

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «РОССИЙСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТЕ НЕФТИ И ГАЗА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ) ИМЕНИ И. М. ГУБКИНА»

На правах рукописи

УДК 622.692.23:621.373.8

САЛЬНИКОВ АНТОН ПАВЛОВИЧ

**ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
РЕЗЕРВУАРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО
СКАНИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз
и хранилищ» (технические науки)

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель: д.т.н., профессор
Г.Г. Васильев

Москва – 2016 г.

Оглавление

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ НА ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ.....	9
1.1. Анализ аварийности и причин аварий вертикальных стальных резервуаров	9
1.2. Оценка влияния пространственного положения на напряженно- деформированное состояние резервуара	17
1.3. Анализ эффективности существующих методов определения пространственного положения резервуаров вертикальных стальных	26
Выводы по главе.....	34
ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ	36
2.1. Технология наземного лазерного сканирования.....	36
2.2. Анализ нормативных технических актов в области наземного лазерного сканирования	40
2.3. Анализ факторов, влияющих на точность результатов измерений наземными лазерными сканерами	44
2.4. Разработка методики проведения работ по лазерному сканированию резервуаров	55
2.5. Разработка методики обработки данных наземного лазерного сканирования при съемке резервуара	64
Выводы по главе.....	73
ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	75
3.1. Выбор метода оценки напряженно-деформированного состояния резервуара	75

3.2. Выбор конечного элемента. Аппроксимация стенки резервуара конечными элементами.....	79
3.3. Определение компонентов разрешающего уравнения для стенки резервуара	85
3.4. Расчет НДС стенки резервуара аналитическим и численным методами	95
Выводы по главе.....	100
ГЛАВА 4. АППРОБАЦИОННЫЕ РАБОТЫ ПО НАЗЕМНОМУ ЛАЗЕРНОМУ СКАНИРОВАНИЮ РЕЗЕРВУАРОВ.....	102
4.1. Постановка задачи и использованное оборудование	102
4.2. Аппробационные работы на резервуаре РВСП-5000	104
4.3. Аппробационные работы на резервуаре РВСП-20000	114
4.4. Аппробационные работы на резервуаре РВСП-7500	119
4.5. Аппробационные работы на резервуарах РВСПА-50000	124
Выводы по главе.....	129
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ	131
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	133
ПРИЛОЖЕНИЕ А	146
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	149
ПРИЛОЖЕНИЕ В	150
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	153
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	154
ПРИЛОЖЕНИЕ Е.....	159
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.....	164
ПРИЛОЖЕНИЕ З	166

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. Вертикальные стальные резервуары представляют собой ответственные сооружения, обеспечивающие не только хранение нефти и нефтепродуктов на сырьевых базах, нефтеперерабатывающих заводах и т.д., но также обеспечивающие безопасность и бесперебойность поставки продукта по системам магистральных трубопроводов. При этом резервуары представляют собой сооружения повышенной опасности, аварии на которых приводят к тяжелым экономическим, экологическим и социальным последствиям. Следовательно, большое значение имеет контроль технического состояния резервуаров и обеспечение их своевременного ремонта.

Одним из факторов, позволяющих определить техническое состояние резервуаров и необходимость их ремонта, является оценка его напряженно-деформированного состояния (НДС). Основное влияние на НДС резервуара оказывает его пространственное положение и геометрическая форма, в то время как все остальные дефекты, по сути, являются инициаторами возможных аварийных ситуаций.

Существующие аналитические зависимости, численные решения и требования действующей нормативной технической документации к оценке влияния пространственного положения и геометрической формы резервуара на его НДС основываются на результатах геодезического обследования резервуаров, выполняемых для ряда точек через каждые 6 метров. Как отмечают многие исследователи, данное обстоятельство не позволяет с достаточной точностью оценить НДС резервуаров, так как информация о многих точках остается неизвестной. Более того, существующие методики не учитывают взаимного влияния отдельных дефектов друг на друга и на НДС резервуара в целом. В результате НДС рассматривается, по сути, опосредовано для отдельных дефектов (неравномерной осадки, дефектов геометрической формы и т.д.).

Данные обстоятельства определяют актуальность задачи оценки НДС резервуаров на основании использования современных технологий определения

их пространственного положения и геометрической формы – наземного лазерного сканирования (НЛС), а также разработки методики определения НДС на основании данных, получаемых при их использовании.

В связи с вышесказанным, **целью** данной **исследовательской работы** является теоретическое обоснование и разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования.

Основные задачи исследования:

1. Анализ проблем эксплуатации резервуаров, связанных с изменением их пространственного положения и геометрической формы.

2. Оценка применимости методов расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и реальной геометрической формы;

3. Разработка методики создания трехмерной модели стенки резервуара с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования;

4. Разработка методики оценки влияния действительного пространственного положения и реальной геометрической формы на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок;

5. Экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования.

Объектом исследования данной работы является напряженно-деформированное состояние вертикальных стальных резервуаров, находящихся в эксплуатации.

Предметом исследования является напряженно-деформированное состояние стенки резервуара с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

Методы исследования. Поставленные в исследовательской работе задачи решаются на основании методов системного анализа и метода конечных элементов при использовании основных положений строительной механики, теории упругости и механики деформируемого твердого тела.

Научная новизна выполненной работы заключается в следующем:

1. Показано, что при расчете напряженно-деформированного стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и геометрической формы возможен переход от трехмерной к двумерной задаче теории упругости (теории оболочек);

2. На основании метода конечных элементов разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования;

3. Разработан алгоритм проведения работ по трехмерному наземному лазерному сканированию резервуаров (резервуар опорожнен и зачищен) с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, позволяющий устранить ошибки в результатах лазерного сканирования, вызванные воздействием внешних факторов (метрологических свойств снимаемого объекта, метеорологических условий проведения работ и т.д.).

Практическая ценность результатов. Применение разработанных методик позволяет оценить НДС стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования. Данные методики содержат

требования ко всему комплексу работ по оценке НДС стенки резервуаров: проведению наземного лазерного сканирования резервуаров (которые ранее отсутствовали в мировой практике); получению данных, соответствующих традиционному геодезическому обследованию; оценке НДС стенки резервуаров методом конечных элементов и т.д. На основании результатов оценки НДС стенки резервуаров по данным трехмерного наземного лазерного сканирования может быть принято решение о необходимости ремонта резервуара.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика проведения работ по трехмерному наземному лазерному сканированию резервуаров (резервуар опорожнен и зачищен) с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы;

2. Методика камеральной обработки данных трехмерного наземного лазерного сканирования с целью получения трехмерной модели стенки резервуара (резервуар опорожнен и зачищен) с учетом действительного пространственного положения и геометрической формы;

3. Методика оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты исследований докладывались и обсуждались на X Всероссийской научно-технической конференций «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, 10-12 февраля 2014 г.; «Актуальные проблемы науки и техники – 2014», Уфимский государственный нефтяной технический университет, 18-20 ноября 2014 г.; «Oil and Gas Horizons VI», Gubkin University SPE Student Chapter, 24-26 ноября 2014 г.; VIII международной научно-технической конференции «Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта», Полоцкий государственный университет

(Республика Беларусь), 25-28 ноября 2014 г.; Круглом столе «Трубопроводный транспорт углеводородов» в рамках выставки «Российская выставка с международным участием Трубы и трубопроводные системы. Нефть. Газ. ЖКХ», Москва, ВДНХ, 25-27 ноября 2014 г.; XI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития нефтегазового комплекса России», Москва, 8-10 февраля 2016 г.; 70-й Международной молодежной научной конференции «Нефть и газ-2016», Москва, 18-20 апреля 2016 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 печатных работ, в том числе 6 статей – в ведущих рецензируемых научных журнал, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

ГЛАВА 1. АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

1.1. Анализ аварийности и причин аварий вертикальных стальных резервуаров

На сегодняшний день стальные вертикальные резервуары являются одними из наиболее опасных промышленных объектов. Это связано с рядом причин:

- высокая пожаровзрывоопасность хранимых продуктов;
- большая протяженность сварных швов конструкции, которую достаточно трудно и трудоемко полностью проконтролировать;
- несовершенства геометрической формы, возникающие еще на стадии гидроиспытаний резервуаров;
- значительные перемещения стенки резервуара как в процессе эксплуатации, так и в процессе выполнения технологических операций;
- высокая скорость коррозии элементов конструкции;
- малоцикловая усталость отдельных зон конструкции;
- сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва. [45]

Аварии резервуаров приводят к тяжелым материальным, экологическим и социальным последствиям. Среди основных последствий аварий можно выделить следующие: полное или частичное разрушение самого аварийного резервуара, а также других близко расположенных резервуаров, зданий и сооружений; загрязнение почвы и водных объектов нефтью и нефтепродуктами, а также загрязнение атмосферы продуктами горения; травмирование и гибель людей. По статистическим данным в экстремальных случаях материальный ущерб от аварий резервуаров в 500 и более раз превышает первичные затраты на их сооружение.

[46]

Следовательно, особую важность имеет повышение надежности и безопасности эксплуатации резервуаров. Решить данную задачу позволяет своевременное определение технического состояния резервуаров, на основании которого принимается решение о необходимости ремонта. Одним из главных показателей технического состояния резервуаров является их напряженно-деформированное состояние. Проанализировав причины аварий вертикальных стальных резервуаров, можно определить факторы, оказывающие основное влияние на формирование НДС резервуаров.

Анализу причин полного или частичного разрушения резервуаров посвящены работы Галеева В.Б. [21, 23, 24, 25], Березина В.Л. [12, 13], Беляева Б.И. [8], Коновалова П.А., Мангушева Р.А. [39, 49], Землянскогo А.А. [36], Тарасенко А.А. [49, 85, 86], Коноваловой О.П. [50], Розенштейна И.М. [65], Афонской Г.П. [4], Ханухова Х.М. [98], Иванова Ю.К. и других. Анализу подвергаются аварии, информация о которых становится известна из технической литературы, периодических изданий, личного опыта авторов и т.д.

Наибольшей полнотой и проработкой отличаются работы Галеева В.Б., Коновалова П.А., Мангушева Р.А., Землянскогo А.А., Тарасенко А.А., Розенштейна И.М. и Ханухова Х.М.

