

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

На правах рукописи

Кемербаев Нурган Токанович



Разработка методики мониторинга состояния промышленных объектов  
с применением технологии наземного лазерного сканирования  
(на примере резервуарного парка Павлодарского НПЗ)

1.6.22. Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук, профессор  
Шоломицкий Андрей Аркадьевич

Новосибирск – 2022

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ .....	10
1.1 Анализ объектов и существующих методик .....	10
1.2 Геодезическое обеспечение автоматизированной системы технического обеспечения и ремонтов .....	21
1.3 Выводы по разделу .....	32
2 МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ .....	34
2.1 Характеристика объекта исследования .....	34
2.2 Методика лазерного сканирования объекта и обработки .....	40
2.3 Методика автоматизированной обработки резервуаров .....	44
2.3.1 Определение параметров резервуара .....	45
2.3.2 Преобразование облака точек к сеточной модели .....	50
2.3.3 Анализ гладкости сеточной модели поверхности резервуара .....	57
2.3.4 Интерполирование пропусков в сеточной модели .....	61
2.3.5 Сглаживание сеточной модели .....	62
2.3.6 Расчет напряженно-деформированного состояния резервуара .....	65
2.4 Алгоритм выделения оседаний днища резервуаров по облаку точек .....	72
2.5 Алгоритм выделения и классификации вмятин стенок резервуаров .....	80
2.6 Этапы методики оценки состояния промышленных объектов .....	84
2.7 Выводы по разделу .....	87
3 СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ .....	89
3.1 Структура базы данных .....	89

3.2	Операции с данными в геодезической подсистеме ТОРО.....	94
3.3	Построение деревьев принятия решений .....	98
3.4	Выводы по разделу .....	100
4	ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ .....	101
4.1	Интерфейс геодезической подсистемы ТОРО .....	101
4.2	Основные функции геодезической подсистемы ТОРО .....	104
4.3	Поддержка принятия решений в геодезической подсистеме ТОРО .....	111
4.4	Выводы по разделу .....	112
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	114
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
	ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ФИЛЬТРАЦИЯ ОБЛАКОВ ТЛО И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРОВ.....	132
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) РЕЗЕРВУАР № 2.....	140
	ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) РЕЗЕРВУАР № 3 .....	143
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) РЕЗЕРВУАР № 4.....	146
	ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) РЕЗЕРВУАР № 5 .....	149
	ПРИЛОЖЕНИЕ Е (обязательное) РЕЗЕРВУАР № 6 .....	152
	ПРИЛОЖЕНИЕ Ж (обязательное) СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ .....	155

## ВВЕДЕНИЕ

*Актуальность темы исследования.* Цифровая трансформация в промышленности предполагает создание цифровых «двойников» промышленного оборудования, которые не только позволяют создать трехмерные модели оборудования, но и моделировать процессы, и оценивать фактическое состояние этого оборудования, а также необходимость его ремонта или замены. Для этого многие предприятия внедряют в производство автоматизированные системы технического обслуживания и ремонта оборудования (ТОРО), которые позволяют перейти от плановых ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию и соответственно увеличить межремонтный период и повысить безопасность эксплуатации объекта. Геодезическое обеспечение является важнейшим элементом ТОРО, так как информация о контролируемых геометрических параметрах формы и размерах объекта позволяет сделать вывод о необходимости ремонта. В диссертационном исследовании на примере геодезического обеспечения ТОРО для автоматизированной системы АО «НК «КазМунайГаз» на Павлодарском нефтехимическом заводе проанализированы возможности лазерного сканирования для автоматизированного мониторинга резервуаров. Вертикальные стальные цилиндрические резервуары (РВС) в настоящее время являются основным типом емкостей для хранения нефти и нефтепродуктов. Простота конструкции и монтажа, хорошее соответствие расчетной и фактической схем работы обеспечивают их высокую надежность в эксплуатации. Форма конструкции и способы сооружения цилиндрических резервуаров тесно связаны с ростом добычи и переработки нефти. Необходимость хранения нефти и нефтепродуктов в больших объемах в середине 50-х гг. прошлого века поставила перед народным хозяйством задачу разработки новой конструкции резервуаров и технологии их строительства объемом до 50 000 м<sup>3</sup>.

Длительный период эксплуатации и наблюдения за состоянием вертикальных стальных резервуаров позволил выявить и обобщить причины возникновения аварий. Наиболее распространенными причинами аварийности РВС являются: дефор-

мации стенок резервуара; оседания днища резервуаров; угловые деформации стыковочного сварного шва.

К настоящему времени РВС, находящихся в эксплуатации на территории стран СНГ, наработали от 5 000 до 50 000 циклов налива-слива, большая их часть исчерпала свою работоспособность и требует обследования и ремонта. В странах СНГ на данный момент находятся в эксплуатации около 40 000 вертикальных цилиндрических резервуаров различной емкости. В то же время нормативная литература, которая регулирует эксплуатацию РВС, существенно устарела и не отражает возросших требований отрасли к безопасной эксплуатации резервуаров, поэтому тема диссертационной работы, связанная с разработкой методики автоматизированной обработки данных лазерного сканирования, является чрезвычайно важной и актуальной.

*Степень разработанности темы* диссертационной работы определяется исследованием научных публикаций и трудов в области прикладной геодезии применительно к задачам геодезического мониторинга и наблюдения за деформациями вертикальных стальных резервуаров. В процессе работы над диссертацией использовались труды известных ученых в области прикладной геодезии: Брыня М. Я., Карпика А. П., Комиссарова А. В., Мелкого В. А., Могильного С. Г., Мазурова Б. Т., Мустафина М. Г., Пимшина Ю. И., Хорошилова В. С., Уставича Г. А., Шоломицкого А. А., Шульца Р. В., Ямбаева Х. К. и многих других.

*Цель и задачи исследования.* Целью диссертационного исследования является разработка методики мониторинга состояния промышленных объектов с применением технологии наземного лазерного сканирования на примере резервуарного парка АО «НК «КазМунайГаз» на Павлодарском нефтехимическом заводе.

*Основные задачи исследований:*

- выполнить анализ существующих методов геодезического мониторинга вертикальных стальных резервуаров и нормативной документации;
- разработать алгоритмы определения деформаций стенок резервуара и днища по данным наземного лазерного сканирования;

- применить методику численного расчета напряжений стенок резервуара для обоснования допустимых величин деформаций;
- разработать структуру базы данных для хранения облаков точек наземного лазерного сканирования и результатов их математической обработки;
- создать информационную систему поддержки принятия управляющих решений для безопасной эксплуатации резервуарного парка;
- выполнить апробацию разработанной методики на примере геодезического обеспечения ТОРО для автоматизированной системы АО «НК «КазМунайГаз» резервуарного парка Павлодарского НПЗ (Республика Казахстан).

*Объект и предмет научного исследования.* Объектом исследования являются вертикальные стальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов. *Предмет исследования* – методика мониторинга технического состояния промышленных объектов с применением технологии наземного лазерного сканирования (на примере геодезического обеспечения ТОРО для автоматизированной системы АО «НК «КазМунайГаз» вертикальных стальных резервуаров Павлодарского НПЗ).

*Научная новизна исследования* заключается в следующем.

1 Выполнено представление облака точек (ТЛО) на основе технологии наземного лазерного сканирования как алгебраического множества и определены математические операции над этим множеством. Разработано математическое обоснование и алгоритм перехода от облака точек к топологически эквивалентным прямоугольным сеточным моделям с целью их анализа и сравнения в операциях алгебры карт.

2 По результатам геодезических измерений деформаций, используя численные методы на основе полубезмоментной теории оболочек Власова, предложено определять напряжения стенок для обоснования допустимых величин деформаций вертикальных стальных резервуаров.

3 Разработана методика автоматизированного мониторинга контроля геометрических параметров РВС с применением технологии наземного лазерного сканирования, основанная на оригинальных алгоритмах создания топологически эквива-

лентной сетки, алгоритме «градиентного спуска» распознавания в облаке ТЛО оседаний днища резервуаров, сканирующего алгоритма с затравкой для выделения локальных деформаций стенок резервуара.

4 Предложены структура базы данных для хранения облака ТЛО и результатов их математической обработки и экспертная система продукционного типа с ранговыми показателями, которая предназначена для поддержки принятия решений и позволяет повысить безопасность эксплуатации вертикальных стальных резервуаров.

*Теоретическая значимость.* Предложено алгебраическое представление облака точек наземного лазерного сканирования и операций на этом множестве, которое позволяет формализовать операции фильтрации геопространственных данных; разработан математический аппарат для создания топологически эквивалентных сеток, что позволяет перейти от приближенных методов оценки состояния резервуаров к более обоснованным и точным численным методам определения напряжений для обоснования допустимых величин деформаций РВС.

*Практическая значимость* результатов исследования заключается в создании автоматизированной геодезической подсистемы ТОРО, обеспечивающей на основе результатов наземного лазерного сканирования минимальную трудоемкость и позволяющей получить необходимые сведения о состоянии резервуара, деформации его стенок и основания.

*Методология и методы исследования.* Методологической базой исследования являются: теория математической обработки геодезических измерений, методы дискретной математики, методы статистического и сравнительного анализа, методы фильтрации геопространственных данных, численные методы расчета стальных оболочек. Большинство из этих методов реализовано в виде алгоритмов в собственном программном обеспечении.

*Положения, выносимые на защиту:*

1 Предложенные решения по математической обработке результатов измерений НЛС позволяют оперировать элементами множества ТЛО как алгебраиче-

скими множествами и перейти от облака точек к топологически эквивалентным сеточным моделям для их последующего анализа и сравнения в операциях алгебры карт с целью выявления деформаций оболочки РВС.

2 Применение численных методов определения напряжений в стенках резервуара по данным деформаций из геодезических измерений по полубезмоментной теории оболочек Власова позволяет обосновать допустимые величины деформаций для резервуаров.

3 Разработанная методика автоматизированного мониторинга контроля геометрических параметров РВС с применением технологии наземного лазерного сканирования и основанная на алгоритмах создания топологически эквивалентных сеточных моделей и оригинальных алгоритмах их обработки позволяет определить деформации оболочки резервуара, оседания днища резервуара и локальные деформации стенок РВС.

4 Разработаны структура базы данных для хранения облака точек ТЛО и результатов их математической обработки и работающая на ее основе экспертная система производственного типа с ранговыми показателями, которая обеспечивает повышение безопасности эксплуатации РВС.

*Соответствие диссертации паспорту научной специальности.* Тематика диссертации соответствуют следующим областям исследований: 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; 7 – Геодезическое обеспечение геодинимического мониторинга состояния окружающей среды, в первую очередь, опасных процессов и явлений, способствующих возникновению кризисных ситуаций паспорта научной специальности 25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки России, по техническим наукам.

*Степень достоверности и апробация полученных результатов.* Апробация и одобрение исследований проходили на международных конференциях: Международном научном конгрессе «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» (2021 и 2022 гг., СГУГиТ, г. Новосибирск); International Conference on Industrial Engineering (2022 г.), XVI International Scientific Conference for students and young scholars «GYLYM JÁNE BILIM – 2021» L. N. Gumilyov ENU (2021 г., Nur-Sultan, Kazakhstan), Международной научно-практической конференции «Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ» (25–27 мая 2022 г., МГТУ имени Г. И. Носова, г. Магнитогорск).

Результаты использованы при мониторинге промышленного оборудования и создании цифровых двойников в геодезической подсистеме ТОРО Павлодарского НПЗ (Республика Казахстан). Реализация исследований осуществлена в виде программ Reservoir Scan и Tank Leveling (регистрационные номера 2020664460 и 2021668726).

*Публикации по теме диссертации.* Основные положения и результаты исследований отражены в 9 научных работах, 3 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, 1 – в журнале, входящем в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, получены два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ.

*Структура диссертации.* Общий объем диссертации составляет 155 страниц машинописного текста. Диссертация состоит из введения, 4 разделов, заключения, списка литературы, включающего 134 наименования, содержит 10 таблиц, 64 рисунка, 7 приложений.

# 1 ГЕОДЕЗИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ

## 1.1 Анализ объектов и существующих методик

В настоящее время в нефтегазовой сфере сложилась ситуация, требующая увеличения разработки и освоения так называемых «сложных» месторождений, находящихся в тяжелых климатических условиях, что, в свою очередь, требует развития системы хранения нефтепродуктов и применения новых подходов в их строительстве и обслуживании. Также следует уточнить, что на территории большинства стран бывшего СССР эксплуатируемый парк резервуаров имеет большой технический износ, что не может не влиять как на безопасность, так и непосредственно на само использование резервуара в принципе.

Разработка эффективных методов выявления и прогнозирования деформаций вертикальных стальных цилиндрических резервуаров (РВС) является актуальной, поскольку ее успешное решение и последующее развитие вносят важный вклад в обеспечение надежности, долговечности и безопасности эксплуатации РВС.

В настоящее время имеется необходимость внедрения в производство BIM технологий (цифровых двойников), их использование открывает огромные возможности для строительства, управления, прогнозирования и непосредственно при эксплуатации производственных объектов, но в то же время предъявляет более жесткие требования к точности, достоверности и полноте используемой в системе информации.

Отдельной темой можно рассмотреть вопрос проведения периодического мониторинга за деформацией резервуаров, реакторов НПЗ и других промышленных объектов в целях своевременного предотвращения техногенных катастроф и человеческих жертв. Нужно не забывать, что объекты нефтегазовой отрасли – это объекты повышенной опасности.

В нефтедобывающей отрасли объекты добычи нефти – это единые имущественно-технологические комплексы, в которые включаются сооружения, оборудование и технологические установки, обеспечивающие процесс добычи и сбора, а также подготовки и последующей транспортировки добытой нефти с последующей ее сдачей в магистральный трубопровод.

*Объекты нефтедобычи.* Эти объекты относятся к опасным производственным объектам (ОПО), которые подразделяются на следующие классы опасности:

- I класс – объекты чрезвычайно высокой опасности;
- II класс – высокой опасности;
- III класс – средней опасности;
- IV класс – низкой опасности.

Эти классы установлены Федеральным законом от 21.07.97 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности ОПО» [53] и учитывают факторы риска нанесения вреда здоровью человека и экологической безопасности окружающей среды.

Для предприятий, на которых происходят процессы бурения и нефте- или газодобычи, а также добыча газового конденсата, такие классы устанавливаются в следующем порядке:

а) если угроза, возникающая в процессе эксплуатации, заключается в возможных выбросах продукции, содержащей более 6 % сернистого водорода (от общего объема выбросов), то присваивается II класс опасности;

б) если угроза, возникающая в процессе эксплуатации, заключается в возможных выбросах продукции, содержащей от 1 до 6 % сернистого водорода (от общего объема выбросов) присваивается III класс;

в) предприятиям, которые не попадают под требования первых двух пунктов, присваивается IV класс.

Для промышленных предприятий, на которых добываются, хранятся, перерабатываются и транспортируются опасные вещества, относящиеся к категории воспламеняющихся, взрывчатых, горючих, высокотоксичных или токсичных веществ, класс опасности устанавливается по такому критерию, как количество

опасных веществ, одновременно находящихся на объекте, или количество таких веществ, которое потенциально может находиться на рассматриваемом предприятии.

Этот показатель, как правило, указывается в проектной документации.

В тех случаях, когда расстояние между несколькими ОПО нефтедобычи и хранения получаемой продукции составляет меньше 500 м, вне зависимости от их принадлежности к той или иной эксплуатирующей организации, параметр количества опасных веществ, относящихся к одному и тому же виду, рассчитывается путем суммирования по всем таким ОПО.

Класс опасности ОПО, которому соответствует предприятие, присваивается во время его регистрации, и заносится в Единый реестр ОПО РФ. В тех случаях, когда к одному предприятию применимы сразу несколько перечисленных выше классов, ему присваивают самый высокий из них.

ОПО, которые получили класс опасности с первого по третий, организации могут эксплуатировать только после получения соответствующей лицензии. На объектах, получивших первый или второй класс, обязательно должна быть разработана декларация промышленной безопасности. Кроме того, должна быть организована система управления обеспечением промбезопасности.

При разработке вышеуказанной декларации проводится всесторонняя оценка риска возникновения аварийных ситуаций и последующих за ними угроз, а также выполняется анализ, который должен оценить достаточность мер, принятых для предупреждения возникновения аварий.

По данным Ростехнадзора, экономический ущерб от аварий на объектах нефтегазового комплекса, расследование по которым завершено, по итогам 11 месяцев 2020 г. превысил 5 млрд руб. [68]. При этом указанная сумма не включает ущерб от аварий, расследование которых еще продолжается, включая аварию на ТЭЦ-3 в Норильске, и не учитывает экологический ущерб.

Всего в январе-ноябре 2020 г. на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса произошло 37 аварий, это на 9 аварий меньше, чем за анало-

гичный период прошлого года. Основными видами аварий стали выбросы опасных веществ – 43 %; взрывы, разрушения технических устройств и сооружений – 38 %; пожары – 19 %.

Как показывает печальный опыт событий на территории ТЭЦ-3 Норильско-Таймырской энергетической компании в мае 2020 г., где в результате разгерметизации произошла утечка более 20 тыс. т топлива, или же июле-августе 1994 г. в Усинском районе Республики Коми по той же причине на грунт вылилось, по оценке экспертов МЧС РФ, до 94 тыс. т сырой нефти (это происшествие стало крупнейшей экологической катастрофой за предыдущие 20 лет в истории нефтедобычи на территории СССР и РФ).

Хотя практически все резервуары имеют достаточно примитивную (цилиндрическую форму), реальные геометрические параметры в любом случае будут отличаться от проектных, на это сильно влияют ошибки в строительстве, износ материалов, человеческие ошибки при проведении ТО, последствия воздействия внешних факторов, сезонность, отклонение от нормативных актов при выборе и использовании материалов и т. д.

Для этих целей крайне необходимо проводить деформационный мониторинг состояния резервуара.

Деформационный мониторинг можно условно разделить на виды:

а) по продолжительности цикла:

- периодический;
- постоянный (круглосуточный).

б) по количеству объектов для мониторинга:

- одиночный (выборочный);
- полный (комплексный).

Периодический мониторинг резервуаров проводится чаще всего геодезическими методами с целью своевременного выявления отклонения от заданных параметров, уточнения векторов направления и скорости деформации. В этом случае применяют электронные тахеометры и нивелиры.

Как писалось выше, мониторинг может выполняться как для отдельных объектов, зданий, сооружений (в зависимости от ситуации), так и для всего комплекса в целом.

Вместимость стальных вертикальных цилиндрических резервуаров определяют согласно ГОСТ 8.570 [20]. Резервуары подлежат первичной и периодической поверкам. Межповерочный интервал для всех типов вертикальных резервуаров должен быть не более 5 лет.

Основанием для проведения работ по поверке, то есть измерениям вместимости и градуировке резервуаров, является ввод в эксплуатацию после строительства, реконструкции и капитального ремонта, который мог повлиять на его вместимость, а также истечение срока действия градуировочных таблиц – межповерочного интервала. Этот процесс регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 8.570–2000 [20] и подразумевает проведение поверки резервуара геометрическим или объемным (динамическим или статическим) методом.

При этом допускаются:

- комбинация геометрического и объемного методов поверки, например, определение вместимости «мертвой» полости или вместимости резервуара в пределах высоты неровностей днища объемным методом при применении геометрического метода поверки;
- комбинация динамического объемного и статического объемного методов поверки.

При объемном методе поверки резервуара вместимость определяют путем непосредственных измерений уровня поверочной жидкости, поступившей в резервуар, с одновременными измерениями ее температуры и объема, соответствующих измеренному уровню. Объемный метод поверки достаточно трудоемкий и затратный, а также не позволяет выявить на ранней стадии какие-либо изменения, которые впоследствии могут привести к приведению РВС в неработоспособное состояние.

При геометрическом методе проверки резервуара вместимость первого пояса определяют по результатам измерений длины наружной окружности, толщины стенки и высоты первого пояса. Вместимости вышестоящих поясов определяют по результатам измерений радиальных отклонений, образующихся от вертикали, толщин стенок и их высот.

Обычно геодезические работы традиционными методами выполняются в основном угломерными приборами (теодолитом, электронным тахеометром) и нивелирами различных модификаций. При этом согласно утвержденным методикам проведения измерений производятся единичные измерения с определенным интервалом (в зависимости от конкретного случая). Так, производятся точечные измерения на определенные точки поверхности РВС. Этот метод достаточно хорошо зарекомендовал себя в плане скорости получения данных, их точности и надежности.

Вместе с тем, имеется ряд недостатков, которые нужно учитывать при применении:

- 1) большое влияние человеческой ошибки на результат как одного измерения, так и в целом всего цикла;
- 2) ошибки, связанные с пространственной разреженностью точек измерения;
- 3) увеличение количества дополнительных измерений прямо пропорционально ведет к увеличению времени на проведение работ и ее удорожанию;
- 4) достаточно большое время на производство полевых работ по сравнению со сканированием.

Для определения деформации цилиндрических стенок резервуаров на основе трехмерных данных выработана следующая методика. Данные предоставляются в развернутом двухмерном виде – для удобства чтения. Для этого необходимо развернуть поверхность на касательную плоскость, т. е. перевести координаты точек, принадлежащих поверхности стенок, из цилиндрической системы координат в прямоугольную. Такое представление облегчает обработку данных, их интерпретация в виде чертежа более наглядна. Для представления данных в прямоугольных коор-

динах необходимо, в первую очередь, выбрать модель цилиндра и сферы, на которую будут проецироваться измеренные точки.

Определение радиуса цилиндрического резервуара. При изучении деформаций РВС геодезическими методами возникает необходимость назначения или определения геометрических параметров цилиндрического резервуара.

Основными параметрами резервуара является радиус, координаты оси центра цилиндра и ее наклон. В этой работе мы будем рассматривать проведение измерений электронным тахеометром, сканирующим тахеометром и лазерным сканером.

Методика работы электронным тахеометром достаточно проста и уже многократно описана в различных руководящих документах. Суть ее заключается в измерении необходимых точек РВС с заданной точностью и в заданных местах. После проведения измерений в камеральных условиях данные обрабатываются и могут быть интерпретированы в отчеты, таблицы и другие материалы или же переданы в специальное ПО.

В настоящее время начинают широко применяться сканирующие тахеометры – приборы, совмещающие в себе функции высокоточного тахеометра (точность до 0,8 мм и угловая точность до 1 секунды), лазерного сканера со скоростью сканирования до 30 000 точек в секунду и наземной фотограмметрической станции. Методика работы сканирующим тахеометром по своему составу не сильно отличается от работы с обычным тахеометром, т. е. прибор на каждой станции центрируют, горизонтируют и ориентируют либо в действующей системе координат, либо в условной, после этого запускают процесс сканирования, причем большинство существующих приборов такого типа позволяют максимально настроить этот процесс: задать шаг сканирования (как в горизонтальной так и в вертикальной плоскости), задать ближние или дальние пороги сканирования, задать области сканирования и т. д. Более того, некоторые приборы имеют технические возможности автоматически сшивать полученные с разных станций облака точек (сразу в поле получать сшитые облака) и даже проводить некоторые операции с данными. Среднее

время стояния на станции немного больше, чем при съемке обычным тахеометром (от 3 мин до 1 ч, в зависимости от настроек прибора), но вот полнота данных в несколько порядков раз больше. Диапазон рабочих температур так же примерно одинаков – от  $-20$  до  $+45$  °С.

Особенности применения сканирующего тахеометра (по сравнению с обычным):

- фактически исключается человеческий фактор в области съемки необходимых объектов. Так, при съемке ручным способом можно не определить плавные локальные отклонения стенок и соответственно их не отснять;

- значительно повышается полнота собранных данных;

- собранные данные позволяют наиболее точно построить по ним поверхности и максимально точно определить геометрические параметры и их объемные характеристики;

- получение фотоснимков позволяет составлять привязанные фотограмметрические модели, а также получать раскрашенные в цвет облака точек, что важно для BIM технологий и системы ТОРО для создания цифровых двойников;

- в некоторых моделях сканирующих тахеометров реализована система сравнения поверхностей, т. е. непосредственно в поле можно увидеть параметры несоответствия фактического положения поверхности с проектной или с отсканированной ранее (т. е. по сути получить анализ деформаций за определенный период).

Обобщая, можно сказать, что применение сканирующих тахеометров значительно повышает достоверность и полноту данных, что значительно увеличит качество проводимого анализа по мониторингу деформаций, а также позволит наиболее точно и объемно обработать эти данные для BIM систем.

Лазерные 3D-сканеры заметно отличаются от вышеперечисленных приборов в части методик проведения полевых работ, затраченного времени на них и камеральную обработку данных. Причем возможности сканеров позволяют работать как в условной системе координат, так и в действующей (т. е. координатно привязывать станции стояния прибора). Скорость сканирования может достигать до

2 млн точек в секунду, и соответственно время сканирования на станции сокращается до нескольких минут. Вместе с тем, учитывая большой объем данных, сканирование подразумевает достаточно сложную камеральную обработку в специальном ПО и желательно на мощных ПК. Одной из особенностей сканирования является возможность проведения съемок в перевернутом на 180 градусов состоянии, когда сканирование производится через горловину люка.

Рассмотрим программное обеспечение Leica Cyclone 3DR [124] для камеральной обработки данных сканирования.

Leica Cyclone 3DR – это мощный инструмент векторизации и анализа данных лазерного сканирования. Программа отлично справляется с построением триангуляционных моделей любой сложности; позволяет выполнить анализ изменений как между двумя облаками точек, снятых в разное время, так и между облаком и 3D-телом.

Основной функционал:

- сегментирование облака по заданному признаку (точку земли, стены/пол, тоннель, дорога и т. д.);
- фильтрация облака точек несколькими способами;
- сшивка облаков точек по маркам и контурам;
- создание 2D- и 3D-триангуляционной поверхностей по облаку точек различными способами;
- редактирование триангуляционной модели: сегментирование, соединение, достраивание до полилинии или другой поверхности, удаление пиковых точек, уменьшение количества треугольников, сглаживание;
- проецирование фотографий на триангуляционную модель;
- автоматическое извлечение плоскостей из облака (стены и пол);
- создание геометрических примитивов, вписывание наиболее подходящего примитива в облако;
- автоматическое создание полилиний по граням перегиба триангуляционной модели;

- вычисление объемов между двумя поверхностями, поверхностью и плоскостью или внутри замкнутой поверхности;
- создание цветowych карт отклонений облако-облако, облако-поверхность, облако-3D-тело. Настройка цветовой легенды, определение величины максимального отклонения, расстановка пикетов с указанием отклонений для конкретной точки на модели;
- создание калибровочных таблиц резервуаров с выводом отчета;
- инспектирование тоннелей: определение оси, анализ отклонений по сечениям проект-факт, развертки карт отклонений;
- прямой импорт облака точек из программы в Autodesk Revit и AutoCAD для сшивки без конвертации в переходные форматы;

Рассмотрим механизм обработки полевых данных в специальном программном обеспечении. Этап обработки полевых данных сканера начинается со сшивки и геопривязки, то есть соединения данных сканирования с разных станций в единое облако точек и привязки этих данных к местной системе координат (при этом многие программы могут делать этот процесс в автоматическом режиме). Важной особенностью ПО является возможность комбинирования разных типов сшивки/геопривязки между собой, используя для этого специальные марки (их можно распознавать как в поле, так и в программе), перекрывающиеся участки облаков точек и даже построенные в Cyclone векторные элементы (например, участки трубопроводов). При необходимости некоторым объектам, участвующим в процессе сшивки/геопривязки, может быть задан меньший «вес» при общем уравнивании, например, в случае плохого качества сканирования некоторых марок. Конечный результат – отчет, генерируемый программой, который позволяет оценить точность и качество сшивки/геопривязки.

Геопривязанное облако точек очищается от измерений, соответствующих посторонним элементам на поверхности резервуара – трубам, лестницам и т. д. Далее пошагово рассмотрим, как происходит работа с облаком точек и получение конечного результата в программе Leica Cyclone 3DR.

1 Создание триангуляционной модели, то есть преобразование облака точек в поверхность из треугольников. При этом окончательно убираются посторонние измерения, которые не были удалены на стадии очистки облака точек, а также корректно затягиваются «дырки» – следы элементов, закрывающих поверхность резервуара от сканера.

2 Анализ дефектов поверхности резервуара путем сравнения его формы с идеальным цилиндром. Такое сравнение в 3DR визуализируется в виде трехмерной цветовой карты отклонений. Можно получить информацию об отклонениях в каждой конкретной точке, оценить размер и величину вмятин и выпуклостей, сравнить результаты с допусками, которые существуют для резервуаров разного размера и срока эксплуатации. Настроенная для резервуаров разного типа цветовая шкала может быть сохранена в качестве шаблона и использована для анализа других резервуаров.

Подобным же образом можно оценить изменение геометрии резервуара во времени, сравнив данные текущей и прошлых съемок. При этом для корректного анализа важно, чтобы съемки производились при приблизительно одинаковой степени заполнения резервуаров.

Трехмерная цветовая карта действительно наглядна и информативна, но для формирования отчетов в двухмерном варианте можно также провести сравнение с идеальной геометрией по сечениям, сделанным вдоль горизонтальных швов.

3 Анализ отклонения резервуара от вертикали. Он производится вдоль каждого вертикального пояса – вот почему важна хорошая читаемость швов на облаке точек.

4 Анализ наклона окрайки резервуара. Измерение высотных отметок точек окрайки резервуара производится у основания первого пояса, это можно делать по облаку точек. Как уже указывалось выше, при наличии растительности важным преимуществом лазерного сканирования оказывается высокая плотность измерений.

5 Построение сплайновой модели резервуара для выполнения расчетов деформаций и напряжений. Триангуляционная модель в 3DR преобразуется

в сплайновую, редактируется и экспортируется для проведения соответствующих вычислений.

Для вышеперечисленных операций требуется построение целого ряда стандартных графиков и выполнение однотипных вычислений, которые к тому же повторяются от резервуара к резервуару. Существенно автоматизировать процесс получения результатов в 3DR позволяет как создание сценариев – определенной последовательности действий и команд, которая может быть записана и сохранена, так и сохранение шаблонов отчетов, например, для графиков или настроек цветовых карт отклонений [38].

Однако, несмотря на все достоинства этого ПО, требуется достаточно много ручного труда для получения конечного результата, и алгоритмы обработки не всегда понятны и прозрачны. Кроме того, ПО Leica Cyclone 3DR имеет высокую стоимость и его сложно встраивать в технологические схемы обработки системы ТОРО. При этом расчет фактических напряжений в этой программе не производится – для этого требуется еще одна система автоматизированного проектирования и твердотельного моделирования [38].

## 1.2 Геодезическое обеспечение автоматизированной системы технического обеспечения и ремонтов

Сегодня цифровая трансформация стала частью стратегий развития всех крупнейших нефтяных компаний. Цифровые технологии становятся важной частью технологического развития компании.

В условиях конкуренции и нестабильных цен на энергоносители главной задачей нефтяных компаний остается максимизация производительности за счет бесперебойной работы, повышение уровня промышленной и информационной безопасности и, конечно, сокращение издержек.

Это становится возможным благодаря переходу на управление всеми бизнес-процессами на основе данных и цифровых моделей, через получение аналитики о

производственных и экономических процессах в режиме реального времени, позволяющих снизить затраты на сырье, логистику, обслуживание и ремонт, увеличить качество и объемы выпускаемой продукции.

В наше время цифровая трансформация осуществляется по трем направлениям:

- продвинутая аналитика (использование больших данных (Big Data) для принятия решений, оптимизации технологических процессов и планирование технического обслуживания);
- цифровизация процессов (упрощение процессов с использованием приложений и мобильных устройств);
- индустрия 4.0 (внедрение новейших технологий – AR, VR, IoT, компьютерное зрение – в производственные процессы).

Огромную роль в достижении высоких производственных показателей играет техническое состояние оборудования, для обеспечения исправности и работоспособности которого необходимо развертывание комплексной системы технического обслуживания и ремонта технологического оборудования [24]. Стоит отметить, что в мире идет плавный переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию оборудования.

Таким образом, важной составляющей повышения эффективности работы ремонтных служб является внедрение современных технических средств, позволяющих перейти к обслуживанию оборудования по фактическому состоянию, которые нашли применение на передовых отечественных и большинстве зарубежных предприятиях с 1990-х гг. Автомобильные, авиационные, ракетно-космические и машиностроительные, нефтеперерабатывающие заводы США, Японии, Англии и Франции проводят обслуживание станков только по их фактическому состоянию. Метод основан на том, что без разборки станка оценивается его техническое состояние, определяются отдельные узлы и детали, которые имеют дефекты, и поэтому ремонт производится целенаправленно, устраняя конкретные дефекты. Это обеспечивает стабильность работы производства, позво-

ляет прогнозировать время безаварийной работы оборудования, заранее заказать необходимые комплектующие для проведения ремонта [52].

В рамках реализации Программы цифровой трансформации проекта «Переход на увеличенный межремонтный период на НПЗ» АО «НК «КазМунайГаз» внедрил в 2018 г. на Павлодарском нефтехимическом заводе автоматизированную систему управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования (ТОРО) и обеспечения надежности и механической целостности.

Система ТОРО состоит из четырех автоматизированных подсистем – IBM Maximo (ПО для управления активами предприятия), APM Meridium (управление эффективностью производственных активов), Asset Sentinel (Мониторинг процессов и оборудования), а также Downtime Reporting (учет простоев).

IBM Maximo – это программный продукт, с помощью которого в автоматическом режиме ведется организация проведения ремонтов, учет технических характеристик каждой единицы оборудования, история, объемы и стоимость выполненных ремонтных работ.

Meridium APM – система управления инспекциями и обеспечения надежности, предназначена для анализа эффективности производственных активов.

Asset Sentinel – система мониторинга оборудования в реальном времени, отслеживает состояние активов в режиме онлайн, заранее прогнозируя выход оборудования из строя, а также осуществляет сбор статистики работы оборудования.

Downtime Reporting – система учета простоев оборудования, предназначена для фиксации и отправки ответственным специалистам уведомлений о наличии простоев на установках, архивировании записей по простоям и потерям производства.

Все перечисленные системы нацелены на увеличение межремонтных интервалов, исключение внеплановых выходов оборудования из строя, а также снижение затрат на его ремонт и финансовых потерь производства от простоя технологических установок [85].

Результат внедрения ТОРО – увеличение межремонтного периода (остановка завода для ремонта не каждый год, а раз в три года), повышение надежности и механической целостности оборудования в условиях непрерывного технологического процесса, безопасность производства, сокращение внеплановых и плановых простоев оборудования, снижение риска возникновения внештатных и аварийных ситуаций, уменьшение затрат на техобслуживание и капитальный ремонт, увеличение производительности работ и общую эффективность оборудования [125].

В настоящее время идет выполнение Программы цифровой трансформации АО «НК «КазМунайГаз» путем реализации проекта «Создание цифрового Генерального плана и 3D-модели НПЗ РК» (далее – Проект). Проект включает в себя развитие автоматизированных систем через работы по расширению интеграции систем и увеличению объема передаваемых между ними данных, исключению дублирования, подключению других структурных подразделений предприятия (техника безопасности, бухгалтерия, сервисные компании), настройке новых модулей.

Инициатором Проекта является Павлодарский нефтехимический завод, который в мае 2019 г. заключил договор на реализацию Проекта с консорциумом ТОО «Alora IT Solutions» и ТОО «GEOID». Срок реализации проекта – 18 месяцев. Согласно разделению объемов, за ТОО «GEOID» закреплено создание информационной модели, а ТОО «Alora IT Solutions» выполняет поставку ПО, серверного оборудования, графических станций, занимается интеграцией AVEVA с системой ТОРО и обучением специалистов Заказчика.

Цель проекта – создание цифрового Генплана и 3D-модели нефтеперерабатывающего завода, с применением технологии лазерного сканирования объектов.

Задача проекта – создание информационной модели завода, содержащей в электронном виде пространственное описание объекта эксплуатации, включая архитектурные, функционально-технологические, конструктивные, инженерно-технические и иные решения, а также необходимые исходные данные для строительства, реконструкции и эксплуатации объекта (рисунок 1.1).

Срок реализации проекта: 18 месяцев

06.2019

12.2020

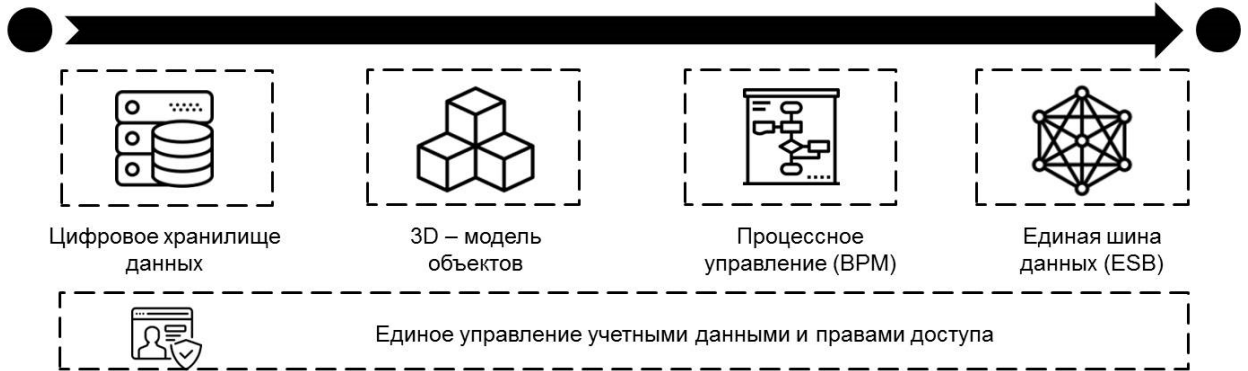


Рисунок 1.1 – Этапы выполнения работ в рамках договора консорциума ТОО «GEOID» и ТОО «Alora IT Solutions»

Интеграция информационной модели (ИМ) завода с системой ТОРО предусмотрена в подсистеме IBM Maximo [126] (рисунок 1.2). Архитектура Проекта показана на рисунке 1.3.

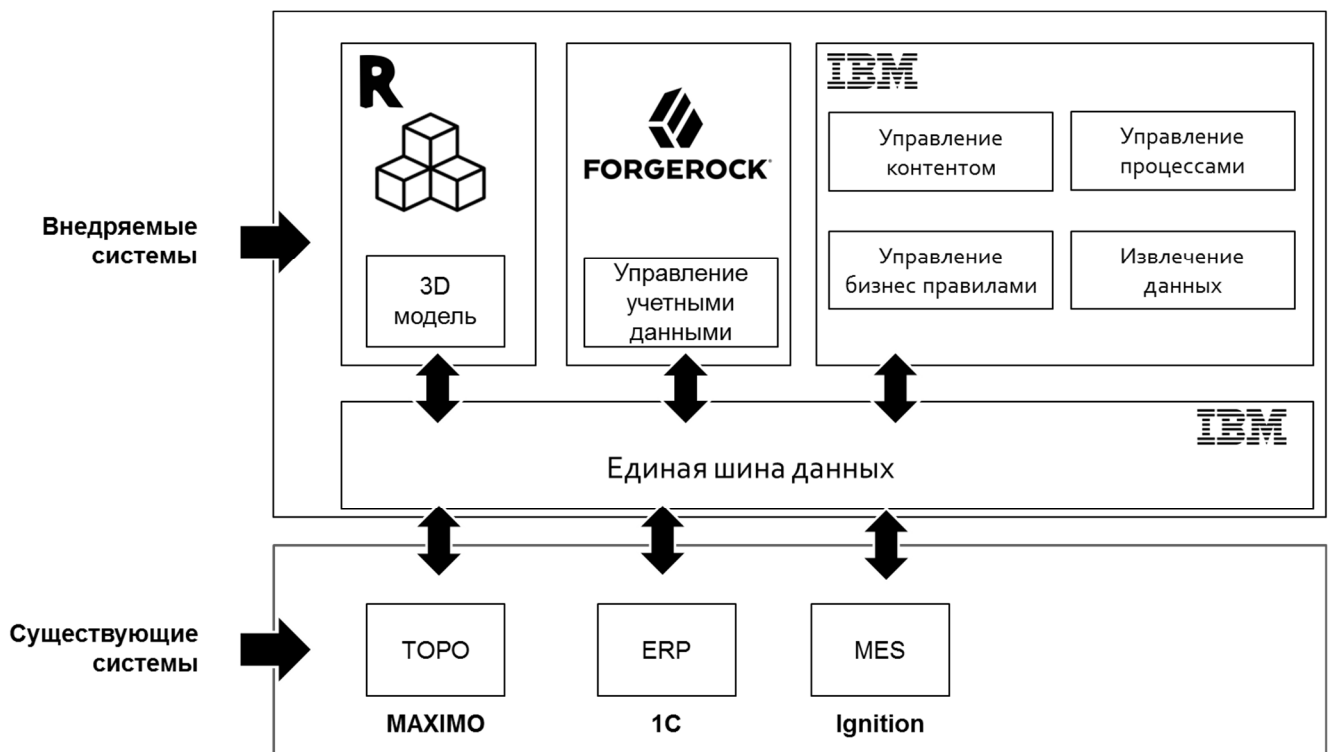


Рисунок 1.2 – Схема интеграции проекта в систему ТОРО

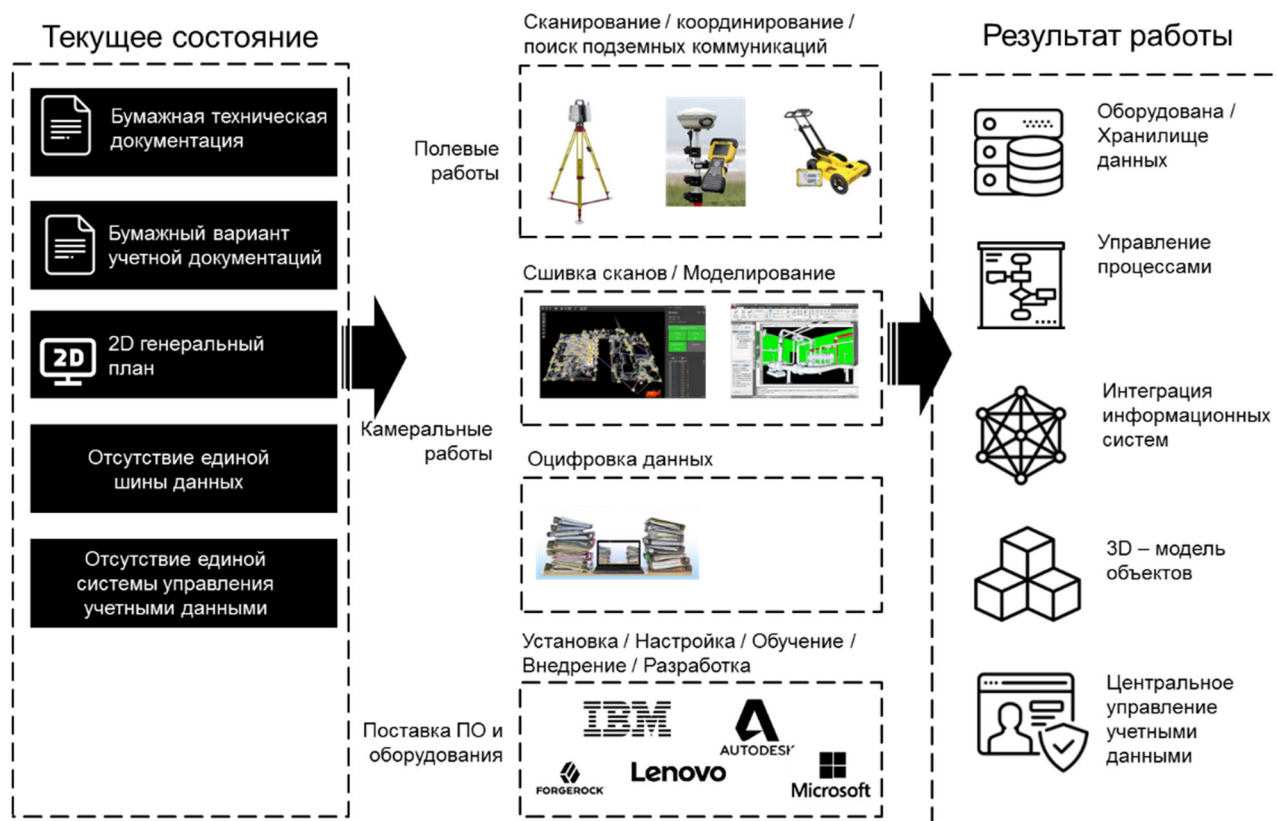


Рисунок 1.3 – Архитектура реализуемого Проекта

Просмотр, заполнение и извлечение данных ИМ завода будут осуществляться посредством использования подсистемы IBM Maximo.

