

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Новосибирск – 2022

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

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Шоломицкий Андрей Аркадьевич.

Официальные оппоненты:

Брынь Михаил Ярославович, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», профессор кафедры инженерной геодезии»;

Гура Дмитрий Андреевич, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный технологический университет», доцент кафедры кадастра и геоинженерии.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» (г. Санкт-Петербург).

Защита диссертации состоится 20 декабря 2022 г. в 12-00 на заседании диссертационного совета 24.2.402.01 при ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий» по адресу: 630108, Новосибирск, ул. Плеханова, 10, ауд. 402.

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

Автореферат разослан 1 ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Аврунев Евгений Ильич

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 13.10.2022.

Формат 60 × 84 1/16. Печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 164.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плеханова, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ

630108, Новосибирск, Плеханова, 8.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 м³.

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

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 алгебраическими 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 продукционного 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 «ĠYLYM 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 Пав-

лодарского 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первом разделе диссертационной работы выполнен анализ истории развития строительства РВС, особенности их строительства и эксплуатации, а также существующие методы геодезического мониторинга, их достоинства и недостатки. Представленные данные по статистике аварийных событий РВС в Российской Федерации и мире свидетельствуют, что совершенствование методики мониторинга за состоянием РВС и обеспечение их безопасной эксплуатации является *актуальной научной задачей*.

С целью продления срока безаварийной эксплуатации РВС могут быть использованы различные подходы, одним из них является совершенствование методов расчета и повышение надежности конструкций и ужесточение требований к нормам проектирования.

Вторым направлением совершенствования безаварийной эксплуатации РВС является постоянный комплексный мониторинг их состояния. В процессе выполненных исследований были выявлены следующие тенденции.

1 Подход к мониторингу должен быть комплексным. Учитывая, что резервуарные парки являются опасными производственными объектами, необходимо ежедневное визуальное обследование объекта со стороны эксплуатирующей организации, включающее периодический геодезический мониторинг оболочки и основания резервуаров и проведение (по мере необходимости) обследований методами неразрушающего контроля с целью получения наиболее ценной и объективной информации о деформации оболочки и основания РВС.

2 Существенным недостатком является отсутствие современной нормативной базы. В действующем нормативном документе СТО СА 03-004–2009 допуски на деформации резервуаров регламентируются в зависимости от объемов резервуаров; в то же время материалы, из которых изготавливались резервуары в разное время, очень сильно отличаются по своим свойствам. Кроме того, геодезические методы, которые рекомендованы в данном документе, являются малопроизводительными.

Отличительной особенностью современного производства является переход от планово-предупредительных ремонтов к ремонтам по фактическому состоянию оборудования. Этот переход основан на том, что без фактической разборки станка оценивается его техническое состояние, определяются отдельные узлы и детали, имеющие дефекты, и поэтому ремонт производится целенаправленно, устраняя только конкретные дефекты. Это обеспечивает стабильность работы производства, позволяет прогнозировать время безаварийной работы оборудования, заранее заказать необходимые комплектующие для проведения ремонта. Для достижения этих целей на предприятиях внедряются автоматизированные системы технического обслуживания и ремонтов.

Геодезическая подсистема ТОРО является важнейшей частью технического обслуживания и ремонта РВС, так как дает необходимую метрическую информацию о состоянии объектов производства, о контролируемых геометрических параметрах формы и размерах объекта, что позволяет сделать вывод о необходимости ремонта. Весь необходимый объем информации для подобного анализа можно получить по результатам выполненного наземного лазерного сканирования в процессе геодезического мониторинга РВС.

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

Во втором разделе исследуются причины аварий РВС и представлена методика сканирования и обработки данных НЛС в процессе геодезического мониторинга РВС. Множество точек лазерных отражений можно представить в виде (рисунок 1, а):

$$M_p = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}, \quad (1)$$

$$p_i = \{x_i, y_i, z_i\}, \quad (2)$$

где p_i – точка облака ТЛЮ, элемент множества M_p , индекс i не обозначает порядок элемента во множестве, а служит для идентификации элемента. Множество M_p не может быть пустым, $M_p \neq \emptyset$. Это множество точек необходимо уменьшить до плотности 1 точка на 15×15 мм – 10×10 мм, получим множество $M'p$. Из этого множества точек выделяем подмножество $M''p$ для определения параметров цилиндра, результат представлен на рисунке 1, б.



