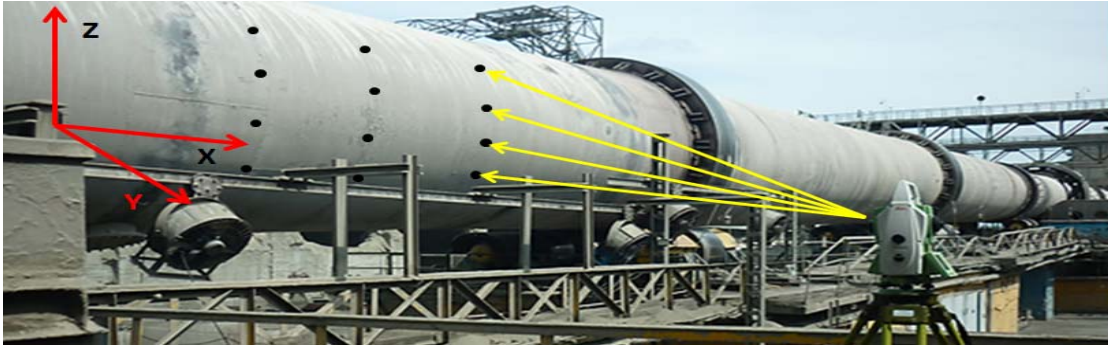


Рисунок 1 – Геодезические измерения при выверке обжиговой печи

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.

*Во втором разделе* выполнены исследования по совершенствованию методики построения опорной геодезической сети, предназначенной для выполнения геодезического мониторинга промышленного оборудования в условиях резкого перепада температур, приведены результаты ее апробации на примере производственных объектов АО «Искитимцемент» и «Ачинскцемент».

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 мониторинга на жестких конструкциях специальными светоотражающими марками, которые используются в качестве

связующих точек между станциями. На рисунке 2 представлена схема опорной сети обжиговой печи.

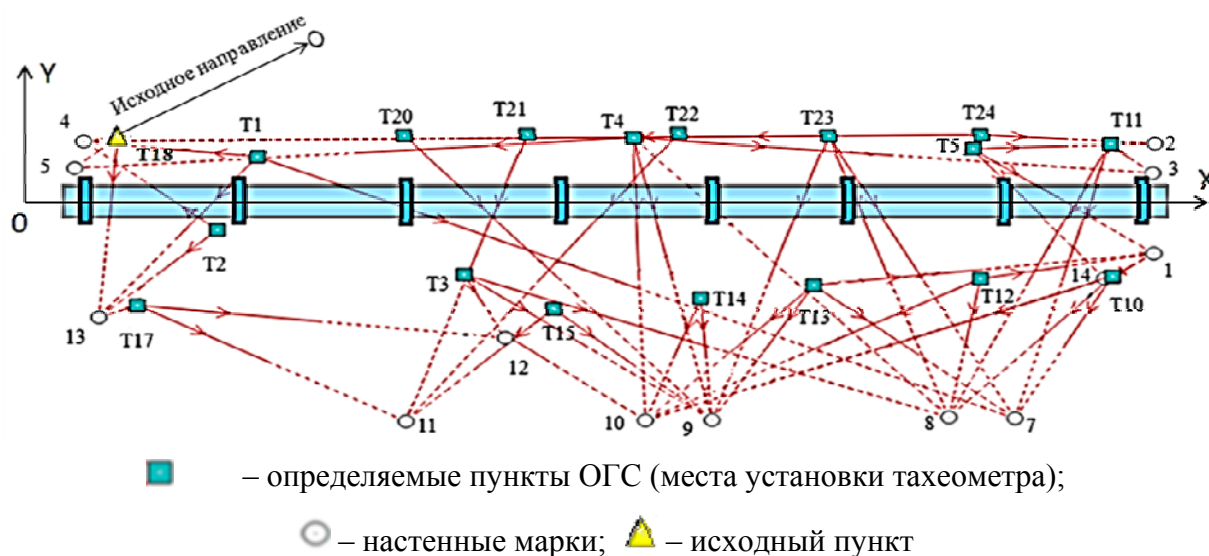


Рисунок 2 – Схема опорной геодезической сети обжиговой печи

Геодезические измерения обжиговой печи заключаются в определении координат точек, расположенных на сечениях конструктивных элементов объекта (обечаек, бандажей и опорных роликов).