Трехмерная визуализация модели с атрибутивными данными повысит эффективность процесса планирования и выполнения работ по техническому обслуживанию.

Таким образом, расширение возможностей системы ТОРО позволит более эффективно управлять активами и положениями, отслеживать заявки и задания, создавать системы из моделей, просматривать модель предприятия в 3D-формате.

Работы по созданию цифрового Генплана выполнялись в несколько этапов.

1 Подготовительные работы:

- проведение анализа необходимых к выполнению объемов работ. Создание совместной рабочей группы по исполнению проекта;

- сбор исходных данных и знакомство с результатами геодезических изысканий прошлых периодов, существующими исполнительными схемами, картографи-

ческими материалами на различных носителях (цифровых, бумажных), паспортными данными, проектной документацией;

- рекогносцировка, составление поэтапного плана полевых работ;
- установка программного обеспечения на аппаратной платформе. Первичная установка и настройка;
- составление полного календарного плана с разбивкой на этапы реализации проекта.

## 2 Комплекс полевых работ:

- работы по созданию и уравниванию пунктов геодезической сети;
- поэтапное лазерное сканирование с использованием марок;
- проведение топографической съемки подземных объектов, включая инженерные сети, резервуары и хранилища с применением специализированного оборудования (трубокабелеискателей и/или георадара).

## 3 Комплекс камеральных работ по созданию модели в виде облака точек:

- взаимное уравнивание сканов (сшивка);
- контроль качества уравнивания;
- создание панорамных снимков;
- создание 3D-модели по облаку точек с созданием тематических слоев;
- обработка результатов топографической съемки подземных коммуникаций и включение данной информации в 3D-модель;
- контроль полноты и точности 3D-модели;
- поэтапная передача облака точек и 3D-модели Заказчику в электронном формате;
- подготовка специалистов завода к работе с векторной моделью;
- подготовка технического отчета;
- внедрение Системы и загрузка 3D-модели в Систему;
- совместно с прочими подрядными организациями Заказчика обеспечение информационного обмена с системой ТОРО;
- организация обучения персонала Заказчика работе с Системой.

*Реализация проекта. Полевые работы.* Этап полевых работ включал в себя работы по созданию и уравниванию пунктов геодезической сети, который является одним из важных критериев при создании цифрового генерального плана.

Техническим заданием было предусмотрено создание геодезической сети заданного класса точности, служащей геодезической основой для выполнения наземного лазерного сканирования.

По точностным характеристикам геодезическая сеть должна быть определена с точностью 1-го разряда (в плане) и IV класса нивелирования (по высоте).

На этапе создания планово-высотного обоснования на местности произведена закладка 30 новых пунктов полигонометрии. Однородная высокая точность геодезических сетей достигнута применением оптимальных методов спутниковых наблюдений и соответствующих методов их обработки, а также за счет использования оптимальной геометрии расположения пунктов, их равномерной плотности и максимально возможного совмещения старой и новой геодезических сетей [132].

*Камеральные работы.* Результатом сканирования является «облако точек» лазерных отражений от объектов с известными координатами – скан (рисунок 1.4).

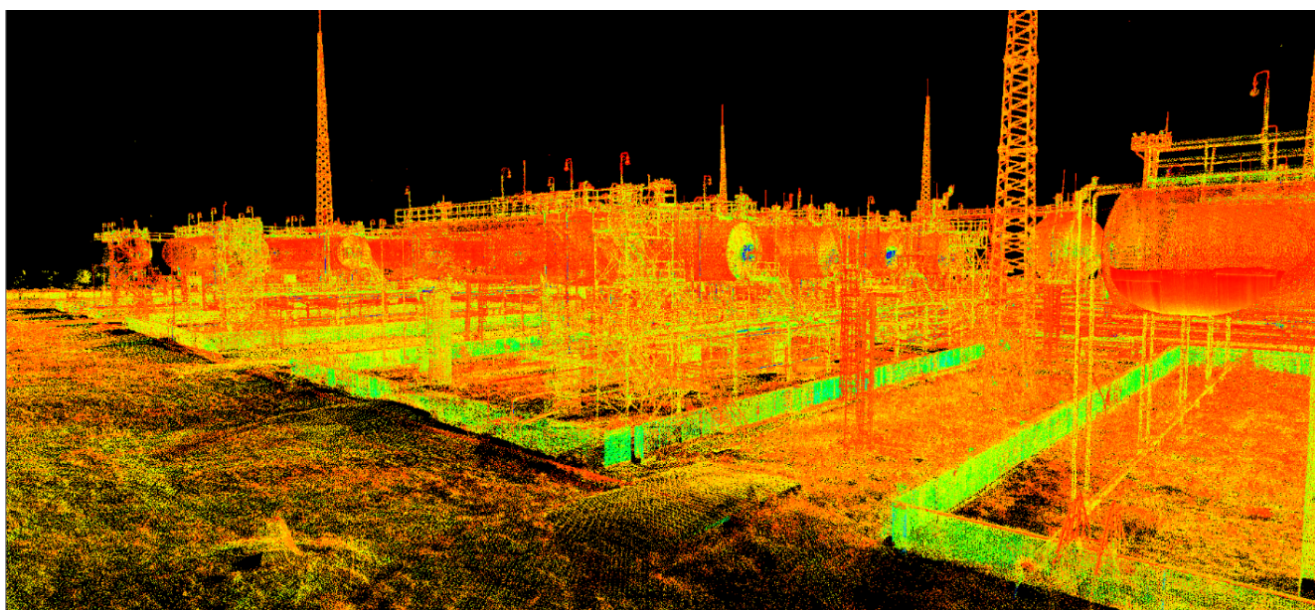


Рисунок 1.4 – Фрагмент облака точек

Предварительная обработка (импорт файлов, удаление шумов (транспорт, люди и т. д.), взаимное уравнивание сканов) производилась в программном обеспечении Leica Cyclone.

*Моделирование.* Этап создания информационной модели, выполнен с использованием программного продукта Aveva E3D.

Выбор данного программного продукта обусловлен рядом причин:

1 Информационная модель, выполненная в Aveva E3D, интегрируется с IBM Maximo.

2 Наличие инструментов обработки данных лазерного сканирования и их интеграция с 3D-моделью.

3 Поддержка работы с «облачными» технологиями и мобильными устройствами.

4 Удобные инструменты для быстрого создания и оформления чертежей согласно необходимым требованиям.

5 Возможность совместной работы над одним проектом с ведущим решением для моделирования в трехмерном пространстве AVEVA PDMS.

6 Полная интеграция с другими системами моделирования AVEVA, которые используются в работе, в том числе с технологиями для работы со схемами.

7 Возможность повторного использования данных, что позволяет применять модульное моделирования.

8 Интуитивно понятный пользовательский интерфейс для выполнения различных задач проектирования.

Процесс моделирования в программном продукте AVEVA E3D начался с обучения специалистов отдела 3D-моделирования. По программе обучения произведена подготовка специалистов по следующим направлениям: специалист по каталогам, специалист по разделам (ТХ, АС, КМ и др.) и администратор системы [12, 109].

В результате обучения получен опыт, который был использован при создании модели.

Моделирование выполнялось в следующей последовательности:

а) импорт облака точек через модуль PDMS программного обеспечения AVEVA (рисунок 1.5, а);

б) моделирование простыми примитивами фундаментов на участке;

в) работы по наполнению каталогов в файл базы данных каталога (DATAL) AVEVA:

1) трубы; фитинги, отводы, фильтры и т. д.;

2) шаблоны электрооборудования, шаблоны инструментального оборудования, осветительные приборы;

3) строительные элементы: арматура; соединения, лестницы и т. д.;

4) механическое оборудование: резервуары, насосы и т. д.;

5) вентиляция, кондиционирование и отопление;

г) моделирование оборудования: насосы, резервуары, цистерны, КЖ, КМ и т. д.;

д) создание каталога трубопроводов;

е) контроль пространственного несоответствия (взаимное расположения элементов);

ж) заполнение модели атрибутивными элементами по спецификации.

Сшитый, уравненный и ориентированный в системе координат файл облака точек, созданный в программном обеспечении Leica Cyclone в формате \*.ptx, не позволяет в дальнейшем проводить работы по экспорту облака точек в AVEVA. Для решения этой задачи использовался модуль Light form modeler.

Образец 3D-модели объекта, выполненный в заводской системе координат, показан на рисунке 1.5, б.

В результате моделирования достигнуты следующие показатели:

- созданы актуальные формы 3D-моделей объекта;
- получены планы, виды, разрезы для дальнейшей работы;
- заказчиком выявлены коллизии на этапе эксплуатации (отличия от проектных данных);
- значительно улучшено качество выходной документации.

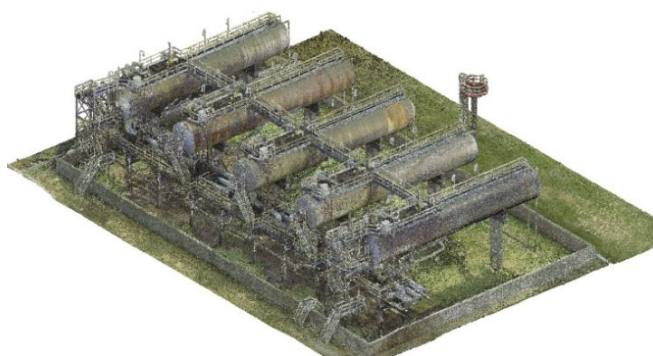
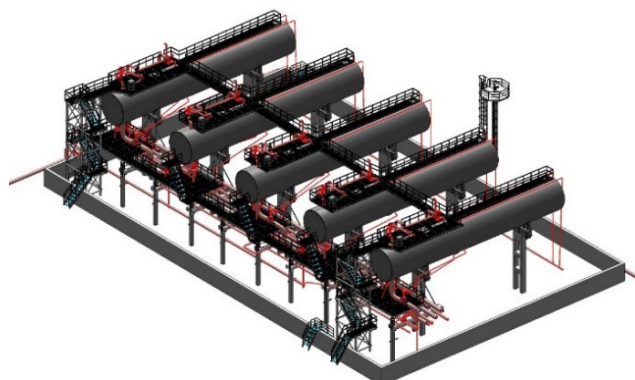
*a)**б)*

Рисунок 1.5 – Пример полученной 3D-модели:

*a)* облако точек; *б)* модель

В настоящее время проект «Создание цифрового Генерального плана и 3D-модели НПЗ РК» завершен и выполнена интеграция 3D-модели завода в автоматизированную систему ТОРО.

После завершения работ, по результатам внедрения, на стадии промышленной эксплуатации будет доступна визуализированная информация о состоянии технологического оборудования в части оценки надежности, прочности деталей и узлов. Также появится возможность получения информации с модели в виде рабочих чертежей и технических паспортов. Использование информационной 3D-модели дает возможность воспроизвести динамические (характеристики материала, изменяющиеся во времени, воздействию температуры и других факторов) изменения технологического оборудования, которые позволят предотвратить чрезвычайные ситуации, минимизировать простои технологического оборудования и, как следствие, увеличить эффективность работы предприятия.

Геодезическое обеспечение системы ТОРО на стадии реализации проекта и последующей эксплуатации объекта системы управления ТОРО выполняет важную роль и является важной частью при построении многоступенчатого процесса от планового обслуживания к необходимому обслуживанию оборудования, основанном на диагностике и контроле его состояния.

На основании вышесказанного можно прийти к выводу о значимости геодезического обеспечения при создании информационной 3D-модели завода, а также при ее эксплуатации в системе ТОРО.

Объем геодезических работ по сбору исходных данных, созданию геодезической основы, топографической съемки подземных коммуникаций, лазерному сканированию, сам процесс моделирования и наполнение его информацией составил основную и важную часть всего процесса реализации Проекта.

Геодезические работы при реализации Проекта явились фундаментом в производственно-технологической цепочке «съемка – облако – модель – анализ – технологический процесс». От их качества, полноты и своевременности, в конечном итоге, зависит качество построения информационной 3D-модели завода, внедрение и ее эксплуатация в системе ТОРО.

В настоящее время становится очевидным, что геодезическое обеспечение системы ТОРО в процессе эксплуатации, с использованием технологии наземного лазерного сканирования, позволит решать практически весь спектр задач геодезического обеспечения эксплуатации промышленных и сложных технологических объектов, и оборудования и откроет новые возможности по поддержанию информационной 3D-модели завода в актуальном состоянии [109] с очень высокой точностью [30, 111].

### 1.3 Выводы по разделу

Подводя итоги вышесказанному, можно сделать следующие выводы.

1 Нормативно-технические регламентирующие документы морально отстают от уровня современных технологий и не в полной мере отражают требования производства по своевременному выявлению деформаций и внедрения технологий BIM.

2 Существующие методики проведения лазерного сканирования позволяют получить максимально точные и полные результаты, но в части, касающейся пра-

воприменения, никак не закреплены нормативными документами (нет единой методики проведения измерений, нет четких регламентов в этой области и т. д.).

3 Внедрение технологий цифровых двойников в производство требует совершенно другого уровня геопривязанной информации об объекте.

4 Традиционные геодезические методы контроля деформаций резервуаров являются чрезвычайно трудоемкими и не дают полной информации о состоянии резервуаров, поэтому необходимы новые методы геодезической съемки резервуаров.

5 Необходима разработка методики обработки НЛС, которая позволит определять деформации резервуаров и позволит перейти от приближенных нормативных допусков к расчетным для конкретного резервуара.

Поэтому в работе ставится цель: разработать методику применения лазерного сканирования на примере наземного лазерного сканирования ПНХЗ.

## 2 МЕТОДИКА МОНИТОРИНГА СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

### 2.1 Характеристика объекта исследования

Вертикальные стальные цилиндрические резервуары в настоящее время являются основным типом емкостей для хранения нефти и нефтепродуктов. Простота конструкции и монтажа, хорошее соответствие расчетной и фактической схем работы обеспечивают их высокую надежность в эксплуатации. Развитие конструкции и способов сооружения цилиндрических резервуаров тесно связаны с ростом добычи и переработки нефти. Необходимость хранения нефти и нефтепродуктов в больших единичных объемах в конце 1940-х – середине 1950-х гг. поставила перед учеными и инженерами задачу разработки новой конструкции и технологии строительства резервуаров номинальным объемом до 50 000 м<sup>3</sup>. В процессе решения этой проблемы были проведены натурные испытания резервуаров с целью сопоставления расчетного и фактического напряженного состояния стенки и купола, опытной апробации методики расчета конструкций резервуара на общую устойчивость, покрытия резервуара [58, 78–80, 82]. На основании полученных теоретических и экспериментальных результатов была разработана нормативная документация на проектирование и монтаж цилиндрических резервуаров [88, 89]. С накоплением опыта эксплуатации и изучения частоты и причин отказов разрабатывались инструкции и правила ревизии, эксплуатации и ремонта резервуаров [16].

В послевоенные годы в Советском Союзе остро встал вопрос об ускорении темпов восстановления народного хозяйства страны, в том числе материальной базы нефтедобывающей и перерабатывающей отраслей. Этим насущным задачам послевоенного времени хорошо отвечал предложенный в 1948 г. в Институте электро-сварки им. Е. О. Патона доктором технических наук Г. В. Раевским способ временного деформирования для сооружения резервуаров [70]. С целью широкого применения нового метода были разработаны его теоретические основы, технология и обо-

рудования для заводского изготовления рулонов, технология монтажа резервуаров [5, 7, 23, 61, 69]. Исследовано влияние рулонирования на геометрическую форму стенки резервуара [69]. Проведены исследования по статической и хрупкой прочности, позволившие обосновать требования к сталям, сварочным материалам и технологии сварки [25, 29, 43–45, 71, 74, 75].

Первоначальный успех способа рулонирования резервуаров способствовал его интенсивному развитию в СССР в 60-е гг. прошлого столетия [48, 62, 76], когда была открыта большая сибирская нефть и в Европейской части страны начала создаваться мощная нефтеперерабатывающая промышленность. Уже в 1961 г. была разработана и прошла опытное опробование конструкция рулонизируемого резервуара номинальным объемом 10 000 м<sup>3</sup> [63]. Первый опытный резервуар объемом 20 000 м<sup>3</sup> с купольным покрытием был сооружен в 1965 г. [81]. В 1970 г. появились резервуары из рулонных заготовок емкостью 20 000 и 30 000 м<sup>3</sup>, для стенки которых была применена высокопрочная сталь 16Г2АФ [6, 26]. После получения положительного опыта, начиная с 1974 г., резервуары с плавающей крышей объемом 50 000 м<sup>3</sup> также сооружаются из рулонных заготовок с использованием стали 16Г2АФ [6].

Интенсивная эксплуатация построенных резервуаров, в особенности на нефтеперекачивающих станциях магистральных нефтепроводов, показала, что их стенка работает в условиях малоциклового нагружения, а расчет стенки резервуара производился только из условия статической и хрупкой прочности [17, 65, 105]. В этом случае очень важно было не допускать дефектов, способствующих концентрации напряжений и развитию пластических деформаций, являющихся причиной зарождения и развития усталостных трещин.

Вторая основная проблема состояла в невозможности добиться того, чтобы концы рулонов стенки перед сваркой находились в свободном состоянии на проектном радиусе, в результате чего в них имеет место угловая деформация. В действующих на тот период строительных нормах на сооружение резервуаров СССР [86, 87], требования к угловатости сварных соединений отсутствовали. Результатом

такого положения дел явилось то, что большинству вертикальных монтажных соединений в одну линию резервуаров, построенных из рулонных заготовок, объемом 10 000 м<sup>3</sup> и более присущи угловые деформации, смещение кромок и неудовлетворительное качество швов. На рисунке 2.1 показана сквозная трещина, вызванная угловой деформацией сварных швов, на рисунке 2.2 – угловая деформация стыковочного шва.



Рисунок 2.1 – Сквозные трещины на стенке резервуара



Рисунок 2.2 – Пример сварного шва с угловой деформацией

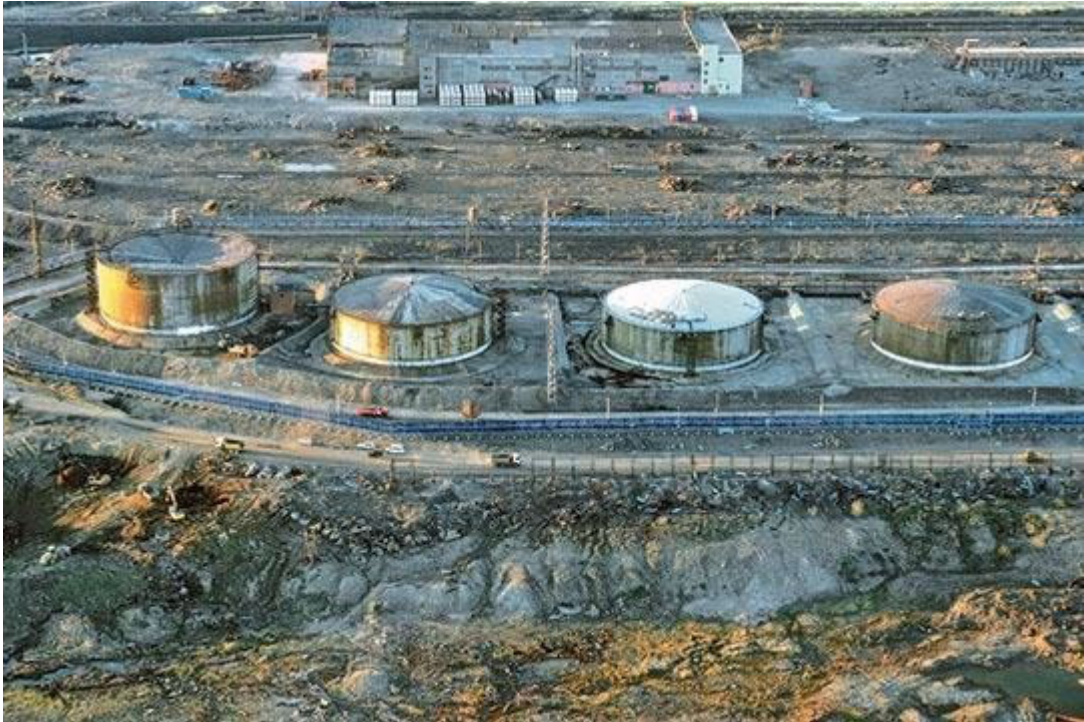
Одними из первых потеряли свою работоспособность по причине наличия угловых деформаций вертикальные цилиндрические рулонизируемые резервуары объемом 20 000 м<sup>3</sup> на НПС «Самара» Приволжских магистральных нефтепроводов. После наработки некоторого числа циклов слива-налива нефти в вертикальных монтажных соединениях стенки образовались продольные усталостные трещины.

С наработкой критического числа циклов слива-налива резервуарами, находящимися в эксплуатации на нефтеперекачивающих станциях, для которых имеет место малоцикловый характер нагружения, число их отказов начало увеличиваться. При этом основной причиной отказов являлось образование усталостных трещин в монтажных соединениях стенки из-за наличия угловых деформаций.

К настоящему времени вертикальные монтажные соединения рулонизируемых резервуаров, находящихся в эксплуатации на нефтеперекачивающих станциях Украины и России, наработали от  $5 \cdot 10^3$  до  $5 \cdot 10^4$  циклов слива-налива, и большая их часть исчерпала свою работоспособность и требует обследования и ремонта. В странах СНГ находятся в эксплуатации 40 000 вертикальных цилиндрических резервуаров различной емкости.

Вторая, наиболее распространенная причина нарушения целостности оболочки, – это деформации оболочки резервуара. Документ, регламентирующий допуски на деформацию стенок резервуаров [95], определяет необходимость ремонтных работ по исправлению деформаций стенок резервуара, которые носят название «хлопуны» и «выпучины».

Третья причина аварийности вертикальных цилиндрических резервуаров – оседания днища резервуаров, и даже в большей степени неравномерность оседаний. Резкие просадки грунта под основанием резервуара могут вызвать локальные сосредоточенные напряжения в оболочке резервуара, которые могут привести к нарушению ее целостности [1, 54] и катастрофическим экологическим последствиям, как это было в Норильске (рисунок 2.3).



*a)*



*б)*

Рисунок 2.3 – Резервуары Норильской ТЭЦ: *a)* общий вид резервуарного парка;  
*б)* деформированное днище резервуара

Конечно, такие аварии крайне редки, и скорее всего вызваны недостаточным уровнем геодезического мониторинга основания резервуаров. Обычно до подобных катастрофических последствий не доходит, так как маркшейдерско-геодезическая служба вовремя обнаруживает опасные деформации резервуаров, а ремонтная служба или специализированные организации [60] вовремя их устраняют (рисунок 2.4).



Рисунок 2.4 – Усиление резервуара в процессе ремонта

На сегодняшний день информация о техническом состоянии резервуара предоставляется геодезическими и маркшейдерскими службами предприятий на основании непосредственных измерений – нивелировки оснований и тахеометрической съемки стенок резервуара по швам и стыкам поясов резервуара. Такая технология достаточно хорошо описана в инструктивных материалах, учебниках и интернете [44, 95]. Однако в последнее время стали использовать метод наземного лазерного сканирования, так как он дает наиболее полную информацию о техническом состоянии резервуара [38, 42, 49, 54, 59, 67, 90,91, 99, 115]. Лазерное сканирование используется достаточно широко при мониторинге различных объектов [21, 100] и ввиду его высокой информативности и точности используется для моделирования и прогноза поведения объектов [10, 11]. Однако, несмотря на большие преимущества метода, он имеет и недостатки, связанные с использованием программного обеспечения общего назначения, которое не позволяет автоматизировать весь технологический цикл и требует большого объема ручного труда. Кроме того, операции в этих программах не всегда позволяют сделать вывод о методах и используемых алгоритмах.

Обобщая эту информацию, можно сделать следующие выводы.

Угловые деформации и дефекты сварных швов определяются методами неразрушающего контроля.

Деформации стенок резервуара и оседания днища резервуаров определяются геодезическими методами и наиболее перспективным для этого является метод лазерного сканирования. Разработка автоматизированных методов определения деформаций стенок резервуаров и осадок днища является актуальной научной задачей.

## 2.2 Методика лазерного сканирования объекта и обработки

*Полевые работы.* Этап полевых работ включал в себя работы по созданию и уравниванию пунктов геодезической сети, который является одним из важных критериев при создании цифрового генерального плана объекта.

Было предусмотрено создание геодезической сети заданного класса точности, служащей геодезической основой для выполнения наземного лазерного сканирования.

По точностным характеристикам геодезическая сеть была определена с точностью 1-го разряда (в плане) и IV класса нивелирования (по высоте).

На этапе создания планово-высотного обоснования на местности произведена закладка 30 новых пунктов полигонометрии. Однородная высокая точность геодезических сетей достигнута применением оптимальных методов спутниковых наблюдений и соответствующих методов их обработки, а также за счет использования оптимальной геометрии расположения пунктов, их равномерной плотности и максимально возможного совмещения старой и новой геодезических сетей.

Был разработан тип закладываемого пункта, который представляет собой толстостенную трехметровую трубу диаметром 159 мм, к верхней части приварена пластина, в центре которой приварен накренный болт (10 мм) высотой 2 см. В нижней части трубы приварен металлический швеллер (якорь). Высота верхней части центра, выступающей над землей порядка 40–50 см, а нижней части более 2,7 м. Нижняя часть центра полностью заполнена бетоном М250.

Закрепление долговременных знаков произведено с применением механического оборудования ямобур БМ-205-Д на базе трактора МТЗ. Диаметр отверстия ямы составил 360 мм (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Закрепление пунктов на местности

В качестве исходных пунктов для создания геодезической сети опознавательных знаков использовались только пункты заводской геодезической и нивелирной сети и вновь созданные пункты.

Для определения координат 30 новых и переопределения 54 существующих геодезических пунктов, а также создания параметров перехода из системы коорди-

нат WGS-84 в местную (заводскую) систему координат, разработана методика спутниковых наблюдений с использованием одновременно восьми ГНСС-приемников Leica GS14.

Координаты и высоты съёмочных точек на объекте работ определены в статическом режиме, так как этот метод является наиболее точным в ГНСС-наблюдениях и позволяет получить векторы на определяемые пункты с точностью в плане  $3 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$  по высоте  $5 \text{ мм} + 0,5 \text{ мм/км}$ .

Продолжительность сеансов при определении составила:

- на исходных пунктах более трех часов;
- на определяемых и переопределяемых пунктах не менее двух часов.

По результатам наблюдений и обработки данных спутниковых наблюдений был создан ключ с параметрами перехода из системы координат WGS-84 в местную (заводскую) систему координат.

Территория завода была разделена на три категории сложности (таблица 2.1):

- высокая сложность – 68 га;
- средняя сложность – 193 га;
- низкая сложность – 81 га.

Таблица 2.1 – Текущее состояние выполненного объема работ по НЛС на февраль 2020 года

Категория сложности	Общая площадь, га	Выполненный объем НЛС, га	Уровень детализации	Количество станций, ед.
Высокая	68	68	LOD 400	7 200
Средняя	193	168	LOD 300	2 750
Низкая	81	72	LOD 200	1 480

Наземное лазерное сканирование выполнялось с использованием современных сканирующих систем Leica ScanStation P40, Leica ScanStation P50 и Leica RTC360. Сканирование производилось в заводской системе координат путем определения координат марок от планово-высотного обоснования тахеометром Leica TS 06 plus.

Сканирование на каждой станции наземного лазерного сканирования выполнялось в пределах поля зрения сканера –  $360^\circ$  по горизонтали и  $270^\circ$  по вертикали, точность взаимного положения данных между станциями обеспечивалась в пределах менее 5 мм.

Сканирование производилось двумя способами:

а) в заводской системе координат с использованием марок, координированных от пунктов планово-высотного обоснования;

б) в условной системе координат, при этом в общем сканировании учитывались марки, которые были предварительно закоординированы. При таком способе при обработке указываются координаты марок и производится автоматическая привязка облака точек к заводской системе координат.

*Камеральные работы.* Результатом сканирования является «облако точек» лазерных отражений от объектов с известными координатами – скан (рисунок 2.6).

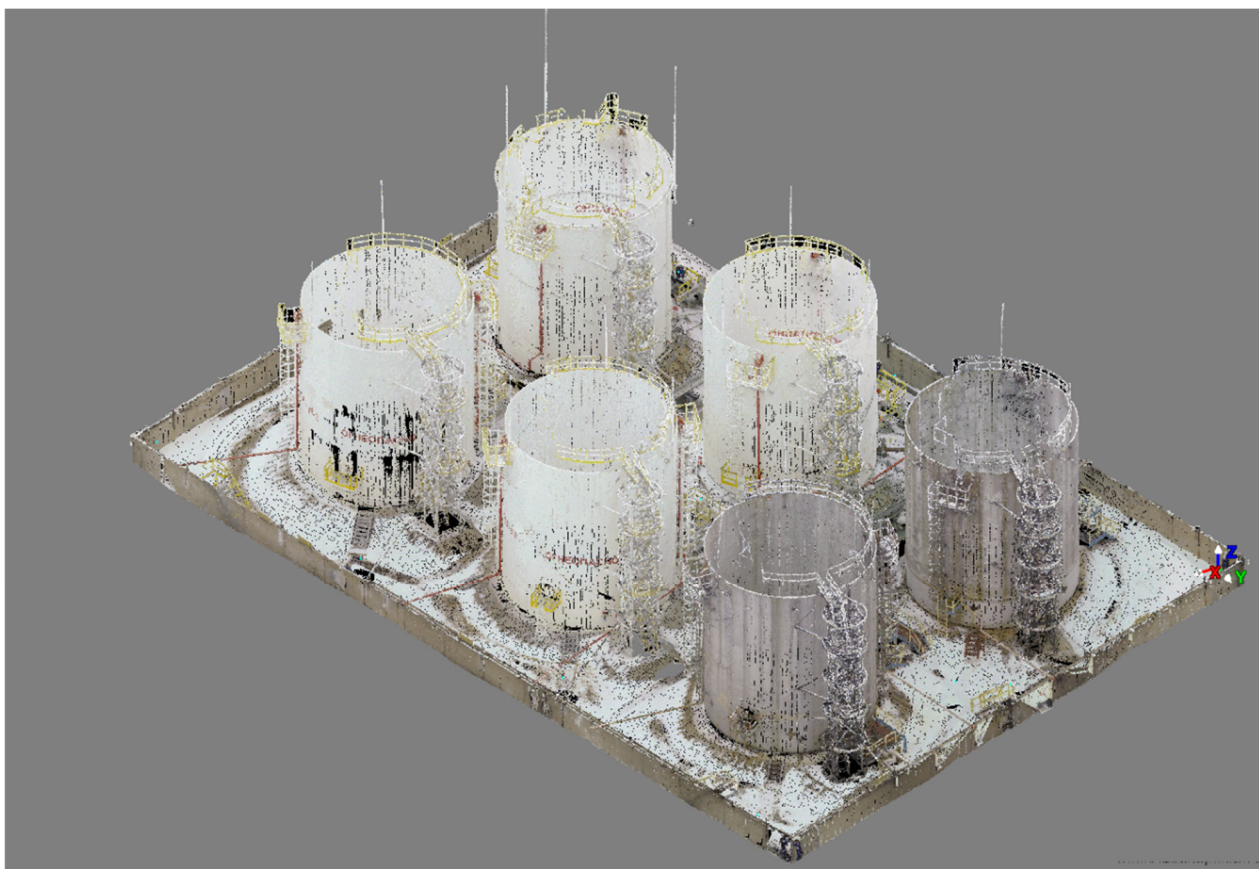


Рисунок 2.6 – Фрагмент облака точек съемки резервуарного парка

Предварительная обработка (импорт файлов, удаление шумов (транспорт, люди и т. д.), взаимное уравнивание сканов) производилось в программном обеспечении Leica Cyclone.

### 2.3 Методика автоматизированной обработки резервуаров

С точки зрения дискретной математики [18], облако точек лазерных отражений представляет собой неупорядоченное множество точек – объектов с общими свойствами. Объекты, которые образуют множество, называются элементами множества.

Множество точек лазерных отражений можно представить в виде:

$$M_p = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}, \quad (2.1)$$

$$p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (2.2)$$

где  $p_i$  – точка облака ТЛО, элемент множества  $M_p$ , индекс  $i$  не обозначает порядок элемента во множестве, а служит для идентификации элемента. Множество  $M_p$  не может быть пустым,  $M_p \neq \emptyset$ .

Число точек в облаке ТЛО очень велико – для резервуара объемом 1 000 м<sup>3</sup> число ТЛО может достигать 150 000 000 точек, или ~ одна точка на 2,5 мм<sup>2</sup>. Это излишняя плотность точек, и с таким числом точек даже многопроцессорный компьютер будет долго выполнять операции. Поэтому первоочередной задачей становится ограничение числа точек до некоторого числа, при котором обработка информации будет занимать приемлемое для оператора время, и точность определения параметров и деформации резервуара будет достаточной.

Экспериментальным путем определено, что для поверхности в 320 м<sup>2</sup> (для резервуара в 1 000 м<sup>3</sup>) достаточно будет 1 500 000 – 3 000 000 точек, при этом плотность точек на поверхности будет 1 точка на 15 × 15 мм – 10 × 10 мм.

Обозначим полученное множество  $M'_p$ , которое является подмножеством множества  $M_p$ :

$$M'_p \subset M_p \leftrightarrow M'_p = \{p_i / p_i \in M_p\}. \quad (2.3)$$

Пример прореженного подмножества  $M'_p$  приведен на рисунке 2.7, а. На этом рисунке видно, что это подмножество ТЛО содержит множество элементов, которые не относятся к вертикальному цилиндрическому резервуару. Это различное технологическое оборудование, которое располагается на кровле и боковой поверхности резервуара: элементы лестниц, площадок, патрубков. Точки этих объектов мешают выделению собственно боковой поверхности резервуара. Поэтому необходимо выполнить операцию отсечения элементов облака ТЛО, которые могут помешать определению параметра цилиндрического резервуара.

### 2.3.1 Определение параметров резервуара

Для определения параметров резервуара необходимо отфильтровать все точки, которые не относятся к цилиндрической поверхности резервуара.

Первым этапом производится отсечение по высоте, для этого имеется инструмент для определения высоты отсечения объектов на крыше  $Z_{\max}$  и в нижней части резервуара  $Z_{\min}$ , которая отсекает поверхность земли.

Эту операцию можно формализовать как выделение подмножества  $M''p$  из множества  $M'p$ :

$$M''p \subset M'p \leftrightarrow M''p = \{p_i / (p_i \in M'p) \cup (Z_{\min} \leq z_i \leq Z_{\max})\}, \quad (2.4)$$

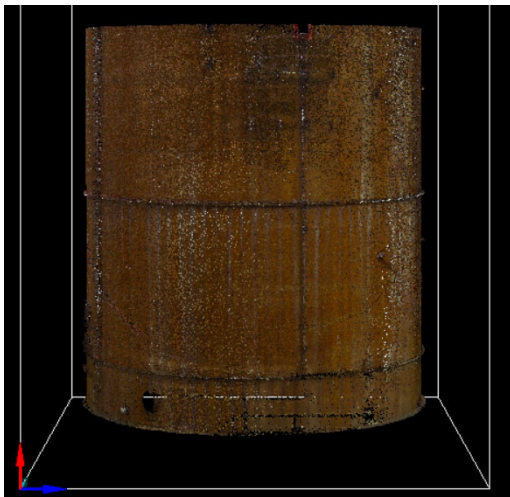
где  $p(z)_i$  – координата  $z$  точки  $p_i$ . Результат выполнения этой операции показан на рисунке 2.7, б.



а)



б)



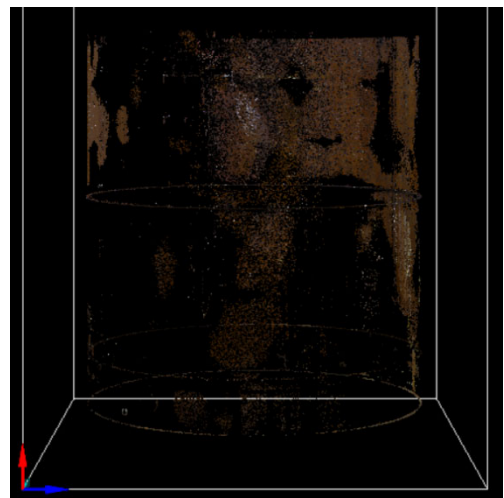
в)



г)



д)



е)

Рисунок 2.7 – Фильтрация облака ТЛЮ резервуара № 1:

- а) исходное облако  $N = 3\,050\,669$ ; б)  $N = 1\,532\,839$ , отсечение  $\Delta R = 120$  мм;  
 в) отсечение  $\Delta R = 100$  мм; г) отсечение  $\Delta R = 60$  мм; д) отсечение  $\Delta R = 40$  мм;  
 е) отсечение  $\Delta R = 20$  мм;

После отсечения по высоте необходимо определить параметры резервуара (цилиндра), которые находят из следующих уравнений, решаемых по МНК:

$$\left. \begin{aligned} \forall p_i \in M^"p \rightarrow (Z_{\min} \leq z_i \leq Z_{\max}) \rightarrow \\ (x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2 - R^2 = \varepsilon_i^2 \\ \left[ \varepsilon_i^2 \right] = \min \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

где  $x_i, y_i$  – координаты точки  $i$  из множества  $M^"p$ ;  $o_x, o_y$  – координаты центра цилиндра;  $R$  – радиус цилиндра;  $\varepsilon_i$  – отклонение точки  $i$  от цилиндра. Для всех точек, попавших в заданный диапазон высот, составляется система уравнений (2.5) и решается по МНК.

В случае, когда необходимо определить отклонение фактического цилиндра от проектного, система уравнений (2.5) примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \forall p_i \in M^"p \rightarrow (Z_{\min} \leq p(z)_i \leq Z_{\max}) \rightarrow \\ (x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2 - R^2 = \varepsilon_i^2 \\ R = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

При решении систем уравнений (2.5) и (2.6), кроме центра цилиндра, определяется положение оси цилиндра относительно системы координат, как показано в таблице 2.2. В таблице параметр  $\Delta R$  – это среднее квадратическое отклонение определения радиуса цилиндра. Высота цилиндра определяется из соотношения  $h = Z_{\max} - Z_{\min}$ . Плановое смещение – это линейное отклонение центра верхней поверхности цилиндра от центра нижней поверхности.

Зная радиус резервуара и координаты центра, можно исследовать, как будет влиять на параметры цилиндра и точность определения радиуса дополнительная операция фильтрации, которую назовем «отсечение по радиусу».

Таблица 2.2 – Параметры резервуара № 1

Название	Значение
Имя объекта	РВС № 1
Дата съемки	15.04.2020
Точек	1 628 320
X центра, м	1 976,143
Y центра, м	-1 102,753
Z центра, м	132,138
R, м	5,218
Отклонение $\Delta R$ , м	0,003 4
Наклон по оси Ax, градусы	-0,093 15
Наклон по оси By, градусы	0,023 89
Наклон по оси Cz, градусы	89,903 84
Высота, м	10,920
Отклонение по оси X, м	0,018
Отклонение по оси Y, м	-0,005
Плановое смещение, м	0,018

Геометрический смысл такой фильтрации заключается в удалении из множества точек  $M_p''$  – точек, которые лежат на расстоянии больше радиуса на величину допуска  $\Delta$

$$M_p''' \subset M_p'' \leftrightarrow M_p''' = \{p_i / (p_i \in M_p'') \cup (((x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2)^{\frac{1}{2}} < (R + \Delta))\}.$$

Теперь можно проанализировать, как влияет величина допуска отсечения  $\Delta$  на точность определения радиуса цилиндра. Если выполнить визуальный анализ облака точек, отфильтрованного с различными значениями допуска отсечения  $\Delta$  (см. рисунок 2.7), можно заметить, что при величине отсечения от 120 до 60 мм в облаке ТЛЮ появляются «дыры» на месте, где находились патрубки и элементы лестниц и площадок (см. рисунок 2.7, б, в, г), т. е. убирается информация об объектах, которые не относятся к цилиндрической поверхности резервуара. При меньшей величине допуска отсечения 40 и 20 мм, (см. рисунок 2.7, д, е) фильтром удаляется и полезная информация – точки, которые принадлежат цилиндрической поверхности резервуара.

В таблице 2.3 приведены сводные данные для резервуара № 1, которые показывают, как влияет допуск на отсечение на определение параметров радиуса резервуара и точность его определения.

Таблица 2.3 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 1

Допуск $\Delta$ , мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
200	1 628 320	38 164	5,218	0,003 4
120	1 532 839	37 954	5,218	0,003 4
100	1 528 510	37 949	5,218	0,003 4
80	1 525 038	37 945	5,218	0,003 4
60	1 509 086	37 891	5,218	0,003 4
40	1 192 684	34 617	5,218	0,003 3
20	102 394	9 890	5,232	0,001 6

Как видно из таблицы 2.3, допуск на отсечение практически не влияет на величину радиуса и точность его определения, только при допуске  $\Delta \leq 40$  мм происходит изменение радиуса и точности его определения. При значениях  $\Delta \geq 100$  мм значение радиуса и средняя квадратическая погрешность его определения не изменяются, такая закономерность прослеживается для всех резервуаров, мониторинг которых выполнялся в данном исследовании (приложение А).

На рисунках А.1 и А.5, в–д (приложение А) особенно хорошо видно, что при допуске отсечения  $\Delta R \geq 100$  мм облака содержат остатки элементов, которые расположены «над» цилиндрической поверхностью резервуара. При допуске отсечения  $\Delta R \leq 100$  мм видны отверстия в облаке ТЛЮ, появившиеся в результате фильтрации.

Если свести к графическому представлению зависимость числа точек выборки (или выходного множества  $M''p$ ) от допуска отсечения  $\Delta R$ , получим графики (рисунок 2.8).

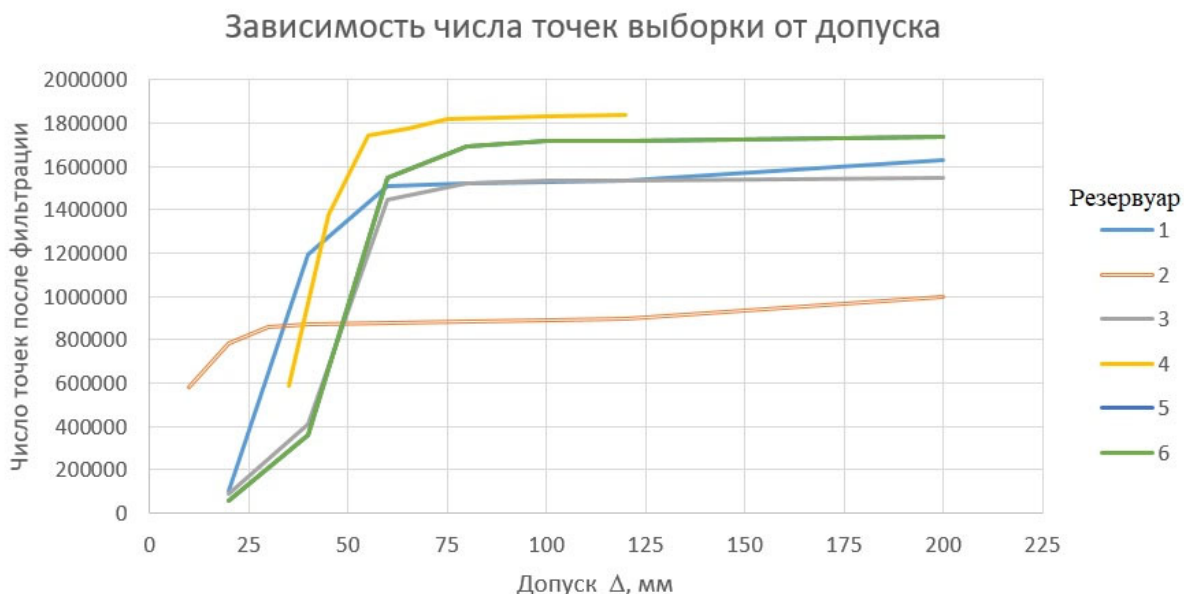


Рисунок 2.8 – Зависимость числа точек множества  $M_p'''$  от допуска отсечения  $\Delta R$

Графики на рисунке 2.8 показывают, что при допуске отсечения  $\Delta R \geq 100$  мм происходит незначительное увеличение числа точек множества  $M_p'''$  и в облаке остаются элементы объектов, которые находятся на поверхности цилиндра, при уменьшении допуска отсечения  $\Delta R \leq 75$  мм удаляется часть полезной информации.