а)



б)

Рисунок 1 – Фильтрация облака ТЛЮ резервуара № 1: а) исходное облако $N = 3\,050\,669$; б) $N = 1\,532\,839$, отсечение $\Delta R = 120$ мм

Следующий этап – это определение параметров резервуара (цилиндра), которые находят из решения следующих уравнений, которые решаемых на основе МНК:

$$\left. \begin{aligned} \forall p_i \in M''p \rightarrow (Z_{\min} \leq z_i \leq Z_{\max}) \rightarrow \\ (x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2 - R^2 = \varepsilon_i^2 \\ \left[\varepsilon_i^2 \right] = \min \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где x_i, y_i, z_i – координаты точки i из множества $M''p$; o_x, o_y – координаты центра цилиндра; R – радиус цилиндра; ε_i – отклонение точки i от цилиндра. Для всех точек, попавших в заданный диапазон высот $Z_{\min} \leq z_i \leq Z_{\max}$, составляется система уравнений (3) и решается по МНК.

Следующий этап – это фильтрация по радиусу (см. рисунок 1, б). Выполненные исследования закономерностей отсечения позволили подобрать допуск отсечения для каждого типа резервуара. Для дальнейшей обработки облака множество точек ТЛО преобразуется в криволинейную равномерную сетку, которая имеет топологически эквивалентную прямоугольную сетку:

$$M'''p \Rightarrow S_{i \times j}^h, \quad (4)$$

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

На рисунке 2 показана криволинейная равномерная сетка на цилиндре и топологически эквивалентная ей прямоугольная сетка. Развертка криволинейной сетки осуществляется по углу δ , который вычисляется по заданному шагу h_y от направления на север геодезической системы координат.

Координаты точек ТЛО в геодезической системе координат перевычисляются в систему координат поверхности цилиндра, для чего используются следующие выражения:

$$\left. \begin{aligned} x_i^c &= z_i \\ y_i^c &= \alpha R \\ z_i^c &= ((x_i - o_x)^2 + (y_i - o_y)^2)^{\frac{1}{2}} - R \end{aligned} \right\} \rightarrow M^c, \quad (5)$$

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; α – центральный угол, в радианах; 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.