Авторы исследований [36, 49] провели натурные и априорные литературные исследования 213 аварийных резервуаров. В своем исследовании они выделяют несколько генеральных направлений доминирующих причин разрушения РВС, если не учитывать активную коррозию металла РВС. В результате общее количество наиболее активных причин разрушения РВС было уменьшено до шести, а наиболее весомой причиной в выделенном спектре является большая неравномерная осадка исследуемого грунтового основания под РВС (таблица 1.1).

Исследования, отраженные в работах [85, 86], подтверждают, что осадка резервуара является одной из доминирующих причин разрушения РВС. Автор исследований обобщил известную ему информацию об авариях на 46 резервуарах. Им было выделено несколько основных причин разрушения РВС, среди которых

Таблица 1.1 – Доминирующие причины разрушения РВС

Наименование доминирующих причин аварий резервуаров	Число аварий	Процент от общего числа аварий, %
1. Недопустимо большие и неравномерные осадки грунтового основания	99	46,5
2. Наличие концентраторов напряжений в несущих и ограждающих конструкциях РВС из-за несовершенства конструкции резервуаров и технологий их возведения	45	21,1
3. Наличие низкочастотной вибрации и неравномерного нагружения плавающих крыш снеговой нагрузкой с неоднородным трением в затворах, приводящих к заклинанию и обрушению крыш с последующим их разрушением и затоплением	38	17,9
4. Наличие дефектов в материале и конструкции РВС из-за несоответствия используемого материала сертификационным требованиям	19	8,9
5. Нарушение технологии изготовления и возведения РВС	10	4,7
6. Грубые ошибки в аналитических расчетах и проектировании РВС, особенно по II предельному состоянию	2	0,9
Всего	213	100,0

неравномерная осадка основания входит в число наиболее часто встречающихся (таблица 1.2).

Отдельный интерес представляет анализ аварийности, проведенный авторами исследования [98]. Они провели анализ аварий, произошедших в периоды с 1965 г. по 1995 г. и с 2002 г. по 2010 г. Анализ аварий первого периода проводился по опубликованным в работах других авторов данным и охватил 65 аварий. Результаты представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.2 – Основные причины разрушения РВС по данным Тарасенко А.А.

Причина разрушения резервуара	Число аварий	Процент от общего числа аварий, %
1. Нарушение технологии ремонта	3	6,5
2. Коррозия	2	4,3
3. Нарушение технологии проведения гидроиспытаний	4	8,7
4. Некачественное выполнение сварочных работ	13	28,3
5. Неравномерная осадка	6	13,1
6. Нарушение правил эксплуатации	11	23,9
7. Нарушение технологии изготовления	7	15,2
Всего	46	100,0

Таблица 1.3 – Причины аварий в период с 1965 г. по 1995 г.

Причина аварии	Процент к итогу, %
1. Хрупкое разрушение	63,1
2. Взрыв и пожар	12,3
3. Образование вакуума	7,7
4. Коррозионный износ	3,1
5. Просадка основания	1,5
6. Ураганный ветер	1,5
7. Прочие причины	10,8
Всего	100,0

Анализ причин аварий, произошедших в период с 2002 г. по 2010 г., проводился по публикациям в журнале «Безопасность труда в промышленности». В число аварий включены также несколько случаев, произошедших ранее 2002 г., а также две аварии 2009 и 2010 гг., известные авторам, и не учтенные другими исследователями. Всего за указанный период было зарегистрировано 54 аварии (таблица 1.4).

Одним из наиболее полных исследований разрушения РВС в настоящее время является монография И.М. Розенштейна [65], основанная на многолетнем

Таблица 1.4 – Причины аварий в период с 2002 г. по 2010 г.

Причина аварии	Число аварий	Процент от общего числа аварий, %
1. Нарушение правил промышленной безопасности (ППБ) при проведении подготовительных работ по зачистке резервуара	12	24
2. Нарушение ППБ при эксплуатации резервуара	15	26
3. Выполнение огневых работ на работающем резервуаре, повлекшие пожар	5	8
4. Хрупкое разрушение стенки резервуара	4	8
5. Неравномерная осадка днища резервуара, повлекшая образование свищей или разрыв по сварным соединениям	3	6
6. Пожар при попадании молнии в резервуар	4	8
7. Разрушение элементов резервуара от снеговой нагрузки (ошибки проекта)	2	4
8. Нарушение условий гидро/пневмоиспытаний, повлекшие недопустимые деформации резервуара	2	4
9. Аварии или пожар от неуказанных причин	7	12
Всего	54	100

опыте выполнения экспертиз ЦНИИПСК. Обобщенный взгляд автора на проблему аварийности представлен на рисунке 1.1.

На основании отечественных и зарубежных источников Галеевым В.Б. в 1987 году была предложена классификация причин аварий (рисунок 1.2). Однако относительная роль каждого фактора в причинах аварий в приведенной классификации не указана.

На основании анализа рассмотренных выше статистических данных о полных и частичных авариях вертикальных стальных резервуаров можно выделить несколько основных причин разрушения резервуаров (причины аварий, не обладающие статистической значимостью, не рассматриваются):

Причины аварий РВС

Прямые	Косвенные
Хрупкие трещины	Неудачные проектные решения
Вязкие трещины	Низкое качество работ
Пересортица проката	Неудовлетворительная организация работ
Дефекты сварных швов	Низкое качество материалов
Неравномерные осадки	Нарушение технологии монтажа
	Некачественный контроль

Рисунок 1.1 – Причины разрушения РВС по И.М. Розенштейну



Рисунок 1.2 – Причины разрушения РВС по В.Б. Галееву

- хрупкое разрушение стенки резервуара;
- нарушение правил промышленной безопасности и требований при эксплуатации и ремонте резервуаров;
- нарушение технологии изготовления и возведения резервуаров;
- неравномерная осадка;
- коррозионный износ;

- нарушение условий гидроиспытаний.

Из проведенного анализа следует, что неравномерная осадка является основной причиной разрушения РВС (рисунок 1.3). На ее долю приходится 33% от общего числа рассмотренных аварий резервуаров.

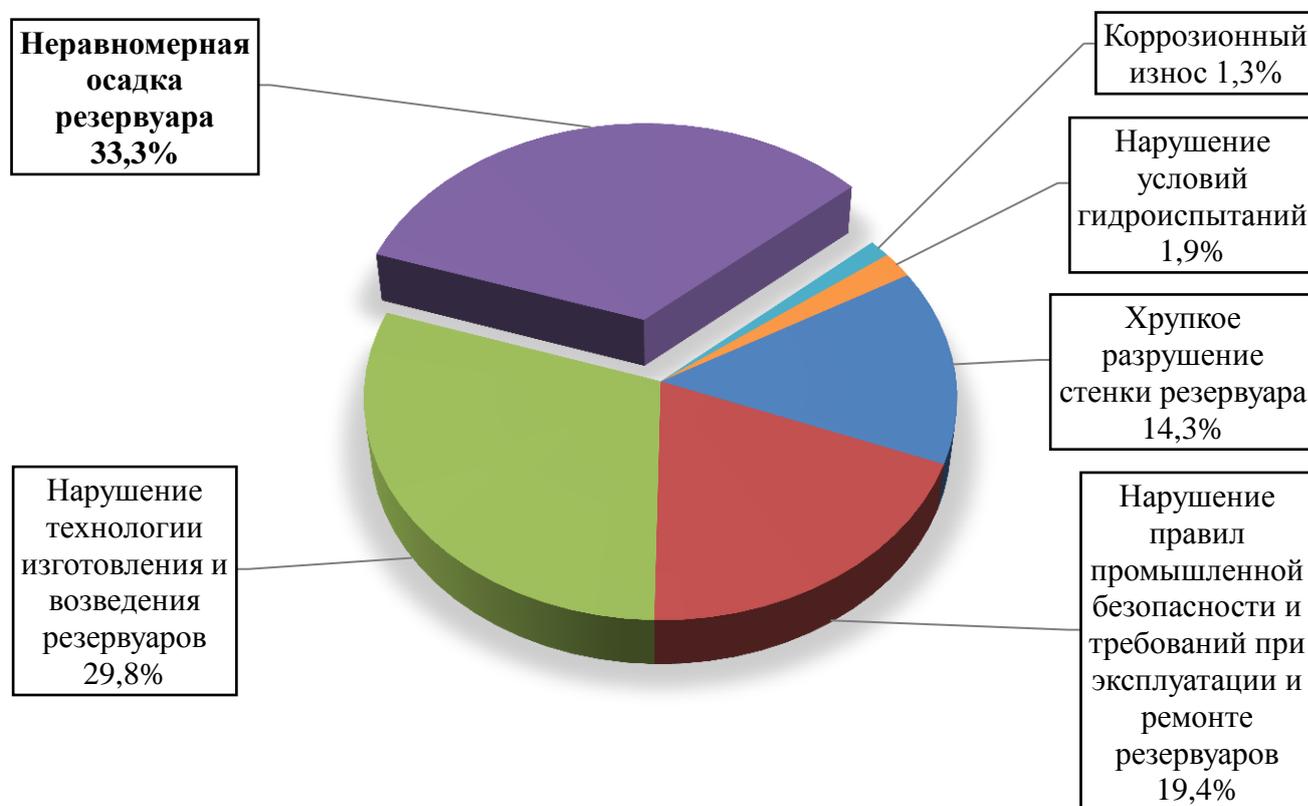


Рисунок 1.3 – Основные причины разрушения РВС

Неравномерную осадку основания как одну из главных причин разрушения РВС выделяют и ряд мировых компаний, таких как ESSO, BP, Chevron и т.п. [108]

Приведем несколько примеров разрушения резервуаров в результате неравномерной осадки.