### 2.3.2 Преобразование облака точек к сеточной модели

Полученное после двойной фильтрации облака ТЛО неупорядоченное множество точек  $M_p'''$  не обладает внутренней структурой и не позволяет выполнять операции сравнения таких множеств. В методиках мониторинга за деформациями резервуаров [38, 42, 49, 59, 67, 90, 91, 99, 115] множество точек облака ТЛО не упорядочивается, а по всем точкам облака строится нерегулярная триангуляционная сеть (TIN), по которой и выполняются дальнейшие операции сравнения и анализа. Такой путь требует значительных ресурсов для хранения и обработки данных. Целесообразно сократить объем информации, которая хранится в базе данных (БД), и привести неупорядоченное облако точек к регулярным структурам, или упорядоченным множествам – решеткам или сеткам [13, 35]. Сетки раз-

мерностью выше первой по структуре делятся на упорядоченные (регулярные) и неупорядоченные (нерегулярные). Регулярные сетки имеют упорядоченный набор узлов, который можно представить  $n$ -мерным массивом. Использование структурированных или регулярных сеток (по сравнению с неструктурированными) позволяет уменьшить продолжительность расчета и необходимый объем оперативной памяти ЭВМ.

Для дальнейшей обработки облака ТЛО преобразуем множество точек в криволинейную равномерную сетку [28, 47], которая имеет топологически эквивалентную прямоугольную сетку:

$$M_p^m \Rightarrow S_{i \times j}^h, \quad (2.8)$$

где  $i, j$  – размер сетки;  $h$  – шаг сетки.

На рисунке 2.9 показана криволинейная равномерная сетка на цилиндре и топологически эквивалентная ей прямоугольная сетка.

Развертка криволинейной сетки осуществляется по углу  $\delta$ , который вычисляется по заданному шагу  $h_y$  от направления на север геодезической системы координат.

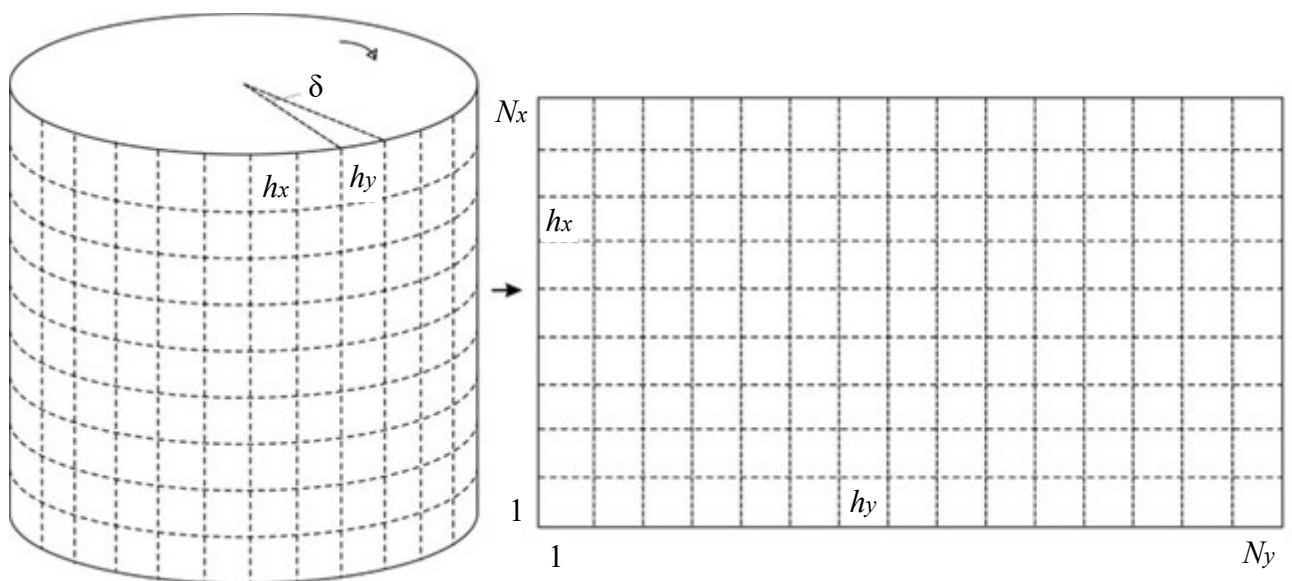


Рисунок 2.9 – Криволинейная и топологически эквивалентная ей прямоугольная сетка

Работать и производить численные вычисления удобнее с квадратной сеткой, поэтому все дальнейшие выкладки будем производить при  $h_y = h_x = 100$  мм для цилиндрического вертикального резервуара объемом  $1\,000\text{ м}^3$ . В нашем случае число строк  $N_x = 116$ , число рядов  $N_y = 329$ . Для получения топологически эквивалентной сетки необходимо выполнить перевычисление геодезических координат точек множества  $M_p'''$  в координаты на поверхности цилиндра. Для этого координаты точек ТЛО в геодезической системе координат перевычисляются в систему координат поверхности цилиндра с использованием следующих выражений:

$$\left. \begin{aligned} x_i^c &= z_i \\ y_i^c &= \alpha R \\ z_i^c &= ((x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2)^{\frac{1}{2}} - R \end{aligned} \right\} \rightarrow M^c, \quad (2.9)$$

где  $x_i^c, y_i^c, z_i^c$  – координаты точки в системе координат поверхности цилиндра;  $x_i, y_i, z_i$  – координаты точки в геодезической системе координат;  $\alpha$  – центральный угол, в радианах (рисунок 2.10);  $R$  – радиус резервуара;  $o_x, o_y$  – координаты центра цилиндра;  $M^c$  – множество точек в системе координат поверхности цилиндра. Геометрический смысл  $z_i^c$  – это отклонение точки  $i$  от цилиндра, имеет знак «+», если точка находится снаружи цилиндра, и знак «-», если внутри.

Затем выполняется переход от неупорядоченного множества точек на поверхности цилиндра к упорядоченной решетке  $S_{i \times j}^h$ , для этого в узлах сетки выполняется интерполирование для каждого узла сетки  $P(i, j)$ , в ограниченной окрестности  $h_x \times h_y$  (рисунок 2.11) с помощью кусочно-линейной гиперплоскости [96].

Для интерполяции выбирается некоторая окрестность  $h_x \times h_y$  вокруг узла сетки  $P(i, j)$ , в нашем случае квадратная область, со стороной квадрата  $h_x = h_y$ , в которую выбираются точки  $x_i^c, y_i^c, z_i^c$  в системе координат поверхности цилиндра из множества  $M^c$ . Выбранные точки образуют подмножество  $m \subset M^c$  с числом точек  $n$ .

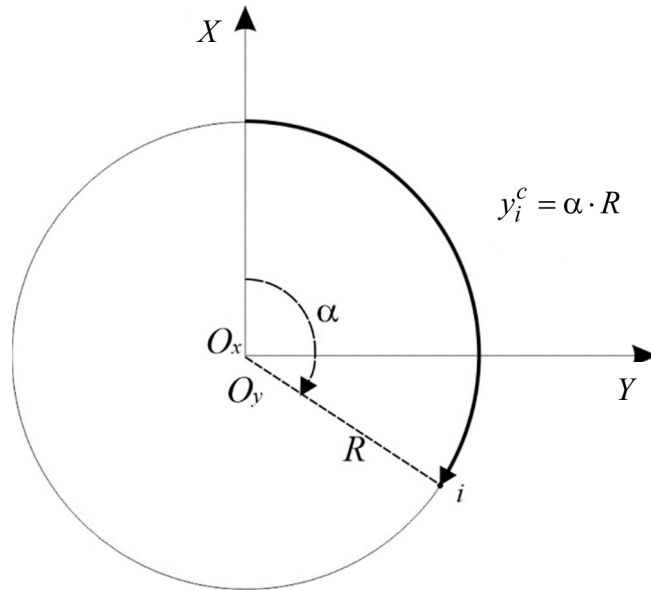


Рисунок 2.10 – Вычисление координаты  $y_i^c$  эквивалентной сетки

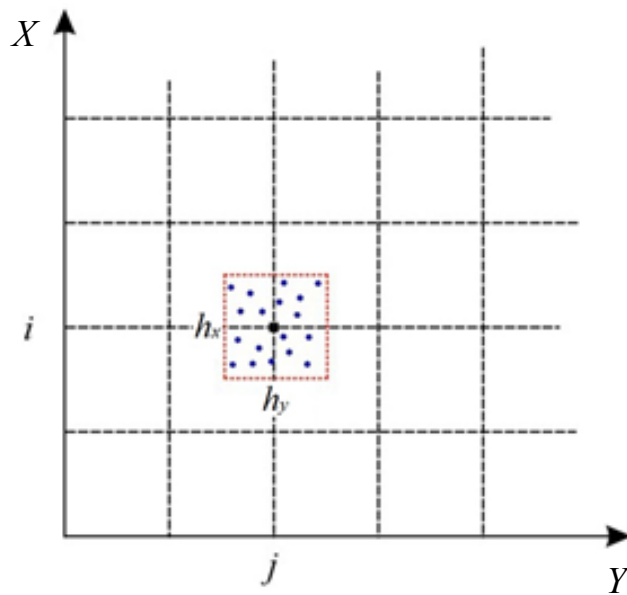


Рисунок 2.11 – Система координат эквивалентной прямоугольной сетки

Ковариационная функция  $K(\rho)$ , будет иметь вид:

$$K(\rho_{i,j}) = a + b \cdot \rho_{i,j}, \quad (2.10)$$

где  $a, b$  – постоянные величины, подбираемые для конкретных условий;  $\rho_{i,j}$  – расстояние между точками  $i$  и  $j$  в подмножестве  $t$ , вычисляется по формуле:

$$\rho_{i,j} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}. \quad (2.11)$$

Постоянная (коэффициент)  $b$  определяется из выражения:

$$b = \frac{c}{h}, \quad (2.12)$$

где  $c$  – некоторая константа, которая подбирается эмпирически;  $h$  – размер окрестности, в которую выбираются точки для интерполяции (см. рисунок 2.11).

По выбранным в окрестность точкам формируются следующие матрицы:

$$L = \begin{vmatrix} z_1 - z_0 \\ z_2 - z_0 \\ \dots \\ z_n - z_0 \end{vmatrix}, \quad (2.13)$$

$$C_p = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,p}) \\ K(\rho_{2,p}) \\ \dots \\ K(\rho_{n,p}) \end{vmatrix}, \quad (2.14)$$

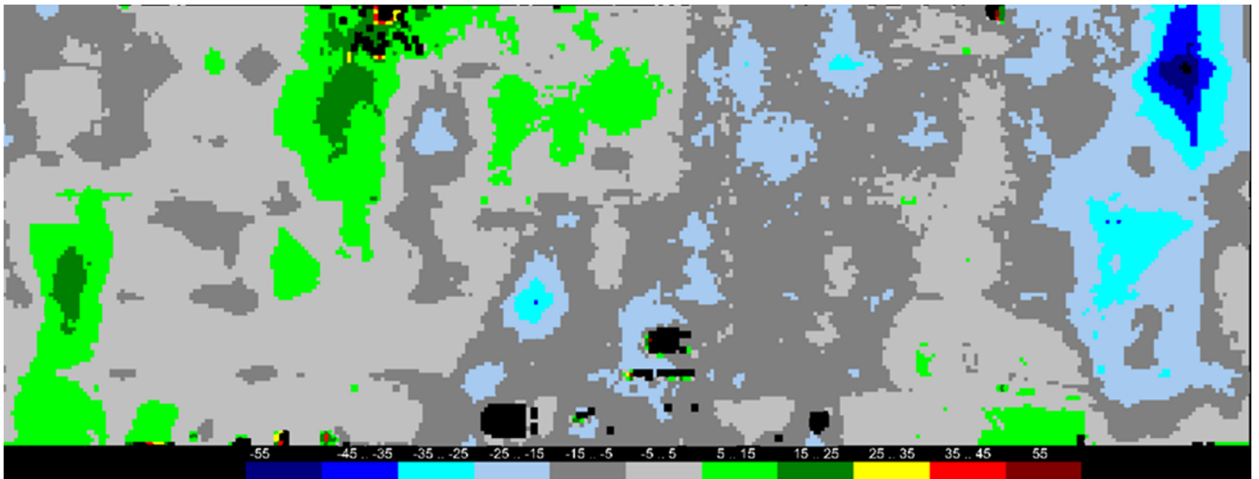
$$C = \begin{vmatrix} K(\rho_{1,1}) & K(\rho_{1,2}) & \dots & K(\rho_{1,n}) \\ K(\rho_{1,2}) & K(\rho_{2,2}) & \dots & K(\rho_{2,n}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ K(\rho_{1,n}) & K(\rho_{2,n}) & \dots & K(\rho_{n,n}) \end{vmatrix}, \quad (2.15)$$

где  $z_0$  – среднее арифметическое из отметок точек, попавших в окрестность.

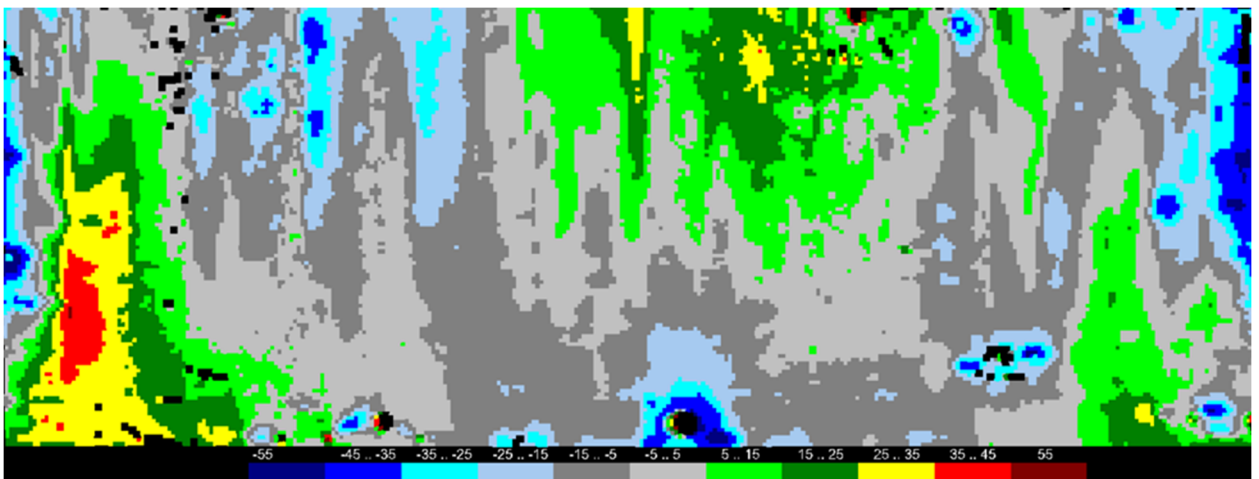
Интерполированная отметка  $Z_p$  узла сетки  $P(i, j)$ , вычисляется по формуле:

$$Z_p = z_0 + C_p^T C^{-1} L. \quad (2.16)$$

Если выполнить интерполяцию методом коллокации для всех узлов сетки, получим развертку поверхности резервуара (рисунок 2.12).



а)



б)

Рисунок 2.12 – Интерполированные поверхности резервуаров:

а) резервуар № 1; б) резервуар № 5

На рисунке 2.12 черным цветом показаны пропуски интерполирования точек сеточной модели, которые связаны с тем, что после операции отсечения по радиусу в облаке точек появляются «дыры», то есть места, где не точек. В этих местах в ограниченную окрестность  $h_x \times h_y$  попало менее трех точек, а в некоторых случаях ни одной. На рисунке 2.13 показаны причины возникновения пропусков в сеточной модели, которые являются следствием «экранирования» поверхности резервуара различными наружными элементами конструкции.

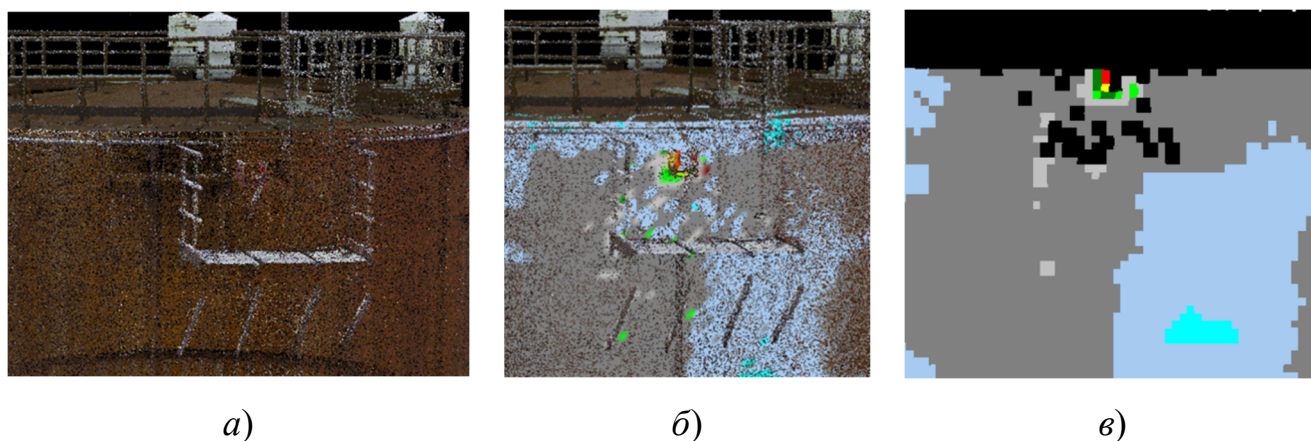


Рисунок 2.13 – Фрагмент облака ТЛО и сеточной модели:

*a)* исходное облако ТЛО; *б)* совмещенное с цилиндром; *в)* сеточная модель

Следует отметить, что «дыры» являются не единственными проблемами сеточных поверхностей. На рисунке 2.13, *в* видно, что некоторые узлы сетки имеют резкие отклонения от основной сеточной поверхности (показаны желтым и красным цветом). Эти отклонения вызваны остаточными «шумами» от площадок, патрубков и люков, которые остаются во множестве  $M^c$  после фильтрации по радиусу с допуском отсечения.

Если проанализировать число точек сеточной модели для резервуара объемом  $1\,000\text{ м}^3$ , для которой число строк  $N_x = 116$ , число рядов  $N_y = 329$ , всего точек сеточной модели 38 164, и связать число фактически интерполированных точек с величиной допуска отсечения по радиусу  $\Delta$ , получим графики зависимостей, показанные на рисунке 2.14.

Графики на рисунке 2.14 показывают, что по мере увеличения допуска  $\Delta$  от 10 до 200 мм число интерполированных точек возрастает и при допуске 100 мм достигает некоторой величины (примерно 37 850), после которой рост прекращается. Поэтому для дальнейшей обработки облака точек для резервуаров объемом  $1\,000\text{ м}^3$  допуск принимается равным  $\Delta = 100\text{ мм}$ . При больших углах наклона резервуара этот допуск может быть увеличен до 150 мм.

Зависимость числа интерполированных точек от допуска

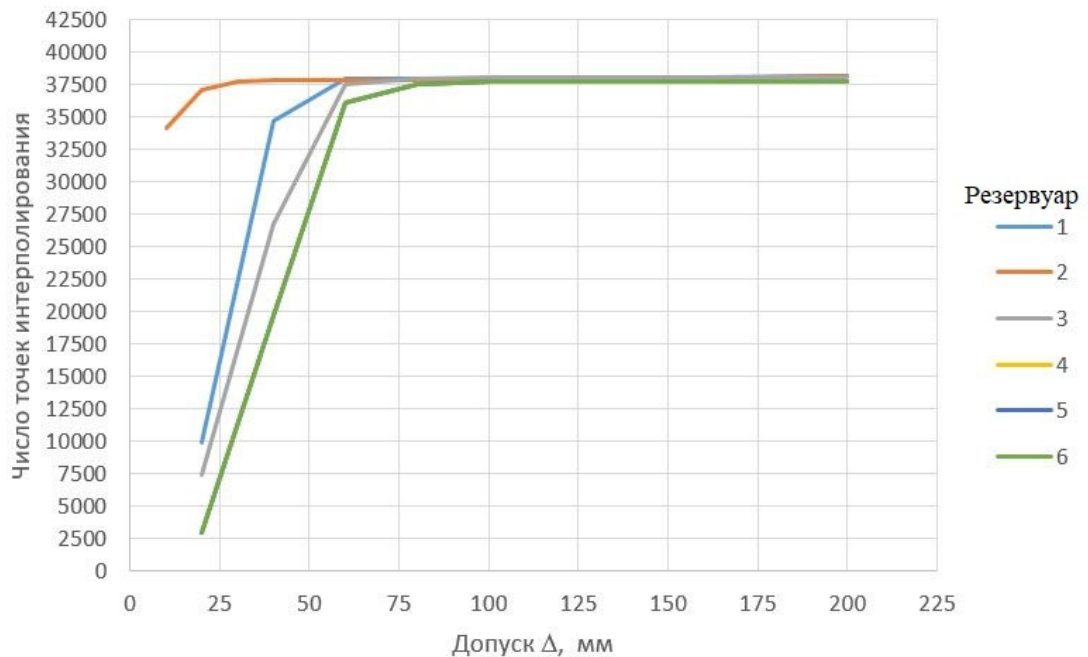


Рисунок 2.14 – Зависимость интерполированных точек от допуска

При этом число узлов сетки, в которых интерполирование не выполнено из-за «дыр», составит от 300 до 500. Для того, чтобы оценить число узлов, на интерполирование которых влияют остаточные «шумы», необходимо провести дополнительные исследования гладкости полученной сеточной модели.

### 2.3.3 Анализ гладкости сеточной модели поверхности резервуара

Следующий этап обработки – выявление узлов, на которые повлияли остаточные «шумы». Эта операция производится, исходя из предположения, что сеточная модель хорошо описывает поверхность резервуара, является гладкой и не имеет ступенчатых дефектов поверхности. То есть предполагается, что деформации резервуара «хлопуны» и «выпучины» тоже являются гладкими поверхностями.

Гладкость поверхностей можно исследовать методами дифференциальной геометрии [77, 98], и она связана с кривизной поверхности в локальных областях.

Для сеточных моделей анализ кривизны поверхности можно упростить до анализа уклонов между узлами сетки. Кроме того, предполагается, что большинство участков с недопустимыми уклонами находится на границе вблизи «дыр», как показано на рисунке 2.15. Подавляющее большинство уклонов сеточной поверхности небольшое и соответствует гладкой криволинейной поверхности.

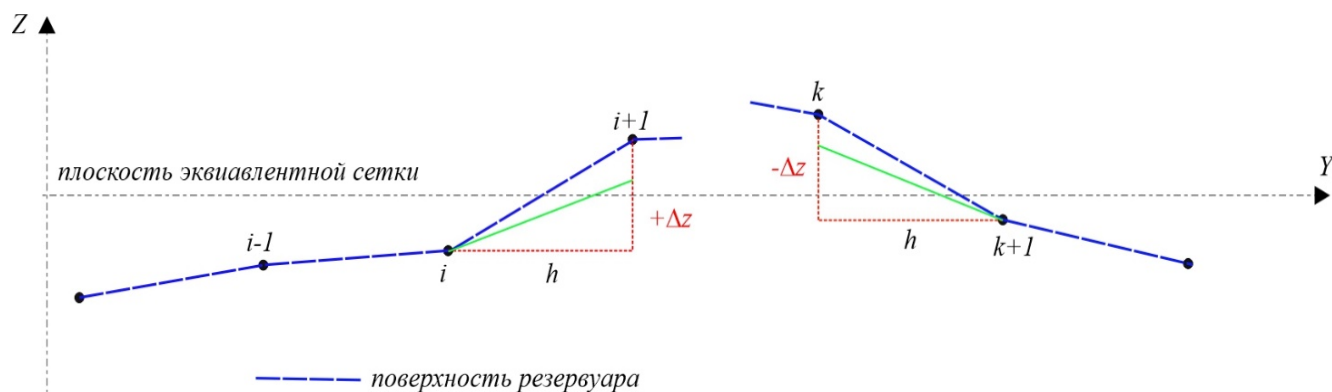


Рисунок 2.15 – Уклоны по линии сеточной модели

На рисунке 2.15 показано, что уклоны могут быть со знаком «+» и со знаком «-», поэтому анализ поверхности уклонов выполняется по модулю. Узлы, для которых не выполняется следующее неравенство, переводятся в состояние «не определен»:

$$\left| \frac{z_{i+1} - z_i}{h} \right| \leq U_{\text{доп}}, \quad (2.17)$$

где  $U_{\text{доп}}$  – допустимая величина уклона.

Для определения допустимой величины уклона выполним статистический анализ поверхностей уклонов. На рисунке 2.16 приведена поверхность уклонов для резервуара № 1.

На рисунке 2.16 видно, что большие значения уклонов (бирюзовый цвет ячеек поверхности) сосредоточены возле стыковочного шва – узкая вертикальная область в центре поверхности – и возле «дыр» в поверхности.

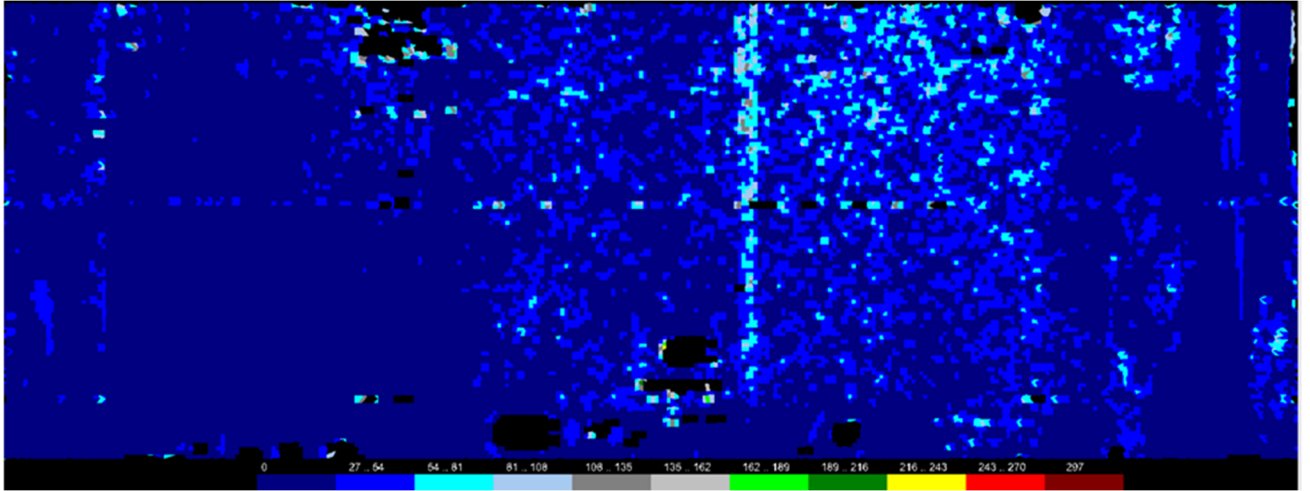


Рисунок 2.16 – Поверхность уклонов для резервуара № 1

Также видны локальные значения уклонов по вертикальным и горизонтальным швам. Статистика распределения числа точек по диапазонам и график гистограммы для резервуара № 1 приведены в таблице 2.4 и на рисунке 2.17.

Если обобщить данные по всем резервуарам (приложения В–Е), можно сделать вывод, что для подавляющего большинства ячеек сетки уклоны не превышают 0,1 что в абсолютных значениях для сетки с шагом в 100 мм превышения между соседними узлами не должны быть более 10 мм. Поэтому для фильтрации по уклонам принимается  $U_{\text{доп}} = 0,10$  (или 10 мм превышения на 100 мм длины).

Таблица 2.4 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,027	27 772
0,027	0,054	7 910
0,054	0,081	1 205
0,081	0,108	291
0,108	0,135	198
0,135	0,162	118
0,162	0,189	63
0,189	0,216	69
0,216	0,243	53
0,243	0,27	25
0,27	0,297	29



Рисунок 2.17 – Гистограмма распределения уклонов

Если с этим допуском обработать все поверхности деформаций (см. рисунок 2.12 для резервуара № 1 и рисунки В.1–Е.2 приложений В–Е), получим дополнительно узлы сетки, в которых деформации не определены, статистика приведена в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Результаты фильтрации по уклону

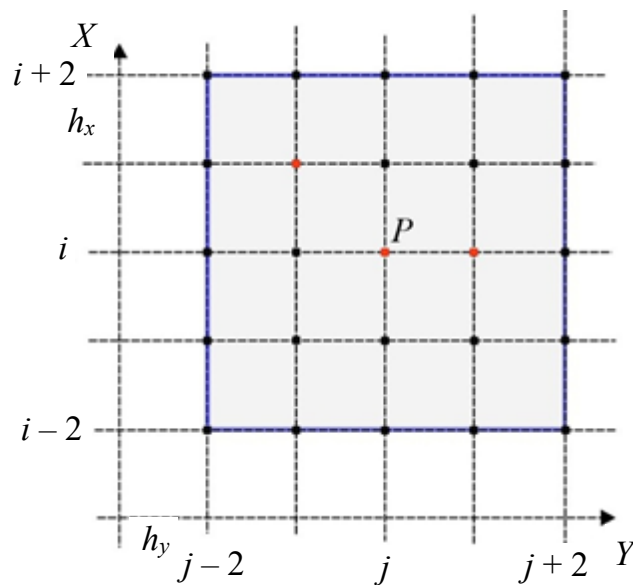
Резервуар №	Отфильтровано точек	в %
1	1 034	2,7
2	238	0,6
3	1 518	3,9
4	996	2,6
5	1 322	3,4

В конечном итоге узлов с неопределенными деформациями из-за «дыр» и фильтрации по уклонам составляет до 5 % из всего числа узлов эквивалентной сетки.

Возникает необходимость интерполировать, а в некоторых случаях – и экстраполировать значения деформаций в узлах сетки там, где они не были определены на предыдущих этапах обработки.

### 2.3.4 Интерполирование пропусков в сеточной модели

Для интерполирования значений деформаций в узлах сеточной модели можно применять различные методы. В работе использовались два метода, которые дают близкие результаты – это метод коллокации и обратных взвешенных расстояний. Метод коллокации, который использовался в 2.3.2 для перехода от облака ТЛО к сеточной модели, дает более надежные результаты в случае экстраполяции [96]. А такие случаи достаточно часто возникают при интерполировании значений вблизи границ сетки. Поэтому в дальнейшем использовались формулы (2.10)–(2.16), но область выборки формировалась иначе. Для того, чтобы применять закономерности поверхности сеточной модели, для которой уже определены показатели в 95 % узлов, использовалась область выборки матричного типа, как показано на рисунке 2.18.



■ – имеют значение (интерполированы); ■ – не имеют значения (не интерполированы)

Рисунок 2.18 – Область выборки при интерполяции узлов

На узел в точке  $P(i, j)$  накладывается квадратная матрица с нечетным количеством ячеек, в данном случае  $5 \times 5$ , и выбираются точки, которые попали в область выборки и которые имеют значения. Для точек, которые попали в область выборки, составляются уравнения (2.10)–(2.16) и определяется показатель в точке  $P$ . Если в область попало мало точек – размер области увеличивается. Пример интерполяции пропусков для сеточной модели резервуара № 1 показан на рисунке 2.19.

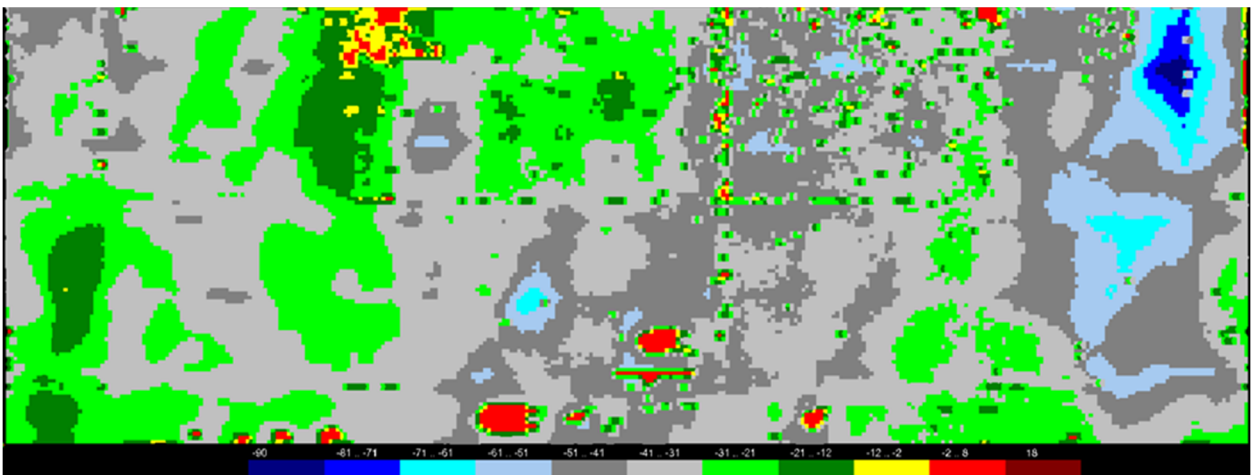


Рисунок 2.19 – Интерполированная сетка резервуара № 1

Полностью интерполированная сеточная модель для резервуара № 1 показывает, что поверхность сеточной модели имеет «пестрый» вид из-за случайных ошибок измерения длин при сканировании, ошибок сшивки сканов и случайных ошибок интерполирования. Такая же картина наблюдается и для остальных резервуаров (приложения В–Е, рисунки В.5–Е.5).

По такой поверхности, которая не обладает достаточной гладкостью, очень трудно выполнять операции анализа, поэтому после интерполирования всех узлов сетки необходимо выполнить сглаживание поверхности.

### 2.3.5 Сглаживание сеточной модели

Сглаживание сеточных моделей (в геоинформатике они называются растровыми) может выполняться различными методами. Целью сглаживания является

уменьшение влияния случайных ошибок измерений и уменьшения остаточных «шумов», т. е. величин, которые сильно отличаются от окружающих ячеек.

В системах автоматизированного проектирования чаще всего применяют сглаживание различного вида сплайнами [40, 55].

В пакетах растровой графики и геоинформационных системах применяют различные варианты фильтрации по Гауссу [102, 104, 128], фильтры нижних частот и фильтры верхних частот. Размытие по Гауссу – это фильтр нижних частот, ослабляющий высокочастотные сигналы. Применительно к эквивалентной сеточной модели поверхности резервуара применение фильтра нижних частот приведет к уменьшению перепадов отклонений (деформаций цилиндра) между соседними ячейками.

Теоретически гауссиан в случае функции двух переменных можно описать выражением:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (2.18)$$

где  $x, y$  – координаты точки;  $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение нормального распределения.

При практическом использовании такое сглаживание выполняется с помощью масок  $3 \times 3$ ,  $5 \times 5$  или  $7 \times 7$ , на которых задается соотношение весов для ячеек этих масок, как показано на рисунке 2.20. На рисунке 2.20 показана маска размером  $3 \times 3$ , которая перемещается по строкам и столбцам сеточной модели и при этом заменяет исходную отметку  $z_{ij}$  на  $z'_{ij}$ , которая вычисляется по формуле:

$$z'_{ij} = \frac{p_1 \sum_{k=1}^8 z_k + z_{ij} p_0}{8p_1 + p_0}. \quad (2.19)$$

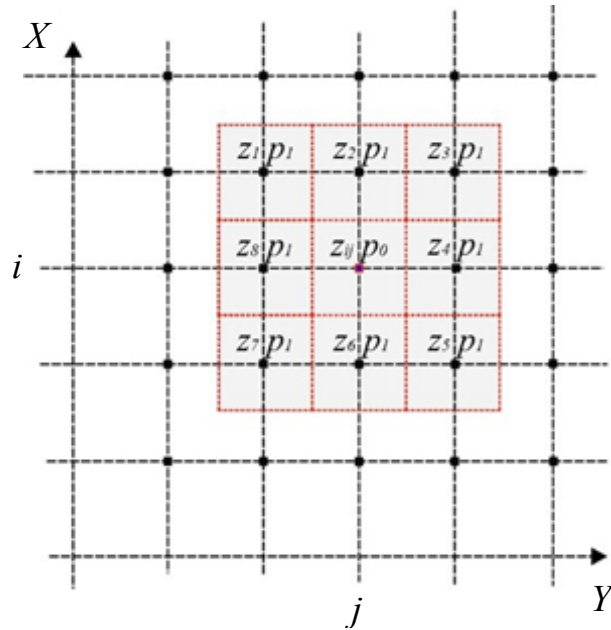


Рисунок 2.20 – Маска  $3 \times 3$  на сеточной модели

При размере масок  $5 \times 5$  или  $7 \times 7$  могут быть разные соотношения весов для первого и второго рядов относительно точки  $i, j$ . В классической интерпретации фильтра по Гауссу соотношения весов связаны с величиной  $\sigma$ .

При соотношении весов  $p_1 > p_0$  фильтр превращается в фильтр низких частот, т. е. уменьшается разница между ячейкой  $i, j$  и окружающими ячейками сетки и происходит сглаживание поверхности. Если соотношение  $p_1 < p_0$ , разница между ячейкой  $i, j$  и окружающими ячейками увеличивается. Если  $p_1 = p_0$ , происходит усреднение показателя по девяти ячейкам.

Для сеточной модели резервуара № 1 (рисунок 2.21) применение низкочастотного фильтра с параметрами  $p_1 = 1,1$  и  $p_0 = 1$  приведет исходную сетку к виду, который показан на рисунке 2.21.

При этом диапазон деформаций  $\min - \max$  до сглаживания составлял:  $-0,0904-0,0181$ , а после сглаживания:  $-0,0842-0,0181$ . То есть, диапазон изменился незначительно, хотя поверхность стала более гладкой. Такая же закономерность наблюдается и на остальных резервуарах (приложения Б–Е, рисунки Б.5–Е.5 и рисунки Б.6–Е.6).

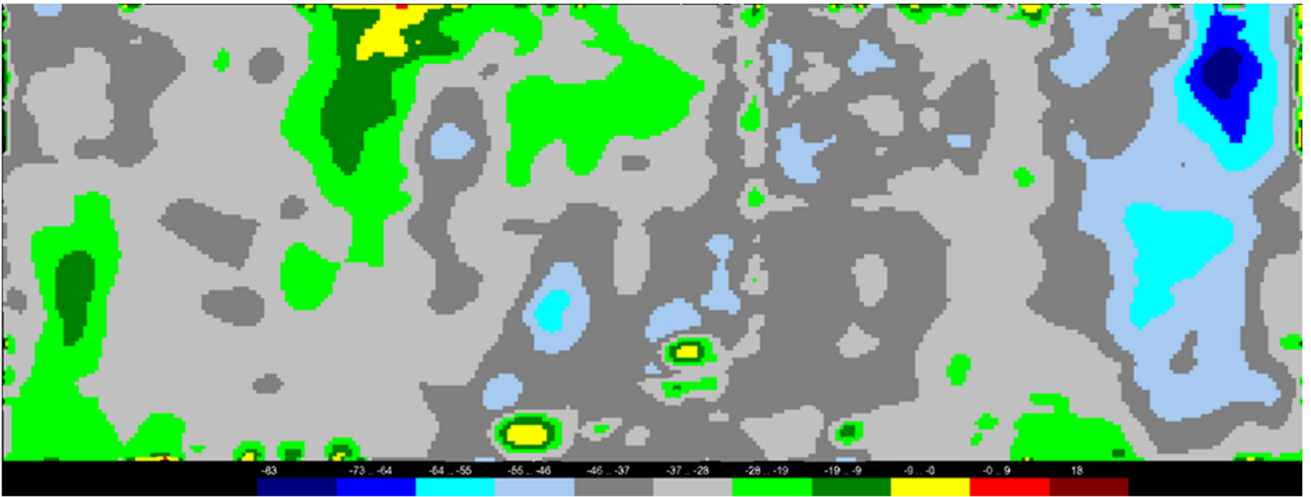


Рисунок 2.21 – Сглаженная маской  $3 \times 3$  сеточная модель резервуара № 1

Над такими поверхностями, которые являются топографическими, можно производить все операции алгебры карт [26, 105]. Так, например, разность двух поверхностей на разные даты даст информацию об изменении деформаций резервуара тоже в виде поверхности.

Кроме того, сглаженные модели позволяют применить численные методы для расчета напряжений цилиндрических оболочек и их прогноза.

### 2.3.6 Расчет напряженно-деформированного состояния резервуара

В процессе эксплуатации резервуары испытывают рабочие нагрузки, предусмотренные проектной документацией, а также могут подвергаться воздействиям несистемного характера, например подвижкам и смещениям грунта в основании, локальное снижение прочности и жесткости может быть вызвано коррозионными процессами и т. п. Периодическое проведение геодезического мониторинга напряженно-деформированного состояния резервуара позволит своевременно отреагировать на намечающиеся изменения, что позволит заблаговременно предотвратить техногенную катастрофу.

Расчет напряженного состояния резервуаров может быть выполнен по различным методикам [9, 14, 15, 106].

Исходными данными к расчету является матрица радиальных перемещений  $W = \{w_{i,j}\}$ , где  $i$  – порядковый номер сечения по окружной координате, начиная с нулевого ( $i = 0, \dots, n\varphi$ );  $n\varphi$  – количество точек по окружной координате;  $j$  – порядковый номер сечения по осевой координате (номер пояса,  $j = 0, \dots, nx$ );  $nx$  – количество точек по осевой координате. Если имеется матрица начальных отклонений  $W_0$ , то для оценки напряженно-деформированного состояния следует принять матрицу  $W = W_1 - W_0$ , где  $W_1$  – текущие перемещения. Для каждого пояса радиальные перемещения интерполируем функцией вида:

$$w_j(\varphi) = \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos^2\left(\frac{1}{2}k(\varphi - \psi_i)\right), \quad (2.20)$$

где  $\psi_i$  – угловая координата  $i$ -й точки;  $a_{i,j}$  – коэффициенты интерполяции, определяются из решения системы:

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{0,0} \frac{n\varphi}{2} + a_{1,0} \left( \cos^2\left(\frac{1}{2}(\psi_0 - \psi_1)\right) + \cos^2(\psi_0 - \psi_1) + \dots \right) + \dots = w_{0,0}; \\ a_{1,0} \left( \cos^2\left(\frac{1}{2}(\psi_0 - \psi_1)\right) + \cos^2(\psi_0 - \psi_1) + \dots \right) + a_{1,0} \frac{n\varphi}{2} + \dots = w_{1,0}; \\ \dots + a_{n\varphi-1,0} \left( \cos^2\left(\frac{1}{2}(\psi_{n\varphi} - \psi_{n\varphi-1})\right) + \cos^2(\psi_{n\varphi} - \psi_{n\varphi-1}) + \dots \right) + a_{n\varphi,0} \frac{n\varphi}{2} + \dots = w_{n\varphi,0}; \\ a_{0,1} \frac{n\varphi}{2} + a_{1,1} \left( \cos^2\left(\frac{1}{2}(\psi_0 - \psi_1)\right) + \cos^2(\psi_0 - \psi_1) + \dots \right) + \dots = w_{0,1}; \\ \dots + a_{n\varphi-1,nx} \left( \cos^2\left(\frac{1}{2}(\psi_{n\varphi} - \psi_{n\varphi-1})\right) + \cos^2(\psi_{n\varphi} - \psi_{n\varphi-1}) + \dots \right) + a_{n\varphi,nx} \frac{n\varphi}{2} + \dots = w_{n\varphi,nx}. \end{array} \right. \quad (2.21)$$

Зависимость (2.20) удовлетворяет условию неразрывности перемещений по окружной координате. На рисунке 2.22 представлено графическое изображение сечения резервуара  $R(\varphi) = R + w(\varphi)$  с номинальным радиусом  $R = 5,218$  м, также показаны исходные точки сеточной модели, для наглядности радиальные отклонения  $w$  увеличены в двадцать раз.