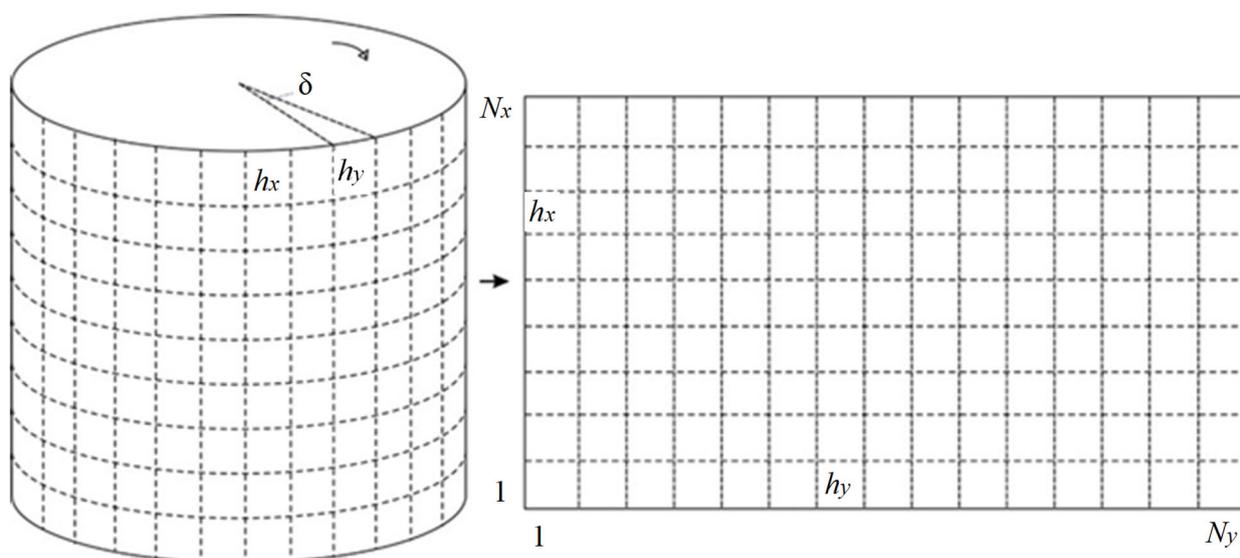


Рисунок 2 – Криволинейная и топологически эквивалентная ей прямоугольная сетка

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 $h_x \times h_y$ с помощью кусочно-линейной гиперплоскости. Результат представлен на рисунке 3, где черным цветом показаны не интерполированные узлы.

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

поверхностями. Анализ гладкости выполняется по допуску на уклоны. Предварительно методом статистического анализа определяются допуски на уклоны.

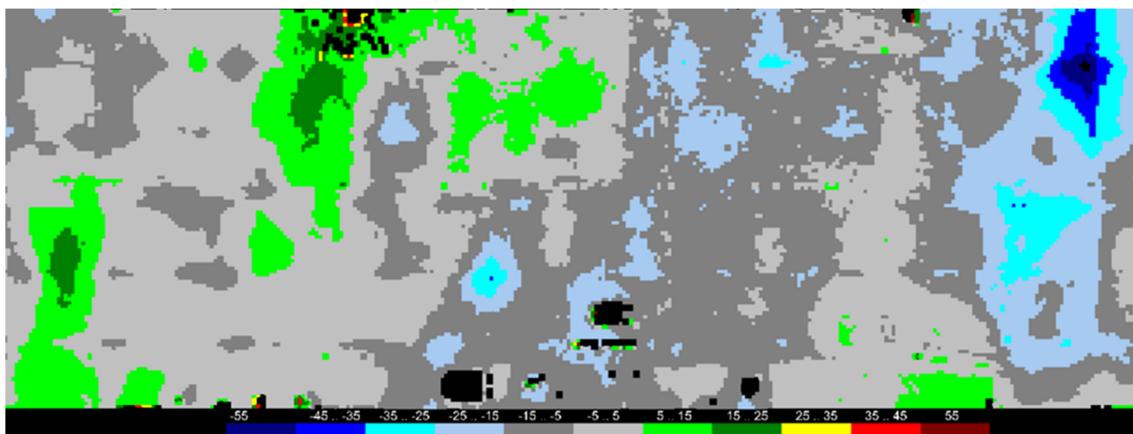


Рисунок 3 – Интерполированные поверхности резервуара № 1

Для интерполирования значений деформаций в узлах сеточной модели используется метод коллокации. Для того, чтобы использовать закономерности поверхности сеточной модели, для которой уже определены показатели для 95 % узлов, использовалась область выборки матричного типа 5×5 . Пример интерполяции пропусков для сеточной модели резервуара № 1 показан на рисунке 4.