В конце месяца в районе г. Одессы во время гидравлического испытания произошло полное разрушение вертикального резервуара вместимостью 10000 м³, предназначенного для хранения мазута. При осмотре места аварии резервуара было установлено, что реактивной силой излившейся воды стенка оторвана от днища, частично – от крыши, развернута и отброшена на расстояние. Трещина разорвала стенку, затем днище по околошовной зоне внутреннего уторного шва, а крышу – по зоне примыкания к стенке. Резервуар был построен над пятном ранее существовавшего и демонтированного резервуара вместимостью 5000 м³. Данные

геодезических замеров после аварии показали, что края резервуара получили осадку, превышающую осадку под его центром. В результате этого днище работало как мембрана, на что оно не рассчитано, и под действием растягивающих усилий произошел разрыв крайков. [69]

В декабре 1974 г. произошла авария резервуара Т-270 объемом 50 тыс. м³ корпорации «Мицубиси» (Япония). Группа резервуаров этой корпорации расположена на побережье морского залива на площадке, сложенной слабыми грунтами. Причиной аварии явилось неравномерное оседание основания, в результате чего образовался разрыв между стенкой и днищем, длина которого по дуге достигла 10 м, а раскрытие – 15 см. [41]

В январе 1988 г. в штате Пенсильвания произошло разрушение резервуара объемом 15 тыс. м³, принадлежащего компании «Ашленд Ойл Инкорпорейтед». Резервуар предназначался для хранения дизельного топлива. Разрушение резервуара произошло в результате больших неравномерных деформаций грунта. После заполнения резервуара дизельным топливом его содержимое резко вылилось наружу, разрушило обвалование и соседний резервуар, стоящий в 20 м от первого резервуара.

В июле-августе 1991 года получили большие повреждения и вышли из эксплуатации во время заполнения шесть резервуаров нефтебазы в п. Усть-Куйга. В трех резервуарах объемом 700 м³ образовались трещины в уторном соединении. В этих местах появились местные выпучивания стенки с большой угловой деформацией уторного соединения. Три резервуара объемом 2 тыс. м³ для хранения дизельного топлива той же нефтебазы получили большие деформации волнообразной формы по всей высоте в районе монтажного шва. Места максимального выпучивания находились, в основном, на участках между вторым и четвертым поясами. Все резервуары имели значительные неравномерные осадки по контуру, крен в одном направлении.

Анализ аварийности и причин аварий РВС показал, что неравномерная осадка является одной из основных причин их разрушения. Другими словами, пространственное положение резервуара оказывает главное влияние на его

напряженно-деформированное состояние. При этом необходимо отметить, что дополнительные дефекты геометрической формы стенки в сочетании с неравномерной осадкой могут привести к аварийным ситуациям и при нормативных допусках на дополнительные дефекты и неравномерную осадку.

Таким образом, для определения технического состояния РВС и принятия решения о проведении ремонтных работ необходимо оценить напряженно-деформированное состояние резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и геометрической формы.

1.2. Методы расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и геометрической формы

В ходе эксплуатации резервуар подвергается ряду внешних и внутренних воздействий: циклическому действующей гидростатической нагрузки, ветровому и снеговому воздействиям, температурным деформациям, неравномерной осадке основания, вакууму, избыточному давлению и другим. Под воздействием данных нагрузок все элементы конструкции резервуара находятся в сложном напряженно-деформированном состоянии.

В последние годы большое внимание уделяется продлению эксплуатации РВС, исчерпавших свой нормативный срок службы. Решение этой задачи при обеспечении надежности и безопасности их эксплуатации невозможно без проведения теоретических и экспериментальных исследований прочности и устойчивости элементов резервуара, разработки новых методик, позволяющих определить действительное напряженно-деформированное состояние резервуаров.

Исследованию напряженно-деформированного состояния резервуаров посвящены работы Арзуниана А.С. [2], Ашкинази М.И. [5, 6], Березина В.Л. [10, 11, 12, 13], Бородавкина П.П. [15], Буренина В.А. [16], Сафаряна М.К. [70, 71, 72], Шутова В.Е. [13, 71], Лебедева В.Д. [52, 53], Хоперского Г.Г. [99], Галеева В.Б.

[22, 24], Слепнева И.В. [76], Тарасенко А.А. и Чепура П.В. [87, 88, 89, 90, 101], Головачева А.А. [27, 28], Сметанникова О.Ю. [27, 28, 35], Катанова А.А. [42], Евдокимова В.В. [35], Любушкина В.В. [22] и других.

Вопросом напряженно-деформированного состояния узла сопряжения стенки с днищем посвящены работы Сафаряна М.К. [69, 70, 71], Березина Л.В. [13], Шутова В.Е. [13], Ашкинази М.И. [6], Стулова Т.Т. [84] и других.

Авторы работ [27, 28, 35, 42, 89] исследовали НДС отдельных дефектов резервуаров и окрайки днища. Так, авторы [35] разработали инженерную методику расчета предельно допустимых вмятин и некоторых других дефектов формы с учетом их геометрии, месторасположения, условий нагружения резервуара и других значимых факторов. Апробация методики выполнялась по средствам сравнения результатов расчета, полученных по методике, с результатами моделирования дефектов в пакете ANSYS.

Большинство из указанных исследования выполнялись на начальном этапе становления расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров и развития теории тонкостенных оболочек. В результате для упрощения математической модели резервуаров принималось значительное количество допущений, позволявших произвести расчеты. Самым распространенным допущением было принятие гипотезы об однородности грунтового основания, что позволяло считать напряженное состояние резервуара осесимметричным.

Попытку учета неравномерной осадки основания при оценке НДС резервуара одним из первых предпринял Стулов Т.Т. [84]. Однако в силу большого количества упрощений, введенных им для описания НДС резервуара, расчетные результаты значительно расходились с экспериментальными.

Оценке НДС резервуара при неравномерных осадках также посвящены работы Ямамото С. и Ковано К. [103], Кршупка В. [116]. Главным недостатком этих работ является то, что они рассматривают конкретные конструкции резервуаров, применяемых в Японии и на Западе. Так, в работе [103] рассматриваются напряжения в зависимости от объема резервуара. Рассматриваемые конструкции резервуаров, не используются в странах бывшего

СССР. В результате распространить результаты исследования на резервуары других конструкций не представляется возможным из-за отсутствия каких-либо аналитических зависимостей.

В работе чешского инженера В. Кршупки [117] приводится расчет деформаций в верхнем сечении корпуса резервуара при неравномерной осадке частного характера (симметричность относительно некоторого значения $\beta=0$), или при подъеме резервуара в нескольких точках. Результаты, полученные им, носят частный характер и не могут быть использованы для оценки прочности резервуаров в общем случае. [99]

Напряженное состояние днища резервуаров при неравномерных осадках основания исследовалось в работах Галеева В.Б. [22, 24], Слепнева И.В. [76], Бородавкина П.П. [15], Буренина В.А. [16], Любушкина В.В. [22] и других. Ими были получены зависимости, позволяющие определить максимальные напряжения в днище резервуара в зависимости от осадки.

Особый интерес для нас представляют современные исследования, посвященные оценке влияния пространственного положения резервуаров (неравномерной осадки по периметру днища) на НДС стенки резервуара. Здесь следует отметить работы Галеева В.Б. [23], Тарасенко А.А. [85, 86], Хоперского Г.Г. [99], Слепнева И.В. [76], Чепура П.В. [102].

В работе [23] автором рассматривается вопрос формирования и развития осадки резервуара, а также влияние осадки на его НДС. Автором предложена методика разложения осадок на составляющие в виде тригонометрических рядов различных порядков (равномерная - нулевой порядок, крен - первый порядок, неравномерная - второй и более высокие порядки). Рассмотрены различные варианты прогнозирования осадки резервуаров. Для моделирования неравномерной осадки автор прикладывает к уторному узлу силы, деформирующие резервуар до искомого состояния (состояния в условия неравномерной осадки). Подобное моделирование неравномерной осадки является спорным, т.к. условия работы резервуара не соответствуют реальным

условиям. Также разработанная автором методика не учитывает действительной геометрической формы поверхности резервуара.

Слепнев И.В. в работе [76] одним из первых в отечественной науке применил метод конечных элементов (МКЭ) к рассмотрению НДС резервуаров. Автором исследуется вопрос природы и описания неравномерной осадки, дается новый взгляд на ее рассмотрение как суммы трех составляющих равномерной осадки, крена и неравномерной осадки. Для оценки НДС РВС при неравномерной осадке автором предлагается использование МКЭ. Однако разработанная им методика не применима для определения НДС РВС с учетом их пространственного положения по ряду причин: разработанная автором методика предусматривает упруго-податливое закрепление верхней кромки, что не соответствует реальным условиям ее работы; как отмечается в работах Тарасенко А.А. и Хоперского Г.Г. [86, 99], автором были допущены некоторые неточности при решении уравнений, описывающих неравномерную осадку; моделирование неравномерной осадки рассматривается как вариант свободного провисания участка стенки, что не соответствует реальным условиям.

Исследования Тарасенко А.А. [85, 86] не имеют прямой направленности на изучение и оценку влияния пространственного положения РВС на его НДС. Работы посвящены разработке научно обоснованных рекомендаций по подъему резервуаров в процессе их ремонта. Однако подъем резервуара по своей сути является «экстремальным» случаем моделирования изменения пространственного положения РВС при неравномерной осадке по контуру днища. Поэтому результаты данных исследований представляют для нас особый интерес. В рамках исследований автором были выполнены экспериментальные исследования НДС РВС в процессе его подъема, результаты которых были сравнены с теоретическими исследованиями НДС при подъеме резервуара. Было установлено, что пространственное положение, а также несовершенства геометрической формы стенки резервуара, оказывают существенное влияние на НДС крупногабаритных резервуаров. В частности, несовершенства геометрической формы стенки резервуара вызывают изгибные напряжения,

составляющие до 30 % от предела текучести стали 09Г2С, из которой был сооружен исследуемый резервуар.

Однако разработанные автором методики экспериментального и теоретического исследования НДС РВС при подъеме не могут быть с достаточной эффективностью и точностью использованы для расчета НДС резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения по нескольким причинам: методика экспериментального исследования НДС РВС очень громоздка и потребует значительных материальных и трудовременных затрат на ее реализацию; при оценке влияния геометрических несовершенств стенки резервуара на его НДС рассматривается только вертикальная составляющая геометрии стенки (вертикальная образующая), которая аппроксимируется полиномом четвертой степени, при этом кривизна стенки в радиальном направлении не рассматривается; при рассмотрении воздействия одного подъемного устройства на НДС РВС расчеты проводились по упрощенным уравнениям оболочек слабо изменяющейся кривизны.