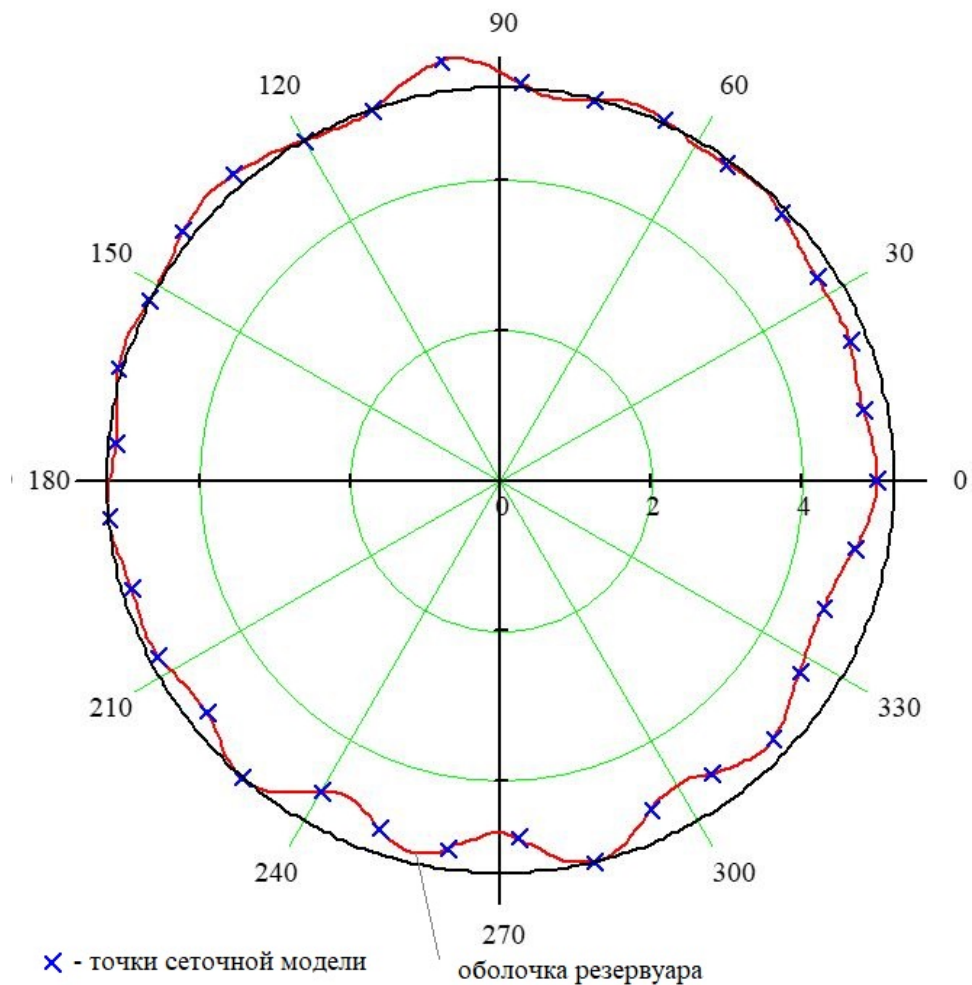


Рисунок 2.22 – Сечение резервуара горизонтальной плоскостью

Резервуар представим как систему кольцевых элементов в пределах одного пояса, длиной  $l_j$  и толщиной  $h_j$ , соединенных друг с другом. Моделирование напряженного состояния резервуара будем проводить на основе теории расчета цилиндрических оболочек [9]. Используя принцип суперпозиций, напряженное состояние можно представить как сумму осесимметричного и несимметричного состояний [106].

Тогда выражение (2.20) представим в виде:

$$w_j(\varphi) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos(k(\varphi - \psi_i)). \quad (2.22)$$

Таким образом, для радиальных перемещений из выражения (2.22) можно выделить симметричную и несимметричную составляющие, соответственно:

$$w_{xj} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j}, \quad (2.23)$$

$$w_{\varphi j} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos(k(\varphi - \psi_i)). \quad (2.24)$$

*Осесимметричное состояние резервуара.* Учитывая, что эффект от закрепления оболочки или шпангоута проявляется на незначительной длине  $l \approx 2,5\sqrt{Rh}$  [9], что меньше шага между поясами резервуара ( $l < l_j$ ), при рассмотрении осесимметричного состояния осевые моменты во внимание принимать не будем. Для исследования их влияния необходимо использовать более мелкую сетку по осевой координате в окрестности зоны состыковки оболочки с днищем, крышей или шпангоутом.

Осевые усилия учитывают весовую нагрузку элементов конструкции резервуара, для  $j$ -го пояса определяются зависимостью

$$T_{xj} = T_{x0} + \sum_{k=1}^j h_k l_k \rho g, \quad (2.25)$$

где  $T_{x0}$  – вес крыши и оснащения, приходящейся на единицу длины окружности;  $\rho$  – плотность материала;  $g$  – ускорение свободного падения.

Окружные усилия определяются формулой

$$T_{tj} = -\mu T_{xj} + \frac{E h_j w_{xj}}{R}, \quad (2.26)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона;  $E$  – модуль упругости.

*Несимметричное состояние резервуара.* Несимметричную деформацию будем рассматривать как деформацию отдельных кольцевых элементов, которые со-

пряжены друг с другом за счет сдвиговых усилий. Такой подход соответствует полубезмоментной теории расчета цилиндрических оболочек Власова [9, 14, 15].

Окружные изгибающие моменты, приходящиеся на единицу длины кольцевого элемента, определяются выражением [9]

$$M_t = -\frac{EJ}{R^2} \left( \frac{d^2 w}{d\varphi^2} + w \right), \quad (2.27)$$

где  $EJ = E \frac{h^3}{12}$  – изгибная жесткость, отнесенная к единице длины.

Подставив зависимость (2.24) в формулу (2.27), получим выражение для определения окружных моментов для  $j$ -го пояса

$$M_{tj}(\varphi) = \frac{EJ_j}{2R^2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} (k^2 - 1) \cos(k(\varphi - \psi_i)). \quad (2.28)$$

Для нахождения сдвиговых усилий рассмотрим дифференциальное уравнение упругой линии кольца в общем виде [9]

$$\frac{EJ_x}{R^4} \left( \frac{d^5 w}{d\varphi^5} + 2 \frac{d^3 w}{d\varphi^3} + \frac{dw}{d\varphi} \right) = \frac{dQ}{d\varphi} + S, \quad (2.29)$$

где  $Q$  – распределенная радиальная нагрузка;  $S$  – распределенная касательная

нагрузка;  $EJ_x = E \frac{lh^3}{12}$  – изгибная жесткость кольцевого элемента. Полагая, что ра-

диальная нагрузка вызвана гидростатическим давлением и является осесимметричной, несимметричное деформирование кольцевого элемента будет происходить только за счет сдвиговых усилий. Тогда для  $j$ -го элемента зависимость (2.29), с учетом выражения (2.24), будет иметь вид

$$-\frac{EJ_{xj}}{2R^4} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} k(k^2 - 1)^2 \sin(k(\varphi - \psi_i)) = S_{j-1} + S_j. \quad (2.30)$$

Из формулы (2.30) получим зависимость для сдвиговых усилий в произвольном поясе

$$S_j = (-1)^{j+1} \sum_{m=0}^j (-1)^m \frac{EJ_{xj}}{2R^4} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} k(k^2 - 1)^2 \sin(k(\varphi - \psi_i)). \quad (2.31)$$

По найденным усилиям (2.25), (2.26), (2.28) и (2.31) определяются нормальные и касательные напряжения:

$$\sigma_x = \frac{T_x}{h}, \quad \sigma_t = \frac{T_t}{h} \pm \frac{6M_t}{h^2}, \quad \tau = \frac{S}{h} \quad (2.32)$$

и эквивалентные напряжения

$$\sigma_{IV} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 - \sigma_x \sigma_t + 3\tau^2}. \quad (2.33)$$

Если по данной методике рассчитать напряжения стенок резервуаров, используя данные фактических деформаций, получим напряжения, показанные на рисунках 2.23–2.25. Напряжения, которые испытывают стенки резервуаров из-за их деформаций, лежат в достаточно больших пределах: от 79,88 МПа для резервуара № 2, до 184,3 МПа для резервуара № 5. Строительство и эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в РФ регламентируется нормативными документами [19, 93] и требует применения хладостойких сталей. Однако в 60–90 гг. прошлого века резервуары строились из рядовых сталей, характеристики которых приведены в приложении Ж.

Если проанализировать предел текучести для рядовых сталей (см. приложение Ж), то для резервуара № 1 эквивалентные напряжения составляют ~46 %, для резервуара № 2 ~33 %, а для резервуара № 5 ~78 %. При таком соотношении фактических и предельно-допустимых напряжений для резервуаров № 1 и 2 никаких действий предпринимать не надо, а для резервуара № 5 возможно нужно учесть срок эксплуатации и число циклов нагружения/разгрузки и провести внеочередное обследование технического состояния резервуара с использованием методов неразрушающего контроля.

Предлагается в нормативные документы [95] добавить возможность определять величины допустимых деформаций и расчетным путем.

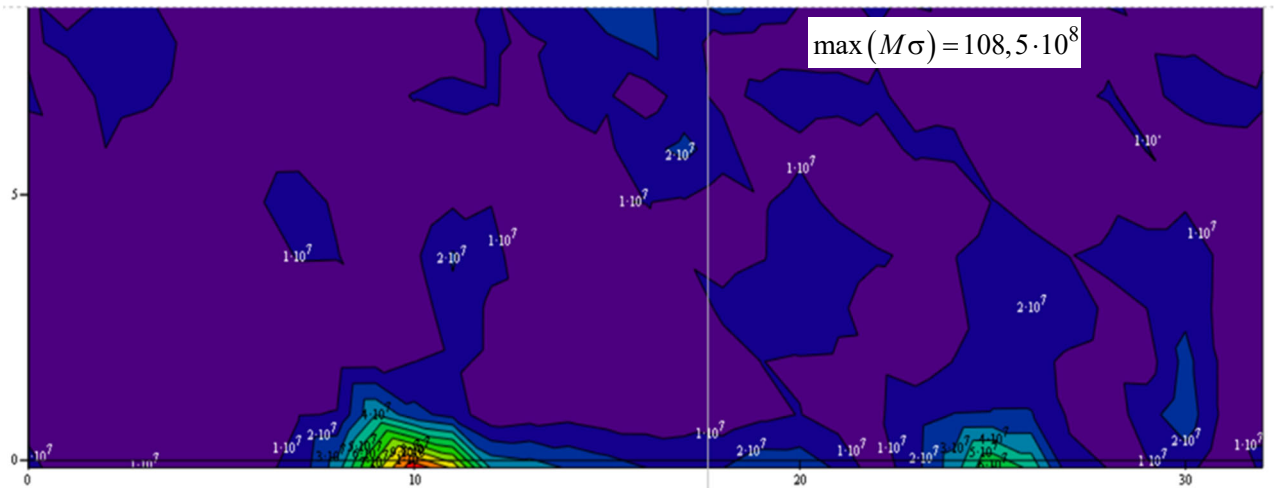


Рисунок 2.23 – Эквивалентные напряжения, резервуар № 1

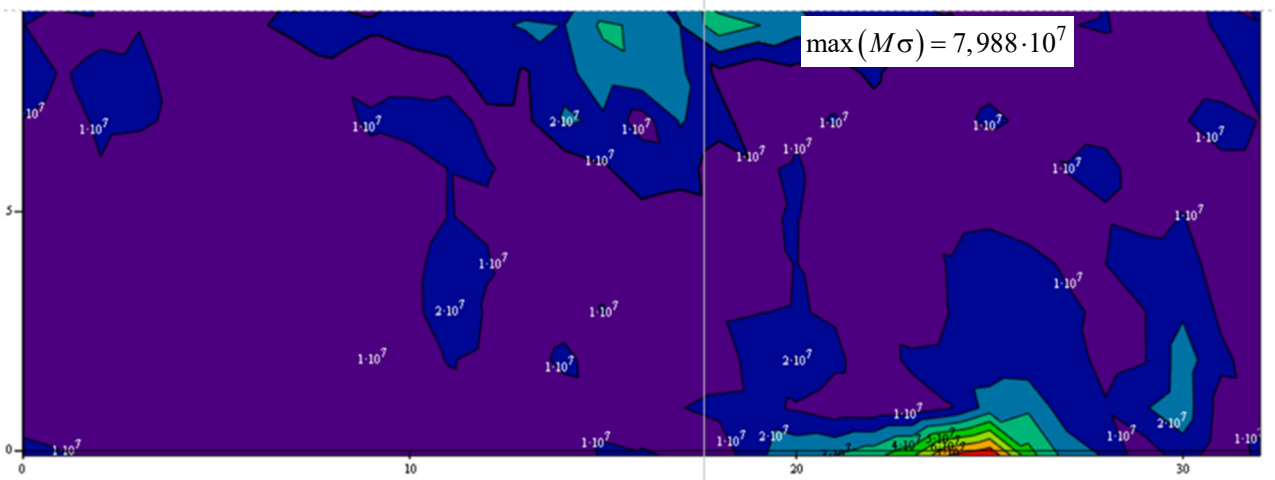


Рисунок 2.24 – Эквивалентные напряжения, резервуар № 2

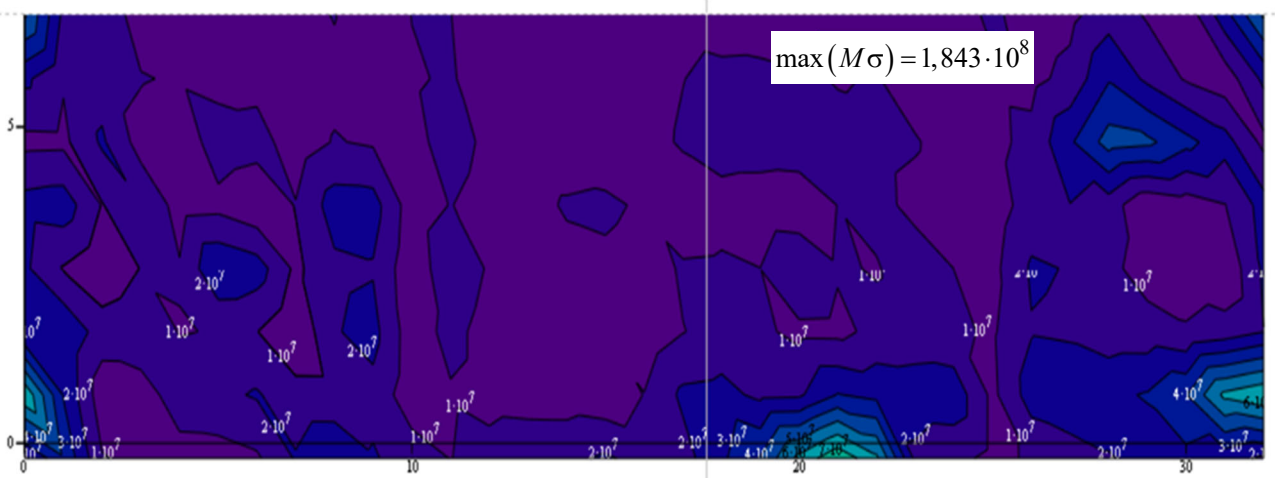


Рисунок 2.25 – Эквивалентные напряжения, резервуар № 5

## 2.4 Алгоритм выделения оседаний днища резервуаров по облаку точек

Еще одной важной задачей, которая регламентируется [95], является нивелирование, которое выполняют по окрайке днища по специально приваренным деформационным маркам. Чаще всего такие работы выполняются по методике нивелирования III класса, а сами марки закладываются на расстоянии 4–6 м по окружности резервуара. Такие работы требуют значительного времени на их выполнение. При регулярном выполнении лазерного сканирования резервуаров, по облаку ТЛО эти работы можно автоматизировать, применив алгоритмы распознавания линии стыка между поверхностью окрайки и вертикальной стенкой резервуара.

Литературных источников, посвященных выделению из облака точек лазерного сканирования, очень много, потому что основная задача обработки облака ТЛО – выделение из неструктурированного облака ТЛО геометрических примитивов и объектов, определение их формы и размеров. Практически любая статья или монография по лазерному сканированию содержит какие-то аспекты выделения объектов из облака точек [37, 118].

Учитывая специфические свойства исследуемого объекта, можно применить более простые алгоритмы выделения полезной информации. А поскольку в системе ТОРО предполагается периодическое сканирование объектов, то можно автоматизировать не только процесс выделения свойств объекта, но и сравнение с предыдущими съемками и анализ их изменений.

Работу алгоритма покажем на примере съемки изнутри вертикального резервуара объемом 2 000 м<sup>3</sup>. Первый этап работы – это выделение по высоте части объекта для дальнейшего анализа. Эта операция выполняется первый раз интерактивно. С помощью инструмента геодезической подсистемы системы ТОРО, как показано на рисунке 2.26, выделяется верхняя граница облака ТЛО, которая будет участвовать в дальнейшей обработке.

Затем выполняется фильтрация по радиусу и получаем часть облака ТЛО, с которым будем выполнять дальнейшие операции алгоритма распознавания пересечения поверхности окрайки и вертикальной стенки резервуара (рисунок 2.27).

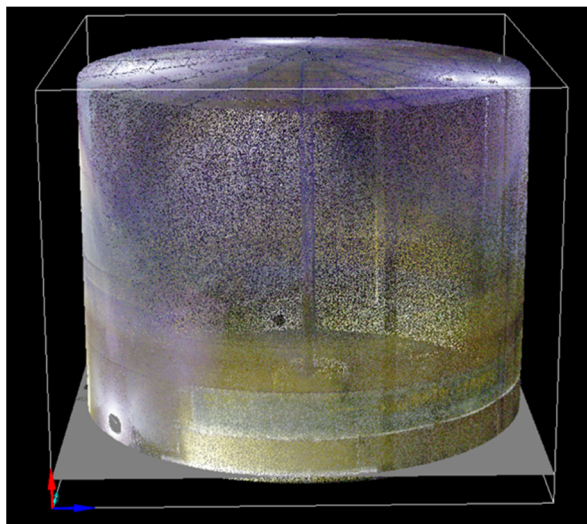
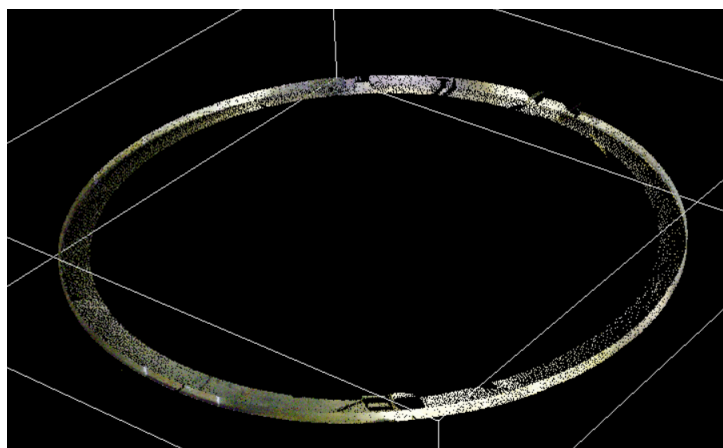
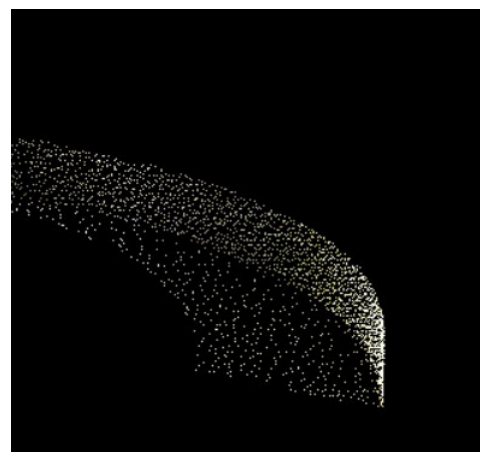


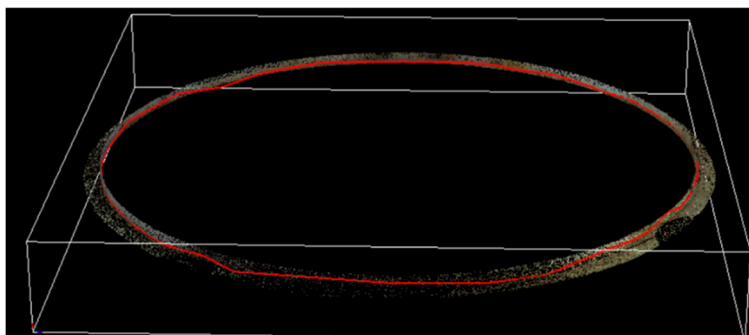
Рисунок 2.26 – Определение верхней границы выборки



*a)*



*б)*



*в)*



*г)*

Рисунок 2.27 – Часть облака для дальнейшей обработки: *a)* часть облака ТЛО, резервуар  $V = 2\,000\text{ м}^3$  (съемка внутри); *б)* поперечный разрез, резервуар  $V = 2\,000\text{ м}^3$  (съемка внутри); *в)* часть облака ТЛО, резервуар  $V = 1\,000\text{ м}^3$  (съемка снаружи); *г)* поперечный разрез резервуар  $V = 1\,000\text{ м}^3$  (съемка снаружи)

Дальнейшая обработка производится дискретно в узлах нижнего ряда сеточной модели (рисунок 2.28). Для этого производится выборка для каждого узла сеточной модели в некоторой ограниченной области, в которой предполагается, что поверхность окрайки является плоскостью, близкой к горизонтальной. По выборке точек в этой области строится плоскость  $P$  и оценивается разброс точек этой плоскости  $\Delta$ .

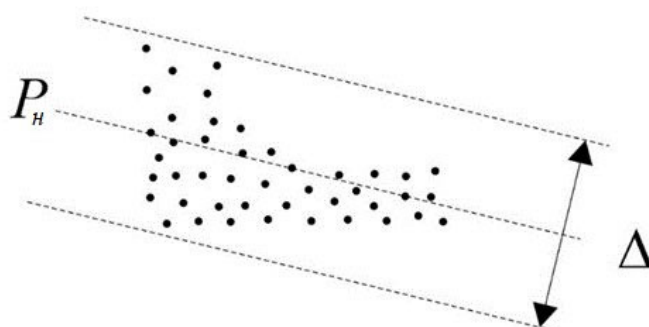


Рисунок 2.28 – Первоначальная плоскость, построенная по точкам выборки

Затем алгоритм выполняется циклически в следующей последовательности. В выборке находится точка с максимальной отметкой и исключается из выборки, опять строится плоскость  $P_i$  и оценивается угол наклона плоскости  $\alpha_i$  и разброс  $\Delta_i$  (рисунок 2.29).

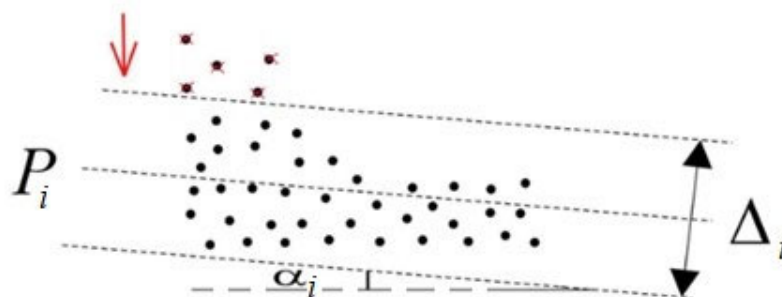


Рисунок 2.29 – Шаг выполнения алгоритма

Работа алгоритма заканчивается на  $i$ -м шаге, когда угол наклона плоскости становится  $\alpha \approx 0^\circ$  и разброс  $\Delta < \Delta_{\text{доп}}$  (рисунок 2.30). Исходя из точности определе-

ния координат, при лазерном сканировании для дальнейшей обработки принято  $\Delta_{\text{доп}} = 4 \text{ мм}$  и  $\alpha = 0^\circ$ .

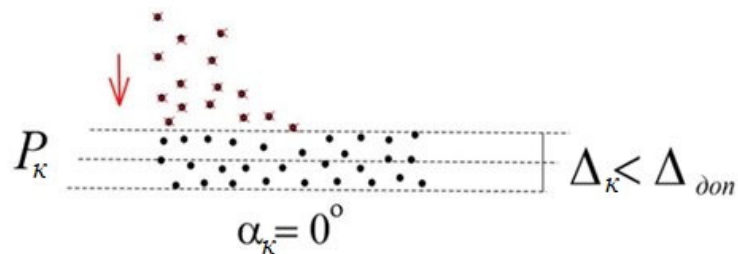


Рисунок 2.30 – Конечный шаг работы алгоритма

При таких параметрах обработки и размере окрестности от 0,1 до 0,3 м для резервуаров различной емкости и шага сетки алгоритм показал устойчивую работу и надежное определение отметок для резервуаров различной емкости и видов съемок как внутри резервуара, так и снаружи (рисунок 2.31).

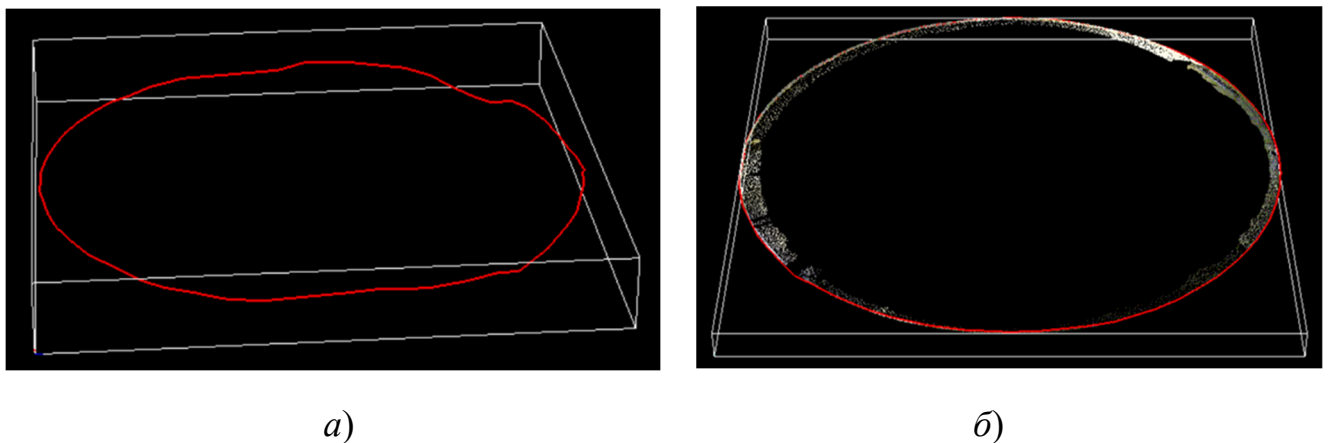


Рисунок 2.31 – Оседания днища резервуаров:

а) резервуар 1 000 м<sup>3</sup>, съемка снаружи; б) резервуар 2 000 м<sup>3</sup>, съемка внутри

Плоскость  $P$  строится по выборке точек по методу наименьших квадратов. Сам алгоритм будем называть «градиент вертикального спуска».

В терминах теории множеств работу алгоритма описать следующим образом:

1) формируется выборка точек  $M_\partial$ , которая является подмножеством  $M_p$

$$M_\partial = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\} \rightarrow M_\partial \subset M_p;$$

2) по множеству точек выборки строится плоскость  $P$

$$p_i \in P;$$

3) определяется диапазон отклонений (разброс) и сравнивается с допуском

$$\Delta < \Delta_{\text{доп}};$$

4) если условие выполняется – вычисляется отметка плоскости  $P$  в данной точке, и действие алгоритма заканчивается. Если условие не выполняется, то из множества  $M_\partial$  исключается точка с максимальной отметкой, и работа алгоритма продолжается с пункта 2

$$z_{p_i} = \max \rightarrow p_i \notin M_\partial;$$

5) если множество  $M_\partial = \emptyset$  оказывается пустым, т. е. в выборку не попало ни одной точки, а такое возможно, если в облаке есть пропуски – «мертвые зоны» из-за какого-то оборудования, то алгоритм переходит к следующей точке и начинает выполнять шаг 1.

Оседания днища можно представить как в виде линии по окружности резервуара, как это показано на рисунке 2.31, так и в виде развертки, совместив с поверхностью деформаций (рисунок 2.32).

Чтобы оценить надежность определения отметок днища резервуара по этому алгоритму, проанализируем гистограммы отклонений  $\Delta$  и числа точек, которые были вычислены с такими отклонениями. На рисунке 2.34 показаны гистограммы для различных вариантов обработки.

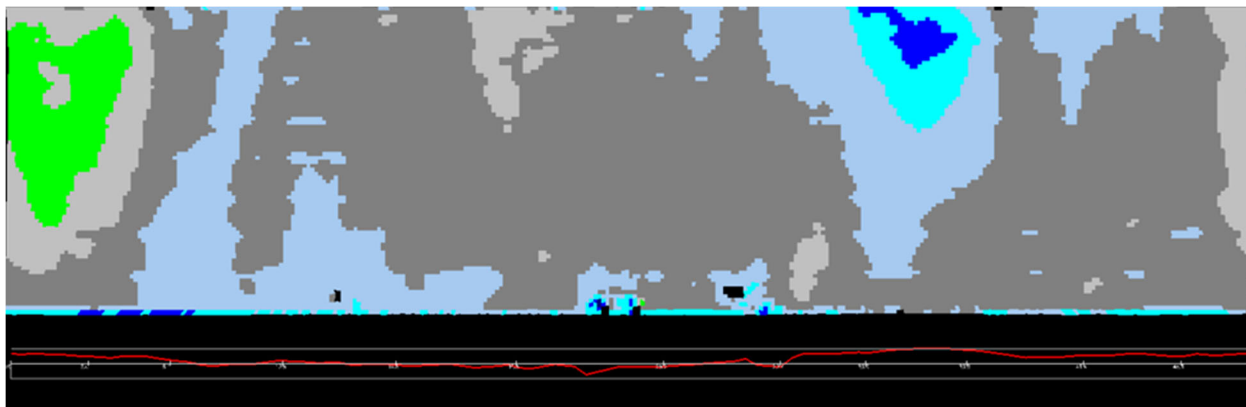


Рисунок 2.32 – График оседаний дна резервуара № 1, совмещенный с поверхностью деформаций

Фрагмент графика оседаний в более крупном масштабе показан на рисунке 2.33.

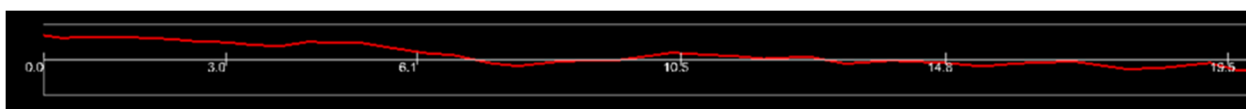


Рисунок 2.33 – Фрагмент графика оседаний

Анализ гистограмм на рисунке 2.34 и таблицы 2.6 показывает, что в окрестности попадает достаточно точек для надежного определения высот точек, отклонения точек от плоскости, построенной по отфильтрованному алгоритмом множеству точек, которые лежат в диапазонах точности измерения координат точек при лазерном сканировании. Примерно 25 % точек профиля оседаний дна не могут быть определены с помощью данного алгоритма из-за «мертвых зон» и пропусков в облаке точек ТЛО.

Пропуски при определении отметок профиля располагаются не подряд, а в среднем через 3,6–5,9 точек, поэтому в случае необходимости пропуски могут быть интерполированы по ближайшим точкам. Кроме того, на число точек, которые были определены алгоритмом, влияет размер окрестности, в которую производится выборка, и можно выполнить обучение алгоритма для определения оптимальных параметров его работы.

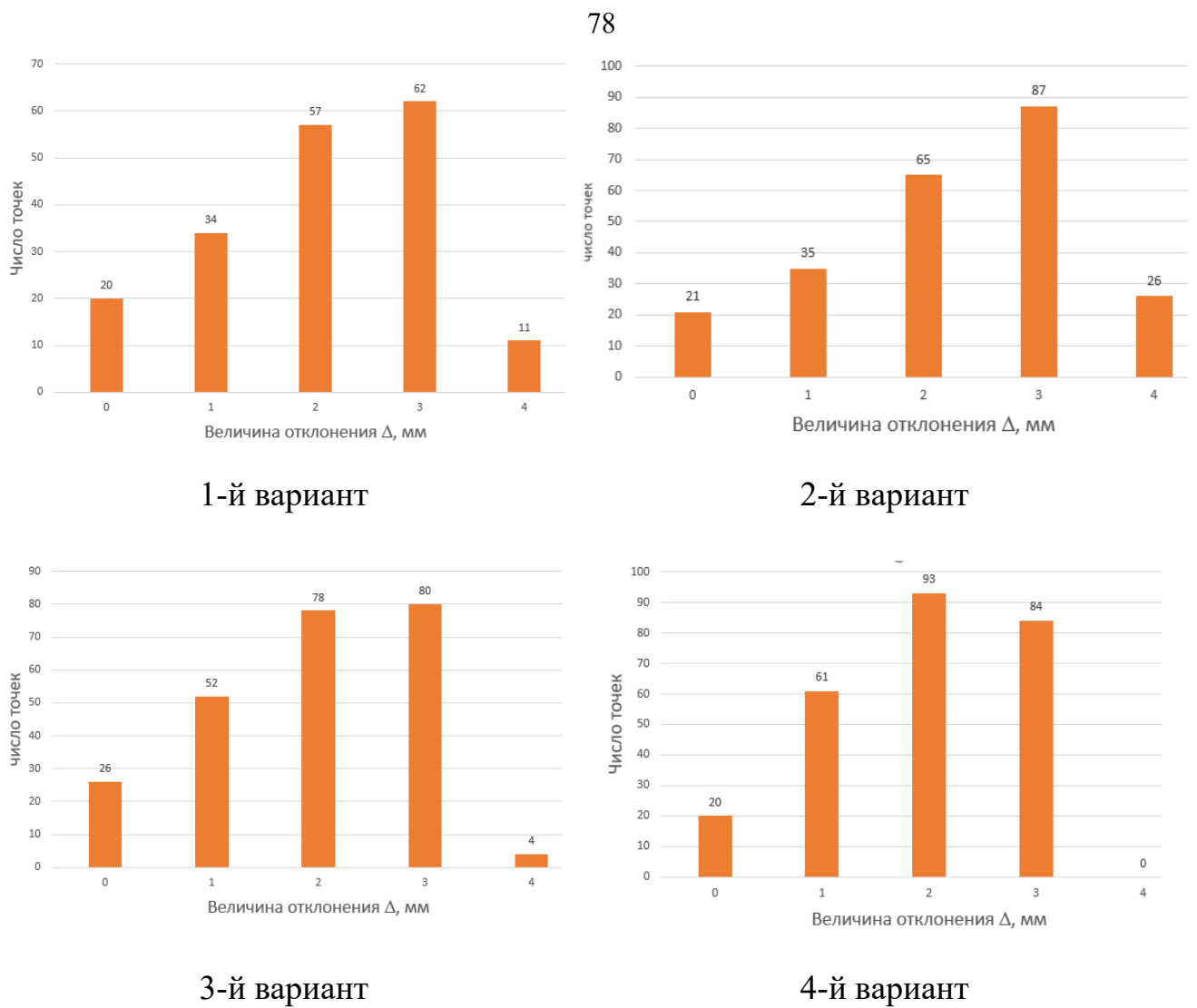


Рисунок 2.34 – Гистограммы распределения отклонений

Таблица 2.6 – Параметры вариантов расчетов оседаний для резервуаров

Параметры	Номер варианта			
	1	2	3	4
Объем резервуара, м <sup>3</sup>	1 000	2 000	2 000	2 000
Число точек профиля	238	328	328	328
Определено алгоритмом	188	238	244	261
Не определено	40	90	84	67
Определено в %	79	72	74	79
Среднее число точек в выборке	90	138	72	306
Окрестность, м	0,2	0,3	0,4	0,5
Количество пропусков	1/5,9	1/3,6	1/3,9	1/4,9

Графики оседаний на рисунках 2.32, 2.33 и 2.35 показывают, что оседания днища резервуаров, выявленные алгоритмом «градиентного спуска», могут иметь различную закономерность, имеются участки с неравномерной осадкой, которые в автоматизированной системе легко можно сравнивать и анализировать. Несомненным преимуществом алгоритмического определения оседаний днища резервуара является высокая детальность графика, позволяющая выявить большие локальные оседания, которые могут быть пропущены при традиционных геодезических измерениях.

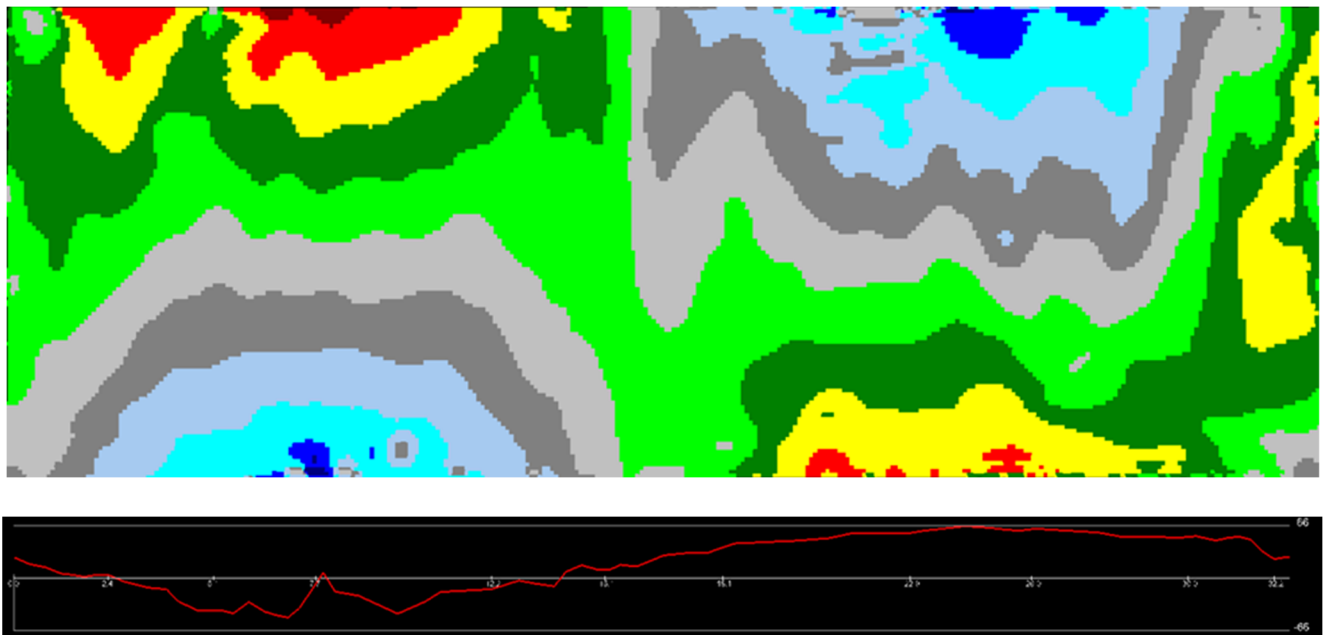


Рисунок 2.35 – Резервуар № 5, поверхность деформаций и график оседаний

Однако алгоритм не всегда показывает хороший результат, так как сильно зависит от качества сканирования, расположения сканера и мертвых зон от оборудования, которое находится между объектом и сканером. На рисунке 2.36 показано распознавание линии осадки днища резервуара объемом 5 000 м<sup>3</sup>, которая имеет много пропусков из-за малого числа ТЛО, попавших на окрайку днища резервуара.

Однако проблемы с качеством лазерного сканирования окрайки резервуара решаются с помощью изменения методики, увеличения числа станций и поднятия сканера на большую высоту.

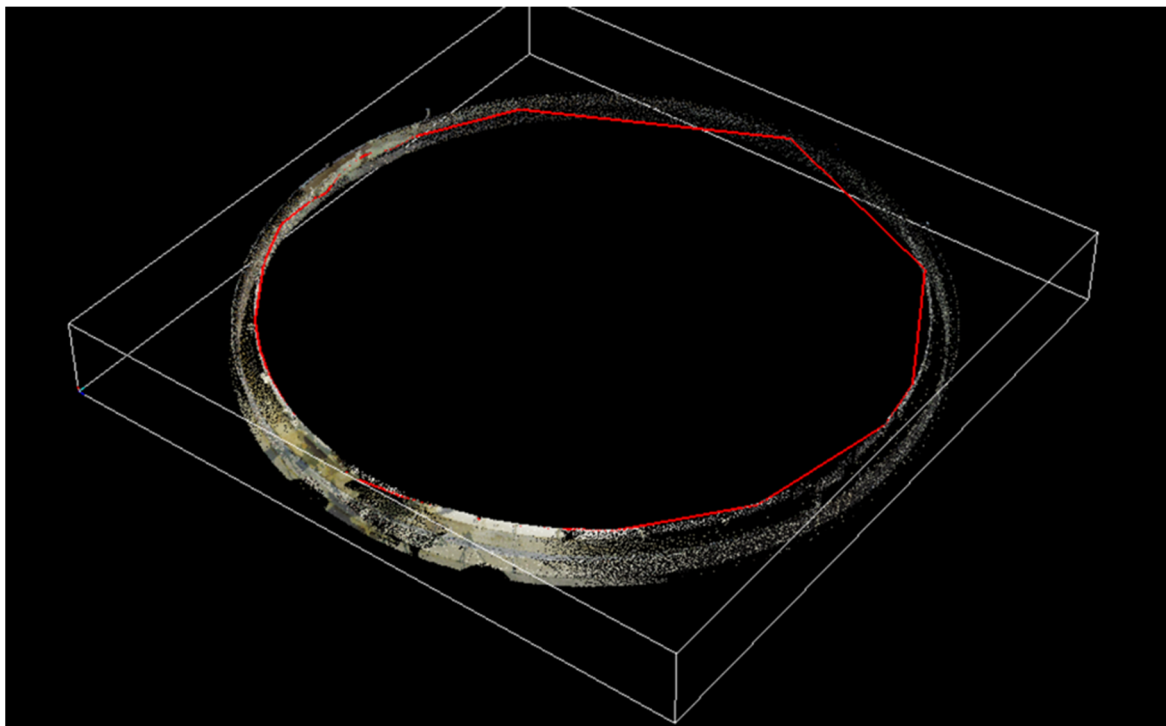


Рисунок 2.36 – Оседания днища резервуара объемом 5 000 м<sup>3</sup>

Кроме того, при получении достаточного количества профилей оседаний днища резервуаров было замечено, что деформации стенок резервуаров и оседания днища этих резервуаров коррелируют между собой. Деформации стенок резервуаров в большой степени определяются именно оседаниями днища резервуара, а не погрешностями его изготовления или результатом многократных циклов его налива-слива.

## 2.5 Алгоритм выделения и классификации вмятин стенок резервуаров

Одна из важнейших задач мониторинга резервуаров – это выявление локальных деформаций стенок резервуара. Такие деформации называются вмятинами, если стрела прогиба находится внутри от стенки резервуара – такая вмятина называется «выпучина», а если стрела прогиба находится снаружи, то такая вмятина называется «хлопуном». Допуски на величины отклонений и размеры вмятин регулируются [95, с. 74, 75] и по сути представляют собой некоторое обобщение опыта эксплуатации резервуаров с приближенной оценкой напряжений, возникающих в стенках резервуаров.

Нахождение таких областей по эквивалентным сеточным моделям – задача, которая может быть решена алгоритмически. При исследованиях в самых разных областях, где используются сеточные или растровые модели, возникает задача выделения связных областей, т. е. областей с каким-то общим признаком. А поскольку сеточные, и особенно растровые модели, содержат множество признаков, то и используемые алгоритмы весьма разнообразны [27, 34, 36, 41, 51, 56, 66, 94].

По своим свойствам эквивалентная растровая сетка поверхности резервуара близка к полутоновым растровым изображениям, поэтому к операциям выделения связных областей можно применить многие из алгоритмов, которые используются для обработки растровых изображений. С некоторыми ограничениями можно применить алгоритм «короеда», рекурсивные алгоритмы с «затравкой» и многие другие. Однако, учитывая небольшой объем узлов в эквивалентной сеточной модели, можно использовать и более простые методы.

Повторим некоторые определения.

Два узла считаются связными, если они являются «смежными» (соседями). В данном случае используется ограниченная топология смежности – смежность узлов определена только по горизонтали и вертикали, как это показано на рисунке 2.37, а.