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 точнее и достовернее.

Результаты оценки точности положения пунктов ОГС после уравнивания приводятся в таблице 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 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"

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, при условии, что измерения углов производились электронным тахеометром с ошибкой 1,0", а длин линий – с ошибкой 2,0 мм.

Анализ точности построения опорной сети показал, что форма и ориентировка средних квадратических эллипсов ошибок в ряде случаев не выгодны для определения координат станций, с которых выполняются измерения геометрических параметров объекта. Поэтому автором рекомендуется выполнять управление точностью ОГС посредством изменения формы эллипсов ошибок.

В работе предлагается способ получения лучшей формы и ориентировки эллипсов ошибок за счет изменения соотношения весов угловых и линейных измерений в процессе математической обработки сети и ее проектирования. Соотношение весов угловых и линейных измерений можно вычислить по известной формуле

$$g = \frac{m_{\text{лин}}^2}{m_{\text{уг}}^2}, \quad (1)$$

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

В таблице 2 представлены результаты оценки точности параметров ОГС после изменения соотношения весов программными средствами на  $g = 0,85$ .

Из полученных результатов (см. таблицу 2) видно, что при построении опорной сети для геодезического мониторинга обжиговой печи наибольшее предпочтение имеет приближение среднего квадратического эллипса к кругу

ошибок, когда точность положения пункта является максимальной и одинаковой по всем направлениям.

Таблица 2 – 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"

Также во втором разделе выполнен анализ влияния ошибок исходных данных на точность определения геометрических параметров промышленных агрегатов. Под ошибками исходных данных понимаются ошибки, получаемые при построении исходной геодезической сети для мониторинга технологического оборудования. По итогам оценки точности ОГС установлено, что ошибки исходных данных могут иметь величины порядка 4–5 мм, сопоставимые с ошибками измерений, и оказывать существенное влияние на точность определения геометрических параметров обжиговых печей. Согласно требованиям нормативных документов, допуск на определение прямолинейности оси печи составляет  $\pm 3$  мм. Следовательно, при использовании ОГС для выверки прямолинейности оси печи ошибка определения координат должна 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 2–5 мм, результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – 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"

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

- минимизация количества пунктов в ОГС и их установка вне зоны влияния резкого перепада температур;
- выполнение математической обработки геодезических измерений в условной системе координат в каждом цикле наблюдений с вычислением деформации относительно продольной оси, что позволит минимизировать перемещения роликов для выравнивания оси вращения обжиговой печи.

В третьем разделе выполнено исследование точности определения геометрических параметров промышленных агрегатов по результатам геодезических измерений и получены результаты исследования влияния нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения.

Для определения радиуса встроеной окружности, расположенной в сечении объекта цилиндрической формы, минимизирована следующая функция:

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

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 измерений.

Поскольку объект исследования имеет цилиндрическую форму с определенными точками  $i$  на его поверхности, то данная задача сводится к аппроксимации фактической кривой (рисунок 3), полученной в заданном сечении объекта, с помощью сглаживающей окружности.

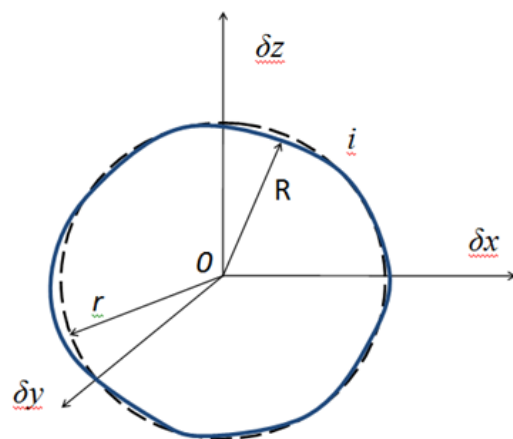


Рисунок 3 – Сглаживание фактической кривой с помощью окружности

Для определения радиуса  $r$  аппроксимирующей окружности используем выражение, представляющее уравнение окружности (функцию) в пространственной системе координат

$$r = \frac{1}{n} \sum_1^n \sqrt{\{(x_i - x_O)^2 + (y_i - y_O)^2 + (z_i - z_O)^2\}}, \quad (3)$$