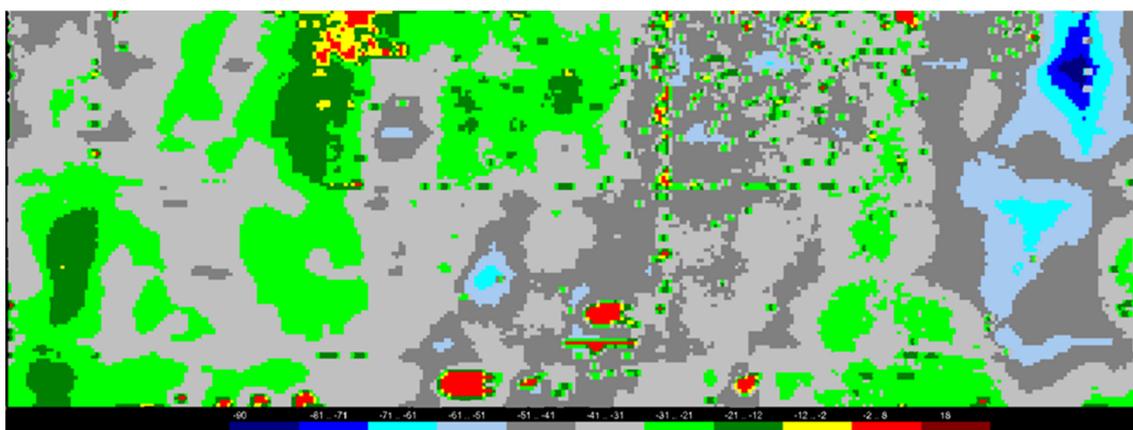


Рисунок 4 – Интерполированная сетка резервуара № 1

Сглаживание сеточных моделей. Целью сглаживания является уменьшение влияния случайных ошибок измерений и уменьшение остаточных «шумов», т. е. величин, которые сильно отличаются от окружающих ячеек. Сглаживание

выполняется с помощью масок 3×3 , 5×5 или 7×7 , для которых задается соответствующее соотношение весов (рисунок 5).

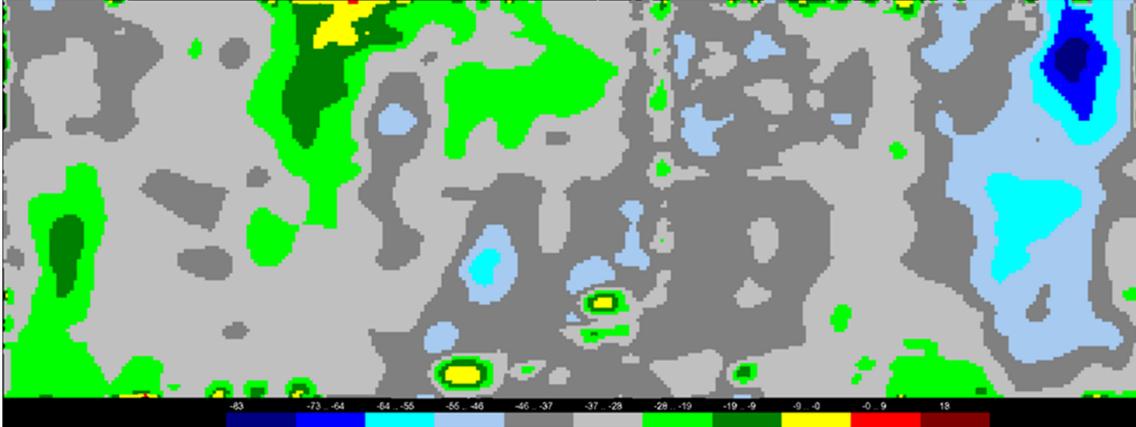


Рисунок 5 – Сглаженная маской 3×3 сеточная модель резервуара № 1

Сглаженные модели позволяют применить численные методы для расчета напряжений цилиндрических оболочек.

Расчет напряженного состояния оболочек резервуаров. Исходными данными для последующих расчетов 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 интерполируются функцией вида:

$$w_j(\varphi) = \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos^2\left(\frac{1}{2}k(\varphi - \psi_i)\right), \quad (6)$$

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

В этом случае резервуар можно интерпретировать как систему кольцевых элементов в пределах одного пояса длиной l_j и толщиной h_j , соединенных друг

с другом. Моделирование напряженного состояния резервуара проводится на основе теории расчета цилиндрических оболочек Власова. Используя принцип суперпозиций, напряженное состояние можно представить как сумму осесимметричного и несимметричного состояний. Тогда выражение (6) представим в виде:

$$w_j(\varphi) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos(k(\varphi - \psi_i)). \quad (7)$$

Таким образом, для радиальных перемещений из выражения (7) можно выделить симметричную и несимметричную составляющие, соответственно:

$$w_{xj} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j}, \quad (8)$$

$$w_{\varphi j} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n\varphi} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} \cos(k(\varphi - \psi_i)). \quad (9)$$

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

$$T_{xj} = T_{x0} + \sum_{k=1}^j h_k l_k \rho g, \quad (10)$$

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

Окружные усилия определяются формулой

$$T_{ij} = -\mu T_{xj} + \frac{E h_j w_{xj}}{R}, \quad (11)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости.