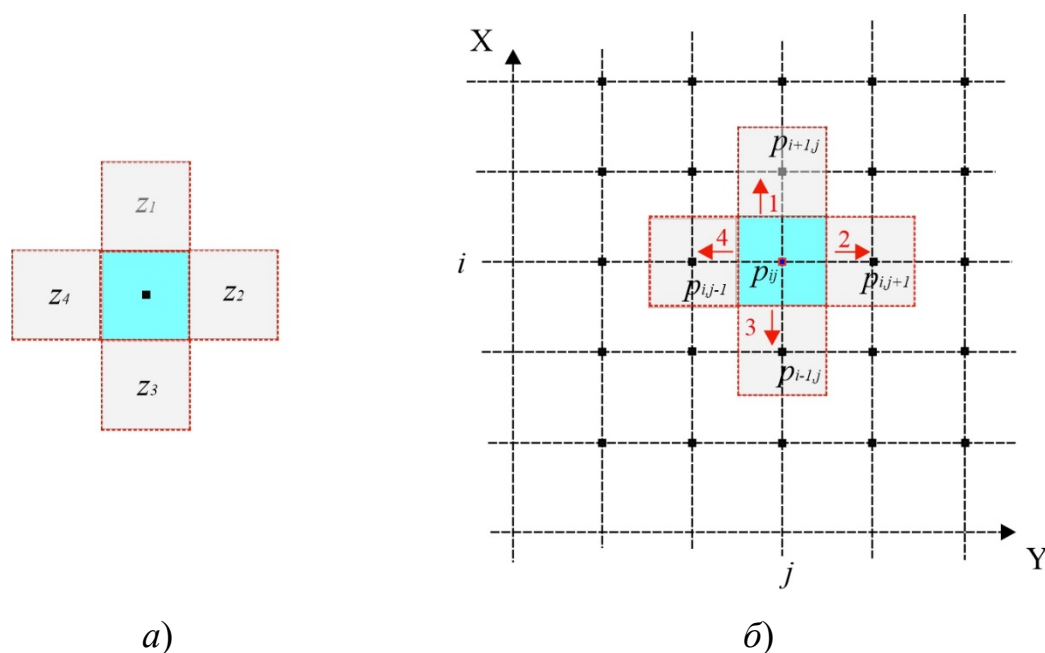


Рисунок 2.37 – Выделение связных областей:

а) маска для анализа; б) схема перемещения маски по сетке

Перед началом работы алгоритма создается маска сети, т. е. такая же по размеру эквивалентная сетка, в которой все узлы имеют нейтральную метку «0». Положительная связная область («выпучина») имеет нижнюю границу  $h_n$  по высоте, а отрицательная связная область («хлопун») имеет верхнюю границу  $h_g$ . Работа по определению «выпучины» выполняется в следующей последовательности:

- находится узел  $i, j$  с максимальной положительной деформацией, рисунок 2.37, б, метка этого узла заменяется на номер выделяемой области;
- на этот узел  $i, j$  накладывается маска, и определяются смежные узлы, у которых показатель (положительная деформация)  $\geq h_n$ , в маске сетки эти узлы помечаются номером выделяемой области;
- маска начинает перемещение по вертикали (направление 1) до границы сетки, затем происходит перемещение по направлению 2 (вправо), потом вниз (направление 3) и влево (направление 4). Этот шаг выполняется циклически до тех пор, пока после очередного прохода к области не будет присоединен ни один узел.

После этого среди не помеченных узлов сетки выбирается узел с максимальным показателем. Если этот показатель больше допуска [95], то на него помещается маска и начинается новый проход по поиску следующей связной области.

Поиск «хлопунов» выполняется по такому же алгоритму, только находится узел с минимальным отрицательным показателем, а пометка смежного узла происходит, если его показатель меньше  $h_g$ .

Поиск «хлопунов» ведется, пока не будут найдены все связные области отрицательных деформаций, у которых показатель первой точки меньше допуска [95].

По характеру своей работы этот алгоритм можно определить как сканирующий алгоритм с «затравкой». Роль затравки выполняет начальная точка, глобальный (для первого прохода) или локальный экстремум (для второго или последующих).

Практическое применение этого алгоритма на сеточных моделях реальных резервуаров показало, что на самом деле таких вмятин на резервуарах не много (рисунок 2.38, таблица 2.7), чаще встречаются однородные области, которые можно классифицировать как наклон стенок резервуара (рисунок 2.37 и таблица 2.8).

Таблица 2.7 – Деформации резервуара РВС № 1

Фигура	Высота, м	Отклонение, м	Площадь, м <sup>2</sup>	Примечание
«Хлопун»	4,20	-0,057	4,6	

Таблица 2.8 – Деформации резервуара РВС № 2

Фигура	Высота, м	Отклонение, м	Площадь, м <sup>2</sup>	Примечание
1 Наклон резервуара	11,60	0,050	39,9	
2 Наклон резервуара	9,80	0,048	32,3	
3 Наклон резервуара	10,70	-0,085	61,0	
4 Наклон резервуара	9,10	-0,072	53,8	

На рисунках 2.38 и 2.39 синим цветом показаны области с отрицательными деформациями, а красным – с положительными деформациями. Номера соответствуют номерам в таблицах.

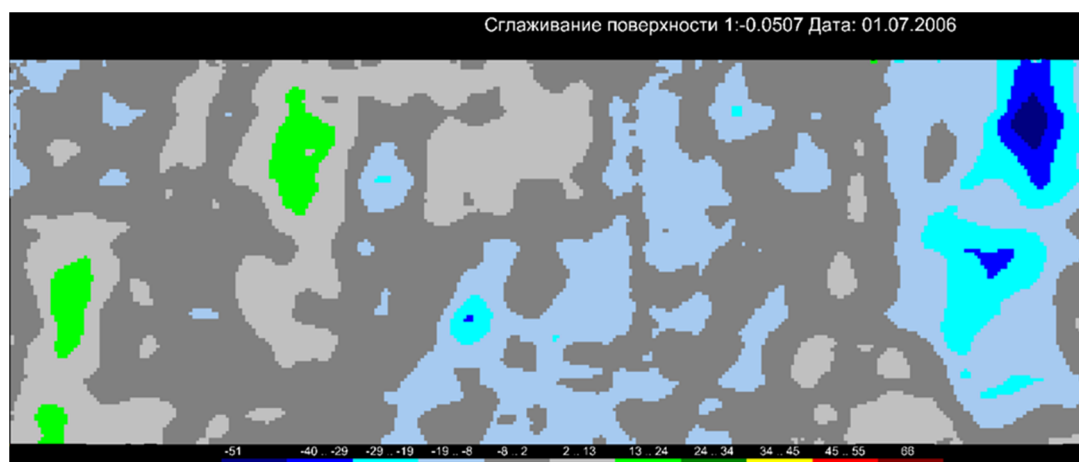


Рисунок 2.38 – Поверхность деформаций и «хлопун» РВС № 1

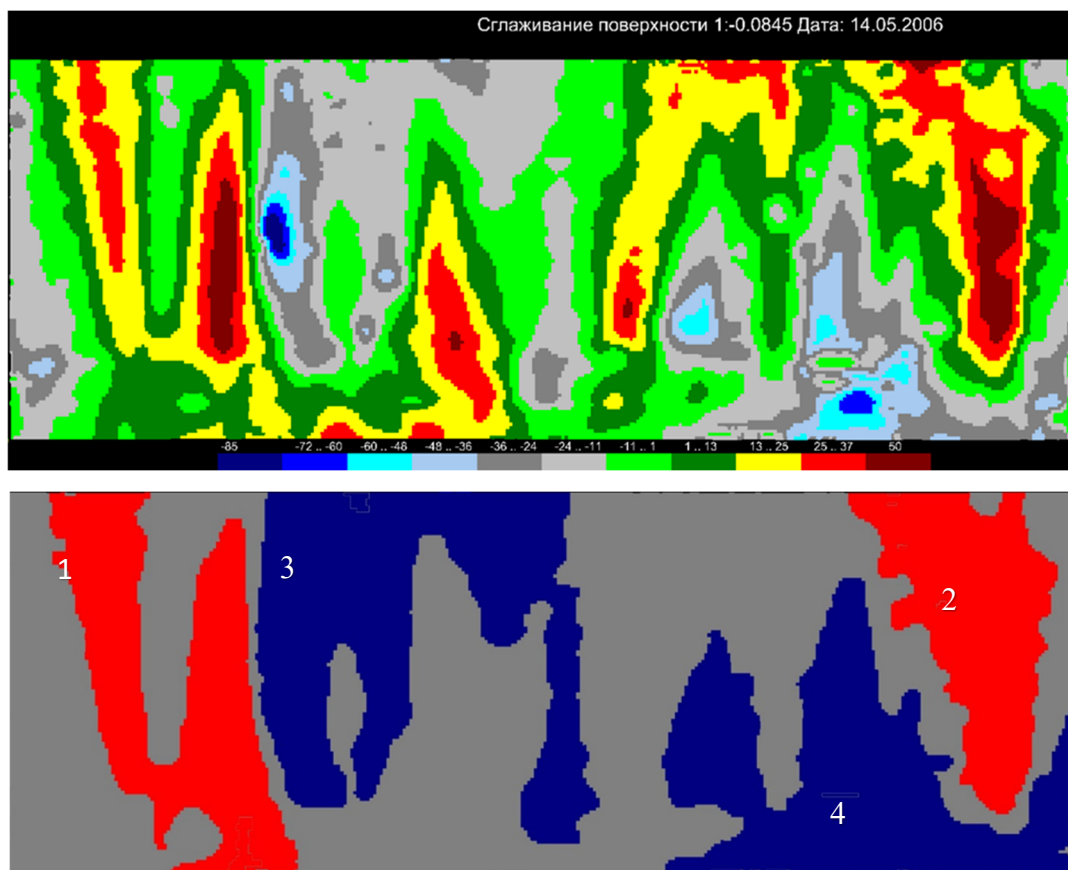


Рисунок 2.39 – Поверхность деформаций и области РВС № 2

## 2.6 Этапы методики оценки состояния промышленных объектов

Предлагаемая методика оценки состояния промышленных объектов предполагает выполнение определенной последовательности операций, которые приводят к ожидаемому результату – комплексной оценке состояния промышленных объектов на примере резервуарного парка нефтеперерабатывающего завода.

Первым шагом методики (рисунок 2.40) является запись исходного облака ТЛО (1) съемки резервуара в базу данных (2). При записи происходит ограничение числа точек до приемлемой плотности от  $10 \times 10$  мм до  $15 \times 15$  мм. По числу точек ТЛО это примерно соответствует 3 млн точек для резервуаров объемом  $1\ 000\ \text{м}^2$  и  $2\ 000\ \text{м}^3$ . Для резервуара объемом  $5\ 000\ \text{м}^3$  это будет примерно 4,5–5 млн точек. Хранение исходного облака точек необходимо для повторных шагов обработки с другими параметрами и других ветвей алгоритма, например (13).

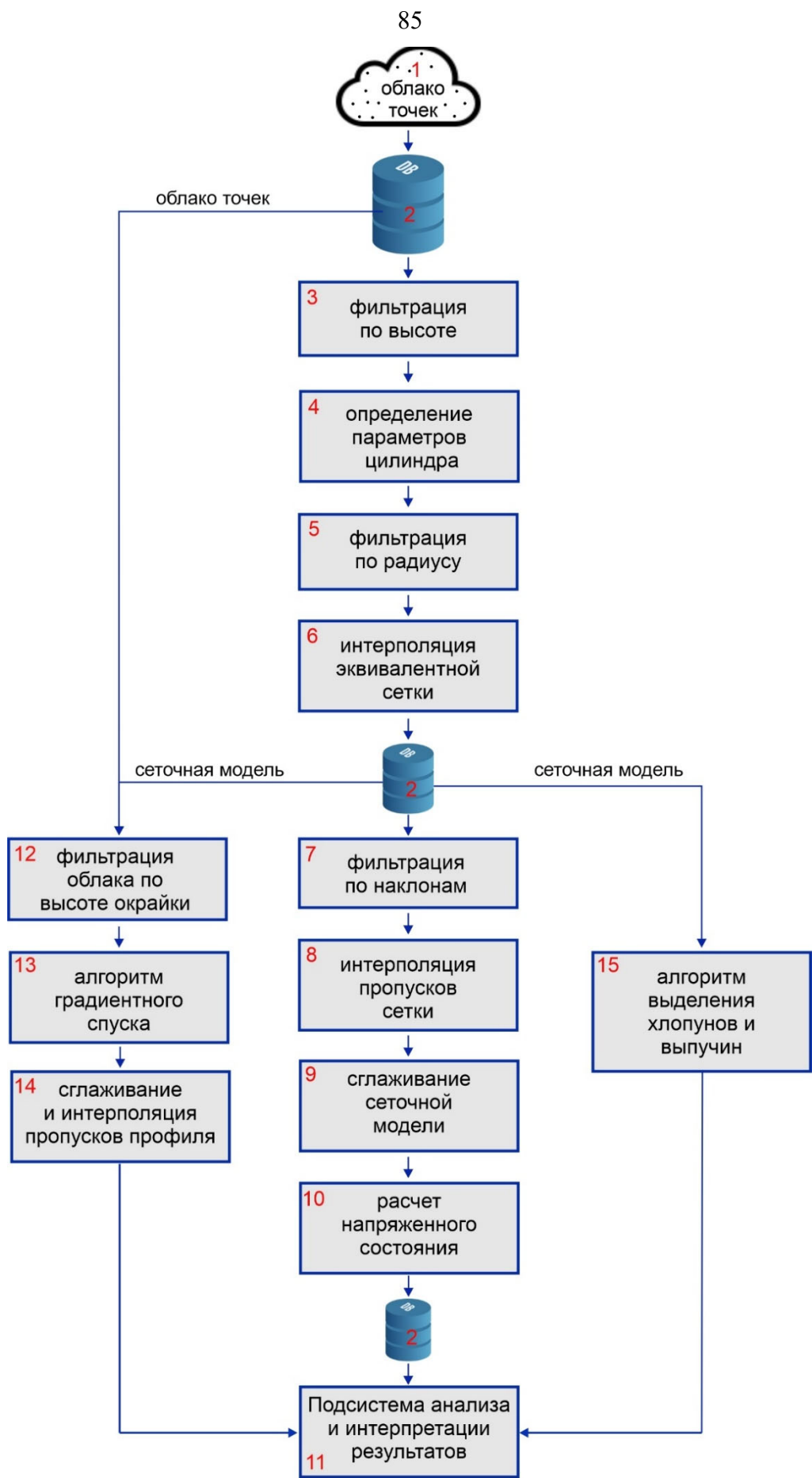


Рисунок 2.40 – Блок-схема методики

Следующим шагом основной ветви методики является фильтрация по высоте (3), этот шаг необходим, чтобы убрать элементы, которые могут повлиять на определение радиуса и параметров резервуара, это обваловка вокруг резервуара, трубопроводы и т. д. На следующем шаге (4), по отфильтрованному по высоте облаку ТЛО, находятся параметры цилиндра: фактический радиус, центр цилиндра и наклон его оси. Как показали статистические эксперименты лестницы, площадки, патрубки не влияют на точность определения параметров и отбраковываются в процессе вычисления параметров цилиндра по методу наименьших квадратов.

На шаге (5) выполняется фильтрация по радиусу с допуском, задача этого этапа – максимально устранить влияние остатков наружных элементов и подготовить множество точек для следующего этапа.

Шаг (6) – это создание начального варианта эквивалентной сетки, для этого выполняется интерполирование в узлах сетки методом коллокации.

Сеточная модель этого этапа может содержать пропуски из-за мертвых зон в исходном облаке ТЛО. Однако эту сетку можно записать в БД (2), привязав к дате съемки этого резервуара.

Дальнейшая обработка эквивалентной сеточной модели заключается в анализе наклонов поверхности резервуара (7), эта операция нужна для очистки сеточной модели от влияния остатков наружных элементов резервуара. Фильтрация по наклонам сетки увеличивает число неопределенных узлов. Однако такая операция необходима, иначе на этапе расчета напряжений можно получить результаты, превышающие во много раз фактические напряжения.

Этап (8) – выполняется интерполяция пропусков исходной эквивалентной сеточной модели. Отличие этого шага методики от этапа (6) заключается в том, что для интерполяции используется не исходное облако ТЛО, а узлы точек с известными отметками. Это позволяет учесть закономерности эквивалентной сетки для интерполирования узлов с неизвестным отклонением.

Этап (9) нужен для фильтрации и уменьшения влияния случайных погрешностей определения деформаций, сглаженная сеточная модель служит для расчета

напряжений (10), возникающих в стенке резервуара. Сглаженная сетка может быть записана в БД, как и результаты расчета напряжений.

Деформации резервуара и результаты расчета напряжений поступают на вход подсистемы анализа и интерпретации результатов (11).

После получения эквивалентной или сглаженной сетки, которые были записаны в БД (2), можно выполнить и другие ветви методики. Так, по данным исходного облака и данным эквивалентной модели можно выполнить фильтрацию исходного облака по высоте и радиусу (12), чтобы получить исходные данные для работы алгоритма градиентного спуска (13), который позволяет получить фактический профиль оседаний днища резервуара. Этот фактический профиль может быть сглажен и интерполирован в некоторых точках, которые необходимы для сравнения с профилями предыдущих съемок (14). Профили после этапа (14) также поступают на вход подсистемы анализа и интерпретации результатов (11).

Сглаженная эквивалентная модель также служит основой для работы алгоритма выделения «хлопунов» и «выпучин» (15). Данные о «хлопунах» и «выпучинах» также поступают для анализа результатов (11).

Данные о техническом состоянии резервуара, поступающие из различных источников (10), (14) и (15), а также данные неразрушающего контроля анализируются в блоке (11) и интерпретируются в виде заключений о техническом состоянии резервуара и рекомендациям для механической и эксплуатирующей службам предприятия.

## 2.7 Выводы по разделу

В результате экспериментов по анализу облаков ТЛО сканерных съемок вертикальных стальных резервуаров различной емкости были получены следующие результаты:

- выполнено представление облака ТЛО как алгебраического множества точек и определены операции над облаком ТЛО как операции над множествами;
- разработаны процедуры вычисления параметров цилиндра по облаку ТЛО;

- экспериментальным путем определены оптимальные параметры фильтрации облаков ТЛО по радиусу и высоте, исследовано влияние допуска отсечения на точность определения параметров цилиндрической поверхности вертикального резервуара;
- разработано математическое обоснование и алгоритм перехода от облака ТЛО к эквивалентной прямоугольной сеточной модели с использованием математического аппарата теории множеств и кусочно-линейной гиперплоскости;
- предложено выполнять фильтрацию остаточных шумов сеточной модели с помощью анализа поверхности наклонов, статистическим анализом определены наиболее подходящие параметры фильтрации по наклонам;
- предлагается для учета закономерностей поверхности деформаций резервуара использовать для интерполяции пропусков сеточной модели узлы сеточной модели с известной деформацией;
- разработана методика сглаживания сеточной модели для устранения случайных ошибок определения деформаций при лазерном сканировании резервуаров;
- предлагается для обоснования допустимых величин деформаций для резервуаров использовать численные методы определения возникающих напряжений в стенках резервуара, которые предлагается рассчитывать по данным геодезических измерений и полубезмоментной теории оболочек Власова;
- разработан алгоритм «градиентного спуска» для распознавания в облаке ТЛО оседаний крайки резервуаров;
- предлагается для выделения вмятин стенок резервуара использовать предложенный в работе сканирующий алгоритм с затравкой;
- создана методика оценки состояния промышленных объектов.

### 3 СТРУКТУРА БАЗЫ ДАННЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ

Информация о резервуарах, их состоянии, результатах геодезических измерениях, различных осмотрах и исследованиях должна храниться в БД геодезической информационной подсистемы ТОРО. Эффективность использования этой информации зависит от организации данных и механизмов извлечения этих данных и их анализа для принятия управляющих решений.

#### 3.1 Структура базы данных

В структурном плане основу информационной подсистемы ТОРО составляют несколько источников информации, которые в совокупности дают информацию о состоянии резервуаров и возможности продолжения его эксплуатации. Эти источники по периодичности и применяемым инструментальным средствам можно разделить на следующие категории:

- визуальный осмотр, по требованиям [95], должен производиться ответственными лицами эксплуатирующей организации ежедневно. Этот вид контроля может выявить появление трещин в оболочке резервуара и трещины в основании фундамента резервуара;

- инструментальный контроль в геодезической подсистеме ТОРО предусмотрен наземным лазерным сканированием, который проводится периодически, четыре раза в год или по требованию, после визуального осмотра. Этот вид контроля дает наиболее полную информацию о деформации стенок резервуара и оседаний дна, величины которых регламентируются в [95]. Инструментальный контроль может выполняться и традиционными геодезическими методами;

- методы неразрушающего контроля – группа методов, которая позволяет оценить состояние металлической оболочки: микротрещины, степень коррозии и усталость металла и т. д.

Кроме этой информации, в базе данных есть раздел о структурном состоянии объекта, его технических характеристиках, состоянии и произведенных ремонтах.

Очень важной характеристикой резервуара является число циклов налива-слива. Кроме этого, в БД есть справочный раздел, в котором содержится информация о материале резервуара, его прочностных характеристиках. К справочной информации относятся и характеристики используемых приборов для геодезических измерений и выполнения неразрушающего контроля, а также допуски, которые накладывает [95] на общие и локальные деформации резервуара.

Информация, хранящаяся в БД геодезической подсистемы ТОРО, является основой для анализа и принятия решений о возможности безаварийной эксплуатации резервуарного парка. Правила для анализа информации и выработки управляющих решений также целесообразно хранить в отдельном разделе БД.

В укрупненном общем виде структура БД геодезической подсистемы ТОРО представлена на рисунке 3.1.

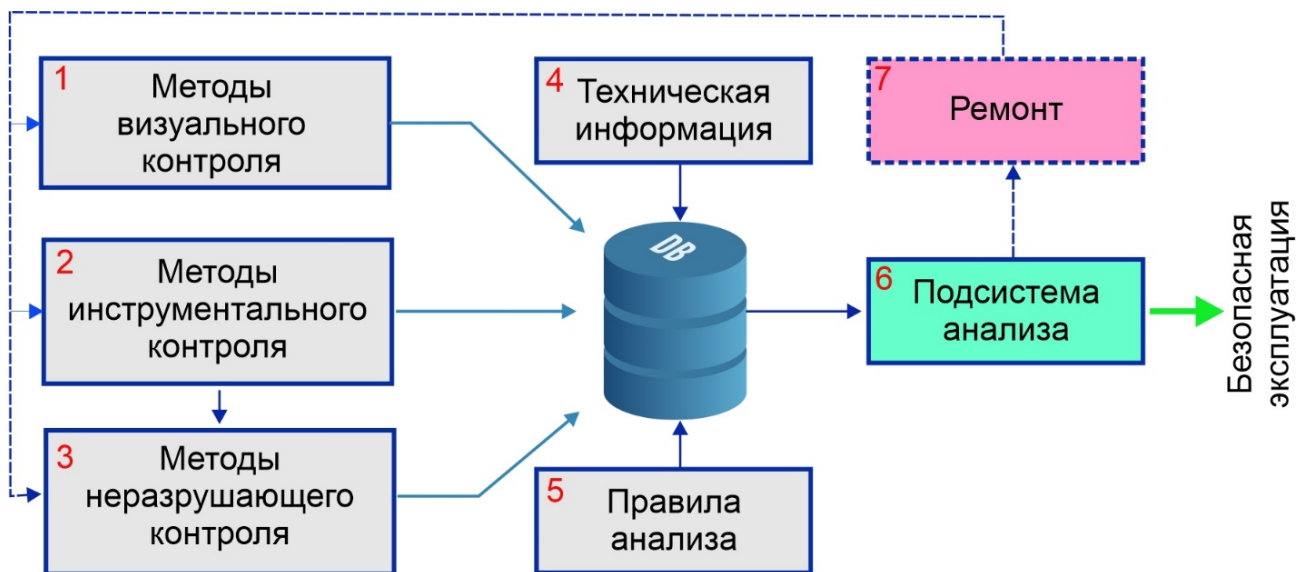


Рисунок 3.1 – Структурная схема информационной геодезической подсистемы

Вследствие того, что общая структура БД геодезической подсистемы ТОРО получается достаточно сложной, рассмотрим каждый блок этой подсистемы отдельно. Следует отметить, что в геодезической подсистеме используется SQL реляционная база данных SQLite, это накладывает некоторые ограничения на типы хранимой информации, однако не снижает возможности информационной системы в целом.

Блок № 1 схемы БД (см. рисунок 3.1) предназначен для хранения информации о визуальных обследованиях резервуаров ключевыми сущностями для записи в БД являются «исполнитель», «дата обследования», «съемка визуального контроля», «резервуар» и «отчет», которые организованы в соответствующие таблицы БД. Структура этого блока представлена на рисунке 3.2.

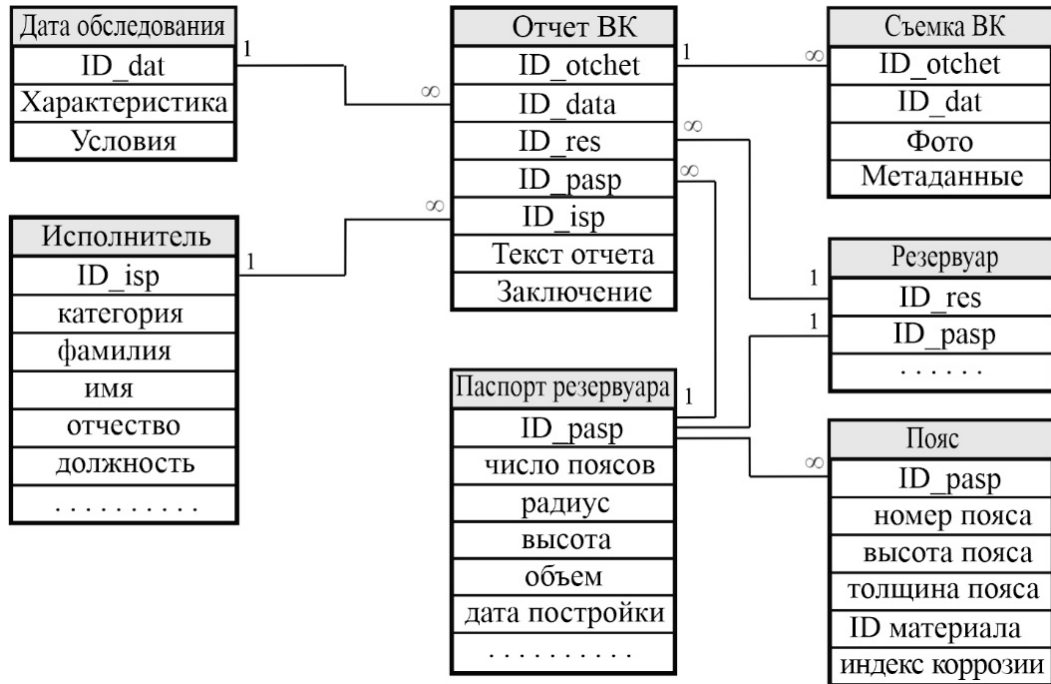


Рисунок 3.2 – Структура БД блока № 1

В этих таблицах (см. рисунок 3.2) все поля идентификаторов – целочисленные, остальные – текстовые, а поле «Фото» типа BLOB (большой двоичный объект) для хранения изображений.

Блок № 2 схемы БД (см. рисунок 3.1) – наиболее большой и сложный по структуре, он содержит как исходное облако точек лазерных отражений, так и этапы его обработки и конечные результаты. Наиболее значимыми сущностями этого раздела являются облако точек лазерных отражений (облако ТЛО), имеет название сущности «съемка», «дата съемки», эквивалентная сеточная модель – «сетка», и результат распознавания оседаний днища резервуара – имеет название «профиль» (рисунок 3.3). Кроме того, сущности этого блока связаны с таблицами из других блоков.

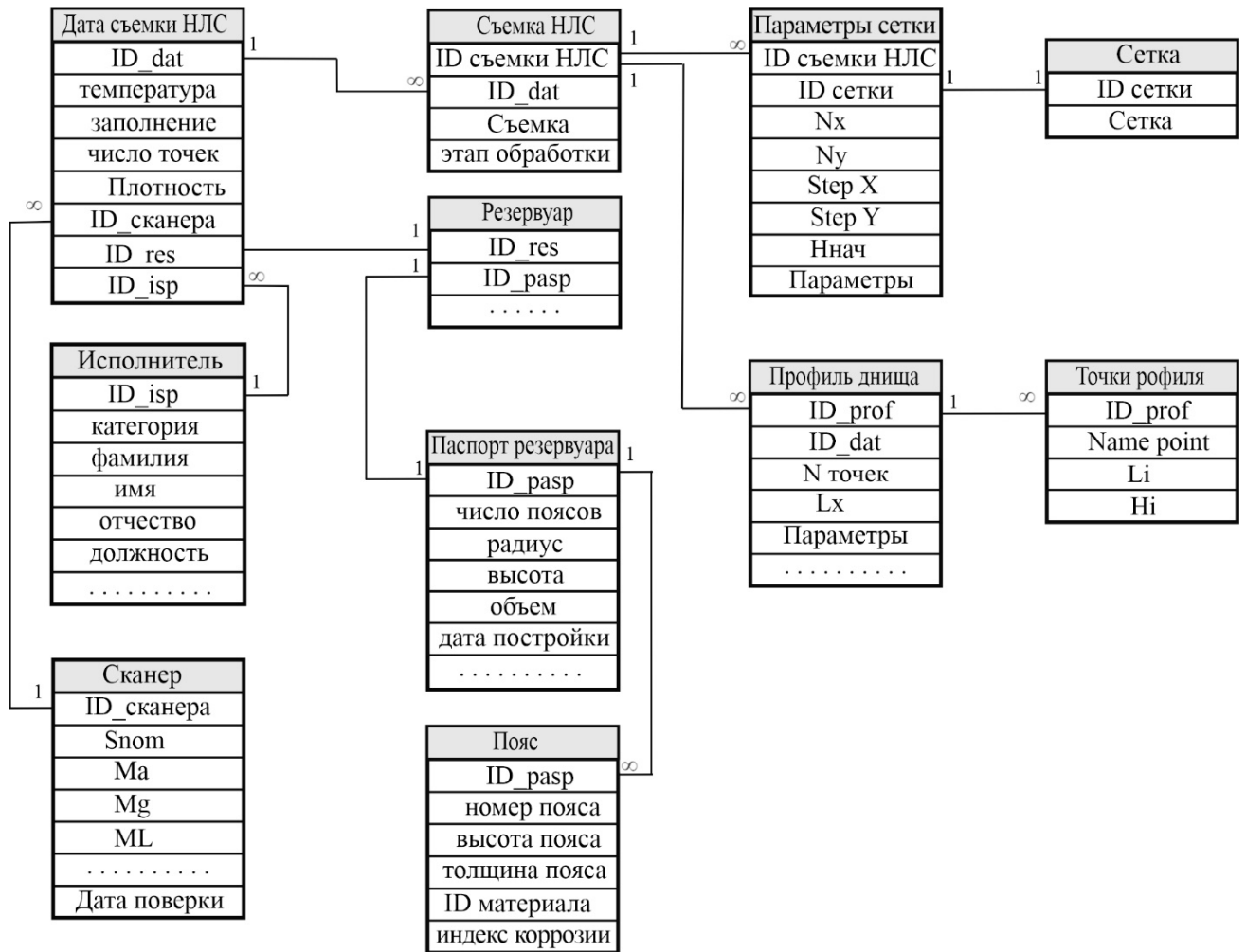


Рисунок 3.3 – Структура БД, блок № 2

В таблицах БД блока № 2 (см. рисунок 3.3) все идентификаторы имеют целочисленный тип, остальные поля имеют тип «текст», и только поле «Съемка» таблицы «съемка НЛС» и поле «сетка» таблицы «Сетка» имеют тип BLOB, что связано с большим объемом информации этих сущностей. Все ключи таблиц являются целочисленными автоинкрементными, для большинства таблиц ключ является простым, для отдельных таблиц ключ состоит из двух и более полей.

Структура таблиц базы данных блока № 3 «Методы неразрушающего контроля» имеет более простую структуру, в первую очередь, это связано с тем, что этот метод контроля обычно выполняется сторонней организацией. Однако таблицы этого блока связаны с техническими характеристиками резервуара, материалом поясов и таблицами других блоков БД (рисунок 3.4). В этой схеме БД только

в таблице «Съемка НК» имеется поле «Данные съемки» типа BLOB, остальные поля целочисленные или типа «Текст».

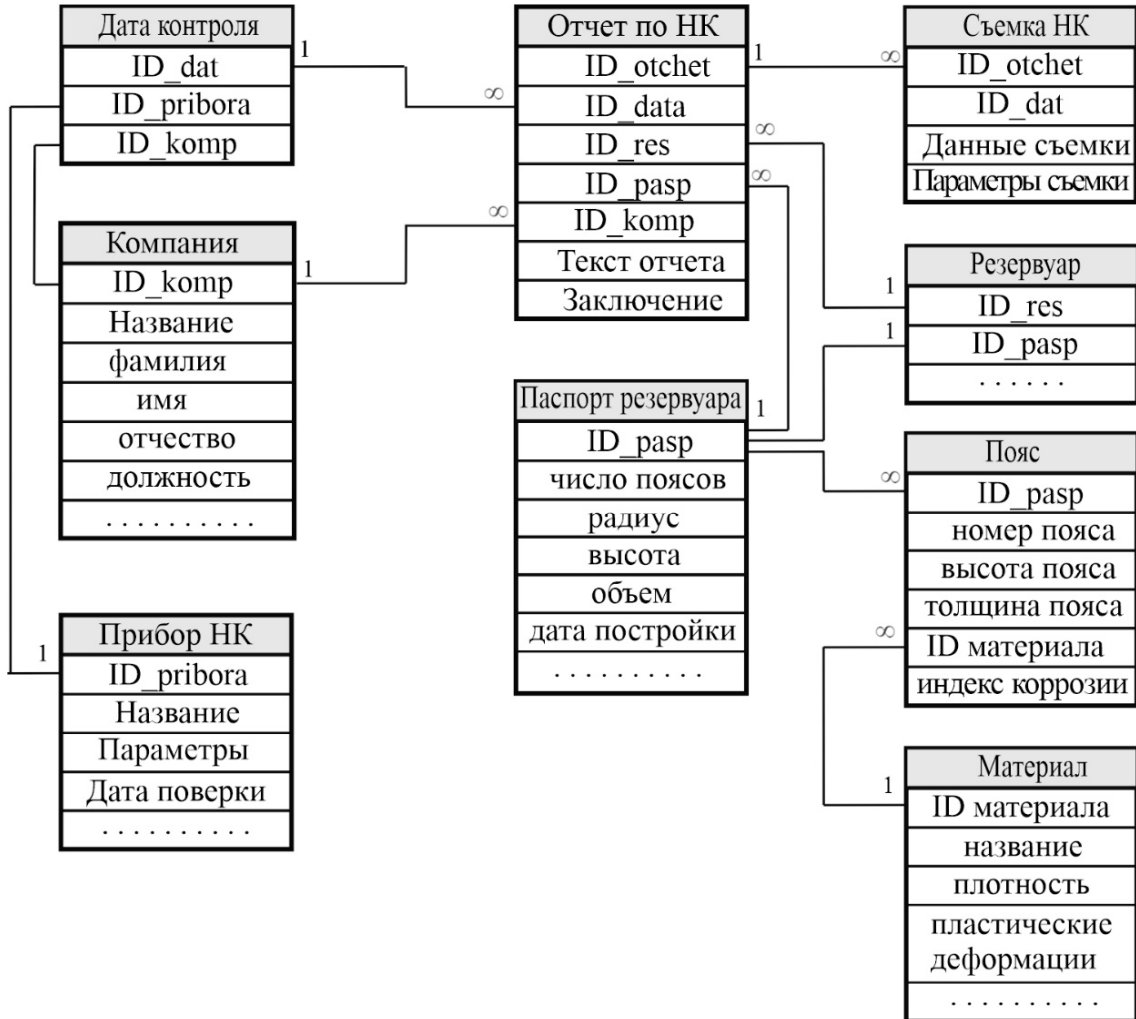


Рисунок 3.4 – Структура БД, блок № 3

Следующий блок БД, подсистема создания заключений, является связующим между различными частями БД геодезической подсистемы ТОРО к информации БД (рисунок 3.5), и основой этой части является таблица правил экспертной системы, которая будет описана в следующем разделе. Эта часть БД интегрирует информацию из всех частей БД геодезической подсистемы ТОРО и на основании правил экспертной системы и информации визуального контроля, неразрушающего контроля и лазерного сканирования создается отчет – заключение геодезической подсистемы ТОРО.

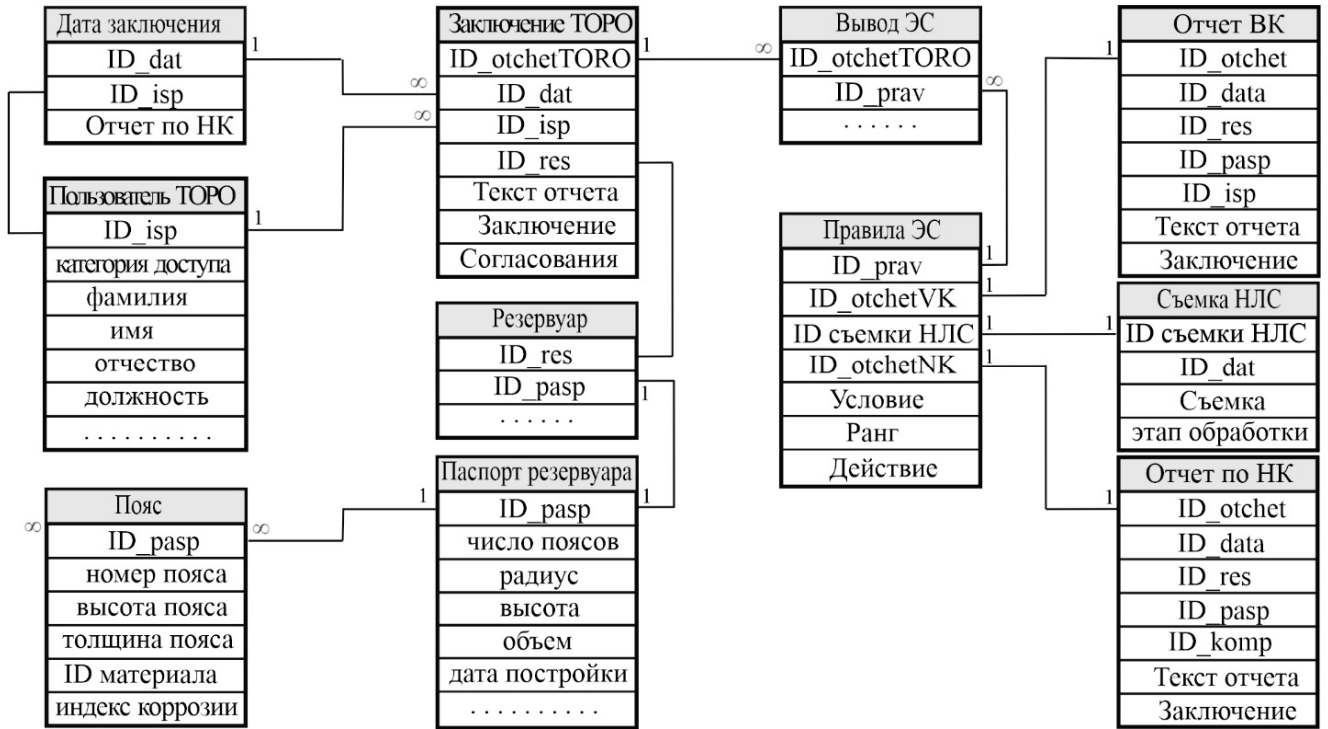


Рисунок 3.5 – Таблицы БД подсистемы выводов

Информация для заключения в геодезической подсистеме ТОРО берется из одного или нескольких отчетов визуального или неразрушающего контроля или отчета съёмки наземного лазерного сканирования. Для этого проверяются отчеты на последние даты и анализируется выполнение условий таблицы «Правила ЭС». Совокупность правил, и соответствующих им действий составляют заключение геодезической подсистемы ТОРО.

### 3.2 Операции с данными в геодезической подсистеме ТОРО

Основную ценность в информационных системах представляет сама информация и методы, которые на основании этой информации позволяют сделать логические выводы о поведении объекта в последующий период времени. В случае таких опасных объектов, как резервуары, логический вывод должен помогать лицу, принимающему решение (ЛПР), принять оптимальное решение для приведения объекта в состояние его безопасной эксплуатации.

Обычно такие информационные системы имеют средства искусственного интеллекта (ИИ), которые помогают ЛПР принимать обоснованные управляющие решения. Формализация процесса принятия управляющих решений – сложный процесс, который заключается в формировании приемлемых вариантов управляющих решений и выборе и обосновании наиболее оптимального из них.

Одним из наиболее развивающихся и гибких методов ИИ являются нейронные сети [39, 103], так как позволяют обучать нейронную сеть для решения прикладных задач. Однако в литературе отмечается, что наиболее эффективно нейронные сети использовать для больших наборов данных с размытыми классификационными признаками. В большинстве случаев это задачи распознавания образов. В случае геодезической подсистемы ТОРО для выработки управляющих решений используется достаточно ограниченная информация, поступающая из небольшого числа источников (см. рисунок 3.1), поэтому для поиска решений можно ограничиться областью ИИ, которая развивается уже более 40 лет – это экспертные системы [22, 64]. Экспертные системы нашли широкое применение в областях, где требуется поиск решения по множеству параметров объекта, в частности, очень широко применяются в медицине для постановки и уточнения диагноза.

В настоящее время литература по этой теме довольно обширная, имеется множество вариаций для улучшения выбора управляющего решения [4, 101] и его объяснения для ЛПР.

Экспертные системы в общем случае основаны на использовании продукций типа:

ЕСЛИ <условие> ТО <действие> .

Механизм вывода просматривает все условия, которые имеются в системе и выбирает действие, которое наилучшим образом соответствует условию или условиям, которые возникают в системе. Исследователи отмечают, что при большом количестве условий процесс логического вывода может быть достаточно продолжительным [22]. Однако продолжительность вывода может быть критична только

для экспертных систем, работающих в режиме «реального» времени, к тому же в геодезической подсистеме ТОРО возникает ограниченное число условий.

Совокупность условий экспертной системы (ЭС) в геодезической подсистеме ТОРО можно представить в виде ранжированной системы условий, и связанных с ними действий. В такой постановке ЭС можно представить в виде алгебраической системы:

$$ЭС = \{U_i, R_j, D_{ij}, S_{ij}\}, \quad (3.1)$$

где  $U_i$  – множество правил для событий, возникающих в системе;  $R_j$  – ранг правила;  $D_{ij}$  – совокупность действий, которые вызываются соответствующими ранжированными правилами;  $S_{ij}$  – пояснение, почему преимущественно выполняется то или иное действие. Ранг правила введен в экспертную систему для того, чтобы отделить семантическую (смысловую) составляющую от числовых данных, которые могут быть как вещественными числами, так и диапазонами с соответствующими операциями сравнения.

Множество правил можно представить в виде символьных литеральных констант, например, для данных съемки наземного лазерного сканирования:

*«деформация стенки резервуара»;*  
*«абсолютное оседание днища резервуара»;*  
*«локальное оседание днища резервуара»;*  
 .....

Для визуального контроля множество правил может быть представлено в следующем виде:

*«обнаружены сквозные трещины»;*  
*«обнаружены микротрещины»;*  
*«обнаружена коррозия»;*  
 .....

Ранг правила определяется уже и числовыми характеристиками, которые связаны с допустимыми напряжениями и деформациями, причем у правил ЭС может быть один или несколько рангов. В таблице 3.1 приведены примеры правил, рангов и действий ЭС.

Таблица 3.1 – Примеры ранжированных правил, действий и пояснений

$i$	Условие	$j$	Ранг	$ij$	Действие	Пояснения
1	«деформация стенки резервуара»	1	$\delta_i > \delta_{\text{доп}}$	11	Выполнить ремонт	Слить содержимое резервуара и выполнить ремонт резервуара
		2	$0,75 \times \delta_{\text{доп}} < \delta_i < \delta_{\text{доп}}$	12	Изменить график геодезических измерений	Уменьшить время между геодезическими наблюдениями
		3	$\delta_i < 0,75 \times \delta_{\text{доп}}$	13	–	Безопасная эксплуатация
2	«локальное оседание днища резервуара»	1	$\delta_i > \delta_{\text{доп}}$	21	Выполнить ремонт	Слить содержимое резервуара и выполнить ремонт фундамента
		2	$\delta_i < \delta_{\text{доп}}$	22	–	Безопасная эксплуатация
3	«напряжения стенок резервуара»	1	$\sigma_i \geq \sigma_{\text{тек}}$	31	Выполнить ремонт резервуара	Выполнить дефектоскопию и ремонт резервуара
		2	$0,7\sigma_{\text{тек}} \leq \sigma_i \leq \sigma_{\text{тек}}$	32	Изменить график обследования	Уменьшить время между геодезическими наблюдениями
		3	$\sigma_i \leq 0,7\sigma_{\text{тек}}$	33	–	Безопасная эксплуатация
4	«обнаружена коррозия»	1	$\tau_i \geq 0,4$	41	Выполнить НК	Выполнить дефектовку листов
		2	$\tau_i < 0,4$	42	Продолжить эксплуатацию	Безопасная эксплуатация
<p>Примечание – <math>\delta_i</math>, <math>\delta_{\text{доп}}</math> – текущие и допустимые деформации; <math>\sigma_i</math>, <math>\sigma_{\text{тек}}</math> – текущие напряжения, предел текучести; <math>\tau_i</math> – индекс износа (коррозии).</p>						

В таблицу правил ЭС (см. рисунок 3.5) занесено 53 правила с соответствующими рангами и действиями, которые позволяют в механизме вывода формировать

заклучения геодезической подсистемы ТОРО, которые, в свою очередь, дают возможность ЛПР не только принимать обоснованные решения, но и предупреждать о необходимости принятия таких решений. Геодезическая подсистема ТОРО срабатывает по новым событиям в подсистеме. Как только в подсистеме появляется новая информация о состоянии резервуара – запускается механизм вывода и создается новое заключение, которое является «советующим» для ЛПР и позволяет не пропустить принятия важных управляющих решений.