В работе [86] автором предпринята попытка определения НДС резервуара на основе метода конечных элементов при помощи программных комплексов, реализующих его. Автором проделана детальная работа по рассмотрению конструкции резервуара и моделированию его элементов различными наиболее подходящими конечными элементами (КЭ), что позволило решить поставленную задачу. Однако разработанная модель не может быть применена для анализа НДС РВС при его неравномерных осадках, так как модель не учитывает неравномерной осадки и действительной геометрической формы поверхности стенки резервуара, более того, используемые КЭ не позволяют это сделать.

В работе [99] автор оценивает НДС резервуара и его конструктивных элементов при равномерной и неравномерной осадке РВС. Целью изучения равномерной осадки было определение влияния коэффициента постели грунта на НДС резервуара, которое, по результатам исследования, отсутствует. Главным недостатком в данной части работы является то, что автор рассматривает только

один типоразмер резервуара при наличии фундаментного кольца под его стенкой. Других случаев не рассматривается. В качестве модели резервуара при неравномерной осадке автором выбрана модель неосесимметричной деформации замкнутой оболочки, описываемой упрощенной системой дифференциальных уравнений. В качестве способа решения системы дифференциальных уравнений предлагается использовать метод интегральных матриц. Разработанная автором методика не позволяет применить ее для определения НДС резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения по нескольким причинам: предлагаемая методика определения НДС РВС при неравномерных осадках не учитывает действительной геометрической формы поверхности стенки резервуара, по сути, рассматривается случай идеального цилиндра, деформированного в вертикальной плоскости; для задания граничных условий разработана отдельная методика определения неравномерных составляющих в осадке резервуара, основанная на предположении о идеальной окружности окрайки днища и представлении неравномерной осадки в качестве ломаной линии.

В работах [88, 89, 90, 101, 102] автором исследуется влияние неравномерной осадки по контуру днища на НДС резервуаров при помощи МКЭ. Автором получены аналитические зависимости между параметрами НДС конструктивных частей резервуара и величинами неравномерной осадки. Однако, разработанный автором алгоритм принятия решения о необходимости ремонта резервуаров при осадках его оснований не может быть в полной мере применен к резервуарам, находящимся в эксплуатации, так как автор проводит моделирование исходя из идеального представления начального положения резервуара, а неравномерная осадка, как и в работе [76], моделируется свободным провисанием. Более того, зависимости, полученные автором, применимы только к резервуару объемом 20000 м³.

В соответствии с действующей на сегодняшний день нормативной технической документацией [40, 61, 64, 67, 82] в процессе технического

диагностирования резервуаров необходимо определять их НДС. Проверочный расчет стенки резервуара на прочность выполняется по формуле:

$$\sigma = \frac{[n_1 \rho (H-x) + n_2 P_u] r}{100 \delta} \leq \gamma_c R_y^*, \quad (1.1)$$

где σ – напряжения в расчетном поясе резервуара, МПа;

n_1 – коэффициент перегрузки для гидростатического давления, $n_1=1$;

ρ – плотность нефтепродукта, кг/м³;

H – высота разлива нефтепродукта, м;

x – расстояние от днища резервуара до расчетного уровня, м;

n_2 – коэффициент перегрузки для избыточного давления и вакуума, $n_2=1,2$;

P_u – нормативная величина избыточного давления в пространстве под кровлей резервуара, $P_u=0,2$ кПа;

r – радиус резервуара по проекту, м;

δ – толщина стенки резервуара в расчетном поясе, м;

γ_c – коэффициент условий работы;

R_y^* – расчетное сопротивление стали по пределу текучести, МПа.

Проверка устойчивости производится по формуле:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{01}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{02}} \leq \gamma_c, \quad (1.2)$$

где σ_1 и σ_2 – соответственно расчетные кольцевые и осевые напряжения в стенке резервуара, МПа;

σ_{01} , σ_{02} – соответственно критические осевые и кольцевые напряжения, МПа;

γ_c – коэффициент условий работы, $\gamma_c=1$.

Формулы (1.1) и (1.2) разработаны для случая осесимметричного нагружения резервуара, то есть они не учитывают неравномерную осадку основания резервуаров и действительную геометрию поверхности резервуара (наличие отклонений образующих от вертикали, нецилиндричность резервуара и т.д.).

Таким образом, анализ методов расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и геометрической формы показал, что определяемое ими фактическое напряженно-деформированное состояние стенки резервуаров может быть представлено выражением (в зависимости от конкретной методики выражение может варьироваться – таблица 1.5):

$$\sigma_{\text{ф}} = \sigma_{\text{ид}} \pm \Delta\sigma_{\text{н.о}}, \quad (1.3)$$

где $\sigma_{\text{ф}}$ – фактические напряжения, рассчитываемые по методике, МПа;

$\sigma_{\text{ид}}$ – напряжения, возникающие в недеформированном резервуаре, находящемся в проектном положении, МПа;

$\Delta\sigma_{\text{н.о}}$ – изменения напряжений, вызванные неравномерной осадкой (пространственным положением), МПа.

Выражение (1.3) показывает, что при определении фактических напряжений $\sigma_{\text{ф}}$ существующие методики учитывается только изменение, вызванное неравномерной осадкой резервуара $\Delta\sigma_{\text{н.о}}$. Изменение напряжений $\Delta\sigma_{\text{н.г}}$, вызванные несовершенством геометрической формы стенки резервуара, не учитывается.

Следовательно, на сегодняшний день отсутствует методика оценки НДС стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

В заключение данного параграфа необходимо отметить, что все существующие методики определения НДС РВС при неравномерных осадках по контуру днища предполагают использование данных традиционного геодезического обследования резервуаров (использование данных о величинах осадки для определения НДС резервуаров или использование данных о величинах осадки для сравнения ее значений с критическими значениями). Однако, как показано в следующем параграфе, традиционное геодезическое обследование обладает рядом недостатков, основным из которых является неполнота информации о действительном пространственном положении и реальной геометрической форме стенки резервуара.

Таблица 1.5 – Анализ методик оценки влияния пространственного положения резервуаров на его НДС

Автор	Галеев В.Б.	Слепнев И.В.	Тарасенко А.А.	Хоперский Г.Г.	Тарасенко А.А. (МКЭ)	Чепур П.В.	Действующая НТД
Учет действительной геометрии стенки	Нет	Нет	Аппроксимация вертикальной образующей	Нет	Нет	Нет	Отклонения образующей от вертикали
Моделирование неравномерной осадки	Приложение к угорному узлу силы, деформирующей стенку до искомого состояния	Свободное провисание стенки на определенном участке	Действие сосредоточенной нагрузки	Неосесимметричная деформация (аппроксимация данных нивелирования)	Действие сосредоточенной нагрузки	Свободное провисание стенки на определенном участке	Нивелировка окрайки днища
Учет проектных нагрузок	Гидростатическое и избыточное давление	Гидростатическое и избыточное давление	Нет	Гидростатическое и избыточное давление	Нет	Все проектные нагрузки	Гидростатическое и избыточное давление
«Целостность» рассмотрения стенки	Полностью	Полностью	Участок	Полностью	Участок	Полностью	Участки
Возможность вычисления НДС РВС всех конструкций при неравномерных осадках	Да	Да	Да	Да	Да	Нет	Да
Фактические напряжения, рассчитываемые по методике, σ_{ϕ}	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о} \pm \Delta\sigma_{в.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о}$	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид}$

Примечание: $\Delta\sigma_{в.о}$ – изменения напряжений вдоль образующей, вызванные ее отклонением от вертикали, МПа.

1.3. Анализ эффективности существующих методов определения пространственного положения и геометрической формы резервуаров

Полное и частичное техническое обследование вертикальных стальных резервуаров предусматривает определение их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы (данные работы входят в состав натурного обследования резервуара). Определение пространственного положения резервуара проводится по трем основным причинам. Во-первых, определение пространственного положения резервуара является наиболее простым способом контроля за изменением его напряженно-деформированного состояния. Во-вторых, результаты определения пространственного положения и действительной геометрической формы резервуара являются основой для дальнейшего определения остаточного ресурса резервуара. Наиболее прогрессивным методом определения остаточного ресурса является оценка НДС резервуара с помощью специализированных программных комплексов, основанных на численных методах моделирования. Для работы в этих программных комплексах необходима компьютерная трехмерная модель резервуара, для создания которой и используются результаты определения его пространственного положения. В-третьих, данные обследования позволяют прогнозировать дальнейшее развитие осадки и дефектов геометрической формы резервуара.

Действующие на сегодняшний день нормативные технические акты [31, 60, 61, 63, 64, 91] подразделяют обследование действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуара на два крупных блока:

- определение высотных отметок окрайки днища;
- измерение геометрической формы стенки резервуара.

Относительные и абсолютные высотные отметки окрайки днища определяют путем нивелирования наружного контура днища в точках, отстоящих друг от друга не более чем на 6 м (как правило, в точках, соответствующих вертикальным швам нижнего пояса), начиная от приемо-раздаточного патрубка с

нумерацией по часовой стрелке. [60] При нивелировании производится измерение отклонений геометрических параметров днища резервуара от номинальных и определяются размеры местных деформаций (хлопунов). Пример исполнительной схемы нивелирования наружного контура днища представлен на рисунке 1.3.