Несимметричное состояние резервуара. Несимметричную деформацию будем рассматривать как деформацию отдельных кольцевых элементов, которые сопряжены друг с другом за счет сдвиговых усилий.

Тогда для j -го элемента сдвиговые усилия можно определить:

$$S_j = (-1)^{j+1} \sum_{m=0}^j (-1)^m \frac{E J_{xj}}{2 R^4} \sum_{i=0}^{n\varphi} a_{i,j} \sum_{k=1}^{n\varphi/2} k(k^2 - 1)^2 \sin(k(\varphi - \psi_i)). \quad (12)$$

По найденным усилиям (10)–(12) определяются нормальные и касательные напряжения:

$$\sigma_x = \frac{T_x}{h}, \quad \sigma_t = \frac{T_t}{h} \pm \frac{6M_t}{h^2}, \quad \tau = \frac{S}{h} \quad (13)$$

и эквивалентные напряжения

$$\sigma_{IV} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_t^2 - \sigma_x \sigma_t + 3\tau^2}. \quad (14)$$

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 № 6. Выполненный анализ предела текучести для рядовых сталей показал, что для резервуара № 1 эквивалентные напряжения составляют ~46 %, а для резервуара № 6 ~78 % от предела текучести. При подобном соотношении фактических и предельно-допустимых напряжений для резервуара № 1 никаких действий предпринимать не требуется в то же время для резервуара № 6 необходимо провести внеочередное обследование технического состояния резервуара с использованием методов неразрушающего контроля.

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

Для определения оседаний днища резервуара предлагается алгоритм «градиент вертикального спуска», который позволяет по облаку ТЛЮ надежно определить оседания днища РВС. А для нахождения локальных деформаций автором предложен многопроходный сканирующий алгоритм с «затравкой». Разработанная методика оценки состояния РВС в процессе геодезического мониторинга предполагает выполнение определенной последовательности шагов, которые приводят к ожидаемому результату – комплексной оценке состояния промышленных объектов на примере резервуарного парка нефтеперерабатывающего завода.

Первым шагом разработанной методики (рисунок 6) является запись исходного облака ТЛЮ (1) съемки резервуара в базу данных (2). При записи происходит ограничение числа точек до приемлемой плотности. Хранение исходного облака точек необходимо для повторных шагов обработки с другими параметрами и других ветвей разработанной методики, например (13).