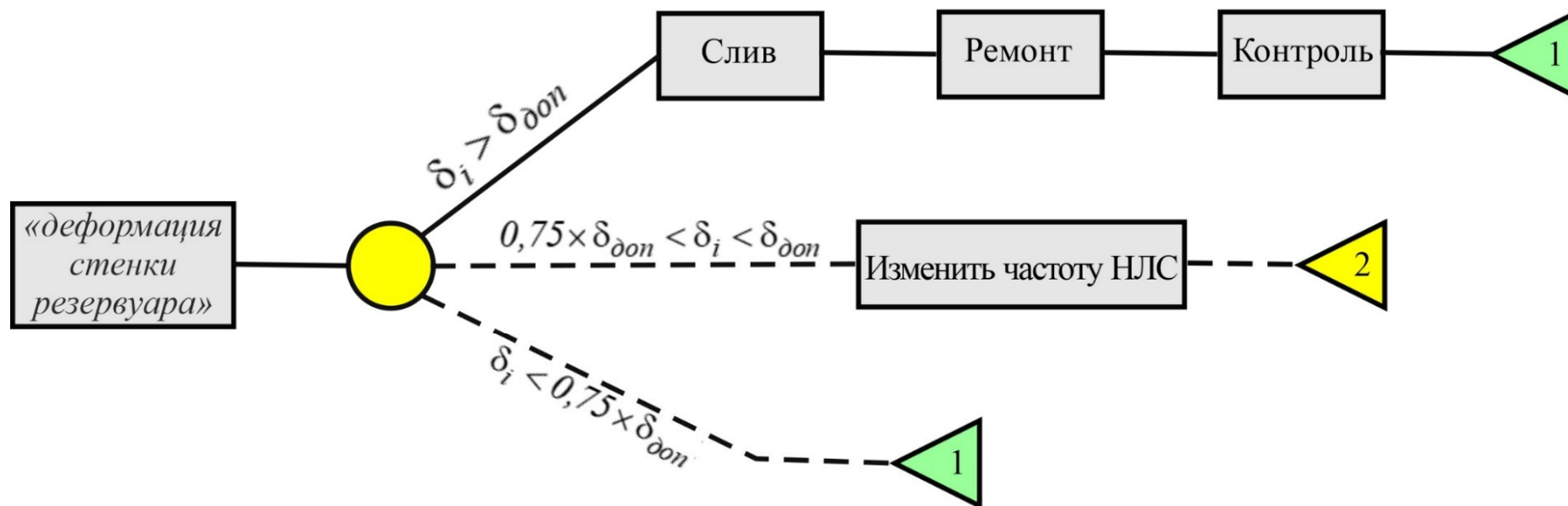
Конечно технология ЭС имеет и недостатки, в частности, в ЭС нет подсистемы обучения, однако в случае геодезической подсистемы ТОРО, когда число правил и действий сравнительно невелико, есть возможность корректировать правила и настраивать ранги действий в рамках обычной инженерии знаний.

Правила ЭС могут служить основанием для создания дерева принятия решений [46, 57, 131], которые могут служить для классификации ситуации и прогноза на будущие периоды.

### 3.3 Построение деревьев принятия решений

Дерево принятия решений – средство поддержки принятия решений, используемое в машинном обучении, анализе данных и статистике [46, 57, 131]. В геодезической подсистеме ТОРО дерево принятия решений используется для визуального анализа ЛПР ситуации и прогноза дальнейших действий. Правила ЭС преобразуются в узлы дерева, ранг правил ЭС – это ветки дерева, которые представляют собой признаки. Действия ЭС также являются узлами. Структура дерева представляет узлы и ребра («ветки»), которые показывают переход объекта из одного состояния в другое (рисунок 3.6).

На рисунке 3.6 сплошной линией показан поиск решения, если превышено условие допустимой деформации. Пунктирными линиями показаны варианты решений, если деформации находятся в пределах допуска или приближаются к допуску. В этом случае предусматривается уменьшить интервал между геодезическими обследованиями резервуара.



1 - безопасная эксплуатация; 2 - эксплуатация в режиме усиленного контроля

Рисунок 3.6 – Дерево решений для правила ЭС «деформация стенки резервуара»

### 3.4 Выводы по разделу

В этом разделе диссертационной работы предложена схема базы данных геодезической подсистемы ТОРО, которая позволяет накапливать информацию о визуальном контроле, геодезическом контроле деформаций вертикальных стальных резервуаров и неразрушающем контроле. Ввод и обработка информации в БД производится в максимально автоматизированной форме. ЛППР может извлечь информацию о любом виде контроля и сформировать из нее заключение о состоянии резервуара.

Для поддержки принятия управляющих решений и недопущения оставления без внимания критических деформаций предложена экспертная система с ранжированием правил, которая работает в событийном режиме и позволяет сформировать заключение о состоянии резервуара на основе всех имеющихся в БД данных визуального, геодезического и неразрушающего контроля. Правила ЭС также предусмотрено хранить в таблице БД (см. рисунок 3.5). Настройка и добавление правил и изменение параметров выбора и допусков возможны ЛППР для адаптации геодезической подсистемы ТОРО к конкретным условиям и материалам резервуарного парка.

Кроме того, показано, как по правилам ЭС и данным контроля можно сформировать «дерево решений», которое показывает классификацию текущего состояния резервуара и варианты действий, которые необходимо предпринять, чтобы продолжить безопасную эксплуатацию резервуара.

## 4 ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ ПОДСИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ

Программная реализация [83, 84] геодезической информационной подсистемы ТОРО выполнена в соответствии с алгоритмами, изложенными в разделе 2 [3, 110, 123]. Информация хранится в БД, структура которой описана в разделе 3. В этом разделе кратко описывается последовательность действий и операций по импорту данных в геодезическую подсистему ТОРО и последующей обработке и получению рекомендаций по безопасной эксплуатации вертикальных стальных резервуаров.

### 4.1 Интерфейс геодезической подсистемы ТОРО

Интерфейс геодезической подсистемы ТОРО состоит из главного меню и пяти страниц-закладок (рисунок 4.1), на которых расположены группы информационных и управляющих элементов.

Программа контроля геометрии резервуара: [D:\Проекты\LaserScanner\DB\ПНПЗ 1000.DB]

Проект Вид Сечение Обработка Помощь

Объект Модель 3D Обработка Поверхность ЭС

Предприятие (подразделение)  
Парк 1000

Резервуары

№	Название	Назначение	Zмакс.м
1	РВС № 1	Вода	138.550
2	РВС № 2	Нефть	138.550
3	РВС № 3	....	138.550
4	РВС № 4	...	138.550
5	РВС № 5		138.550
6	РВС № 6		138.550
7			

Измерения

№	Дата съемки	T, град.С	Заполнение, м	Точек	Этап
1	01.07.2006	32	0	3050671	
2	12.09.2007	21	0		

Паспорт резервуара

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Заводской номер	2	Объем, куб.м	1000
Инвентарный номер	2	Поясов	6
Тип резервуара	РВС	Толщ.крыши, мм	4
Дата ввода	1992	Толщ.дна, мм	6
Высота, м	11.580	Толщ.окрайки, мм	6
Диаметр, м	10	Материал	СТ 3

Пояса резервуара

№ пояса	Высота, м	Толщина, мм
1	1.5	6
2	1.5	6
3	1.5	6
4	1.5	6
5	1.5	6
6	1.5	6

Рисунок 4.1 – Интерфейс геодезической подсистемы ТОРО

На странице «Объект» сосредоточены инструменты выбора баз данных предприятий или их подразделений. Для выбранного подразделения показана таблица резервуаров, для текущего резервуара показаны паспорт резервуара и таблица поясов и съемки наземного лазерного сканирования. Идентификатором съемок НЛС является дата съемки. Кроме того, на этой странице вводится информация о температуре окружающей среды при выполнении съемок, заполнении резервуара и других параметрах, необходимых для расчета напряжений, возникающих в теле резервуара при его деформации.

Основными операциями для таблиц «Резервуары» и «Измерения» являются «Добавить резервуар» (дату), «Удалить резервуар» (дату) и сохранить в БД, если в таблицах производилось редактирование. Крупные кнопки справа от таблицы агрегируют основные операции с данными в БД (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Основные операции с БД

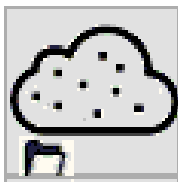

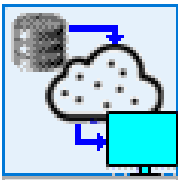
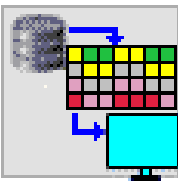
Изображение кнопок	Операции
	Импорт съемки НЛС выполняется из файла формата PTS, параметры импорта задаются на странице «Обработка» (рисунок 4.2) и ограничивают число точек, которые будут храниться в БД
	Запись текущего состояния облака точек с привязкой к текущей дате съемки
	Чтение облака точек из БД, для текущей съемки, облако точек показано на странице «Модель 3D» (см. рисунок 4.2)
	Чтение топологически эквивалентной сетки из БД для текущей съемки показывается на странице «Поверхность»



Рисунок 4.2 – Страница «Модель 3D»

Таблица «Паспорт резервуара» связана с конкретным резервуаром, а таблица «Пояса резервуара» связана с паспортом резервуара. Операции с этими таблицами ограничены только операцией сохранения.

Поскольку паспорта резервуаров одного объема однотипны, можно использовать паспорт существующего резервуара в качестве шаблона для создания паспорта нового резервуара, который добавляется в БД.

Страница «Модель 3D» служит для показа облака точек, реализована с помощью графической библиотеки OpenGL. Это дает возможность рассмотреть облако точек с различных сторон и при различном увеличении. Для стандартных видов отображения служит инструментальное меню (рисунок 4.3), управление видимостью объектов показано на рисунке 4.4.

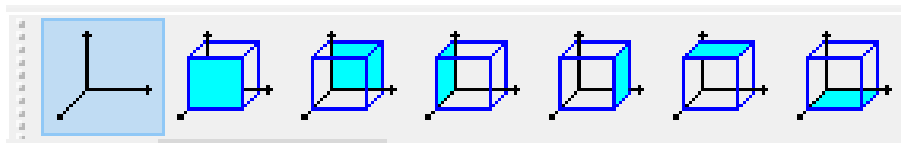


Рисунок 4.3 – Инструментальное меню

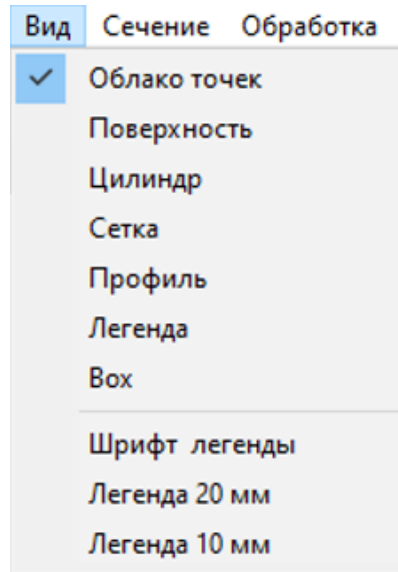


Рисунок 4.4 – Управление видимостью объектов

Кроме того, на этой странице выполняются некоторые операции по измерению параметров резервуара.

#### 4.2 Основные функции геодезической подсистемы ТОРО

На странице «Обработка» (рисунок 4.5) сгруппированы операции обработки данных наземного лазерного сканирования и производных от этих данных.

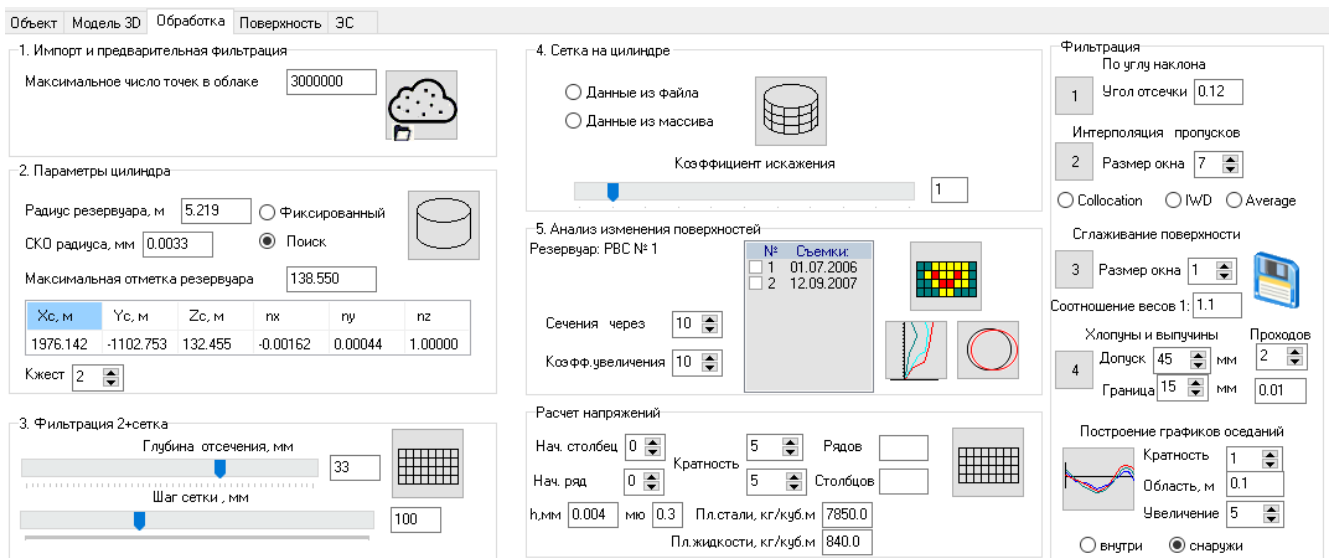


Рисунок 4.5 – Операции обработки данных

Для обеспечения логики обработки операции и параметры обработки сгруппированы под номерами.

1 *Импорт и предварительная фильтрация* – операция импорта и ограничения числа точек облака лазерных отражений до некоторого приемлемого для дальнейшей обработки числа. Для резервуаров объемом 1 000 м<sup>3</sup> достаточно 3 млн точек, для резервуаров большего объема требуется 4–5 млн точек.

2 *Параметры цилиндра* – определение параметров цилиндра (алгоритм описан в 2.3) возможно в двух вариантах, с поиском радиуса цилиндра и при заданном в паспорте резервуара радиусе цилиндра. Это бывает необходимо, чтобы оценить качество постройки нового резервуара. Параметры цилиндра используются в дальнейших операциях фильтрации и построении топологически эквивалентной сетки.

3 *Фильтрация 2 + сетка* – задаются параметры фильтрации по радиусу и параметры топологически эквивалентной сетки, алгоритм и пояснения к выбору оптимальных параметров приведены в 2.3, пример показан на рисунке 2.5 для резервуара № 1 и в приложении А для других резервуаров

4 *Сетка на цилиндре* – эта команда позволяет задать источник, откуда брать топологически эквивалентную сетку и с каким коэффициентом искажения показать ее на трехмерной модели резервуара (рисунок 2.12 – топологически эквивалентная сетка, рисунок 4.6 – сетка на цилиндре, коэффициент искажения 1).

*Фильтрация* – здесь сгруппированы методы фильтрации и сглаживания для работы с эквивалентной сеточной моделью. Эти функции также имеют номера и параметры, которые подобраны для обработки данных резервуаров определенного размера, на рисунке 4.5 показаны параметры обработки для резервуаров объемом 1 000 м<sup>3</sup>.

1 – фильтрация по углу наклона с заданным допуском – убирает неровности, выступающие над поверхностью резервуара, поверхность уклонов показана на рисунке 2.16 и на рисунках А.3, Б.3, В.3, Г.3, Д.3, Е.3 приложений А–Е.

2 – интерполяция пропусков в сеточной модели, параметрами являются размер окна для выбора точек интерполяции и метод интерполяции. Исходные поверхно-

сти с пропусками показаны на рисунках А.2, Б.2, В.2, Г.2, Д.2, Е.2 приложений А–Е. Интерполированные поверхности – на рисунках А.5, Б.5, В.5, Г.5, Д.5, Е.5 приложений А–Е.

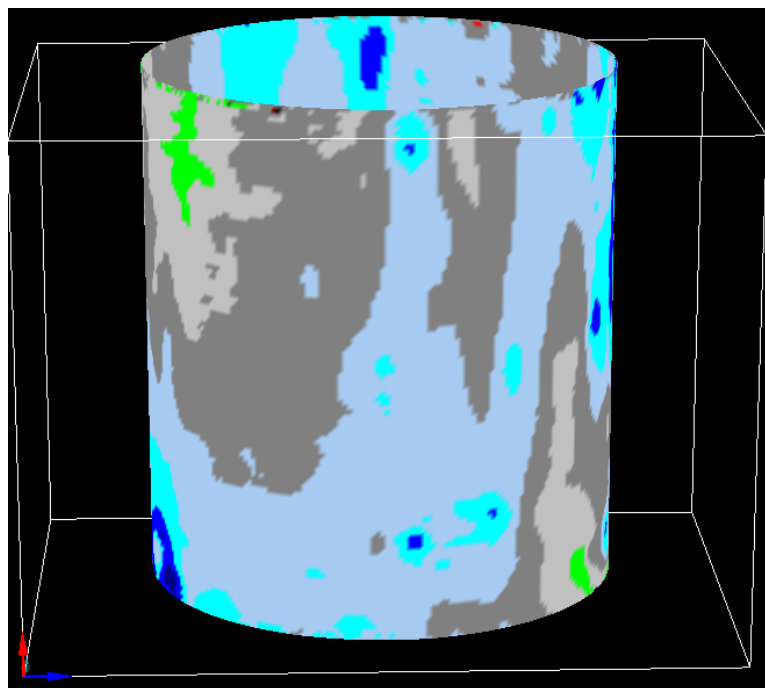


Рисунок 4.6 – Топологически эквивалентная сетка на цилиндре

3 – применяется для сглаживания поверхностей, для этого задается размер окна сглаживания и соотношение весов между центральным элементом и окружающими ячейками. Если соотношение весов будет больше 1, то это будет фильтр низких частот, который будет приводить к сглаживанию поверхности. Если вес центральной ячейки будет больше, чем окружающих ячеек, – это будет фильтр высоких частот, который будет увеличивать разницу между ячейками. Мы применяем фильтр низких частот с небольшой разницей весов, чтобы выполнить сглаживание, но не исказить исходную поверхность.

4 – функция поиска «хлопунов» и «выпучин» параметрами этой операции являются: допуск, граница и число проходов. Описание алгоритма поиска приведено в 2.5. Результаты работы показаны на рисунках 2.38 и 2.39.

*Построение графиков оседаний* – один из важнейших контролируемых параметров [95], так как оседания днища резервуаров, особенно локальные приводят к нарушению целостности оболочек стальных вертикальных резервуаров [72]. При хорошем качестве сканов и правильно подобранных параметрах обработки надежно и с высокой точностью определяются оседания днища резервуара. Описание алгоритма приведено в 2.4, а результаты показаны на рисунках 2.27, 2.31, 2.32, 2.33.

*5 Анализ изменения поверхностей* – может выполняться несколькими способами. Первый способ – алгебраическая разность эквивалентных топографических поверхностей. Для этого нужно выбрать две поверхности в чек-листе (см. рисунок 4.5). После чего будет выполнено алгебраическое вычитание параметра  $z$  каждого узла эквивалентных топологических сеток на разные даты и результирующая поверхность будет показана на экране на странице «Поверхность» (рисунок 4.7). Физический смысл этой поверхности – это изменение деформаций стенок резервуара между выбранными датами. Анализ этой поверхности должен учитывать температуру окружающей среды и уровень заполнения резервуара, такая информация в БД имеется.

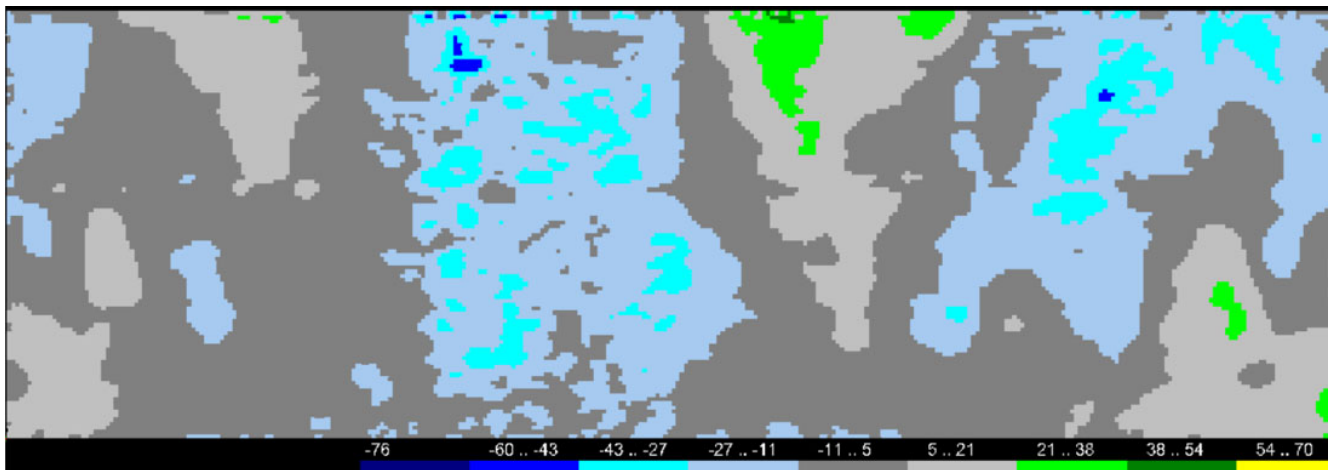


Рисунок 4.7 – Разность поверхностей на даты 1.07.2006 – 12.09.2007

Изменение деформаций между этими датами имеет преимущественно отрицательную величину, что связано с более низким уровнем заполнения резервуара на вторую дату и на 11 °С более низкую температуру.

Второй вариант анализа изменений поверхностей предусматривает построение вертикальных профилей стенок резервуара [80]. Для этого выбираются в чек-листе поверхности на нужные даты (см. рисунок 4.5) и выполняется команда построения вертикальных профилей (рисунок 4.8). Но поскольку даты съемок очень близкие и заполнение практически одно и то же – профили на смежные даты практически не различаются.

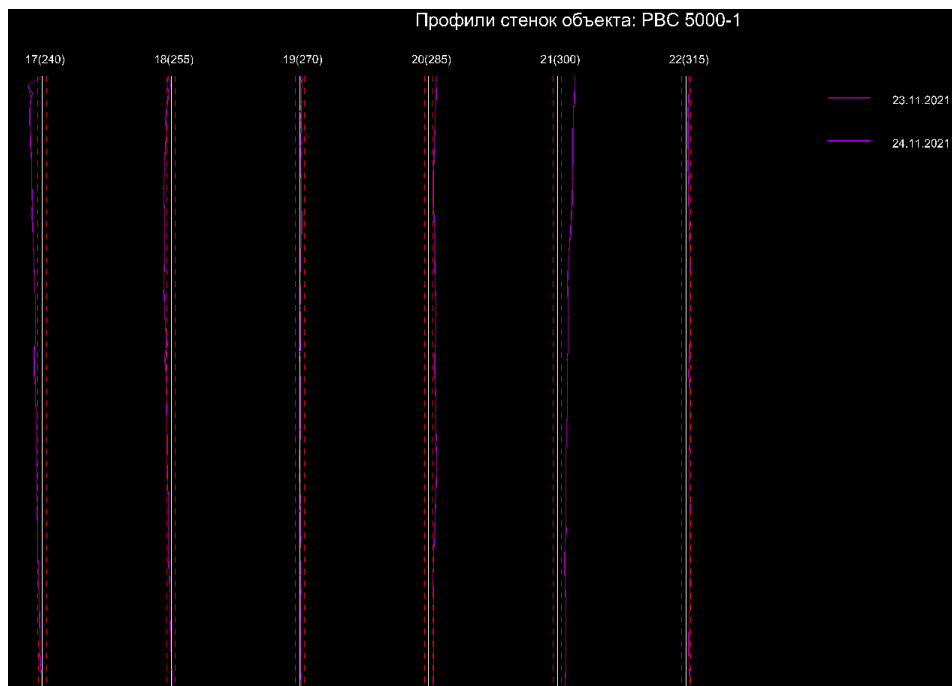


Рисунок 4.8 – Профили стенок резервуара

Третий вариант анализа поверхностей заключается в построении горизонтальных сечений на различной высоте резервуара. Поскольку в БД имеются готовые топологические сетки на разные даты с очень маленьким шагом (для резервуара объемом 1 000 м<sup>3</sup> это 0,1 м) то задача построения горизонтальных и вертикальных сечений и профилей заключается в выборе и отображении на плоскости или в трехмерном пространстве соответствующей строки или столбца сетки. На рисунке 4.8 видно, что некоторые профили выходят за пределы отклонений для резервуара этого объема.

Для построения горизонтальных сечений также производится выбор поверхности в чек-листе и выполняется построение (рисунки 4.9, 4.10).

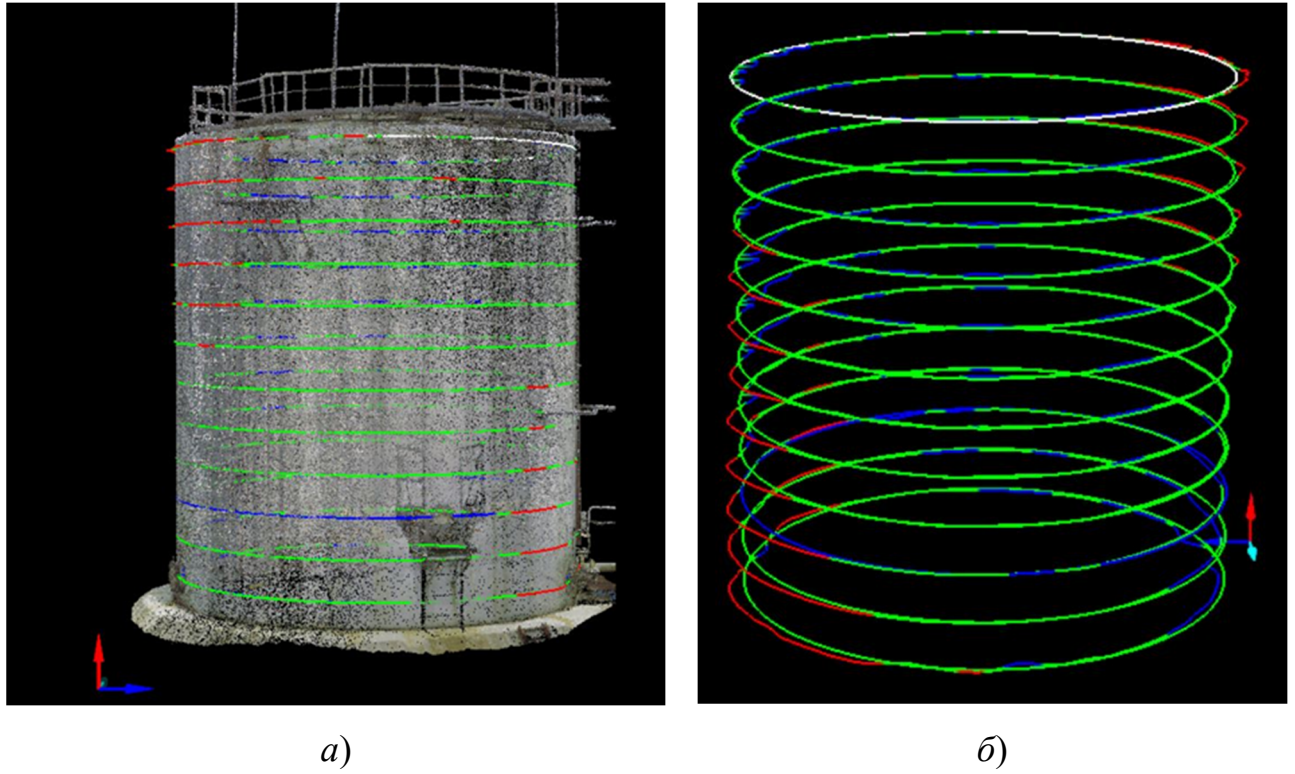


Рисунок 4.9 – Горизонтальные сечения резервуара:  
а) совмещенные с облаком точек; б) без совмещения

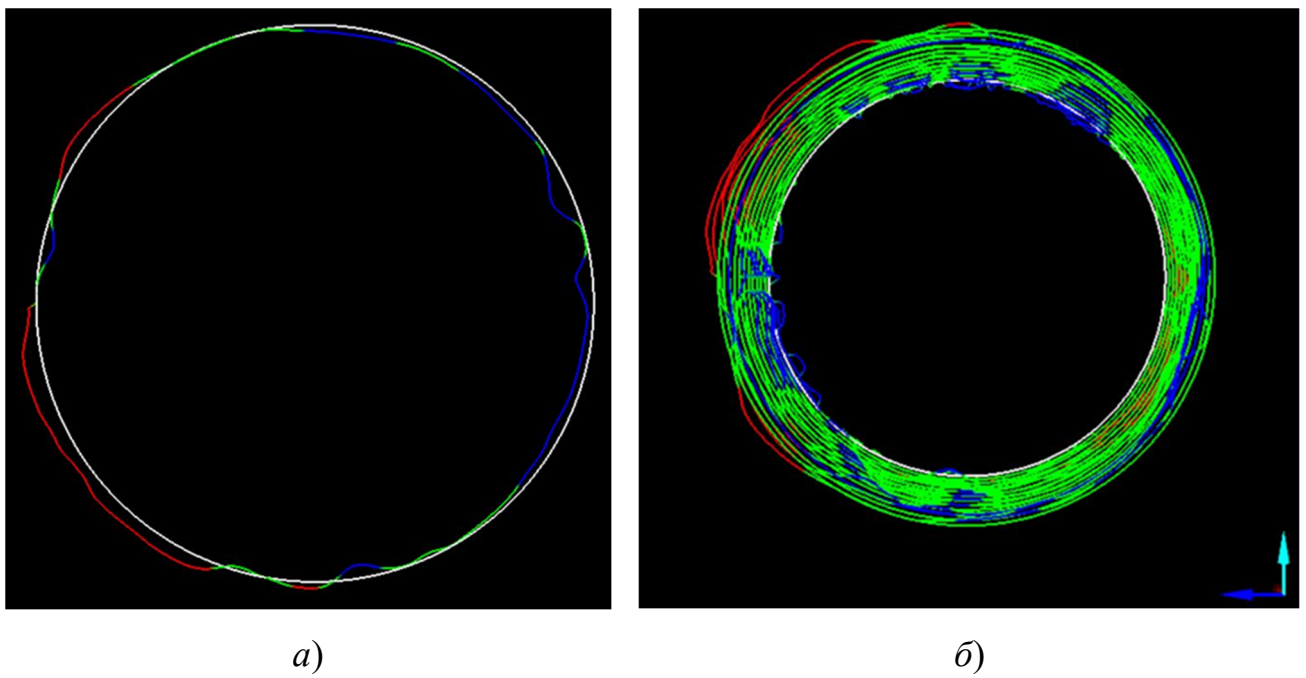


Рисунок 4.10 – Горизонтальные сечения:  
а) одиночное сечение; б) вид сверху

При построении профилей и сечений параметрами операции задается шаг, с которым строятся профили и сечения, и коэффициент увеличения деформаций.

*Расчет напряжений* – для оценки состояния резервуара необходимо знать, какие напряжения возникают в теле резервуара при тех деформациях, которые были определены съемкой НЛС. Для расчета используется информация о плотности материала корпуса, жидкости и размерах сетки для расчета. Теория расчета описана в 2.3.6. Пример расчета для поверхности деформаций (рисунок 4.11) показан на рисунке 4.12.

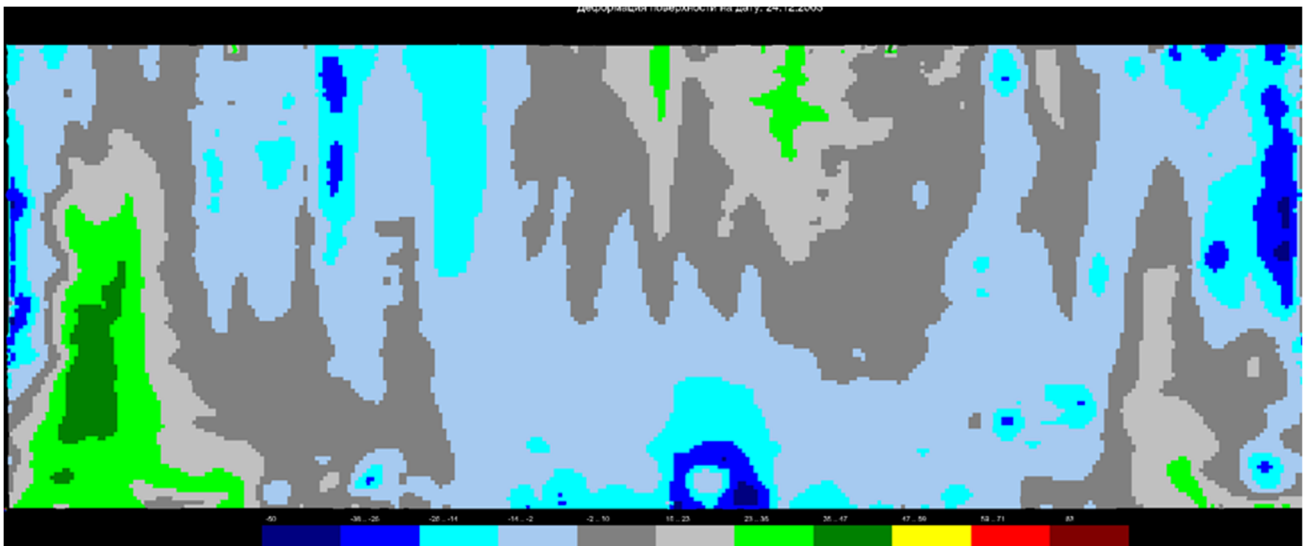


Рисунок 4.11 – Поверхность деформаций резервуара № 6

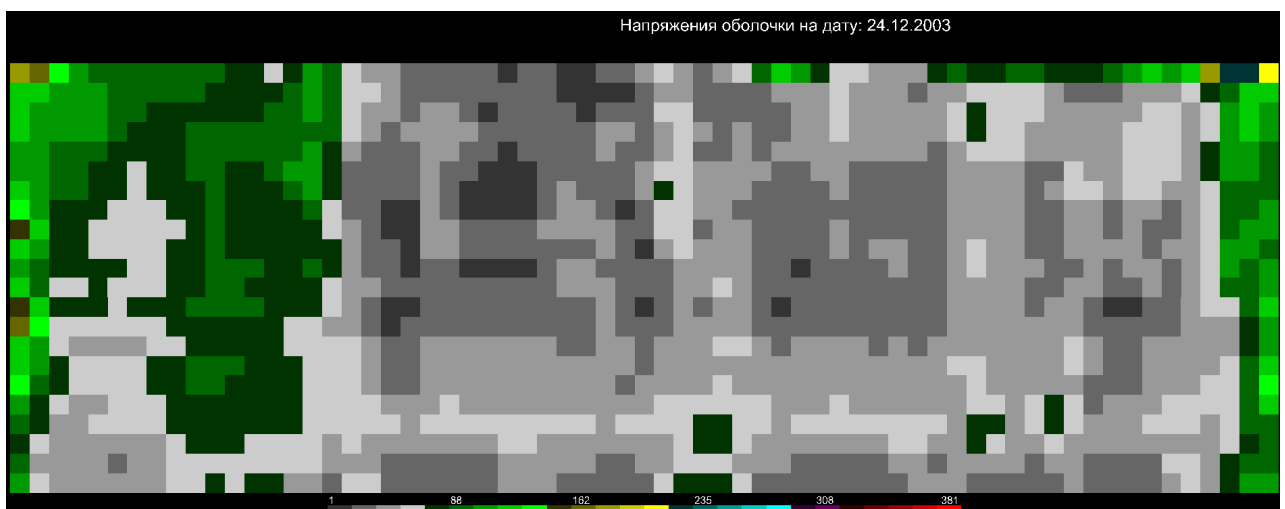


Рисунок 4.12 – Напряжения оболочки резервуара № 6

На рисунке 4.12 показана шкала напряжений в мегапаскалях. Расчет напряжений показывает, что в местах сосредоточенных деформаций имеются напряжения до 200 МПа, что составляет почти 80 % от предела текучести (см. приложение Ж), что требует более пристального внимания к этим местам, одним из возможных действий является проведение неразрушающего контроля.

#### 4.3 Поддержка принятия решений в геодезической подсистеме ТОРО

Поддержка принятия решений в геодезической подсистеме ТОРО осуществляется с помощью экспертной системы продукционного типа, дополненной ранговыми показателями. Подсистема вывода просматривает правила и имеющуюся информацию и формирует цепочку логического вывода, которая приводит к некоторым действиям. Эти действия не исполняются автоматически, а служат для поддержки принятия решений ЛПР.

Примером такого решения может служить заключение ЭС для резервуара № 6, показанное на рисунке 4.13.

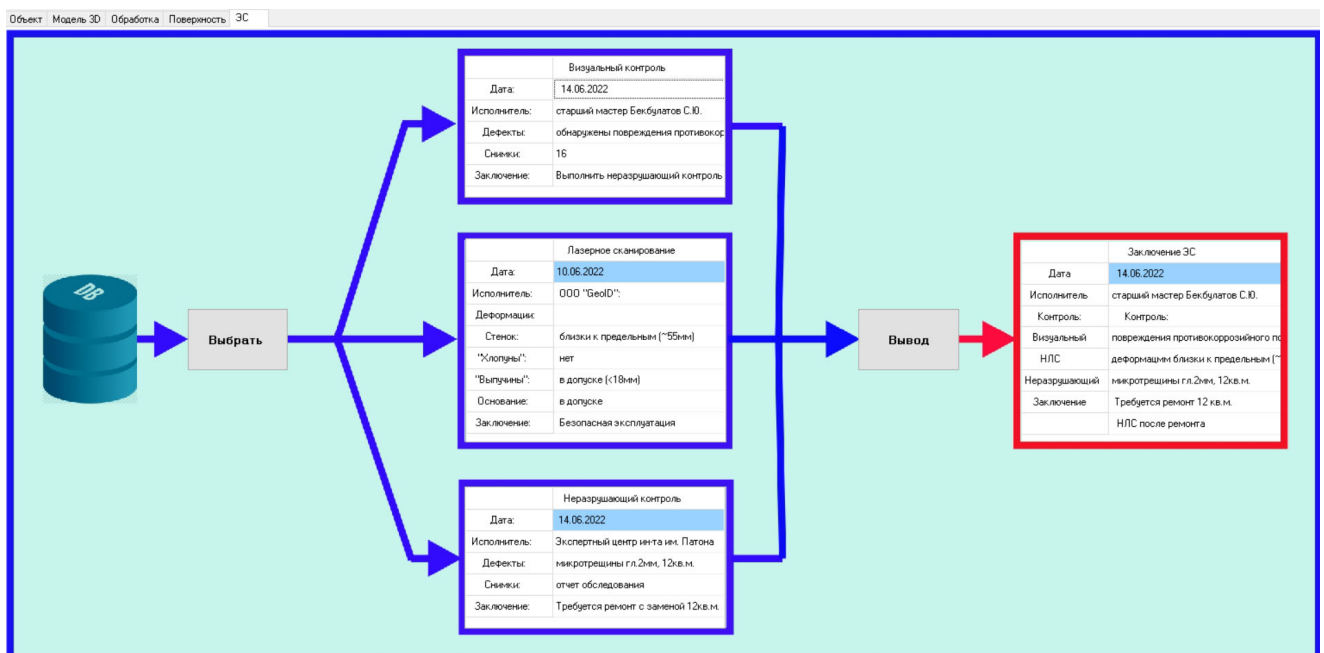


Рисунок 4.13 – Страница «Экспертная система»

Правила экспертной системы и ранги, связанные с правилами, могут дополняться и корректироваться в БД. Эти изменения должны вноситься по распоряжению ЛПР (обычно это технический директор подразделения).

#### 4.4 Выводы по разделу

В данном разделе показана практическая реализация алгоритмов [88, 89], предложенных в разделе 2, и проверена работоспособность структуры базы данных, рассмотренная в разделе 3.

Можно констатировать, что методика обработки данных НЛС, предложенная в диссертационном исследовании, позволяют автоматизированно решить все задачи, которые поставлены в [95], причем затраты времени на получение результата уменьшаются примерно в 10 раз, по сравнению с обработкой в стандартном Syclon.

Еще одним преимуществом предложенной методики является то, что все данные, необходимые для контроля за эксплуатацией вертикальных стальных резервуаров, берутся из одного источника – съемки резервуара НЛС. При этом время полевых работ при съемке резервуара методом НЛС уменьшается в десятки раз, по сравнению с традиционными геодезическими методами съемок.

Структура базы данных, предложенная в разделе 3, позволяет эффективно хранить первичные данные облаков точек лазерных отражений, оперировать этими данными и хранить производные от этих данных – топологически эквивалентные сетки. А это, в свою очередь, позволяет выполнять над сетками алгебраические операции анализа и выборки по строкам и столбцам, что дает возможность без дополнительных вычислений построить горизонтальные сечения и вертикальные профили стенок резервуара.

И конечно геодезическая подсистема ТОРО имеет преимущества перед другими системами, потому что дает возможность численного определения напряжений в теле резервуара, которые можно сравнивать с пределом текучести для материала резервуара.

Экспертная система в геодезической подсистеме ТОРО срабатывает каждый раз, когда в базу данных заносится новая информация о состоянии резервуара – это гарантирует, что ЛПР будет проинформировано о критических событиях и методах их устранения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационном исследовании автором получены следующие результаты:

– выполнен анализ нормативной документации и существующих методов геодезического мониторинга вертикальных стальных резервуаров, который показал их высокую трудоемкость и ограниченную информативность. Анализ показал, что нормативная документация по РВС не соответствует возросшим требованиям к безопасной эксплуатации резервуаров;

– разработаны оригинальные алгоритмы определения деформаций стенок резервуара, его днища и выделения областей локальных деформаций по данным наземного лазерного сканирования, которые объединены в методику мониторинга состояния промышленных объектов, позволяющую выполнить комплексную оценку состояния резервуаров и оценить возможность их дальнейшей эксплуатации;

– апробирована методика численного расчета напряжений по данным деформаций стенок РВС из геодезического мониторинга, которая позволяет обосновать допустимые деформации для безопасной эксплуатации резервуаров;

– определена структура базы данных для хранения облаков точек наземного лазерного сканирования и результатов их математической обработки, обеспечивающая эффективный доступ к информации при выполнении оценки состояния промышленных объектов;

– создана информационная система поддержки принятия управляющих решений, основанная на экспертной системе продукционного типа, которая повышает безопасность эксплуатации резервуарного парка;

– выполнена апробация разработанной методики на примере резервуарного парка Павлодарского НПЗ (Республика Казахстан), которая показала ее высокую эффективность при обработке данных лазерного сканирования, позволяя значительно сократить время обработки и повысить точность определения технического состояния объектов резервуарного парка.

Результаты исследования рекомендуются к использованию при выполнении геодезического мониторинга для оценки технического состояния резервуарных парков и продолжения их безопасной эксплуатации. Предлагается дополнить нормативную документацию расчетными методами определения допустимых деформаций.

Перспективы дальнейших исследований по данной тематике заключаются в выявлении общих закономерностей фильтрации геопространственных данных НЛС для повышения точности создания топологически эквивалентных моделей РВС и расчета эквивалентных напряжений оболочек РВС в процессе эксплуатации.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Аварийная разморозка. – Текст : электронный // «Версия», № 49 от 24.12.2021. – URL: <https://versia.ru/razliv-topлива-v-norilske-mozhet-stat-nachalom-serii-texnogennyx-katastrof-v-rossijskoj-arktike>.

2 Алсынбаев, К. С. Алгоритмы определения тел объемных объектов в трехмерном нерегулярном облаке точек / К. С. Алсынбаев. – Текст : непосредственный // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2015. – Вып. 10. – С. 159–165.

3 Анализ деформаций и напряжений оболочки вертикальных стальных резервуаров по данным лазерного сканирования / А. А. Шоломицкий, Н. Т. Кемербаев, С. Г. Могильный, С. Н. Царенко. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2022. – Т. 27, № 2. – С. 86–101. – DOI 10.33764/2411-1759-2022-27-2-86-101.