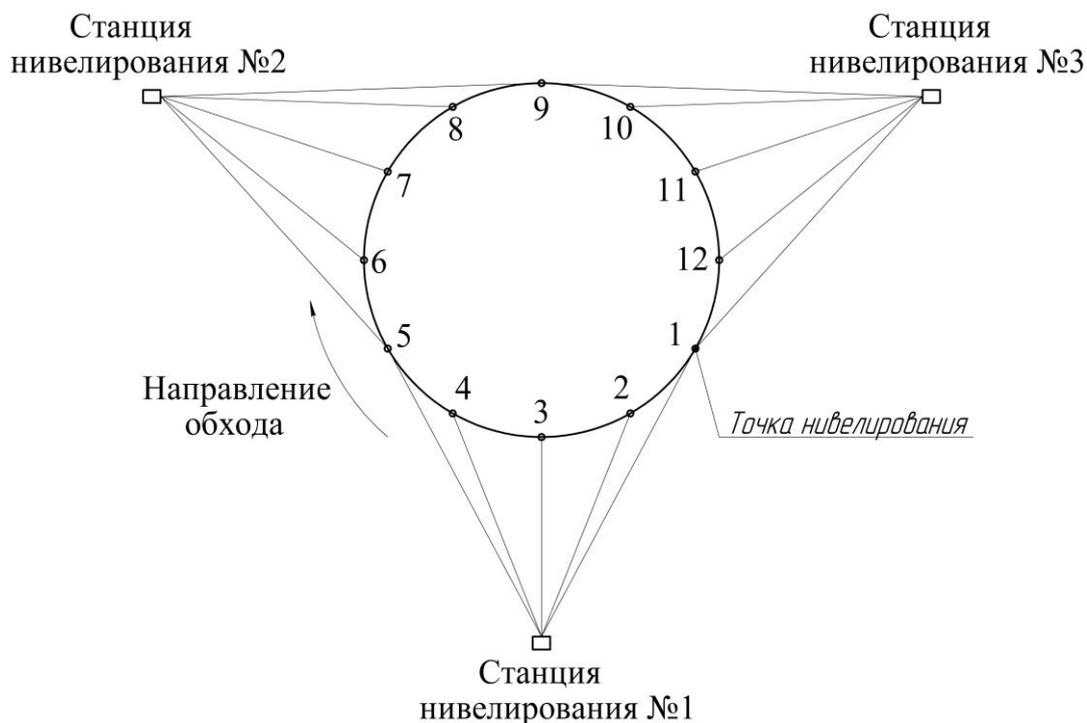


Рисунок 1.3 – Пример исполнительной схемы нивелирования наружного контура днища

Высота точек нивелирования определяется в Балтийской системе высот. Поэтому необходимо выполнять высотную привязку обследуемого резервуара к реперу. Для этого выполняется замкнутый нивелирный ход через одну из точек нивелирования окрайки днища резервуара или какую-либо другую точку резервуара, которую можно использовать в качестве рабочего репера. [91]

Нормативные технические акты [31, 64, 91] предусматривают несколько методов нивелирования наружной окрайки днища:

- геометрическое нивелирование;
- тригонометрическое нивелирование;
- гидростатическое нивелирование.

Геометрическое нивелирование принимается в качестве основного метода измерения вертикальных перемещений (осадки резервуара). Определение

превышений производится с помощью горизонтального визирного луча, создаваемого геодезическим прибором – нивелиром. Измерение превышений определяют способом «из середины», как наиболее точным, надежным и менее трудоемким по сравнению с другими способами геометрического нивелирования.

Тригонометрическое нивелирование применяют в условиях резких перепадов высот. Данный вид нивелирования выполняется теодолитом или электронным тахеометром. Тригонометрическое нивелирование требует больших затрат труда на камеральную обработку полученных данных, чем геометрическое нивелирование, поскольку не происходит непосредственного измерения превышения точки нивелирования над прибором.

Гидростатическое нивелирование (переносным шланговым прибором) применяется в следующих случаях:

- для измерения большого числа точек в труднодоступных местах;
- нет прямой видимости между марками;
- производство измерительных работ человеком невозможно по условиям техники безопасности.

Суть метода гидростатического нивелирования представлена на рисунке 1.4.

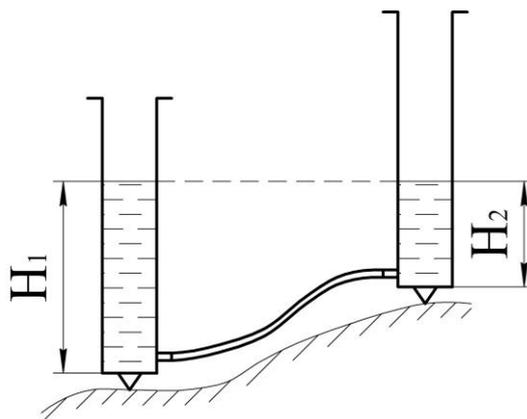


Рисунок 1.4 – Гидростатическое нивелирование

Для определения реальной геометрической формы стенки резервуара измеряются величины отклонений образующих стенки от вертикали, проведенной из нижней точки первого пояса, на уровне верха каждого пояса, а также измеряются размеры местных деформаций. В случае, если длина листов

превышает 6 м, то измерения производятся по сварным швам и в середине листа. Измерения следует производить на расстоянии 50 мм от верхнего горизонтального сварного шва. [60, 61, 91]

В случае превышения допустимых значений отклонений дополнительно проводятся измерения отклонений от вертикали образующих с шагом в 1 м вправо и влево до следующей образующей. При обнаружении недопустимой вмятины (выпучины) наносится сетка с шагом 20 см и площадью больше размеров вмятины (выпучины) и проводятся измерения деформации стенки. [61]

Измерения отклонений от вертикали образующих стенки производят либо с помощью отвеса путем прямых измерений, либо при помощи теодолита, электронного тахеометра или другими методами.

При использовании геодезических приборов (теодолита, электронного тахеометра) для обследования стенки резервуара производят угловые измерения проекций образующих стенки на горизонтальную плоскость, на основании которых вычисляются величины отклонений. Схема измерений горизонтальных смещений образующей стенки резервуара представлена на рисунке 1.5.

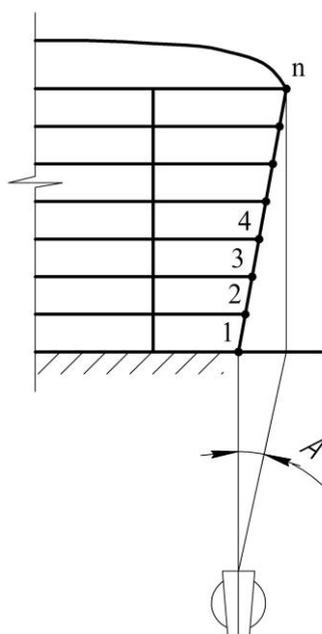


Рисунок 1.5 – Схема измерения горизонтальных смещений образующей стенки резервуара

Измерения реальной геометрической формы стенки резервуара и определение высотных отметок окрайки дна необходимо проводить дважды:

на заполненном и пустом резервуаре, с определением мест наибольших деформаций и выявления напряженно-деформированного состояния стенки под нагрузкой. При этом необходимо проводить дополнительные измерения местных выпучин и вмятин. [60, 61, 91]

В соответствии с нормативными документами [60, 91] для проведения геодезического обследования вертикальных стальных резервуаров должны применяться следующие геодезические приборы:

- нивелир точный по ГОСТ 10528-90 [29] со средней квадратической погрешностью измерения превышений 3 мм на 1 км двойного нивелирного хода и предназначенный для нивелирования III и IV классов или другие приборы с параметрами не хуже указанных;

- теодолит технический по ГОСТ 10529-90 [30] со средней квадратической погрешностью измерения угла одним приемом 30" и менее.

Таким образом, существующая на сегодняшний день методика определения реальной геометрической формы и действительного пространственного положения резервуаров вертикальных стальных позволяет получить информацию о следующих точках:

1) при отсутствии недопустимых дефектов геометрической формы (рисунок 1.6):

- абсолютные и относительные высотные отметки окрайки днища в точках, отстающих друг от друга не более чем на 6 метров (как правило в точках, соответствующих вертикальным швам нижнего пояса);

- отклонения образующей стенки от вертикали, проведенной из нижнего пояса (как правило, точки нивелировки), в точках верха каждого пояса;

2) при наличии недопустимых дефектов:

- абсолютные и относительные высотные отметки окрайки днища в точках, отстающих друг от друга не более чем на 6 метров (как правило в точках, соответствующих вертикальным швам нижнего пояса);

- отклонения образующей стенки от вертикали, проведенной из нижнего пояса (как правило, точки нивелировки), точках верха каждого пояса;