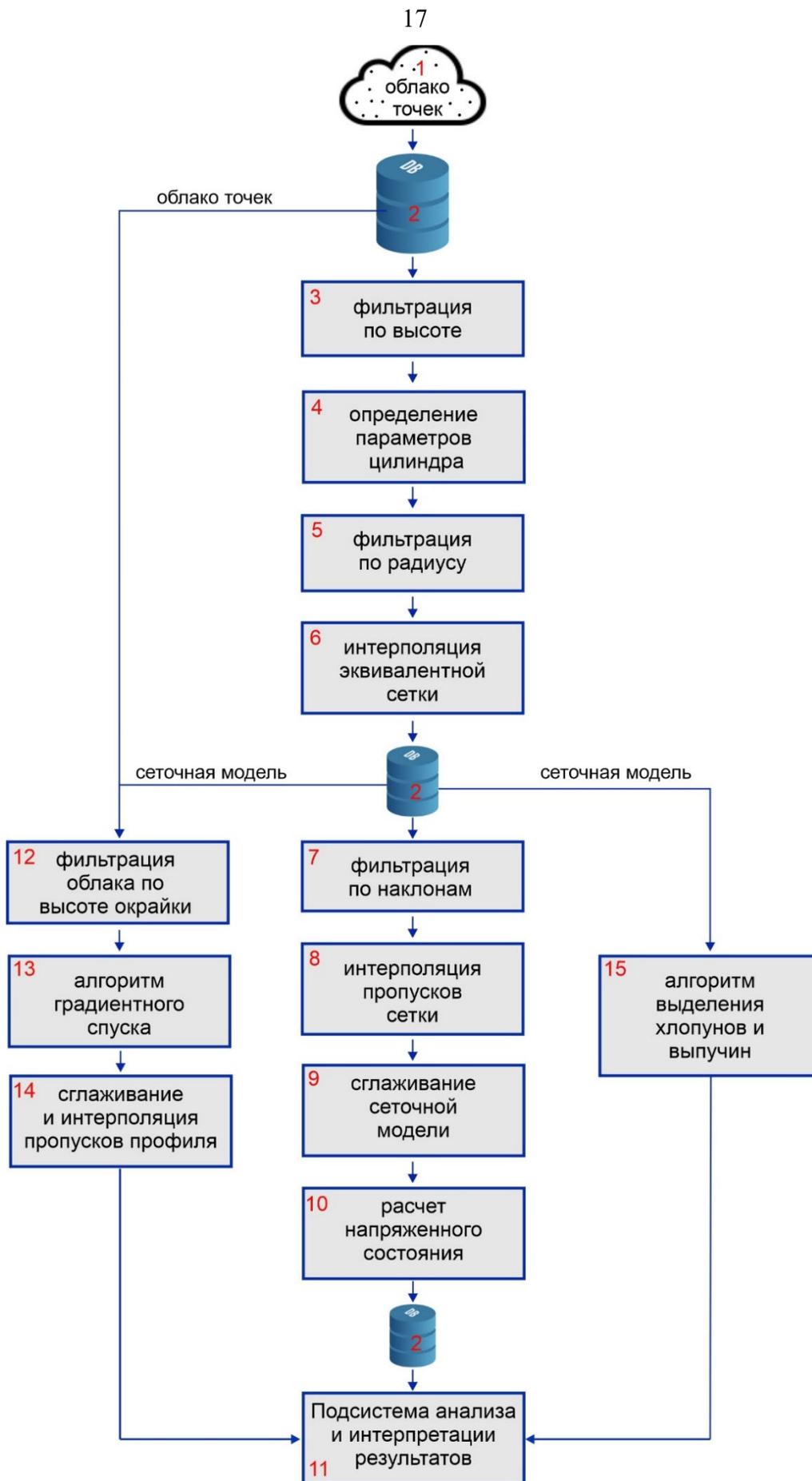


Рисунок 6 – Блок-схема методики

Следующим шагом основной ветви является фильтрация по высоте (3). Этот шаг необходим, чтобы убрать элементы, которые могут повлиять на определение радиуса и параметров резервуара, это обваловка вокруг резервуара, крыша, трубопроводы. На следующем шаге (4) по отфильтрованному по высоте облаку ТЛО находятся параметры цилиндра: фактический радиус, центр цилиндра и наклон его оси.

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

Шаг (6) – это создание начального варианта эквивалентной сетки, для чего выполняется интерполирование в узлах сетки методом коллокации. Сеточная модель этого этапа может содержать пропуски из-за мертвых зон в исходном облаке ТЛО. Эту сетку можно записать в БД (2), привязав к дате съемки резервуара.

Дальнейшая обработка эквивалентной сеточной модели заключается в анализе наклонов поверхности резервуара (7). Данная операция необходима 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 алгоритма от (6) заключается в том, что для интерполяции используется не исходное облако ТЛО, а только узлы точек с известными отметками. Это позволяет учесть закономерности эквивалентной сетки для интерполирования узлов с неизвестным отклонением.

Этап под номером (9) необходим 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.

Результаты расчетов деформаций 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, например, 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 дна резервуара. В дальнейшем этот фактический профиль может быть сглажен и интерполирован в некоторых точках, которые необходимы для сравнения с профилями предыдущих съемок (14). Все рассчитанные профили после этапа (14) также поступают на вход подсистемы анализа и интерпретации результатов (11).

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

Все полученные результаты расчетов и обработки о техническом состоянии резервуара, поступающие из различных источников (10), (14) и (15), а также данные неразрушающего контроля анализируются в блоке (11) и в дальнейшем интерпретируются в виде заключений о техническом состоянии резервуара и рекомендаций для эксплуатирующей службе предприятия.

В третьем разделе диссертации приведена в укрупненном общем виде структура БД геодезической подсистемы ТОРО (рисунок 7).