4 Бажанов, Ю. С. Системы искусственного интеллекта и принятия решений. Оптимизация баз знаний нечетких экспертных систем : учебное пособие / Ю. С. Бажанов, А. В. Бухнин, Д. А. Кобляков. – Нижний Новгород : Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р. Е. Алексеева, 2012. – 84 с. – Текст : непосредственный.

5 Балицкий, В. М. Вопросы прочности и совершенствования сварных конструкций резервуаров : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. М. Балицкий. – Киев, 1966. – 24 с. – Текст : непосредственный.

6 Билецкий, С. М. Индустриальное изготовление негабаритных сварных листовых конструкций / С. М. Билецкий, В. М. Голинько. – Киев : Наукова думка, 1983. – 272 с. – Текст : непосредственный.

7 Билецкий, С. М. Разработка, исследование и внедрение способа временного деформирования сварных листовых конструкций : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / С. М. Билецкий. – Киев, 1967. – 20 с. – Текст : непосредственный.

8 Болгов, А. Н. Применение преобразования Хафа и его модификаций для нахождения графических примитивов / А. Н. Болгов, М. Н. Фаворская. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2011. – Т. 1. – № 7.

9 Бояршинов, С. В. Основы строительной механики машин / С. В. Бояршинов. – Москва : Машиностроение, 1973. – 456 с. – Текст : непосредственный.

10 Брынь, М. Я. Геодезический мониторинг земляного полотна железнодорожных путей / М. Я. Брынь, Н. Д. Яковлева. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2022. – № 11 (406). – С. 14–16.

11 Брынь, М. Я. Построение прогнозной модели поисковым методом нелинейного программирования по геодезическим данным / М. Я. Брынь, Г. Г. Шевченко. – Текст : непосредственный // Инженерные изыскания. – 2019. – Т. 13, № 4. – С. 48–58.

12 Вальдовский, А. Высокоточная съемка промышленных объектов методом лазерного сканирования с последующим 3D-моделированием / А. Вальдовский, Г. Морозова. – URL: <https://sapr.ru/article/21468/>. – Текст : электронный.

13 Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – Москва : Высшая школа, 2002. – 840 с. – Текст : непосредственный.

14 Власов, В. З. Избранные труды. Том 1. Общая теория оболочек / В. З. Власов. – Москва : Издательство академии наук СССР, 1962. – 528 с. – Текст : непосредственный.

15 Власов, В. З. Избранные труды. Том 3. Тонкостенные пространственные системы / В. З. Власов. – Москва : Издательство академии наук СССР, 1964. – 472 с. – Текст : непосредственный.

16 Временная инструкция по ремонту и исправлению дефектов вертикальных сварных цилиндрических резервуаров для хранения нефтепродуктов : утверждена Министерством нефтяной промышленности СССР 20.05.1954. – Москва, 1954. – 39 с. – Текст : непосредственный.

17 Галюк, В. Х. Анализ режима нагружения вертикальных цилиндрических резервуаров / В. Х. Галюк, П. Г. Почтовик, Г. К. Шаршуков. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело и транспорт нефти. – 1984. – № 11. – С. 32–34.

18 Горбатов, В. А. Фундаментальные основы дискретной математики. Информационная математика / В. А. Горбатов. – Москва : Наука. Физматлит, 2000. – 544 с. – Текст : непосредственный.

19 ГОСТ 31385–2016. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. Межгосударственный стандарт. Москва, Стандартинформ. – 2016. – 95 с. – Текст : непосредственный.

20 ГОСТ 8.570–2000. Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика поверки : введен 01.01.2002. – Минск, 2000. – Текст : непосредственный.

21 Гура, Д. Основы мониторинга объектов транспортной инфраструктуры / Д. Гура, И. Марковский, Н. Хушт. – Краснодар : Издательство Кубанского государственного технологического университета, 2021. – 159 с. – Текст : непосредственный.

22 Джексон, П. Введение в экспертные системы / П. Джексон: [пер. с англ. и ред. канд. техн. наук В. Т. Тертышного] 3-е изд. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2001. – 623 с. – Текст : непосредственный.

23 Дуда, Р. И. Некоторые вопросы прочности стальных нефтерезервуаров : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Р. И. Дуда. – Киев, 1957. – 18 с. – Текст : непосредственный.

24 Иванов, В. А. Особенности подходов к техническому обслуживанию и ремонту оборудования в непрерывном производстве / В. А. Иванов, А. А. Фещенко. – Текст : непосредственный // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение. – 2018. – Т. 20, № 3. – С. 82–89. – DOI 10.15593/2224-9877/2018.3.10.

25 Иванова, Н. В. Хладостойкость металла ЗТВ сварных соединений резервуарных конструкций / Н. В. Иванова, В. Н. Дикун, В. А. Винокуров. – Текст : непосредственный // Сварочное производство. – 1985. – № 11. – С. 15–23.

26 Изготовление рулонных резервуаров из стали повышенной прочности / Б. В. Поповский, И. И. Ивочкин, В. А. Красников, Г. А. Ритчик. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1970. – № 5. – С. 45–48.

27 Иксымбаева, Ж. С. Некоторые аспекты сегментации в выбранном алгоритме распознавания образов нейронными сетями / Ж. С. Иксымбаева. – Текст : непосредственный // Вестник науки КазАТУ им. С. Сейфуллина. – 2011. – № 2 (69). – С. 108–113.

28 Ильин, В. П. О сеточных технологиях для двумерных краевых задач / В. П. Ильин, В. М. Свешников, В. С. Сынах. – Текст : непосредственный // Сиб. журн. индустр. матем. – 2000. – Т. 3, № 1. – С. 124–136.

29 Исследование листовой стали для резервуаров / Р. И. Дуда, Л. С. Лившиц, В. Д. Таран, А. С. Фалькевич. – Текст : непосредственный // Строительство предприятий нефтяной промышленности. – 1957. – № 1. – С. 13–16.

30 Исследование методов определения геометрических параметров вращающихся агрегатов по данным лазерного сканирования // С. Г. Могильный, А. А. Шоломицкий, А. В. Иванов, А. В. Середович, Е. К. Лагутина, А. В. Мартынов. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 3. – С. 89–107.

31 Кемербаев, Н. Т. Геодезическая информация в системе автоматизированного технического обеспечения и ремонтов / Н. Т. Кемербаев. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, № 4. – С. 27–36. – DOI 10.33764/2411-1759-2020-25-4-27-36.

32 Кемербаев, Н. Т. Маркшейдерское обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных парков / Н. Т. Кемербаев. – Текст : непосредственный // Маркшейдерское и геологическое обеспечение горных работ : сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции ; редкол. И. Е. Павлова, Е. А. Романько. – Москва : Перо, 2022. – С. 27–29.

33 Кемербаев, Н. Т. Новые задачи геодезии в автоматизированной системе управления промышленным предприятием / Н. Т. Кемербаев, А. А. Шоломицкий. – Текст : непосредственный // Интерэкспо ГЕО-Сибирь. XVII Междунар. науч.

конгр., 19–21 мая 2021 г., Новосибирск : сб. материалов в 8 т. Т. 1 : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия». – Новосибирск : СГУГиТ, 2021. – С. 35–39. – DOI 10.33764/2618-981X-2021-1-35-39.

34 Кластеризация точек на регулярной сети. – URL: <http://habrahabr.ru/post/138185/> (дата обращения: 23.09.2021). – Текст : электронный.

35 Корн, Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – Москва : Наука, 1973. – 832 с. – Текст : непосредственный.

36 Костюк, Ю. Л. Алгоритмы векторизации цветных растровых изображений на основе триангуляции и их реализация / Ю. Л. Костюк, А. Б. Кон, Ю. Л. Новиков. – Текст : непосредственный // Вестник Томского государственного университета. – 2003. – № 280. – С. 275–280

37 Костюк, Ю. Л. Распознавание граней трехмерных объектов по данным лазерного сканирования / Ю. Л. Костюк, М. И. Литовченко. – Текст : непосредственный // Информационные технологии и математическое моделирование (ИТММ-2017) : материалы XVI Международной конференции им. А. Ф. Терпугова. 2017. – С. 55–61.

38 Котельников, С. И. Применение технологии лазерного сканирования для мониторинга нефтеналивных резервуаров / С. И. Котельников. – Текст : непосредственный // Маркшейдерский вестник. – 2016. – № 2. – С. 36–40.

39 Круглов, В. В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика / В. В. Круглов, В. В. Борисов. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с. – Текст : непосредственный.

40 Кукарцев, В. В. Аппроксимация данных поверхности растровых карт в геоинформационной системе / В. В. Кукарцев, О. А. Антамошкин. – Текст : непосредственный // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнева. – 2012. – Вып. 3 (43). – С. 29–32.

41 Кулешов, С. В. Объектная локализация семантических блоков на растровых изображениях / С. В. Кулешов, А. А. Зайцева. – Текст : непосредственный // Труды СПИИРАН. – 2008. – Выпуск 7. – С. 41–47.

42 Лазерное сканирование и 3D-моделирование в промышленности. – Текст : электронный // Сайт компании Промышленная геодезия. – URL: <https://www.promgeo.com/services/engineering/industrial/>.

43 Лебедев, Б. Ф. Исследование влияние наклепа на хладноломкость стали и сварных соединений / Б. Ф. Лебедев. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1958. – № 1. – С. 28–31.

44 Лебедев, Б. Ф. Исследование прочности сварных соединений нефтерезервуаров, изготавливаемых методом сворачивания : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лебедев Б. Ф. – Киев, 1956. – 16 с. – Текст : непосредственный.

45 Лебедев, Б. Ф. Прочность сварных соединений вертикальных резервуаров, изготовляемых методом сворачивания / Б. Ф. Лебедев. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1956. – № 1. – С. 58–64.

46 Левитин А. В. Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. Глава 10. Ограничения мощности алгоритмов: деревья принятия решения. – Москва : Вильямс, 2006. – С. 409–417. – Текст : непосредственный.

47 Лисейкин, В. Д. Обзор методов построения структурных сеток / В. Д. Лисейкин. – Текст : непосредственный // Журнал вычисл. математики и мат. физики. – 1996. – Т. 36, № 1. – С. 3–41.

48 Мельников, Н. П. Пути прогресса в области металлических конструкций / Н. П. Мельников. – Москва : Стройиздат, 1974. – 136 с. – Текст : непосредственный.

49 Мониторинг и инспектирование резервуаров Leica MS60 и Leica RTC360. – Текст : электронный // Технология традиционная и лазерное сканирование Гексагон. – URL: [https://kzsection.info/green/monitoring-i-inspektirovanie-rezervuarov-rvs-bullity-leica-ms60-i-leica-rtc360/035\\_caWsqq5pq3k.html](https://kzsection.info/green/monitoring-i-inspektirovanie-rezervuarov-rvs-bullity-leica-ms60-i-leica-rtc360/035_caWsqq5pq3k.html). – Текст : электронный.

50 Наземное лазерное сканирование / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. – Новосибирск : СГГА, 2009. – 261 с. – Текст : непосредственный.

51 Нахождение связных областей на изображениях. – URL: <https://www.mallenom.ru/company/publications/321/>. – Текст : электронный.

52 Новый подход к эксплуатации и ремонту оборудования на машиностроительных предприятиях ОПК. – URL: <https://ufastanki.ru/sarticles/0/41>. – Текст : электронный.

53 О промышленной безопасности опасных производственных объектов : федеральный закон от 21.07.97 № 116-ФЗ. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

54 Обеспечение пожарной безопасности на топливно-энергетических объектах посредством инженерно-геодезического контроля / П. В. Галкин, В. П. Спиридонов, А. А. Копылов, С. А. Баженов. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – № 5 (109). – С. 17–21.

55 Оскорбин, Н. М. Сглаживание массива данных рельефа с использованием сплайновых поверхностей / Н. М. Оскорбин, С. И. Суханов, Л. Ю. Федин. – Текст : электронный // Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 112–115. – URL: <http://izvestia.asu.ru/2010/1/info/TheNewsOfASU-2010-1-info-13.pdf>.

56 Основы пространственного анализа в растровых ГИС : учебно-методическое пособие / сост.: А. А. Савельев, С. С. Мухарамова, Н. А. Чижикова, А. Г. Пилюгин. – Казань : Казанский университет, 2015. – 59 с. – Текст : непосредственный.

57 Паклин, Н. Б. Бизнес-аналитика: от данных к знаниям : учебное пособие. 2-е изд. / Н. Б. Паклин, В. И. Орешков. – Санкт-Петербург : Питер, 2013. – С. 428–472. – Текст : непосредственный.

58 Писанко, Н. М. Комплексное решение вопроса о допусках при изготовлении сварных вертикальных цилиндрических резервуаров / Н. М. Писанко. – Текст : непосредственный // Сб. трудов Московского инженерно-строительного института им. В. В. Куйбышева. – 1962. – Вып. 18. – С. 57–82.

59 Проверка и градуировка резервуаров методом лазерного сканирования. – Текст : электронный // Сайт СоюзГипрозем. – URL: <http://www.souzgiprozem.ru/izyskaniya-graduirovka-reservuarov-nalivnyh.html>.

60 Повышение работоспособности вертикальных монтажных сварных соединений стенки цилиндрических резервуаров, построенных из рулонированных заготовок / Ю. П. Барвинко, В. М. Голинько, А. Ю. Барвинко, А. В. Перельмутер, Г. В. Кулеба. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 2001. – № 7 (580). – С. 27–33.

61 Поповский, Б. В. Индустриальная технология и поточность в сооружении сварных вертикальных цилиндрических резервуаров : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Б. В. Поповский. – Киев, 1957. – 17 с. – Текст : непосредственный.

62 Поповский, Б. В. О современном состоянии и дальнейшем развитии метода рулонирования / Б. В. Поповский, М. К. Сафарян. – Текст : непосредственный // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 1966. – № 10. – С. 8–11.

63 Поповский, Б. В. Опыт монтажа крупных резервуаров и газгольдеров с применением рулонированных конструкций / Б. В. Поповский, Г. В. Линевиц. – Текст : непосредственный // Тематический сборник. – Москва : ЦБТИ, 1962. – С. 74–97.

64 Поспелов, Г. С. Искусственный интеллект – основа новой информационной технологии / Г. С. Поспелов. – Москва : Наука, 1988. – 278 с. – Текст : непосредственный.

65 Почтовик, П. Г. Экспериментальное натурное исследование напряженно-деформированного состояния стенки резервуара, имеющей отклонение от правильной геометрической формы у вертикального монтажного шва / П. Г. Почтовик. – Текст : непосредственный // Металлические конструкции : сборник трудов МИСИ. – Москва, 1985. – С. 195–200.

66 Предварительная обработка изображений. – Текст : электронный // Национальная библиотека им. Н. Э. Баумана. – URL: [https://ru.bmstu.wiki/Предварительная\\_обработка\\_изображений](https://ru.bmstu.wiki/Предварительная_обработка_изображений).

67 Применение лазерного сканирования при мониторинге нефтяных резервуаров. – Текст : электронный // Сайт SCANENG. – URL: <https://laserscanningeng.ru/blog/primenenie-lazernogo-skanirovaniya-pri-monitoringe-neftyanyh-rezervuarov/>.

68 Промышленная безопасность. Ущерб от аварий на нефтегазовых объектах в 2020 году вырос на 76 %. – URL: [https://www.profiz.ru/pb/blog/post\\_4705](https://www.profiz.ru/pb/blog/post_4705). – Текст : электронный.

69 Раевский, В. Г. Изготовление стальных вертикальных резервуаров методом сворачивания / В. Г. Раевский. – Москва : Гостоптехиздат, 1952. – 116 с. – Текст : непосредственный.

70 Раевский, В. Г. Новый метод изготовления стационарных сварных резервуаров / В. Г. Раевский. – Текст : непосредственный // Автогенное дело. – 1946. – № 5/6. – С. 17–20.

71 Раевский, Г. В. Разработка, исследование и внедрение новых способов изготовления сварных листовых конструкций : доклад-сообщение опубл. работ, представляемых на соискание ученой степени доктора технических наук. – Киев, 1963. – 33 с.

72 Разлив дизельного топлива в Норильске. – URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Разлив\\_дизельного\\_топлива\\_в\\_Норильске](https://ru.wikipedia.org/wiki/Разлив_дизельного_топлива_в_Норильске). – Текст : электронный.

73 РД 153-112-017–97. Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров. – Уфа : Издательство УГНТУ, 1997. – 74 с. – Текст : непосредственный.

74 Розенштейн, И. М. Исследование хрупкого разрушения листовых сталей, применяемых в резервуаростроении : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / И. М. Розенштейн. – Москва, 1966. – 12 с. – Текст : непосредственный.

75 Розенштейн, И. М. К вопросу надежности резервуаров против хрупкого разрушения / И. М. Розенштейн, В. Г. Чернашкин. – Текст : непосредственный // Прочность материалов и конструкций при низких температурах : докл. I Всесоюзн. симпоз. по механике разрушения. – Киев : Наукова думка, 1984. – С. 195–205.

76 Рулонирование листовых конструкций : тематический сборник. – Москва : ЦБТИ, 1962. – 158 с. – Текст : непосредственный.

77 Сабитов, И. Х. Локальная теория изгибаний поверхностей / И. Х. Сабитов. – Текст : непосредственный // Итоги науки и техники. Серия. Современные проблемы математики. Фундаментальные направления. – 1989. – Т. 48. – С. 196–270.

78 Сафарян, М. К. Допускаемые отклонения от проектных размеров вертикальных цилиндрических резервуаров / М. К. Сафарян. – Текст : непосредственный // Строительство предприятий нефтяной промышленности. – 1956. – № 9. – С. 20–26.

79 Сафарян, М. К. Исследование геометрической формы стальных вертикальных цилиндрических резервуаров / М. К. Сафарян, Н. М. Писанко. – Текст : непосредственный // Труды «ВНИИСтройнефть». – 1957. – Выпуск IX. – С. 5–22.

80 Сафарян, М. К. Основные положения расчета цилиндрических и сферических оболочек на устойчивость (применительно к резервуаростроению) / М. К. Сафарян. – Текст : непосредственный // Монтажные работы в строительстве. – 1967. – Вып. III. – С. 20–33.

81 Сафарян, М. К. Прочностные испытания стальных резервуаров новых типов для хранения нефти и нефтепродуктов / М. К. Сафарян, Ю. К. Ищенко. – Текст : непосредственный // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1968. – № 1. – С. 7–13.

82 Сафарян, М. К. Стальные резервуары для хранения нефти и нефтепродуктов / М. К. Сафарян. – Москва : ОНТИ, 1958. – 240 с. – Текст : непосредственный.

83 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020664460 Российская Федерация. Reservoir Scan : № 2020662657 : дата поступления 22.10.2020 : дата регистрации 13.11.2020 / Шоломицкий А. А., Кемербаев Н. Т. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU). – Текст : непосредственный.

84 Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021668726 Российская Федерация. Tank Leveling : № 2021668356 : дата поступления 19.11.2021 : дата регистрации 119.11.2021 / Шоломицкий А. А., Кемербаев Н. Т. ; правообладатель Федеральное государственное бюджетное образова-

тельное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» (RU). – Текст : непосредственный.

85 Система ТОРО с различных точек зрения. – Текст : непосредственный // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2013. – № 3. – С. 10–14.

86 СНиП 3.03.01–87. Несущие и ограждающие конструкции. – Москва, 1988. – 188 с. – Текст : непосредственный.

87 СНиП III-18–75. Правила производства и приемки работ. – Москва, 1976. – 160 с. – Текст : непосредственный.

88 СНиП II-В.3–62. Стальные конструкции. Нормы проектирования. – Москва, 1963. – 62 с. – Текст : непосредственный.

89 СНиП II-В.5–62. Металлические конструкции. Правила изготовления, монтажа и приемки. – Москва, 1963. – 92 с. – Текст : непосредственный.

90 Современный метод проверки на деформации нефтеналивных резервуаров с помощью 3D лазерного сканирования. – Текст : электронный // Лазерное мир. – URL: <https://лазер.рф/2019/11/29/15085>.

91 Современный метод проверки на деформации РВС. – URL: <https://zen.yandex.ru/media/id/5d53b415ec575b00ada3bb66/sovremennyi-metod-proverki-na-deformacii-rvs-5d763c28f73d9d00ae3d3d6b>. – Текст : электронный.

92 СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/871001219>. – Текст : электронный.

93 СП 365.1325800.2017. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для хранения нефтепродуктов. Правила производства и приемки работ при монтаже. Дата введения 2018-06-14. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/550965736>. – Текст : электронный.

94 Стержанов, М. Методики выделения связанных компонент в штриховых бинарных изображениях / М. Стержанов. – URL: <https://www.graphicon.ru/html/2010/conference/RU/Se2/12.pdf>. – Текст : электронный.

95 СТО СА 03-004–2009. Трубчатые печи, резервуары, сосуды и аппараты нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств. Требования к техниче-

скому надзору, ревизии и отбраковке / Ассоциация «Ростехэкспертиза», ОАО «ВНИКТИнефтехимоборудование». – Волгоград : Издательство ВГИУ «Перемена», 2010. – 156 с. – Текст : непосредственный.

96 Стрельцов, В. И. Маркшейдерское обеспечение природопользования недр / В. И. Стрельцов, С. Г. Могильный. – Москва : Недра, 1989. – 205 с. – Текст : непосредственный.

97 Тагунов, А. М. Библиотека NL – Numerical Library / А. М. Тагунов, Н. Ю. Золотых. – URL: <http://www.uic.nnov.ru/~zny/nl/doc/html/index.html>. – Текст : электронный.

98 Тайманов, И. А. Лекции по дифференциальной геометрии. I. Кривые и поверхности : учебное пособие / И. А. Тайманов. – Новосибирск : Издательство НГУ, 2005. – 47 с. – Текст : непосредственный.

99 Технологии для мониторинга и калибровки резервуаров хранения нефти и нефтепродуктов. – URL: <https://www.youtube.com/watch?v=rBDF133VdUs>. – Текст : электронный.

100 Технология трехмерного лазерного сканирования как средство обеспечения безопасности объектов спортивной инфраструктуры / Д. А. Гура, Д. А. Беспятчук, С. В. Самарин, Н. М. Кирюникова, Э. Д. Лесовая. – Текст : непосредственный // Нанотехнологии в строительстве : научный интернет-журнал. – 2021. – Т. 13, № 4. – С. 259–263.

101 Тиханычев, О. В. О некоторых проблемах предметной области поддержки принятия решений / О. В. Тиханычев. – Текст : непосредственный // Программные продукты и системы. – 2016. – № 3. – С. 24–28. – DOI 10.15827/0236-235X.115.024-028.

102 Форсайт, Д. Компьютерное зрение. Современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс. – Москва : Вильямс, 2004. – 928 с. – Текст : непосредственный.

103 Хайкин, С. Нейронные сети : полный курс. 2-е изд. / С. Хайкин. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с. – Текст : непосредственный.

104 Шапиро, Л. Компьютерное зрение / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с. – Текст : непосредственный.

105 Шаршуков, Г. К. О фактических нагрузках резервуаров нефтеперекачивающих станций / Г. К. Шаршуков, П. Г. Почтовик. – Текст : непосредственный // Нефтепромысловое дело и транспорт нефти. – 1984. – № 6. – С. 41–43.

106 Шевченко, Ф. Л. Механика упругих деформируемых систем. Часть 2. Сложное напряженно-деформированное состояние : учебное пособие / Ф. Л. Шевченко. – Донецк : ДонНТУ, 2007. – 306 с. – Текст : непосредственный.

107 Шинкарев, Б. М. Вопросы технологии сварки строительных конструкций из листовой стали : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Б. М. Шинкарев. – Киев, 1967. – 24 с.

108 Шинкарев, Б. М. Меры борьбы с выпучиванием концов стыковых швов при автоматической сварке полотнищ / Б. М. Шинкарев. – Текст : непосредственный // Автоматическая сварка. – 1951. – № 6. – С. 78–84.

109 Шишкин, А. Реализация проектов с применением технологий 3D-моделирования на базе AVEVA PDMS в ООО «ЛУКОЙЛ-Нижегородниинепфтепроект» / А. Шишкин, А. Кутлаев. – URL: <https://sapr.ru/article/25001/>. – Текст : электронный.

110 Шоломицкий, А. А. Алгоритм определения оседаний днища вертикального стального резервуара по облаку точек лазерных отражений / А. А. Шоломицкий, Н. Т. Кемербаев. – Текст : непосредственный // Маркшейдерия и недропользование. – Март–апрель 2022. – № 2 (118). – С. 33–36.

111 Шоломицкий, А. А. Использование лазерного сканирования для мониторинга большепролетных сооружений / А. А. Шоломицкий, Е. К. Лагутина, Е. Л. Соболева. – Текст : непосредственный // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 43–57.

112 Шульц, Р. Определение геометрических параметров цилиндрических резервуаров по данным наземного лазерного сканирования // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия Горно-геологическая. – 2010. – Вып. 12 (173). – С. 37–47.

113 Шульц, Р. Преимущества и недостатки различных методов сшивки лазерных сканов / Р. Шульц. – Текст : непосредственный // Научные труды Донецкого

национального технического университета. Серия Горно-геологическая. – 2009. – Вып. 9 (143). – С. 140–145.

114 Шульц, Р. Расчет точности определения горизонтальных перемещений сооружений методом наземного лазерного сканирования / Р. Шульц. – Текст : непосредственный // Инженерная геодезия. – 2008. – № 54. – С. 311–320.

115 3D лазерное сканирование и градуировка резервуаров РВСПК-100000 на берегу залива Чихачёва Японского моря. – Текст : электронный // Сайт НГКИ. – URL: [https://www.ngce.ru/pg\\_projects255.html](https://www.ngce.ru/pg_projects255.html).

116 API Standard 650. Welded Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition. American Petroleum Institute, Washington, 2013. – Текст : непосредственный.

117 API Standard 653. Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fifth Edition. American Petroleum Institute, Washington, 2014. – Текст : непосредственный.

118 Automatic detection and classification of pole-like objects in urban point cloud data using an anomaly detection algorithm / Rodríguez-Cuenca B. et al. – Текст : непосредственный // Remote Sensing. – 2015. – Т. 7. – №. 10. – С. 12680–12703.

119 Baidurja, Ray. Unconventional micro-seismicity based enhanced 3D SRV estimator using advanced parameter-free concave methodology / Baidurja Ray, Avi Lin, Jianfu Ma. – Текст : непосредственный // SEG Technical Program Expanded Abstracts. – 2014. – P. 2304–2308.

120 Chang, J. A study of storage tank accidents / J. Chang, C.-C. Lin. – Текст : непосредственный // Journal of Loss Prevention in the Process Industries 19. – P. 51–59.

121 EN 14015:2004. Specification for the Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed, above ground, welded, steel tanks for the storage of liquids at ambient temperature and above. European committee for standardization, Brussels, 2004. – Текст : непосредственный.

122 EN 1993-4-2:2007. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 4-2: Tanks. European committee for standardization, Brussels, 2007. – Текст : непосредственный.

123 Evaluation of Stress-Strain State of Vertical Steel Tanks Using Laser Scanning Data / A. A. Sholomitskii<sup>1</sup>, S. N. Tsarenko, S. G. Mogilny, Z. M. Aukazhieva, N. T. Kemerbaev. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 8th International Conference on Industrial Engineering. ICIE 2022. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Springer, Cham. – P. 881–890. – DOI 10.1007/978-3-031-14125-6\_86.

124 Hexagon : официальный сайт. – URL: <https://geosystems.ru/shop/programmnoe-obespechenie-main>. – Текст : электронный.

125 IBM Maximo Asset Management. Comprehensive enterprise asset management for lifecycle management and resource management. – URL: <https://interprocom.ru/products/ibm/ibm-maximo-asset-management/>. – Текст : электронный.

126 Maximo Asset Management Documentation V 7.6.0.7. – URL: [https://www.ibm.com/support/knowledge-center/ru/SSLKT6\\_7.6.0.7/com.ibm.mam.doc/welcome.html](https://www.ibm.com/support/knowledge-center/ru/SSLKT6_7.6.0.7/com.ibm.mam.doc/welcome.html). – Текст : электронный.

127 Mennis, J. Функции алгебры кубических карт для пространственно-временного анализа / J. Mennis, P. Vigier, D. Tomlin. – Текст : непосредственный // Картография и географическая информатика. – 2005. – Vol. 32, No. 1. – P. 17–32.

128 Nixon, Mark S. Feature Extraction and Image Processing / Mark S. Nixon and Alberto S. Aguado // Academic Press, 2008. – С. 88. – Текст : непосредственный.

129 Nugumanova, J. History of geographical information systems development / J. Nugumanova, N. Kemerbayev. – Текст : непосредственный // Proceedings of the XVI International Scientific Conference for students and young scholars «GÝLYM JÁNE BILIM – 2021» L. N. Gumilyov ENU, Nur-Sultan, Kazakhstan. – 6286 с. – ISBN 978-601-337-539-7.

130 Pichugin, S. F. Accidents Analysis of Steel Vertical Tanks ICBI 2019 / S. F. Pichugin, L. A. Klochko. – Текст : непосредственный // Proceedings of the 2nd International Conference on Building Innovations. – P. 193–204. – DOI 10.1007/978-3-030-42939-3\_21.

131 Quinlan, J. R. Induction of Decision Trees / J. R. Quinlan. – Текст : непосредственный // Machine Learning. – Kluwer Academic Publishers, 1986. – No. 1. – P. 81–106.

132 Sholomitskii, A. Design and preliminary calculation of the accuracy of special geodetic and mine surveying networks / A. Sholomitskii, E. Lagutina. – Текст : непосредственный // International science and technology conference «Earth science», IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 272. – P. 022010. – DOI 10.1088/1755-1315/272/2/022010.

133 Tomlin, C. D. Geographic Information Systems and Cartographic Modelling / Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1990.

134 Typical damage in steel storage tanks in operation / L. Zdravkov et al. – Текст : непосредственный / Procedia Structural Integrity 22. – P. 291–298.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

## ФИЛЬТРАЦИЯ ОБЛАКОВ ТЛО И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЕРВУАРОВ



а)



б)



в)



з)



д)

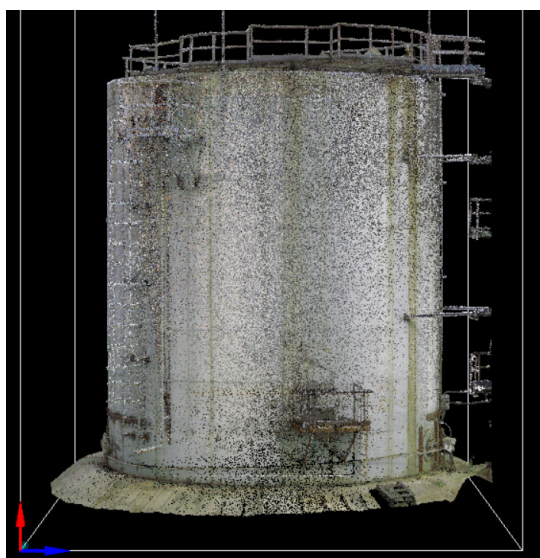


е)

Рисунок А.1 – Фильтрация облака ТЛО резервуара № 2: а) исходное облако  $N = 999\ 464$ ; б)  $N = 897\ 543$ , отсечение  $\Delta R = 120$  мм; в) отсечение  $\Delta R = 60$  мм; з) отсечение  $\Delta R = 30$  мм; д) отсечение  $\Delta R = 20$  мм; е) отсечение  $\Delta R = 10$  мм

Таблица А.1 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 2

Допуск $\Delta$ , мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
200	999 464		5,220	0,0042
120	897 543	37 801	5,220	0,0042
100	890 410	37 797	5,220	0,0042
80	884 355	37 786	5,220	0,0042
60	877 958	37 773	5,220	0,0042
40	869 772	37 763	5,220	0,0042
30	856 400	37 721	5,220	0,0042
20	785 868	37 039	5,220	0,0042
10	580 366	34 137	5,220	0,0044



а)



б)



в)



г)

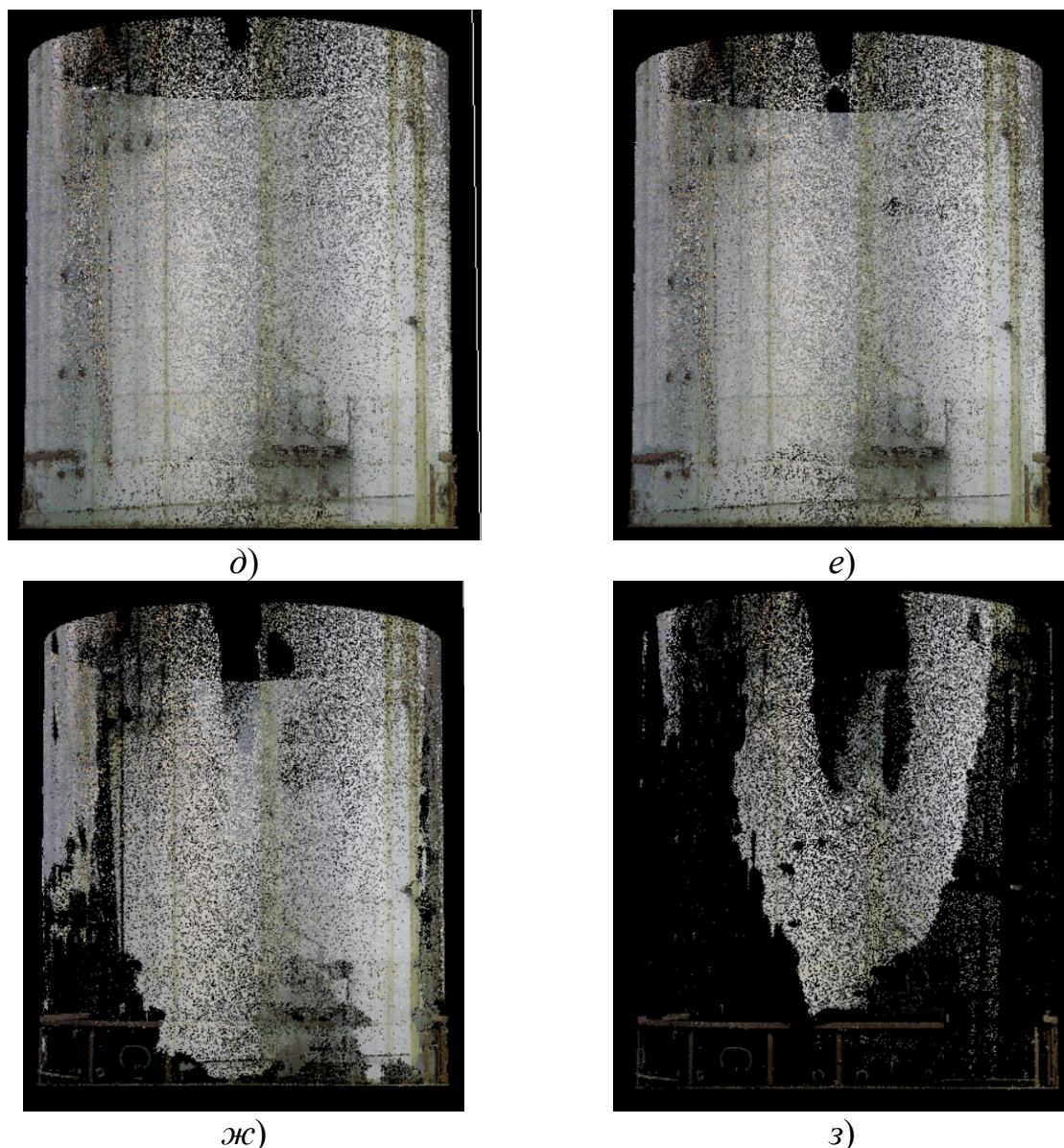


Рисунок А.2 – Фильтрация облака ТЛО резервуара № 3: а) без фильтрации; б) отсечение  $\Delta R = 200$  мм; в) отсечение  $\Delta R = 120$  мм; г) отсечение  $\Delta R = 100$  мм; д) отсечение  $\Delta R = 80$  мм; е) отсечение  $\Delta R = 60$  мм; ж) отсечение  $\Delta R = 40$  мм; з) отсечение  $\Delta R = 20$  мм

Таблица А.2 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 3

Допуск, мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
200	1 546 887	38 020	5,204	0,0029
120	1 534 921	37 986	5,204	0,0029
100	1 531 758	37 975	5,204	0,0029
80	1 524 678	37 925	5,204	0,0029
60	1 448 483	37 530	5,204	0,0029
40	409 913	26 694	5,215	0,0032
20	88 425	7 459	5,238	0,0041

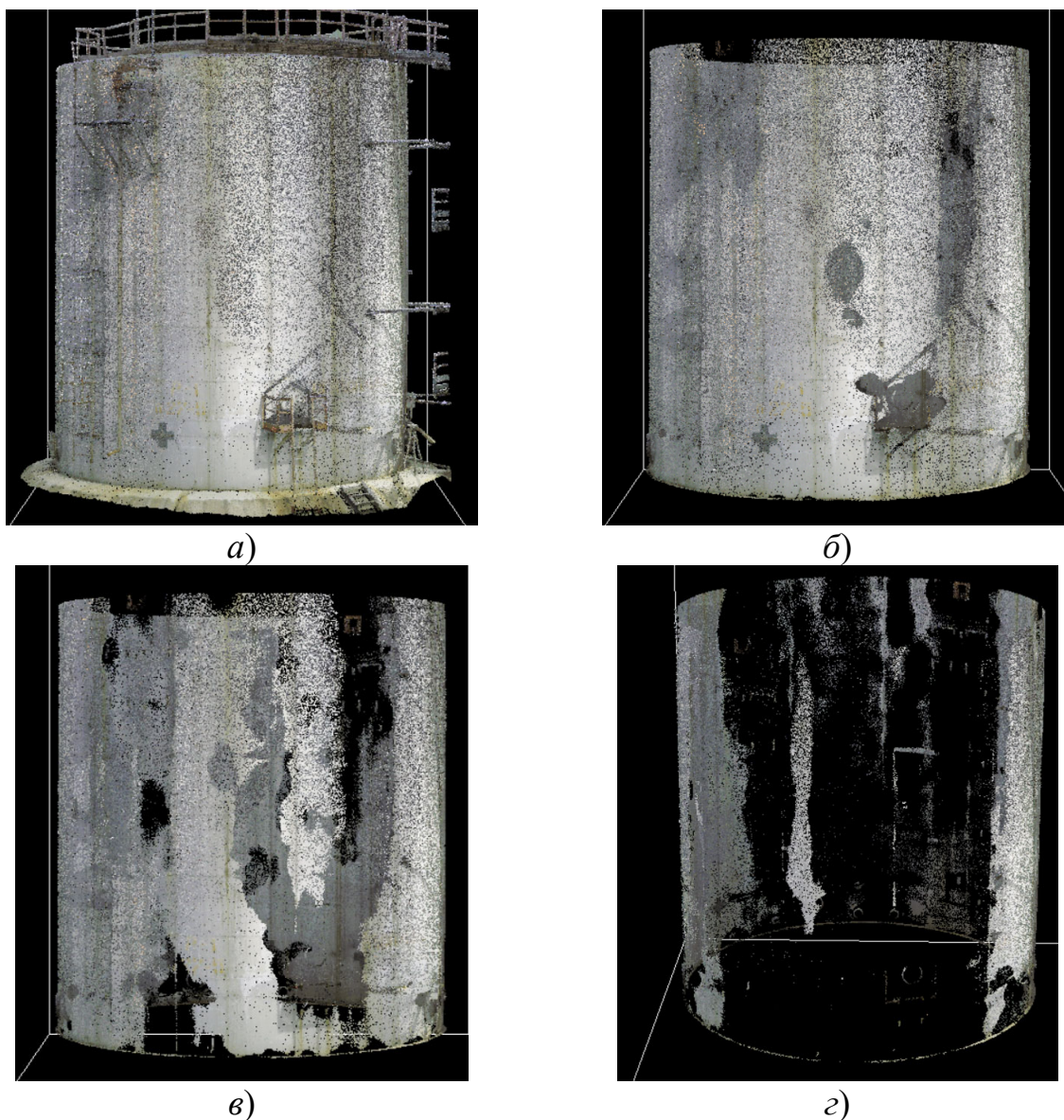


Рисунок А.3 – Фильтрация облака ТЛЮ резервуара № 1:  
 а) исходное облако  $N = 3\,118\,845$  точек; б) отсечение  $\Delta R = 75$ ;  
 в) отсечение  $\Delta R = 55$  мм; г) отсечение  $\Delta R = 45$  мм

Таблица А.3 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 4

Допуск $\Delta$ , мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
35	585 156	19 090	5,225	0,0031
45	1 379 742	32 953	5,207	0,0036
55	1 744 377	37 264	5,209	0,0020
65	1 777 484	37 662	5,208	0,0036
75	1 820 332	37 973	5,207	0,0036
100	1 830 022	38 006	5,207	0,0036
120	1 836 360	38 015	5,207	0,0036



a)



б)



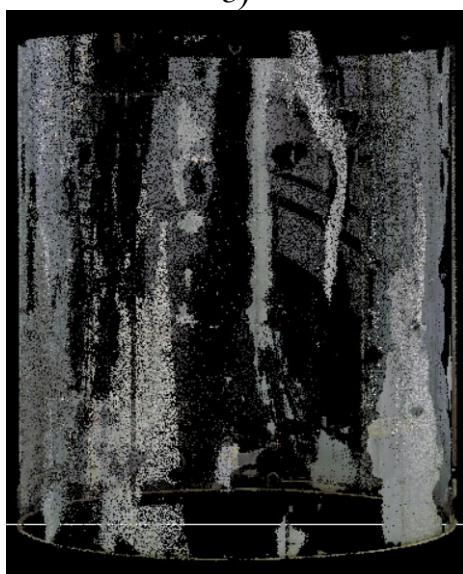
в)



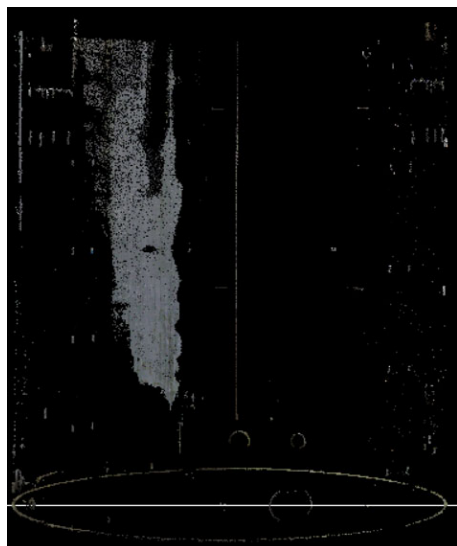
г)



д)



е)



ж)

Рисунок А.4 – Фильтрация облака ГЛЮ резервуара № 5: а) исходное облако; б) отсечение  $\Delta R = 200$  мм; в) отсечение  $\Delta R = 100$  мм; г) отсечение  $\Delta R = 80$  мм; д) отсечение  $\Delta R = 60$  мм; е) отсечение  $\Delta R = 40$  мм; ж) отсечение  $\Delta R = 20$  мм

Таблица А.4 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 5

Допуск $\Delta$ , мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
200	1 738 329	37 696	5,204	0,0037
120	1 718 682	37 681	5,204	0,0037
100	1 715 210	37 675	5,204	0,0037
80	1 692 489	37 533	5,204	0,0037
60	1 547 308	36 068	5,204	0,0037
40	358 067	19 685	5,213	0,0023
20	59 381	3 009	5,267	0,0027



а)



б)



а)



б)



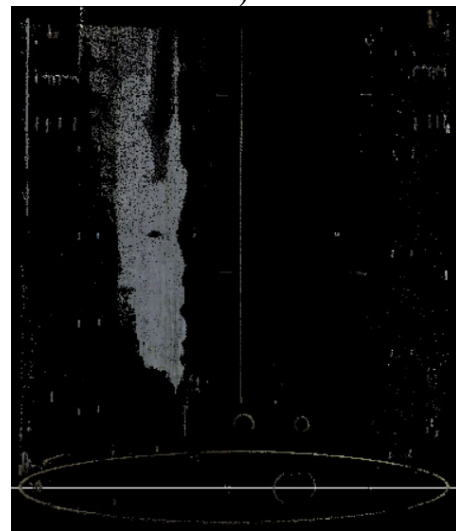
в)



г)



д)



е)



ж)



з)

Рисунок А.5 – Фильтрация облака ТЛО резервуара № 6: а) исходное облако; б) отсечение  $\Delta R = 200$  мм; в) отсечение  $\Delta R = 120$  мм; г) отсечение  $\Delta R = 100$  мм; д) отсечение  $\Delta R = 80$  мм; е) отсечение  $\Delta R = 60$  мм; ж) отсечение  $\Delta R = 40$  мм; з) отсечение  $\Delta R = 20$  мм

Таблица А.5 – Влияние допуска отсечения на определение параметров резервуара № 6

Допуск $\Delta$ , мм	Точек после фильтрации	Интерполировано узлов сетки	$R$ , м	$\Delta R$ , м
200	1 738 329	37 696	5,204	0,0037
120	1 718 682	37 681	5,204	0,0037
100	1 715 210	37 675	5,204	0,0037
80	1 692 489	37 533	5,204	0,0037
60	1 547 308	36 068	5,204	0,0037
40	358 067	19 685	5,213	0,0023
20	59 381	3 009	5,267	0,0027

ПРИЛОЖЕНИЕ Б  
(обязательное)  
РЕЗЕРВУАР № 2



Рисунок Б1 – Исходное облако ТЛЮ

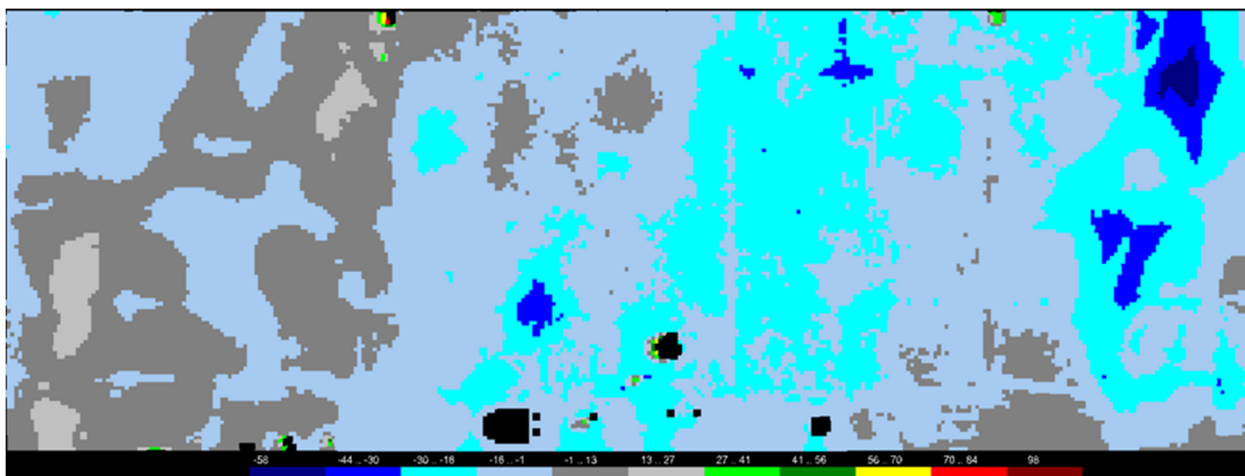


Рисунок Б.2 – Развертка поверхности резервуара

Здесь и далее черным цветом показаны ячейки, в которых значение показателя не определено. Легенда рисунков выполняется по программе автоматической классификации по 11 интервалам, поэтому цветовые показатели рисунков могут изменяться при изменении диапазона изменения классифицируемого признака.