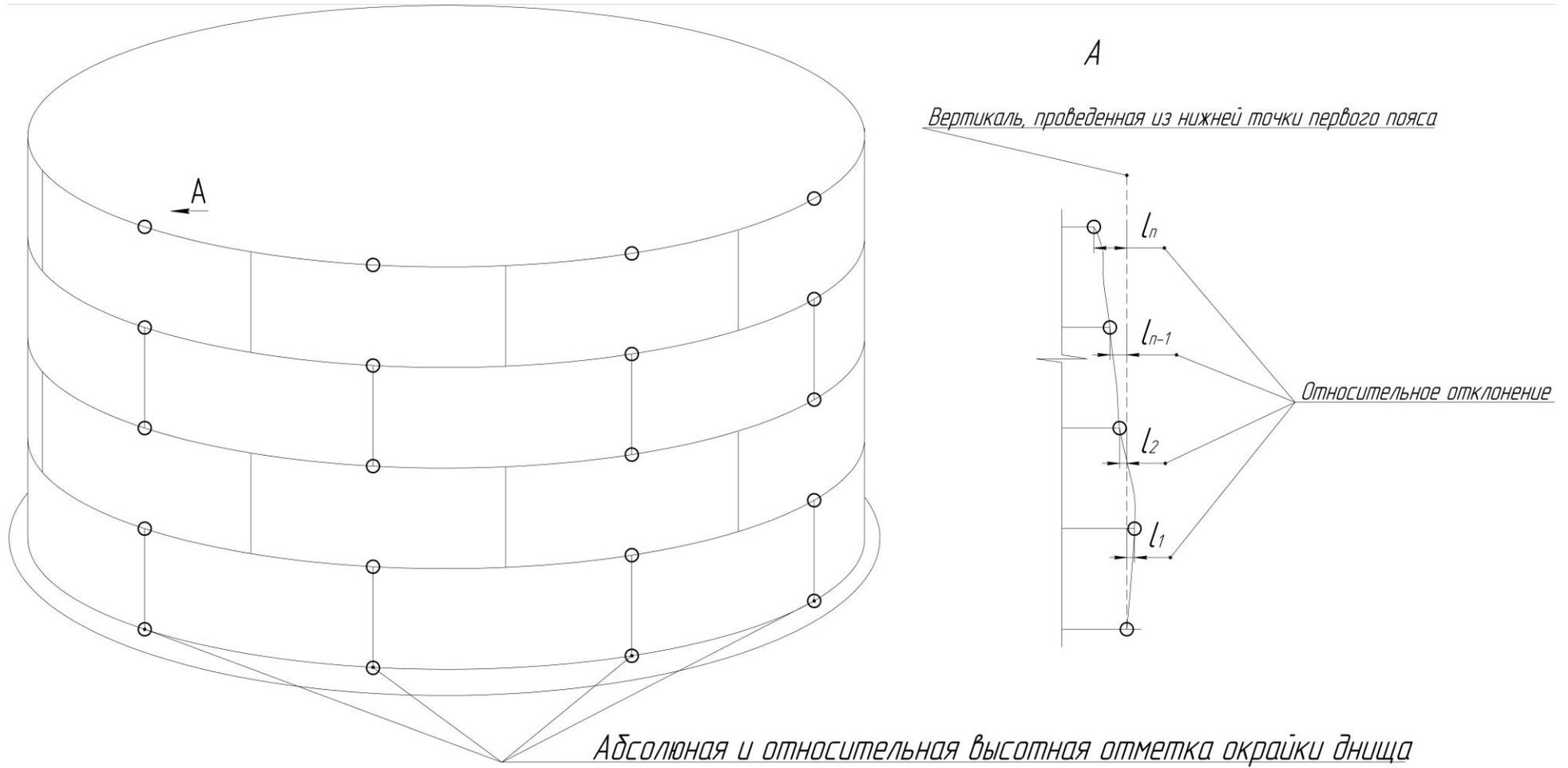


Рисунок 1.6 – Информация о пространственном положении и геометрической форме резервуара, получаемая при геодезическом обследовании

- отклонения от вертикали образующих с шагом в 1 метр вправо и влево от образующей, имеющей критические отклонения от вертикали, в точках верха каждого пояса;

- деформация стенки в местах недопустимых вмятин (выпучин) в точках сетки с шагом 20 см.

Анализ показал, что описанная выше методика определения действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуара позволяет сделать заключение о необходимости его ремонта по причине наличия недопустимых осадок и дефектов геометрической формы, предельные значения которых нормативно закреплены. Однако данная методика обладает рядом существенных недостатков, среди которых можно выделить следующие:

1. Низкая степень детализации.

Данные, полученные при геодезическом обследовании, позволяют получить информацию только о ключевых точках (в частности, пересечениям образующих с горизонтальными сварными швами). Форма поверхности стенки, лежащая между этими точками, за исключением недопустимых вмятин (выпучин), остается для нас «неизвестной». В частности, можно лишь приближенно судить, где начинается и заканчивается та или иная вмятина (выпучина), где стенка совпадает с вертикалью и т.д.

В результате при анализе НДС резервуара, находящегося в эксплуатации (когда большое значение имеют начальные условия для конструкции), можно лишь приближенно судить о степени точности полученной при моделировании картины распределения напряжений/перемещений и действительной картины распределения напряжений/перемещений. С увеличением объема резервуаров, а, следовательно, уменьшением жесткости его конструкции в целом, важность наличия всей полноты информации и геометрии резервуара возрастает.

2. Раздельное рассмотрение дефектов геометрической формы резервуара и его пространственного положения.

Величины определенных высотных отметок окрайки днища и отклонений образующих от вертикали сравниваются с табличными критическими значениями данных величин, установленных нормативными техническими актами. Нормативные технические акты предусматривают градацию данных критических величин в зависимости от объема резервуара и взаимного расположения точек, в которых определяется величина осадки. В результате осадка и несовершенство геометрической формы резервуара рассматриваются отдельно, не учитывается их взаимное влияние на НДС резервуара.

3. Высокая трудоемкость проведения работ и последующей камеральной обработки данных.

Специалисту по геодезическому обследованию требуется вручную произвести измерение пространственного положения каждой необходимой точки, количество которых значительно увеличивает с увеличением объема РВС. При наличии недопустимых вмятин (выпучин) количество требуемых измерений возрастает. Также значительный объем работ необходимо выполнить при камеральной обработке данных и построении трехмерной компьютерной модели резервуара.

4. Длительное время выполнения работ.

Указанная выше высокая трудоемкость выполнения работ по определению действительной геометрической формы РВС обуславливает и длительность проведения геодезического обследования. Так, на обследование резервуара большого объема может уходить до одного месяца.

5. Необходимость дополнительно выезда на объект, при обнаружении ошибок на этапе камеральной обработки данных.

6. Большая вероятность наличия ошибок (человеческий фактор) вследствие малой автоматизации процесса.

Специалист, проводящий работы по геодезическому обследованию резервуара, принимает решение о необходимости дополнительных измерений дефектов геометрии резервуара визуально, на основании собственного опыта. При

этом велика вероятность возникновения ошибок, при которых часть критических дефектов не будет отражена в результатах обследования.

Таким образом, указанные выше недостатки говорят о неэффективности существующей методики геодезического обследования резервуаров для оценки его НДС с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы. Следовательно, требуется разработать методику, позволяющую получить детальную информацию о пространственном положении и действительной геометрической форме резервуара. Для решения данной задачи предлагается использовать технологию трехмерного наземного лазерного сканирования (НЛС).

Выводы по главе

1) Анализ аварийности и причин аварий РВС показал, что неравномерная осадка является одной из основных причин их разрушения. На долю неравномерной осадки приходится порядка 33% всех случаев аварий резервуаров. Вместе с тем, дополнительные дефекты геометрической формы стенки резервуара в сочетании с неравномерной осадкой могут привести к аварийным ситуациям и при нормативных допусках на дополнительные дефекты и неравномерную осадку. Таким образом, изменение пространственного положения РВС в сочетании с дефектами геометрической формы стенки оказывает основное влияние на их НДС.

2) Вопросами расчета НДС резервуаров с учетом их пространственного положения и геометрической формы занималось множество исследователей. Наибольшей полнотой и проработкой отличаются работы Галеева В.Б., Слепнева И.В., Тарасенко А.А., Хоперского Г.Г. и Чепура П.В. Анализ показал, что разработанные данными авторами методы не дают решения задачи оценки совместного воздействия действительного пространственного положения и реальной геометрической формы стенки резервуара на ее НДС, а ограничиваются только учетом пространственного положения. При этом в действующей

нормативно-технической документации при определении НДС стенки резервуаров не учтены как реальная геометрическая форма, так и действительное пространственное положение стенки резервуара.

Таким образом, требуется разработка методики оценки НДС стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и геометрической формы. Следует отметить, что в рамках данной работы в качестве нулевой точки отсчета рассматривается положение резервуара на момент его лазерного сканирования, т.е. с отсчетом от его текущего пространственного положения и геометрической формы.

3) Традиционное геодезическое обследование резервуаров на текущем этапе развития науки и техники не может более считаться эффективным, так как обладает значительным количеством недостатков. Главным недостатком геодезического обследования является то, что оно не дает информации о достаточном количестве точек, характеризующих действительное пространственное положение и геометрическую форму резервуаров. Преодолеть недостатки традиционного геодезического обследования, а также оценить совместное влияние реальной геометрической формы стенки и действительного пространственного положения резервуара на его НДС может применение технологии трехмерного наземного лазерного сканирования.

ГЛАВА 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ

2.1. Технология наземного лазерного сканирования

Трехмерное сканирование – это систематический процесс определения координат точек, принадлежащих поверхностям физических объектов, с целью последующего получения их пространственных математических моделей. [96, 100]

Наиболее современным бесконтактным трехмерным сканером является наземный лазерный сканер. Сущность наземного лазерного сканирования заключается в измерении с высокой скоростью расстояния от сканера до точек объекта и регистрации соответствующих направлений (вертикальных и горизонтальных углов). Следовательно, при наземном лазерном сканировании измеряемые величины аналогичны величинам, измеряемым при работе с электронными тахеометрами. [74] Таким образом, по своей сути НЛС является следующим этапом развития электронных тахеометров, отличающимся от них принципом тотальной съемки всей поверхности обследуемого объекта.

В наземных лазерных сканерах реализуются два основных метода определения расстояния с помощью лазерного луча: импульсный и фазовый.

При измерении расстояния импульсным методом измеряется непосредственно время распространения коротких, регулярно следующих со сравнительно долгими паузами импульсов, от приемно-передающего устройства до объекта и обратно. [14, 74, 114] В результате, зная скорость распространения электромагнитной волны v , м/с, можно определить расстояние:

$$R = \frac{v \cdot \tau}{2}, \quad (2.1)$$

где τ – время, измеряемое с момента подачи импульса лазерным устройством до момента приема отраженного от объекта импульса, с.

Фазовый метод основан на том, что фаза гармонического колебания есть линейная функция времени, и, следовательно, изменение фазы за некоторый

промежуток времени будет линейной функцией расстояния, пройденного за это время гармоническим колебанием. [14, 74, 114] Тогда расстояние может быть определено по формуле:

$$R = \frac{\varphi_{2D} \cdot v}{4\pi \cdot f}, \quad (2.2)$$

где φ_{2D} – разность фаз между отправленным и принятым сигналом, рад;
 f – частота, Гц.

Таким образом, принцип работы наземного лазерного сканера заключается в следующем: пучок, излучаемый лазерным дальномером I класса, направляется блоком развертки на объект, отражаясь от которого, возвращается в сканирующую систему, попадая на приемное устройство, где и фиксируется время возвращения (фаза) отраженного сигнала. При этом происходит фиксирование направления распространения лазерного луча и расстояние до точек объекта (рисунок 2.1). В качестве блока развертки в НЛС выступают сервопривод и полигональное зеркало или призма. Отклонение лазерного луча в горизонтальной плоскости происходит за счет поворота верхней части сканера, а в вертикальной плоскости – за счет вращения или качания зеркала.