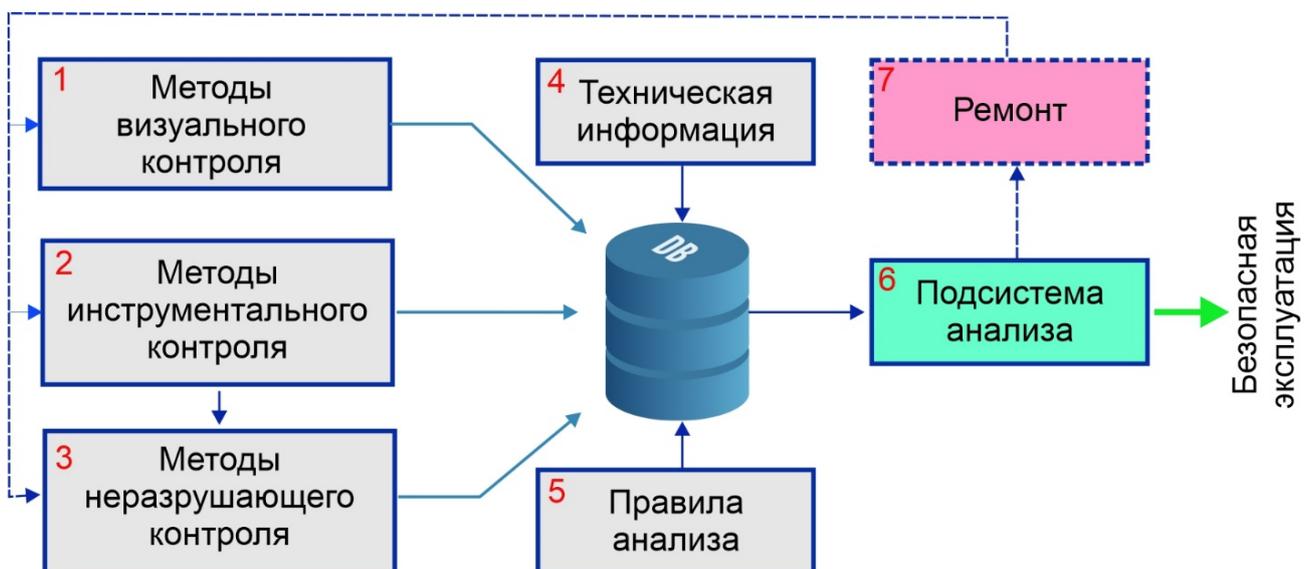


Рисунок 7 – Структурная схема информационной геодезической подсистемы

Рассмотрим схему блока № 2 «Методы геодезического контроля» (рисунок 8), которая является наиболее большой и сложной по структуре. Она содержит как исходное облако точек лазерных отражений, так и этапы его обработки и конечные результаты.