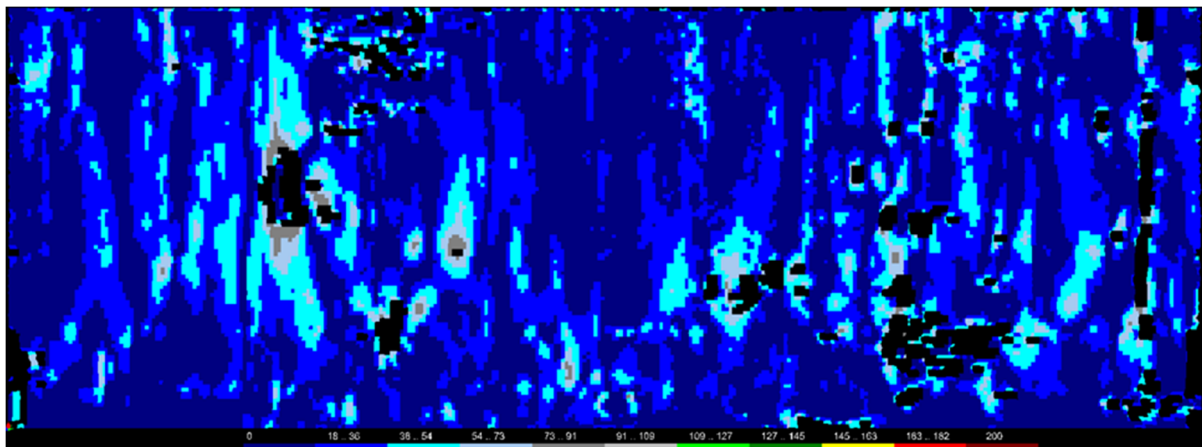


Рисунок Б.3 – Поверхность уклонов

Таблица Б.1 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,018	18 585
0,018	0,036	12 200
0,036	0,054	4 301
0,054	0,073	1 303
0,073	0,091	514
0,091	0,109	280
0,109	0,127	166
0,127	0,145	104
0,145	0,163	54
0,163	0,182	29
0,182	0,2	23



Рисунок Б.4 – Гистограмма распределения уклонов

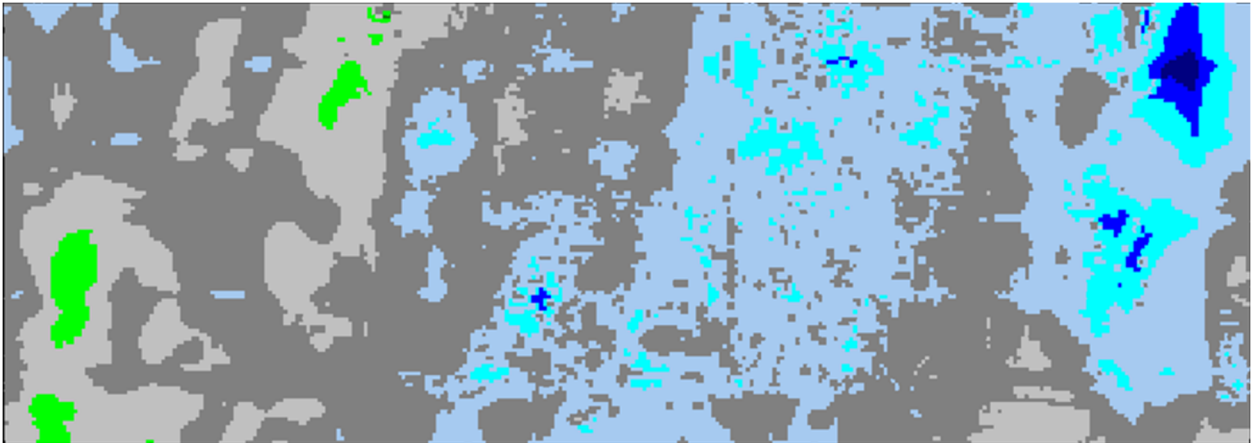


Рисунок Б.5 – Интерполяция пропусков

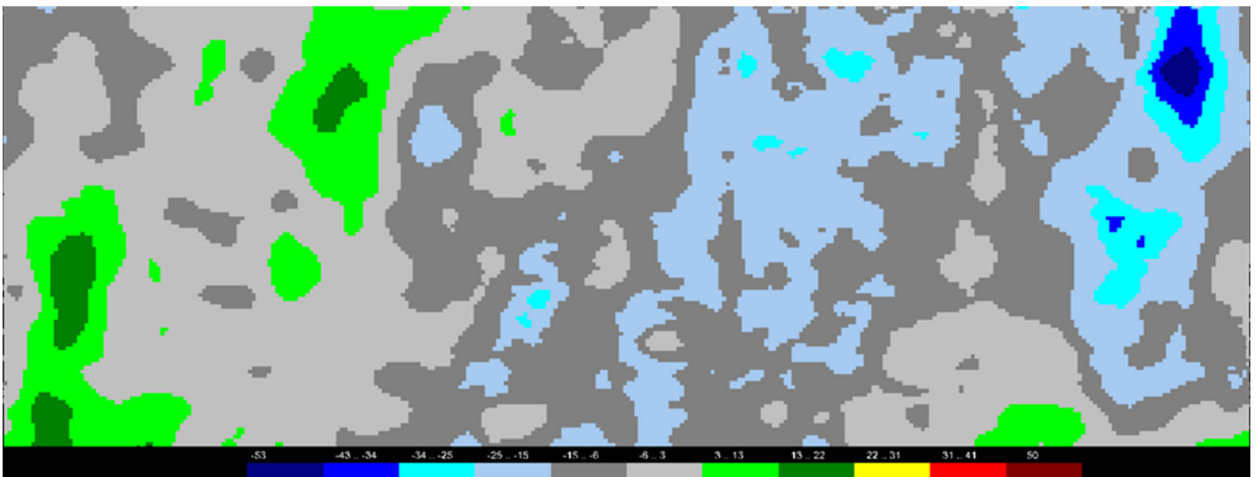


Рисунок Б.6 – Сглаживание поверхности

Диапазон до сглаживания:  $-0,058-0,073$ .

Диапазон после сглаживания:  $-0,0525-0,050$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ В  
(обязательное)  
РЕЗЕРВУАР № 3



Рисунок В1 – Исходное облако ТЛЮ

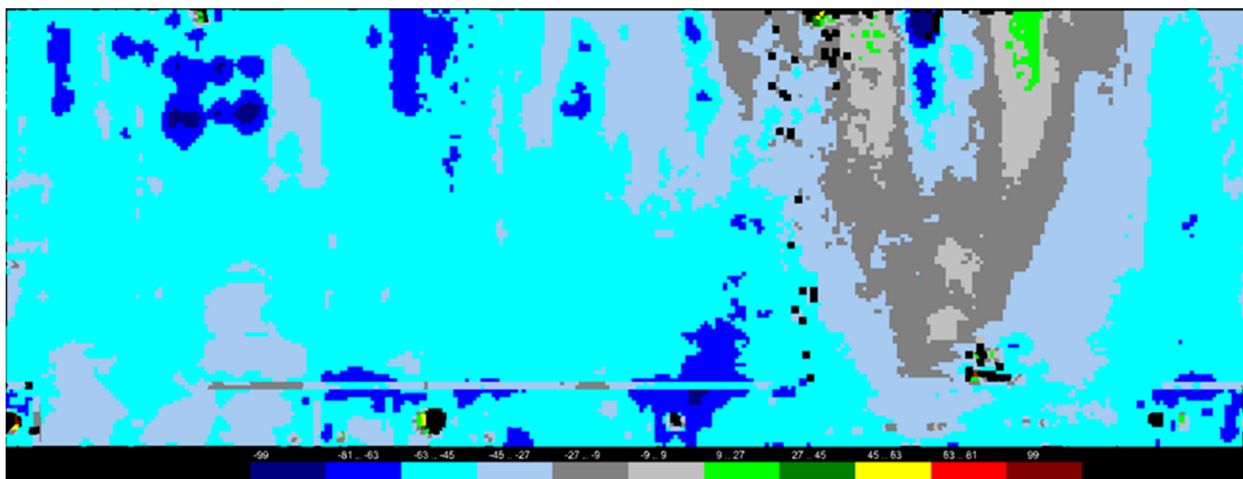


Рисунок В.2 – Развертка поверхности резервуара

Здесь и далее черным цветом показаны ячейки, в которых значение показателя не определено. Легенда рисунков выполняется по программе автоматической классификации по 11 интервалам, поэтому цветовые показатели рисунков могут изменяться при изменении диапазона изменения классифицируемого признака.

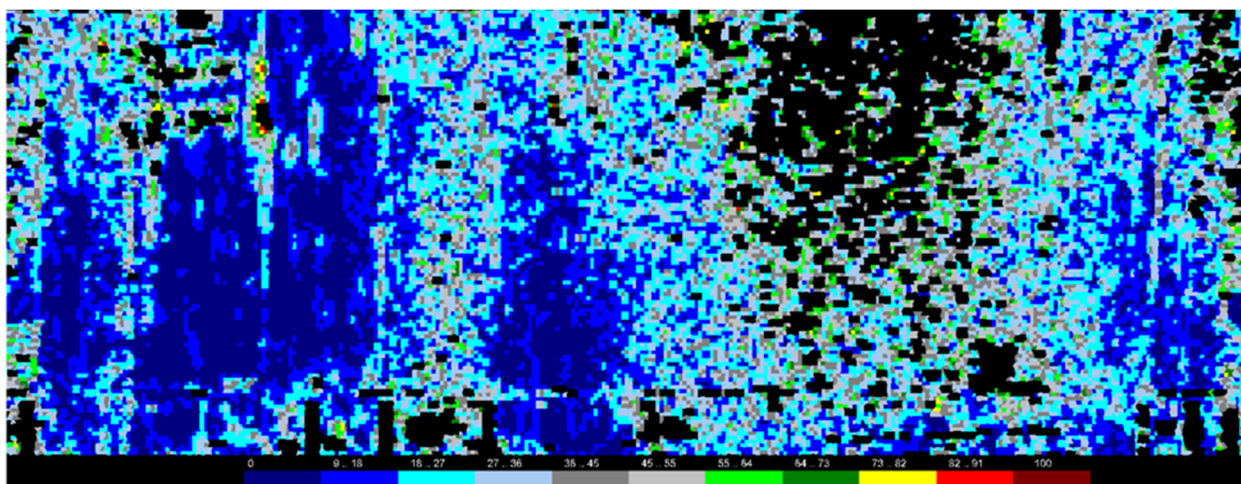


Рисунок В.3 – Поверхность уклонов

Таблица В.1 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,009	6 127
0,009	0,018	8 090
0,018	0,027	7 107
0,027	0,036	5 344
0,036	0,045	3 590
0,045	0,055	2 292
0,055	0,064	1 463
0,064	0,073	968
0,073	0,082	636
0,082	0,091	363
0,091	0,1	244



Рисунок В.4 – Гистограмма распределения уклонов

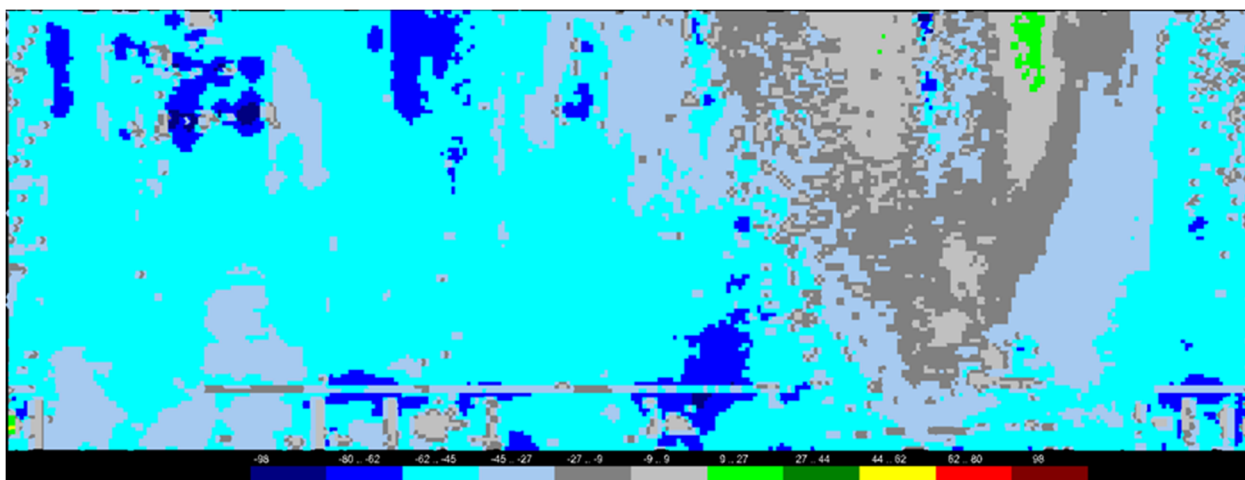


Рисунок В.5 – Интерполяция пропусков

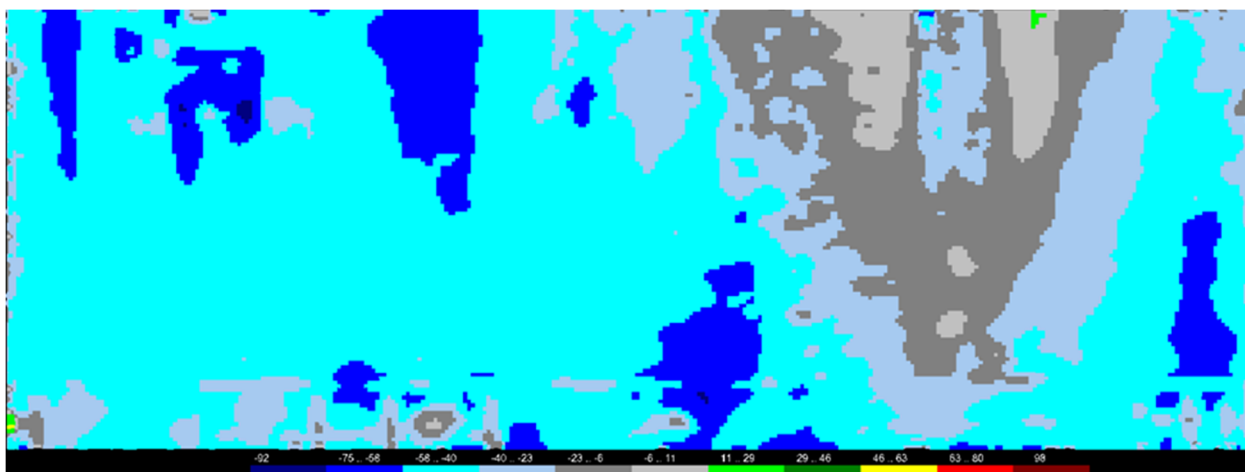


Рисунок В.6 – Сглаживание поверхности

Диапазон до сглаживания:  $-0,0978-0,0976$ .

Диапазон после сглаживания:  $-0,0921-0,0976$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ Г  
(обязательное)  
РЕЗЕРВУАР № 4



Рисунок Г.1 – Исходное облако ТЛЮ

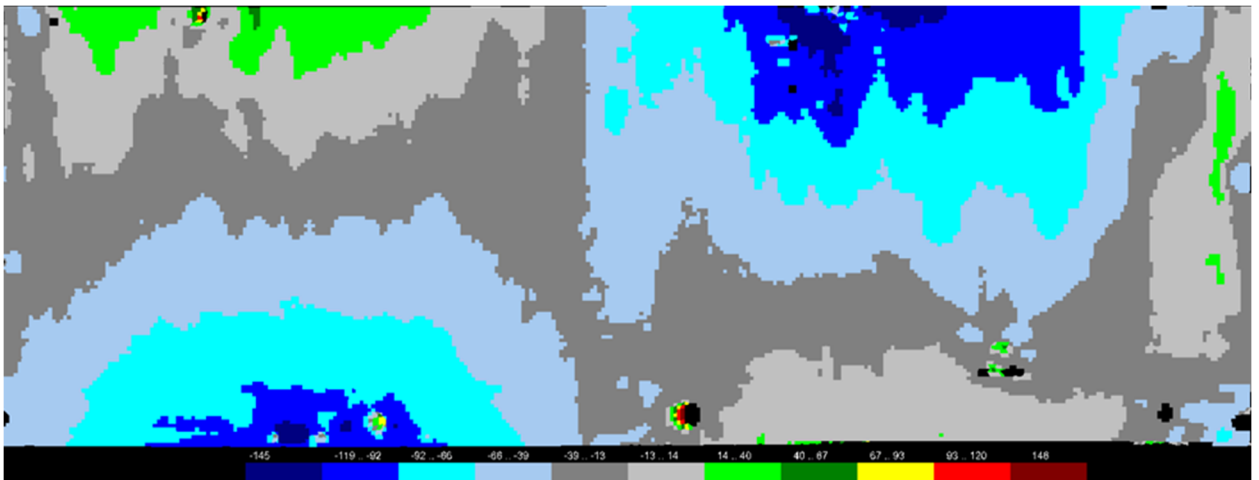


Рисунок Г.2 – Развертка поверхности резервуара

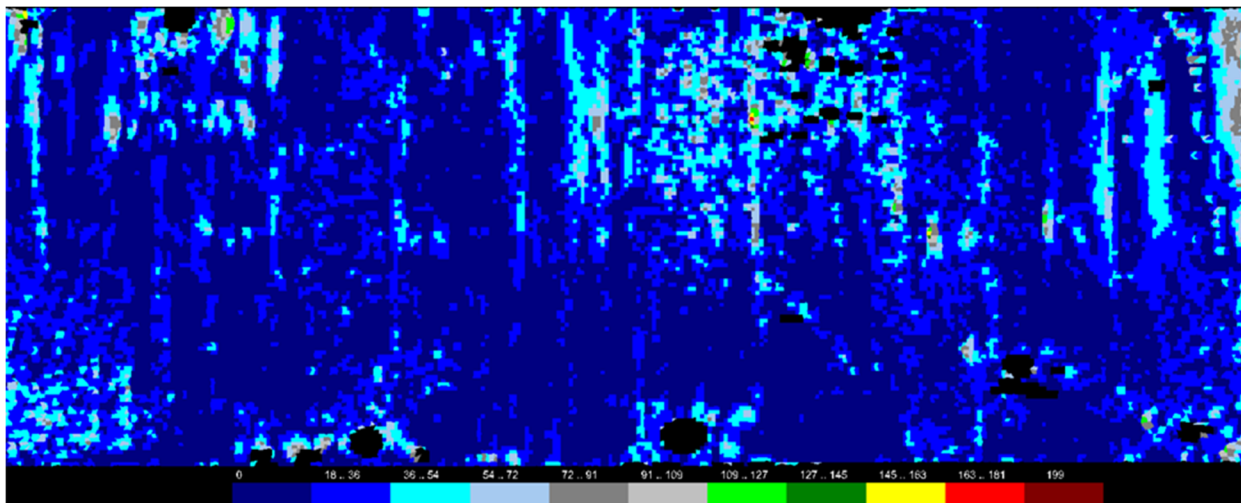


Рисунок Г.3 – Поверхность уклонов

Таблица Г.1 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,018	20 176
0,018	0,036	11 877
0,036	0,054	3 442
0,054	0,072	1 037
0,072	0,091	404
0,091	0,109	154
0,109	0,127	97
0,127	0,145	70
0,145	0,163	60
0,163	0,181	60
0,181	0,199	39



Рисунок Г.4 – Гистограмма распределения уклонов

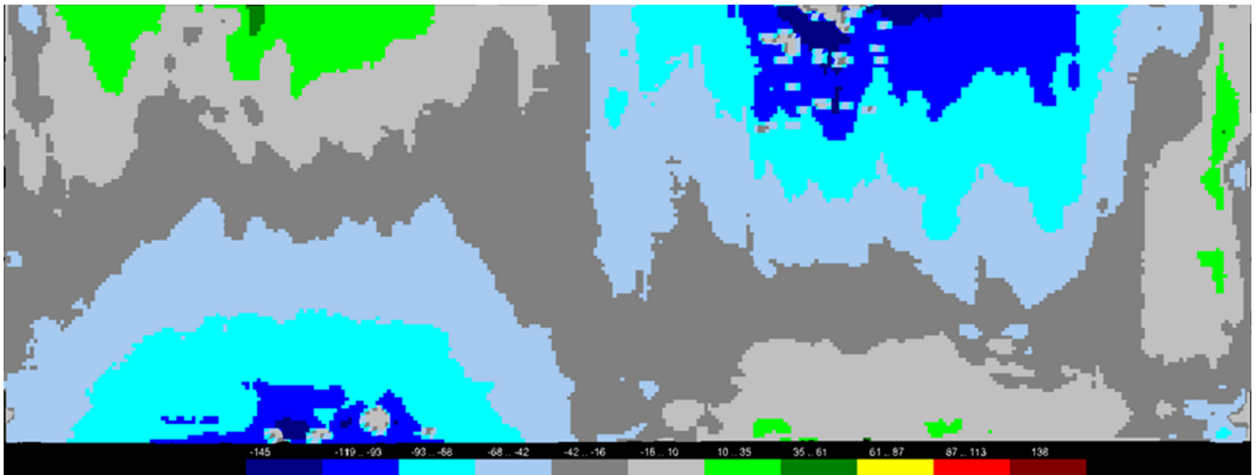


Рисунок Г.5 – Интерполяция пропусков

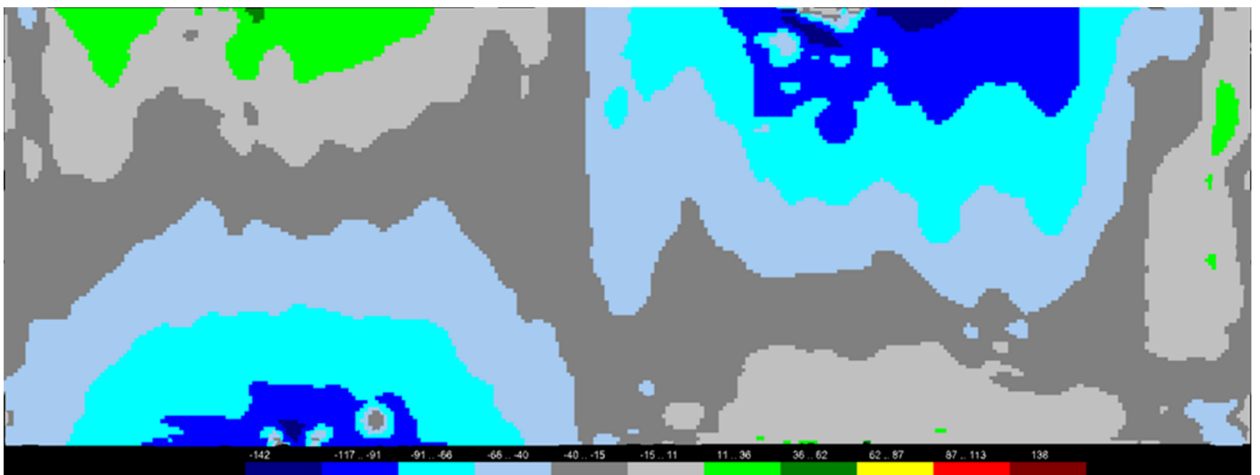


Рисунок Г.6 – Сглаживание поверхности

ПРИЛОЖЕНИЕ Д  
(обязательное)  
РЕЗЕРВУАР № 5



Рисунок Д.1 – Исходное облако ТЛО

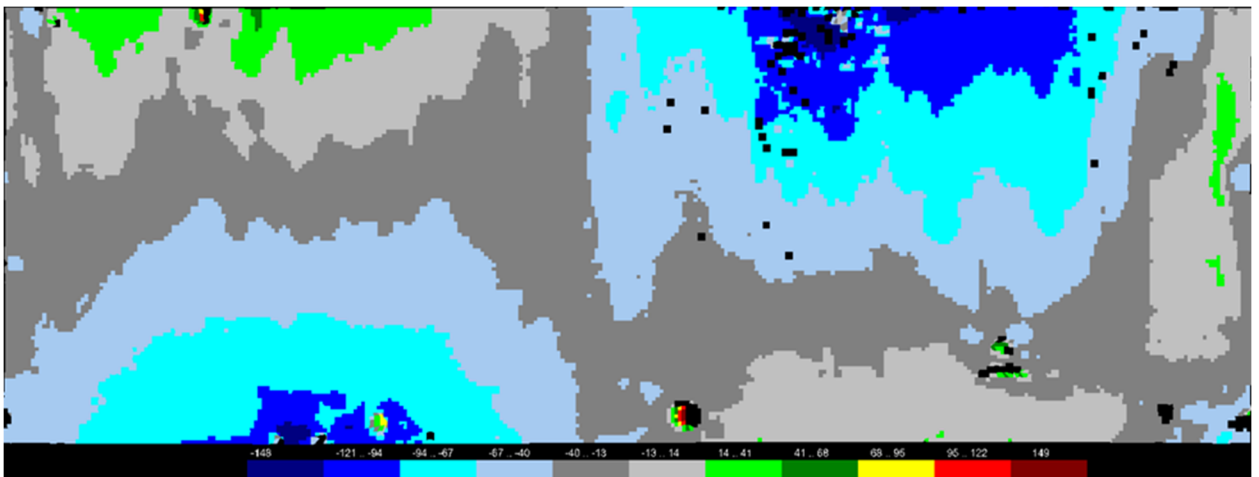


Рисунок Д.2 – Развертка поверхности резервуара

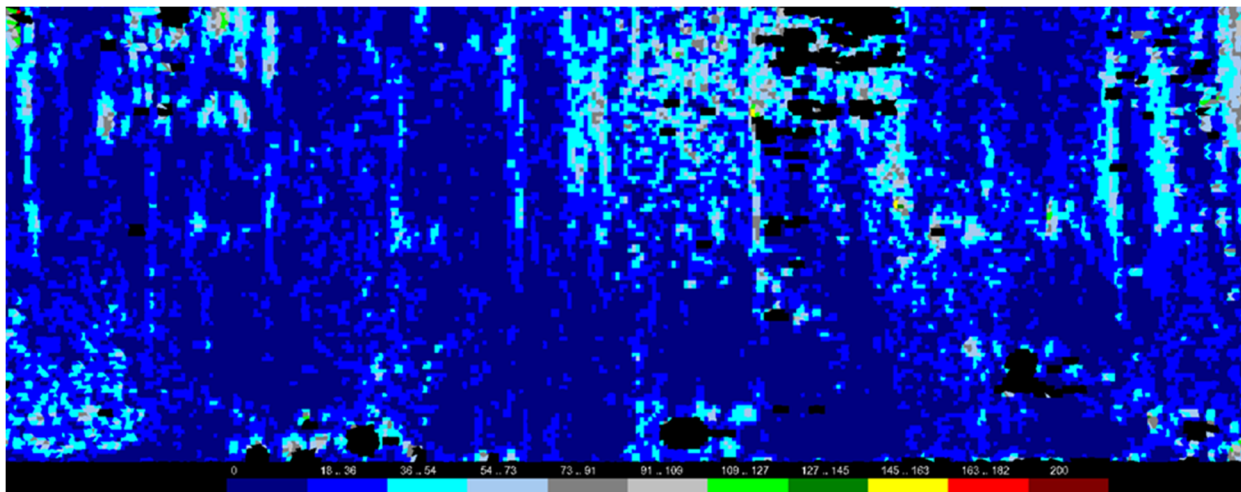


Рисунок Д.3 – Поверхность уклонов

Таблица Д.1 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,018	17 962
0,018	0,036	12 537
0,036	0,054	3 810
0,054	0,073	1 272
0,073	0,091	485
0,091	0,109	228
0,109	0,127	129
0,127	0,145	91
0,145	0,163	104
0,163	0,182	78
0,182	0,2	64



Рисунок Д.4 – Гистограмма распределения уклонов

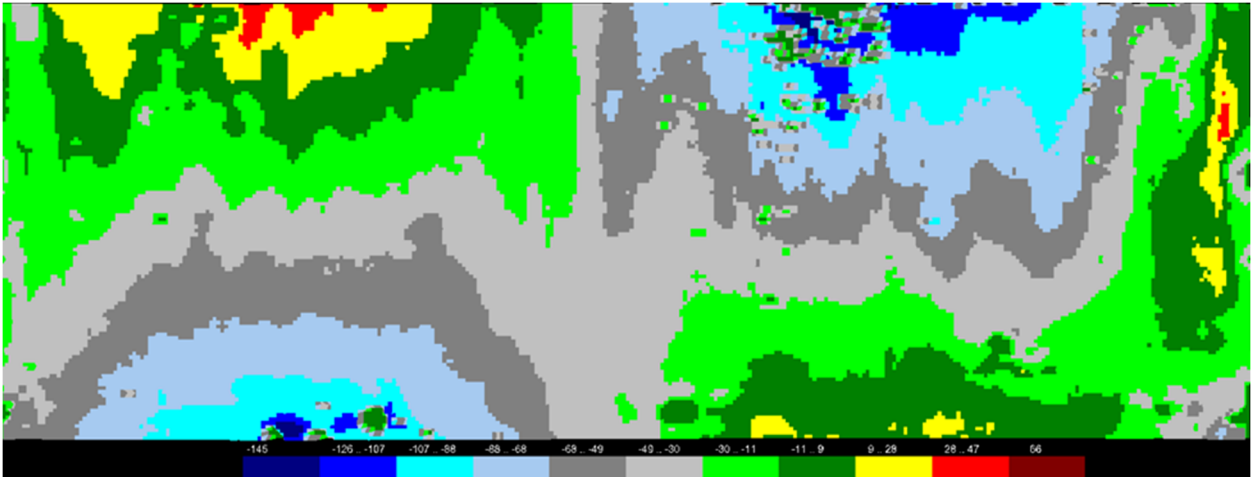


Рисунок Д.5 – Интерполяция пропусков

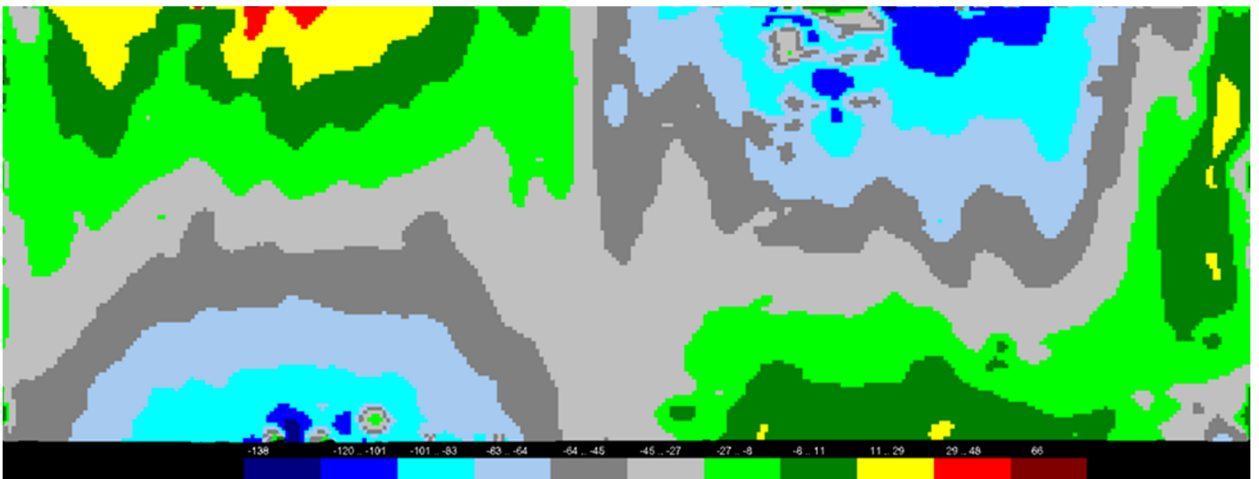


Рисунок Д.6 – Сглаживание поверхности

Диапазон до сглаживания:  $-0,1454-0,0664$ .

Диапазон после сглаживания:  $-0,1385-0,0664$ .

ПРИЛОЖЕНИЕ Е  
(обязательное)  
РЕЗЕРВУАР № 6



Рисунок Е.1 – Исходное облако ТЛО

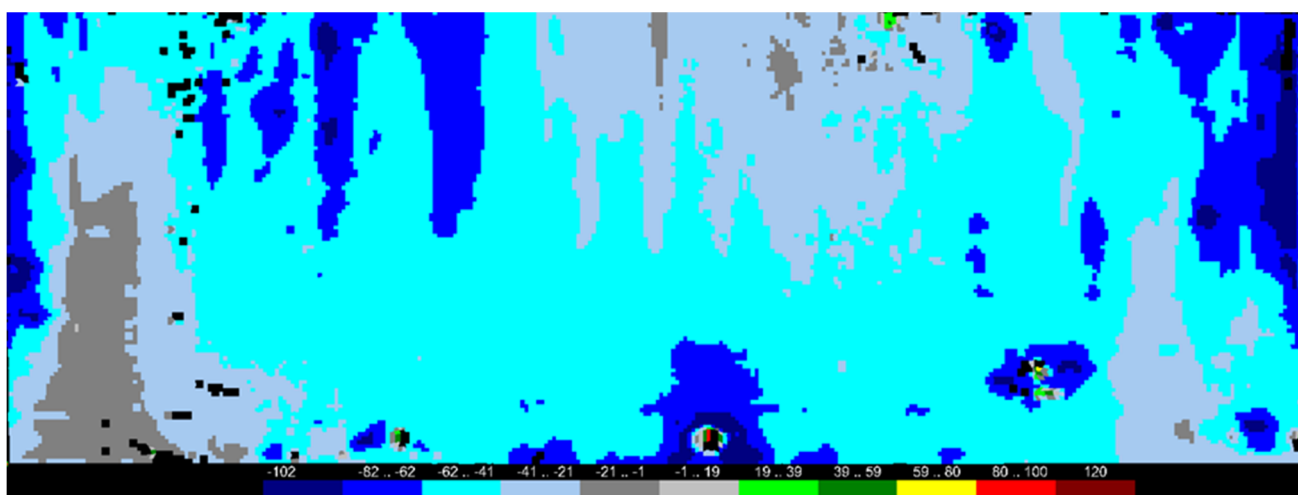


Рисунок Е.2 – Развертка поверхности резервуара

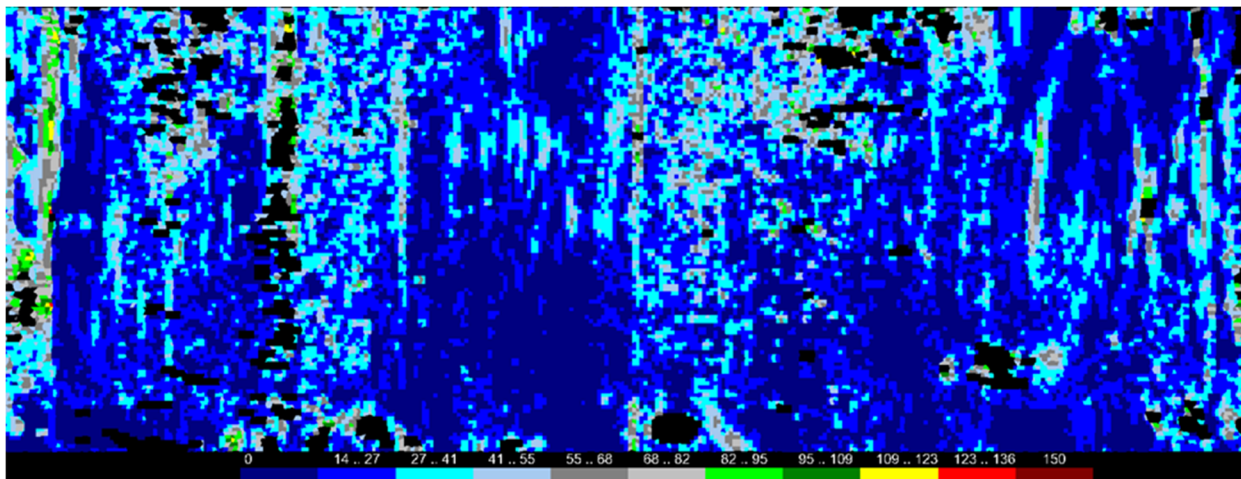


Рисунок Е.3 – Поверхность уклонов

Таблица Е.1 – Распределение числа ячеек сетки по интервалам уклона

Диапазон		Число
0	0,014	11 671
0,014	0,027	12 817
0,027	0,041	6 069
0,041	0,055	2 600
0,055	0,068	1 322
0,068	0,082	696
0,082	0,095	411
0,095	0,109	242
0,109	0,123	184
0,123	0,136	140
0,136	0,15	103



Рисунок Е.4 – Гистограмма распределения уклонов

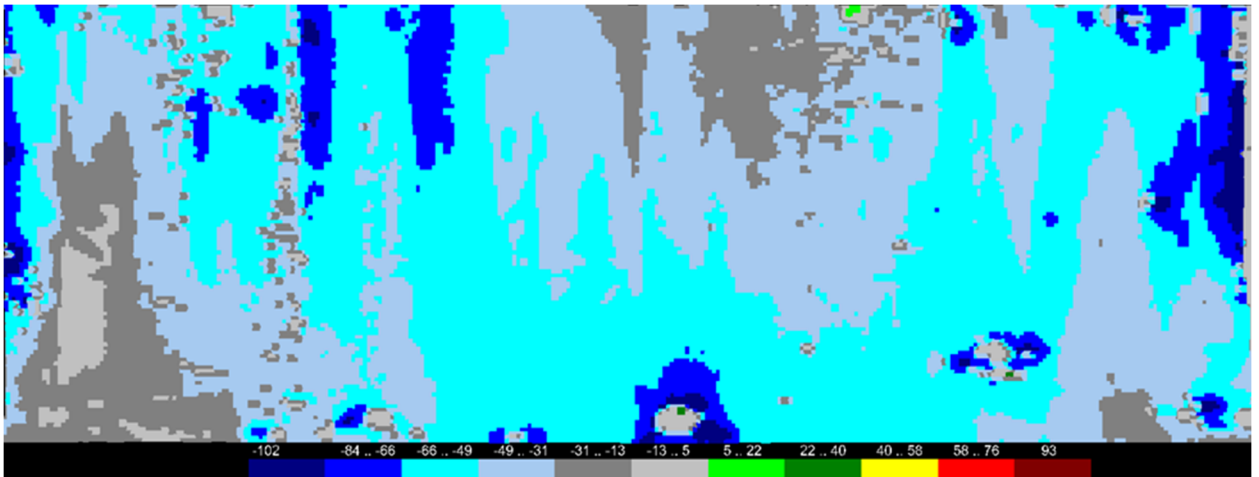


Рисунок Е.5 – Интерполяция пропусков

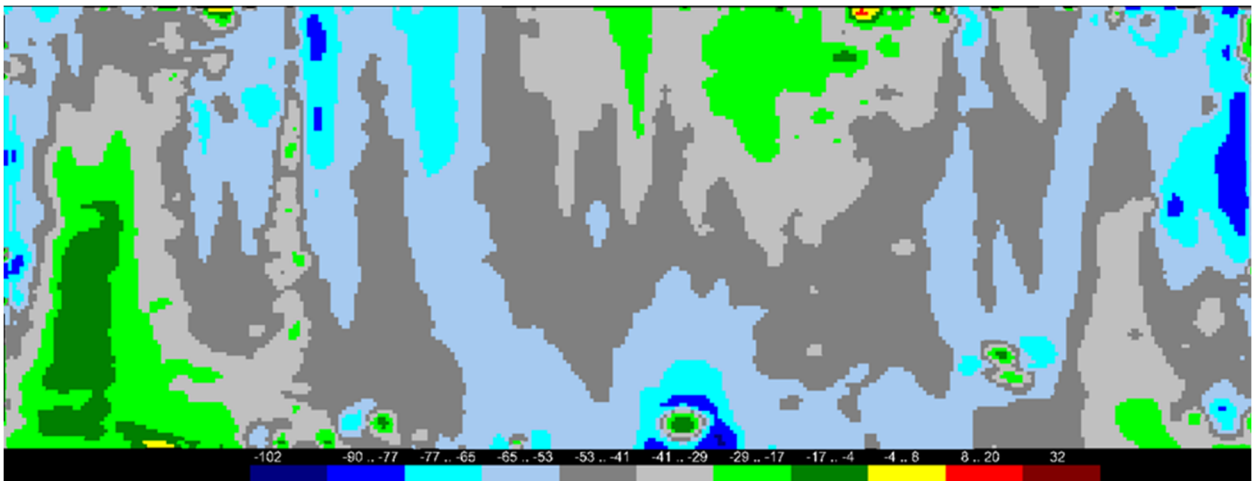


Рисунок Е.6 – Сглаживание поверхности

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж  
(обязательное)  
СТАЛИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ВЕРТИКАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ

Таблица Ж.1 – Стали, применяемые в строительстве

Наименование стали по ГОСТ 27772	Заменяемые стали по действующим стандартам		
	Марка аналогов	Толщина проката, мм	Предел текучести $R_{yn}$ , МПа
С 235	Ст3кп по ГОСТ 14637 или по ГОСТ 535	от 4 до 20	235
С 245	Ст3пс, Ст3сп, Ст3Гпс по ГОСТ 14637; Ст3пс по ГОСТ 535	от 4 до 20	245
С 255	Ст3Гсп по ГОСТ 14637; Ст3сп по ГОСТ 535	от 4 до 20	255
С 345	09Г2С по ГОСТ 19281	от 4 до 9	345
		от 10 до 20	325
		св. 20 до 32	295
		св. 32	265
С 390	10ХСНД по ГОСТ 19281, ГОСТ 6713 или по ТУ 1-5120-92	от 8 до 40	390