где  $x_O, y_O, z_O$  – координаты центра тяжести (точки  $O$ ) фактической кривой, которая является центром симметрии сглаживающей окружности на заданном сечении объекта;

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

После дифференцирования (3) и перехода к средним квадратическим ошибкам получена упрощенная формула для оценки точности определения радиуса сглаживающей окружности

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

где  $m_r$  – СКО определения радиуса аппроксимирующей окружности;

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

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

$n$  – количество измерений.

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

На основе алгоритмов аппроксимации результатов измерений, представленных в диссертационной работе, можно определить параметры эллипса и его подеры, которые являются образующими для построения оптимальной поверх-

ности объекта. Полученные таким образом модели поверхности агрегата могут служить основой для определения отклонений его геометрических параметров от проектных данных.

На основе ковариационной матрицы координат двух центров  $O$  и  $Q$  окружностей (рисунок 4) выполнена оценка точности определения длины оси вращения для обжиговой печи. Ковариационная матрица для данных центров  $K_{6 \times 6}$  содержит необходимую информацию для строгой оценки длины осевой линии  $S_{OQ}$  элемента рассматриваемого объекта

$$m_{S_{OQ}}^2 = U_{1 \times 6}^{(S)} \cdot K_{6 \times 6} \cdot U_{6 \times 1}^{(S)}, \quad (5)$$

где  $m_{S_{OQ}}$  – СКО длины пространственной линии;

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

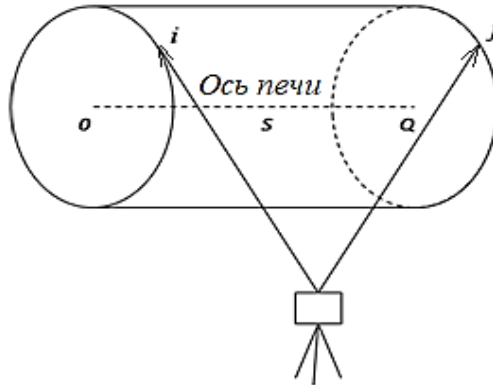


Рисунок 4 – Конструктивный элемент обжиговой печи

При этом получено

$$U_{OQ}^{(S)} = \frac{1}{S_{OQ}} \left[ -\Delta x_{QO}, -\Delta y_{QO}, -\Delta z_{QO}, \Delta x_{QO}, \Delta y_{QO}, \Delta z_{QO} \right]. \quad (6)$$

Пространственное положение оси вращения зависит от ошибок взаимного положения точек, образующих линию этой оси, то есть ошибок в длине и на-

правлении этой линии. Ошибки взаимного положения двух пунктов можно выразить посредством приращений их координат. Получена следующая формула для оценки взаимного положения центральных точек, расположенных в сечениях объекта цилиндрической формы:

$$K_{3 \times 3}^{\Delta} = U_{3 \times 6}^{\Delta} \cdot K_{6 \times 6} \cdot U_{6 \times 3}^{\Delta}, \quad (7)$$

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

$U_{3 \times 6}^{\Delta}$  – преобразующая матрица, которая в данном случае имеет вид

$$U_{3 \times 6}^{\Delta} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

По итогам проведенного исследования разработаны алгоритмы для определения и оценки точности геометрических параметров агрегатов цилиндрической формы по пространственным данным.

Также в третьем разделе автор приводит результаты исследования влияния нагрева печи на прямолинейность ее оси вращения.

На объектах АО «Искитимцемент» и АО «Ачинскцемент» выполнены дискретные замеры температуры корпусов работающих вращающихся обжиговых печей пирометром Raytek Raynger ST. На рисунке 5 показана линейная температурная модель печи № 6, цифрами указана температура элементов печи в °С.