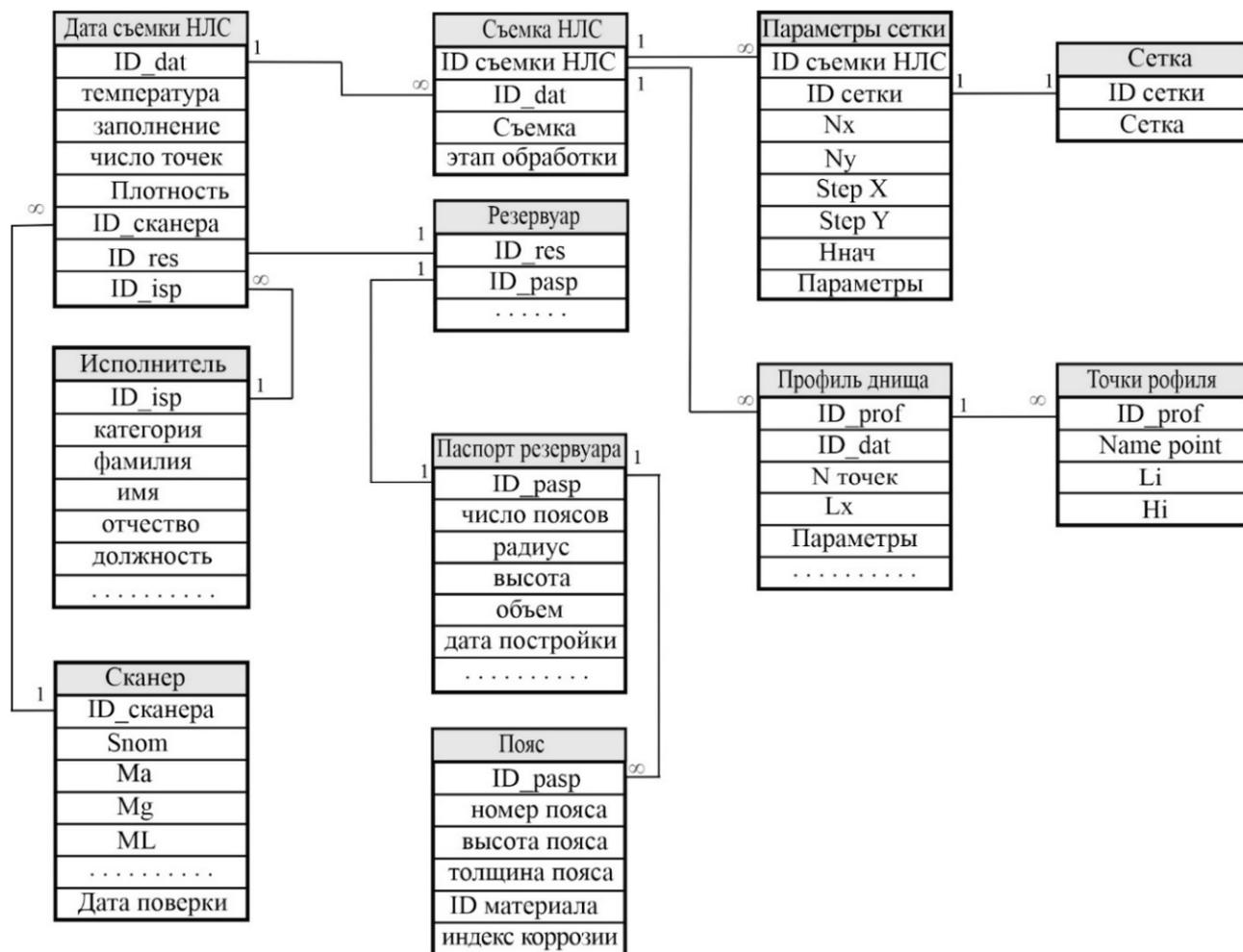


Рисунок 8 – Структура БД, блок № 2

Наиболее значимыми сущностями этого раздела являются облако точек лазерных отражений (облако ТЛО) под названием сущности «съемка НЛС», «дата съемки», эквивалентная сеточная модель – «сетка» и результат распознавания оседаний днища резервуара – имеет название «профиль». Кроме того, сущности этого блока связаны с таблицами из других блоков.

Блок № 5 «Правила анализа» представляет собой правила продукционной экспертной системы (ЭС) в геодезической подсистеме ТОРО, которые можно

представить в виде ранжированной системы условий, и связанных с ними действий. В такой постановке ЭС можно представить в виде алгебраической системы:

$$ЭС = \{U_i, R_j, D_{ij}, S_{ij}\}, \quad (15)$$

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. Ранг правила может быть, как нормативным, так и расчетным.

Правила ЭС служат основанием для создания дерева принятия решений, которые объясняют и классифицируют ситуацию и прогнозируют развитие ситуации на будущие периоды. Структура дерева представляет узлы и рёбра («ветки»), которые показывают переход объекта из одного состояния в другое.

В четвертом разделе на примерах показана реализация предложенной методики и алгоритмов. Показано, как, выполняя последовательность шагов алгоритма этой методики, можно загрузить данные НЛС и, обработав, получить необходимые для оценки состояния резервуара данные и рекомендации.

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 по-

казал, 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 эквивалент-

ных моделей РВС и расчета эквивалентных напряжений оболочек РВС в процессе эксплуатации.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1 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.

2 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.

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 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.

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

6 Evaluation of Stress-Strain State of Vertical Steel Tanks Using Laser Scanning Data / A. A. Sholomitskii¹, 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.

7 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.

8 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.

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