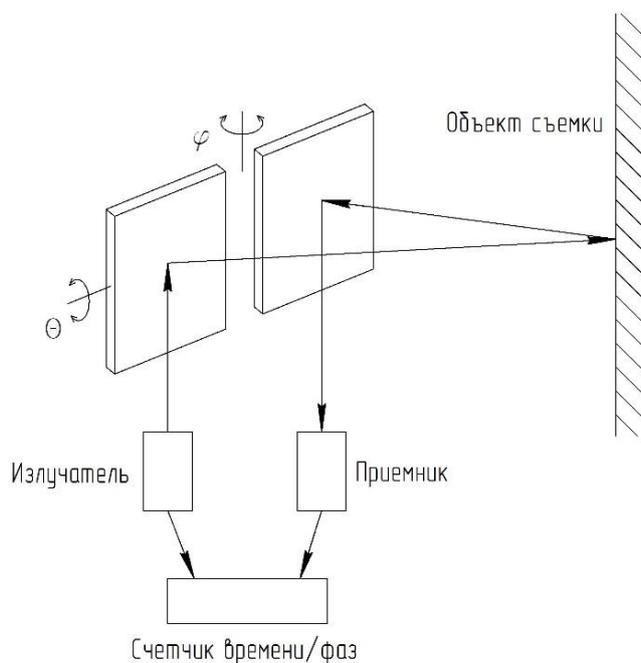


Рисунок 2.1 – Принципиальная схема работы НЛС

Результатом работы НЛС является файл, содержащий данные о расстоянии от лазерного сканера до точек поверхности объекта, вертикальные и

горизонтальные углы, характеризующие направление распространения лазерного луча, интенсивность отраженных сигналов и реальный цвет (набор фиксируемых данных может различаться в зависимости от конкретного лазерного сканера). Полученные данные могут быть представлены в виде скана (двумерного отображения) или облака точек (трехмерного отображения).

Скан – это растровое изображение, значение пикселей которого содержат информацию об измеренном расстоянии, интенсивности отраженного сигнала и RGB-составляющей, характеризующей реальный цвет точки. В зависимости от конкретной модели сканера набор сохраняемой информации может варьироваться. Строка и столбец каждого пикселя полученного растра содержат информацию о значениях измеренных вертикальных и горизонтальных углов (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Растровое представление результатов НЛС (скан)

Трехмерной формой представления результатов НЛС является облако точек лазерных отражений от объектов, имеющих пять характеристик: пространственные координаты (X , Y , Z), интенсивность и реальный цвет (рисунок 2.3). Однако, так как лазерный сканер производит измерения в полярной системе координат, то для перевода данных в декартову систему координат (рисунок 2.4) используется формула:

$$\begin{cases} X = R \cos\varphi \sin\theta \\ Y = R \sin\varphi \sin\theta \\ Z = R \cos\theta \end{cases} \quad (2.3)$$

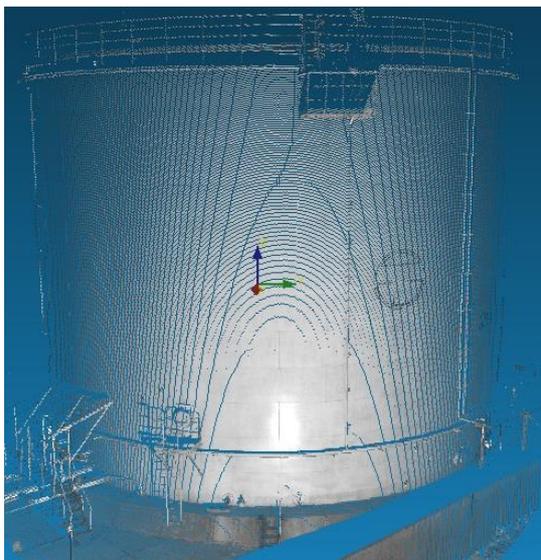


Рисунок 2.3 – Трехмерное представление результатов НЛС (облако точек)

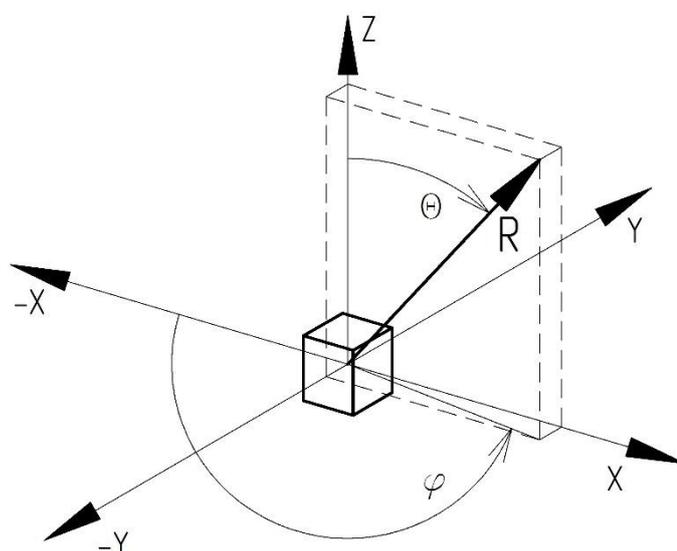


Рисунок 2.4 – Система координат НЛС

где X, Y, Z – пространственные координаты точек объекта, м;

R – измеренная дальность от точки стояния сканера до объекта, м;

φ – горизонтальный угол измеренного направления лазерного луча R , град;

θ – вертикальный угол направления луча R , град.

Для конкретного лазерного сканера формула (2.3) имеет индивидуальный вид, который учитывает несовпадение источника излучения и приемника, эксцентриситет вертикальной и горизонтальной осей вращения прибора и иные параметры калибровки сканера. [74]

Результаты НЛС, представленные в виде облака точек, впоследствии могут быть использованы для получения оболочечной или твердотельной трехмерной

математической модели объекта, плоского чертежа, набора сечений, поверхности и т.д.

Первые НЛС отличались невысокой точностью съемки, поэтому нашли свое применение только при выполнении прикладных топографических задач. Однако точность измерения расстояний и углов наземными лазерными сканерами последнего поколения сопоставима с точностью электронных тахеометров типов Та2 и Та5 по ГОСТ Р 51774-2001 [33]. Данные типы электронных тахеометров соответствуют требованиям [61] и применяются при техническом диагностировании резервуаров. Следовательно, современные НЛС могут быть применены при техническом диагностировании резервуаров с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

2.2. Анализ нормативных технических актов в области наземного лазерного сканирования

Технология трехмерного наземного лазерного сканирования существует на рынке геодезического оборудования и трехмерного проектирования уже более 10 лет. По мере развития систем наземного лазерного сканирования (увеличение точности результатов, рост производительности и скорости съемки, создание сопутствующего программного обеспечения, способного решать новые задачи и т.д.) данная технология находила все новые области применения. Однако, не смотря на все очевидные преимущества, ее развитие сдерживалось рядом факторов:

- различные производители, отражая технические характеристики своих приборов, использует различные критерии их оценки, зачастую не сопоставимые между собой;
- различные форматы хранения данных наземного лазерного сканирования (часто являющиеся закрытыми), используемые различными производителями, не

позволяют комплексно применять необходимое программное обеспечение ввиду несовместимости форматов данных и трудности их взаимного конвертирования;

- отсутствует нормативно закреплённая методика выполнения работ по лазерному сканированию.

В результате странами Европейского Союза, США и Российской Федерацией был разработан ряд нормативных технических актов, призванных регламентировать и унифицировать вопросы применения трехмерного наземного лазерного сканирования.

В Европейском Союзе разработан блок нормативных документов ISO 17123-4 [111, 112], который регламентирует методы полевых испытаний измерительных геодезических приборов. Отдельного нормативного документа по методам испытаний наземных лазерных сканеров на текущий момент в Европейском Союзе нет. Однако с каждым годом появляется все больше публикаций, которые рассматривают будущее содержание такого нормативного документа, например, Reinhard Gottwald, Switzerland «Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS). A Contribution to a Future ISO Standard». [116]

Первой попыткой создания подобных документов в Европе стали нормативные акты, разработанные Ассоциацией немецких инженеров - The Association of German Engineers (VDI). Три нормативных документа [118, 119, 120] рассматривают практические тесты, необходимые для приемочных испытаний измерительных лазерных систем и оценки точности их работы.

В США с 2006 года действует Комиссия E57 3D Image, отвечающая за разработку нормативно-технических документов в области трехмерного лазерного сканирования. На сегодняшний день ими разработаны несколько нормативных документов [104, 105, 106, 107]. Данные документы охватывают собой ряд вопросов наземного лазерного сканирования:

- основная терминология и унификация применяемых определений;
- методы испытания трехмерных лазерных сканирующих систем с целью выявления их точности и применимости для той или иной сферы;
- обеспечение безопасности при проведении работ с лазерными сканерами;

– разработка единого формата хранения данных наземного лазерного сканирования, известного как E57.

Таким образом, разработанные на текущий момент в странах Европы и США документы регулируют вопросы определения точности наземных лазерных систем, форматов хранения данных и безопасности при проведении работ по лазерному сканированию. Однако не существует нормативно закреплённой методики проведения работ по наземному лазерному сканированию с целью оценки технического состояния зданий и сооружений.

В Российской Федерации разработаны три нормативных документа [54, 55, 80], устанавливающих требования к проведению наземного лазерного сканирования при выполнении геодезических работ.

Методика МДС 11-20.2009 [54] регламентирует процесс исполнительной съёмки всех элементов навесных фасадных систем с воздушным зазором при возведении высотных зданий, сооружений и комплексов. Данный документ рассматривает возможность применения наземного лазерного сканирования для проведения исполнительной съёмки навесных фасадных систем с воздушными зазорами.

Документ рассматривает ряд основных требований, которые необходимо выполнить при съёмке объектов с использованием НЛС (установка на объекте не менее трёх опорных точек, обеспечение взаимного перекрытия сканов при выполнении съёмки и другие), устанавливает требования к точности применяемых приборов (приводит примеры конкретных приборов, удовлетворяющих этим требованиям) и указывает перечень рекомендуемого программного обеспечения. Однако следует отметить, что требования к проведению работ носят наиболее общий характер. Их выполнение требует само применение технологии наземного лазерного сканирования. Требования, предъявляемые к комплексам оборудования по наземному лазерному сканированию, относятся к характеристикам приборов предыдущих поколений, которые являются не актуальными на сегодняшний день. Методологические

вопросы проведения съемки с целью обеспечения повышения точности работ, полноты съемки и т.д. документом не рассматриваются.