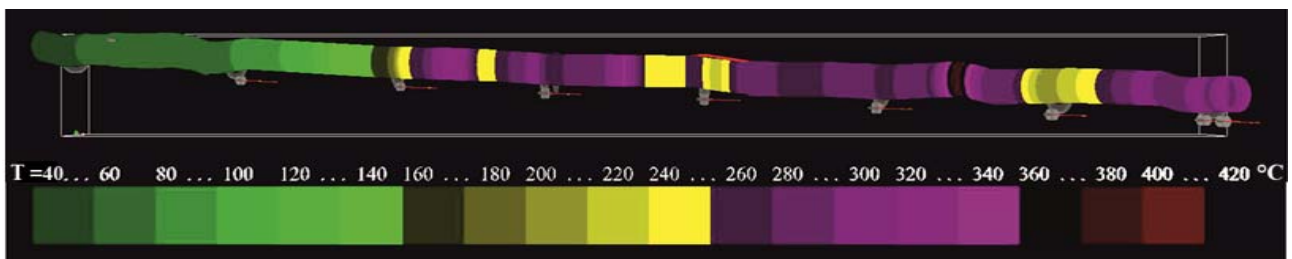


Рисунок 5 – Нагрев корпуса обжиговой печи  
Искитимцемент ВП № 6 ( $T$ , °С)

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:

$$\Delta H = \alpha R \Delta T \cos \beta, \quad (9)$$

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 6), в расчетах принято среднее значение  $\beta = 30^{\circ}$ .

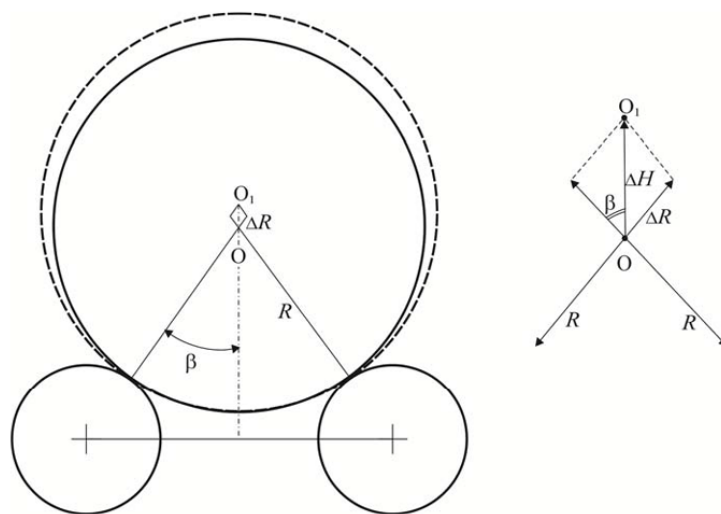


Рисунок 6 – Модель вертикальных деформаций

На рисунке 7 показан график вертикальных деформаций оси печи № 6. Расчеты величин деформаций приведены в таблице 4.

Анализ графиков деформаций осей печей при нагревании свидетельствует о нелинейном характере деформаций. Это вызвано неравномерным нагревом бандажей вращающейся печи.

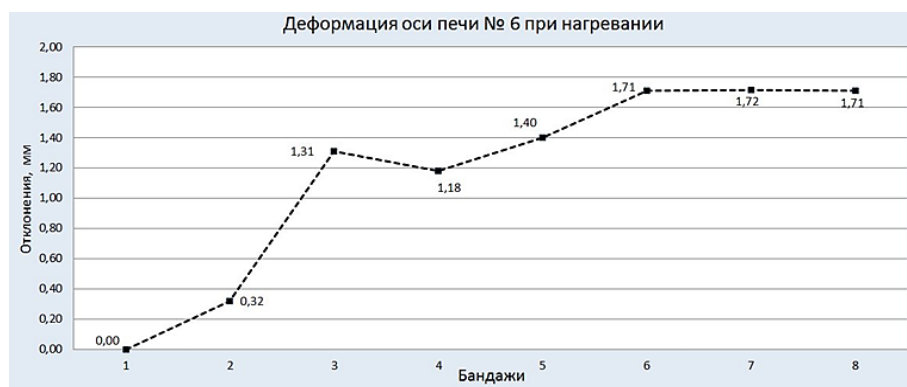


Рисунок 7 – Вертикальные температурные деформации оси ВП № 6

Таблица 4 – 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

Предлагается следующий алгоритм действий после выполнения «холодной» выверки. После разогрева печи и выхода на рабочий режим необходимо выполнить измерение температуры бандажей, и построить графики деформации осей. Если график деформаций имеет вид, близкий к линейному, с ошибкой до  $\pm 1,0$  мм, то корректировку положения оси производить не следует. Если отклонения более  $\pm 1,0$  мм, то необходимо выполнить оптимальную корректировку, т. е. вычислить такое положение оси, чтобы количество передвижек роликов было минимальным.

В четвертом разделе предложена трехмерная компьютерная модель вращающихся обжиговых печей крупногабаритного оборудования, позволяющая автоматизировать и ускорить процесс выполнения деформационного мониторинга.

Для исследования точности построения трехмерных моделей в специализированном программном обеспечении построены экспериментальные модели объектов цилиндрической и сферической формы и башенного типа. По итогам исследования выявлено, что ошибки результатов аппроксимации, полученные программными средствами, и их отклонения от проектных величин не превы-

шают случайных ошибок измерений, выполняемых электронным тахеометром (или сопоставимы с точностью таких измерений). После проведенного анализа выполнено моделирование крупногабаритного оборудования по полученным пространственным данным. Автор работы рассматривает два способа получения координат, необходимых для создания трехмерных моделей.

Первый способ – с применением электронного тахеометра. Для примера используется тахеометр Leica TM30. По результатам геодезического мониторинга выполнено трехмерное компьютерное моделирование конструктивных элементов печи обжига № 6 АО «Искитимцемент».

На рисунке 8 представлена трехмерная модель обечайки печи.

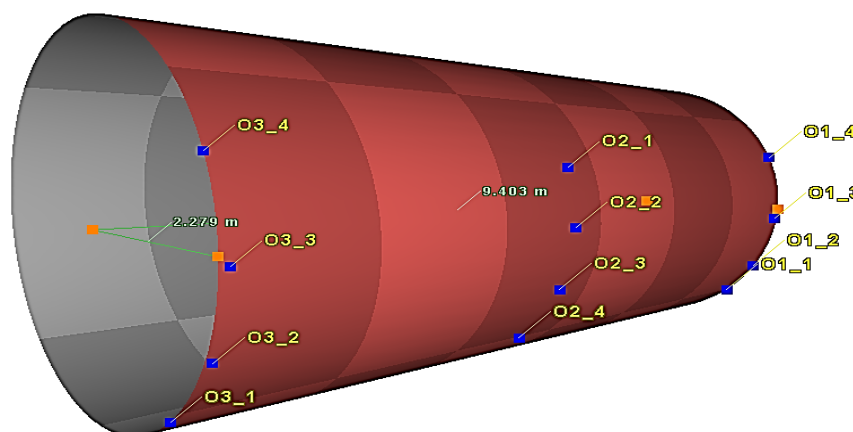


Рисунок 8 – Модель обечайки обжиговой печи № 6  
АО «Искитимцемент»

СКО встраивания обечайки составила 6 мм. Средний радиус встроенного цилиндра при длине 9 403 мм оказался равным 2 279 мм. Модель получена по 12 точкам односторонней съемки, это обстоятельство повлияло на результаты определения радиуса. Точность аппроксимации программными средствами может быть повышена за счет увеличения количества измеряемых точек, расположенных с двух сторон наблюдаемого объекта.

На рисунке 9 приведена модель бандаж, полученная по 18 измеренным точкам, расположенным с двух сторон объекта. По результатам моделирования получен радиус 3 030 мм с ошибкой встраивания 2 мм.

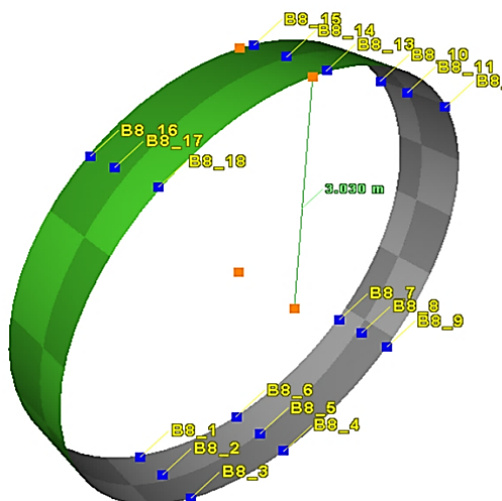


Рисунок 9 – Модель поверхности бандажа № 8 обжиговой печи АО «Искитимцемент»

Результаты исследования подтверждают состоятельность предложенной методики трехмерного моделирования на основе пространственных данных, полученных с помощью электронного тахеометра.

Второй способ основан на применении наземного лазерного сканера (НЛС). Для получения пространственных координат использовался НЛС RIEGL VZ400. Преимуществом данного сканера является возможность получения из облака точек данных о времени измерения каждой точки, что делает его

применимым для измерений вращающегося агрегата в рабочем режиме.

По результатам съемки печи НЛС создана трехмерная компьютерная модель, представленная на рисунке 10.



Рисунок 10 – Трехмерная компьютерная модель объекта по результатам лазерного сканирования

Для построения векторной модели применялся способ пространственной нерегулярной триангуляции (TIN). На основе полученной модели с шагом в один метр построены поперечные сечения обжиговой печи, как показано на рисунке 11, отклонения центра окружности от геометрической оси объекта определялись смещением координат  $\Delta x$  и  $\Delta z$ .

На основе анализа трехмерной модели, полученной с помощью НЛС, выполнена оценка точности определения геометрических параметров печи.

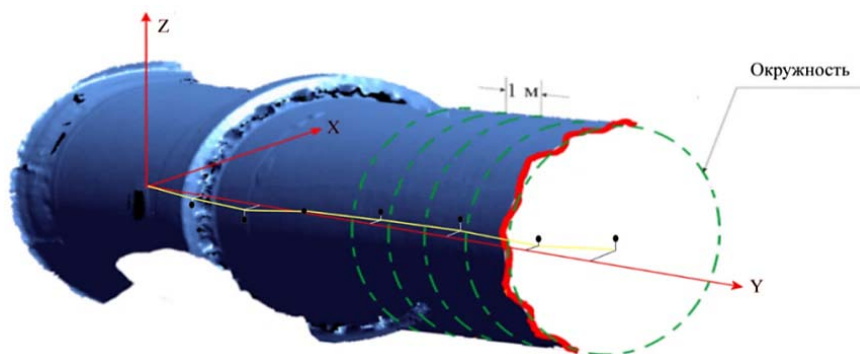


Рисунок 11 – Построение сечений объекта

В результате исследования разработана трехмерная модель, на основе которой выполняется определение геометрических параметров при проведении геодезического мониторинга обжиговых печей и других подобных промышленных объектов с применением электронных тахеометров и НЛС.

## 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 обжигowych 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 обжигowych 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 НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 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.

2 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.

3 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.

4 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.

5 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.

6 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, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 8–18 апреля 2014 г.). – Новосибирск : СГГА, 2014. Т. 2. – С. 166–171.

7 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.

8 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 Международ. науч. конгр. : Международ. 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.

9 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 Международ. науч. конгр. : Международ. 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.

10 Медведская, Т. М. Особенности геодезических наблюдений за деформациями объектов нефтяной промышленности [Текст] / Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Международ. науч. конгр. : Международ. 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.

11 Неволин, А. Г. 3D-моделирование крупногабаритных промышленных агрегатов с помощью программного комплекса CYCLONE [Текст] / А. Г. Неволин, Т. М. Медведская // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XV Международ. науч. конгр., 24–26 апреля 2019 г., Новосибирск [Текст] : сб. материалов в 9 т. Т. 1 : Международ. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2019. № 1. – С. 223–230.