СТО Методологическая инструкция 71.12.12 [80] устанавливает требования к проведению работ в области геодезии с применением 3D-сканера. Данный документ более подробно, чем МДС 11-20.2009 [54], рассматривает все технологические этапы проведения работ по лазерному сканированию. СТО Методологическая инструкция 71.12.12 представляет собой описание совокупности последовательных действий (подготовительные работы, съемка на объекте, камеральная обработка и т.д.), которые должна выполнить Инженерная организация (специалист по НЛС, специалист по камеральной обработке и другие) с момента получения заказа от Заявителя до момента сдачи ему результатов работы. Данная инструкция не устанавливает технических требований к процессу выполнения работ и применяемым приборам, квалификации персонала и точности получаемых результатов.

Наибольшей проработкой вопросов применения НЛС отличается МИ 3171-2008 [55], устанавливающая требования к проведению калибровки резервуаров стальных вертикальных цилиндрических для нефти и нефтепродуктов типов РВС, РВСП, РВСПА, РВСПК номинальной вместимостью до 50000 м³. Данная инструкция в полной мере регламентирует необходимые мероприятия для проведения калибровки резервуара при помощи НЛС. В инструкции определены требования к точности сканеров и подготовке персонала; определен порядок проведения сканирования, с учетом необходимых мер безопасности; определены параметры, необходимые для проведения построения 3D модели и проверки её на соответствие объекту моделирования; определена последующая процедура обработки трехмерной информации, для получения результатов с контролируемой точностью и т.д.

Основным недостатком данной инструкции является то, что результаты наземного лазерного сканирования используются с целью подтверждения результатов, полученных посредством измерений с использованием геодезических приборов, измерительных рулеток и линеек. В методике не

рассмотрена возможность прямого вычисления объема резервуара и его пространственного положения (наклоны и осадки), а также использования НЛС как самостоятельного диагностического прибора.

Таким образом, на сегодняшний день в Российской Федерации не разработано полноценной методики по технической диагностике вертикальных стальных резервуаров при помощи НЛС с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы. Более того, не унифицированы термины и определения в области наземного лазерного сканирования.

2.3. Анализ факторов, влияющих на точность результатов измерений наземными лазерными сканерами

При разработке методики применения технологии трехмерного наземного лазерного сканирования для определения действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуаров наиболее важным является вопрос обеспечения точности результатов измерений.

Различные производители НЛС указывают паспортную точность своих приборов в технической документации к ним. Однако точность результатов измерений варьируется от прибора к прибору, зависит от их индивидуальной калибровки, условий производства работ по лазерному сканированию и т.д. Более того, каждая точка, измеренная в процессе сканирования, содержит ряд несистематических ошибок в определении ее величин (расстояние до точки и ее положение). Следовательно, большое значение имеет систематизация ошибок, возникающих при наземном лазерном сканировании, для разработки мероприятий, позволяющих устранить или снизить их величину до минимального значения. Ошибки в результатах измерений, возникающие при проведении работ по наземному лазерному сканированию, можно разбить на четыре группы [39, 74, 114]:

- инструментальные ошибки;

- ошибки, вызванные окружающей средой (вибрация прибора, затухание электромагнитных волн и т.д.);
- ошибки, обусловленные метрологическими свойствами снимаемого объекта (геометрическая форма, текстура поверхности, материал и т.д.);
- методологические ошибки.

Методологические ошибки в результатах измерения НЛС вызваны неверной методикой проведения работ и малым опытом персонала. Например, выбор чрезмерного разрешения, избыточного в данной ситуации, может привести к возникновению ошибок из-за накладывания разных сигналов лазерного луча друг на друга. Или, например, использование НЛС, рассчитанного для работы на дальних дистанциях, на малом расстоянии до объекта приведет к увеличению погрешности измерений, так как точность подобных НЛС на близких дистанциях, как правило, меньше. Ошибки методологического характера исключаются разработкой ряда общих требований к порядку и организации проведения работ по наземному лазерному сканированию.

Инструментальные ошибки

Инструментальные ошибки вызваны технологией изготовления приборов (точностью сборки, системой охлаждения и т.д.), используемыми компонентами (дальномерный блок, блок измерения углов и т.д.), а также способом разрешения неоднозначности при вычислении расстояний. Инструментальные ошибки отражены в точности приборов, указанной в техническом паспорте. Паспортная точность определяется на этапе сборки и юстировки прибора, а затем периодически подтверждается во время калибровки и поверки.

На сегодняшний день наибольшей из инструментальных ошибок является ошибка измерения расстояния от прибора до снимаемого объекта. В общем случае величина ошибки измерения расстояния m_R , м, фазовым методом с использованием различных способов разрешения неоднозначности может быть определена по формуле [14, 74]:

$$m_R = \sqrt{m_K^2 + \left(\frac{v}{4\pi f}\right)^2 m_\varphi^2 + R^2 \left[\left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{m_v}{v}\right)^2\right]}, \quad (2.4)$$

где m_K – ошибка определения постоянной поправки прибора, м;

m_φ – ошибка измерения разности фаз, рад;

m_f – частотная ошибка, Гц;

m_v – ошибка определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн, м/с.

Ошибка постоянной поправки прибора m_K зависит от конструкции прибора, его точности и способа определения постоянной. Данная ошибка объясняется тем, что при прохождении лазерного луча через оптическую систему прибора и прохождении электрических сигналов через различные цепи возникает фазовая задержка. В результате измеренное расстояние будет отличаться от «истинного». В современных приборах данная ошибка составляет десятые миллиметра или их доли и имеет систематический характер. [14]

Ошибка измерения разности фаз m_φ главным образом зависит от инструментальной точности фазометра и содержит как случайную, так и систематическую составляющую. Ее возникновение связано со способом регистрации разности фаз, условиями измерений и т.д. [14, 74]

Частотная ошибка m_f сканеров с фиксированными частотами складывается из ошибки за нестабильность частоты и ошибки эталонирования. В приборах с плавным изменением частоты ошибка m_f зависит главным образом от способа ее измерения. Частотная ошибка носит случайный характер, но в сканерах с фиксированными частотами имеет также систематическую составляющую, обусловленную неточной установкой частот в номинал (ошибка эталонирования) и медленным дрейфом частоты генератора. [74]

Ошибка определения рабочей скорости распространения электромагнитных волн m_v крайне мала и составляет порядка нескольких единиц шестого знака. Основной вклад в эту ошибку вносит ошибка определения среднего показателя преломления воздуха между сканером и снимаемым объектом.

Из формулы (3.4) следует, что ошибка постоянной поправки прибора m_K и ошибка измерения разности фаз m_φ не зависят от расстояния до измеряемого объекта, а частотная ошибка m_f и ошибка определения рабочей скорости

распространения электромагнитных волн m_v зависят. По этой причине формулу (2.4) часто представляют в виде:

$$m_R = a + bR, \quad (2.5)$$

где a и b – коэффициенты, определяемые эмпирическим путем, которые находят путем сопоставления измеренных расстояний с эталонными, либо рассчитывают по результатам лабораторных определений отдельных ошибок.

Таким образом, инструментальные ошибки зависят от дальности от объекта съемки до лазерного сканера и от самого изготавливаемого прибора (качества его изготовления, используемых компонентов, способов разрешения неоднозначности при вычислении расстояний и т.д.). Ошибки, вызванные дальностью до объекта съемки, могут быть устранены правильным выбором установки наземного лазерного сканера на месте выполнения работ, а также правильным выбором используемого прибора (на расстоянии, не превышающем нескольких сотен метров, наибольшей точностью обладают фазовые лазерные сканеры, на больших расстояниях наибольшей точностью обладают импульсные лазерные сканеры). Ошибки, вызванные самим прибором, могут быть устранены по средствам замены частей и/или усовершенствованием технологии сборки прибора производителями. Следует отметить, что их можно уменьшить во время проведения калибровки прибора. На сегодняшний день написано множество статей [43, 117, 118] предлагающих различные методики проведения калибровки наземных лазерных сканеров с целью повышения точности их работы.

Ошибки, вызванные окружающей средой

При проведении работ по наземному лазерному сканированию в условиях промышленного предприятия на результаты измерений негативное влияние оказывает приземный слой атмосферы (интенсивное перемешивание воздушных масс, различия в температуре, влажности и плотности воздуха на различных участках между прибором и объектом и другие), вибрации, частицы различного рода в воздухе (пыль, туман, снег) и т.д. Рассмотрим воздействие каждого фактора на результаты НЛС более подробно.

Наличие приземного слоя атмосферы приводит к следующим негативным последствиям [14, 74]:

- уменьшение скорости распространения электромагнитной волны по сравнению с вакуумом (следовательно, к увеличению времени распространения сигнала по трассе и его фазовому сдвигу);
- искривление траектории электромагнитной волны (явление рефракции);
- затухание (ослабление интенсивности) электромагнитной волны, обусловленное поглощением и рассеянием энергии волны в атмосфере;
- случайные изменения параметров волны, обусловленные турбулентностью атмосферного воздуха.

Затухание электромагнитной волны в атмосфере вызвано тем, что энергия волны поглощается молекулами воздуха, аэрозольными частицами и рассеивается на флуктуациях плотности. Ослабление интенсивности излучения описывается формулой Бугера [14]:

$$I_D = I_0 e^{-(\alpha_{\text{п}}(\lambda) + \alpha_{\text{р}}(\lambda))D}, \quad (2.6)$$

где I_D – интенсивность излучения, прошедшего расстояние D , Вт/м²;

I_0 – начальная интенсивность излучения, Вт/м²;

$\alpha_{\text{п}}(\lambda)$ – коэффициент поглощения, 1/м;

$\alpha_{\text{р}}(\lambda)$ – коэффициент рассеяния, 1/м.

Из формулы (2.6) следует, что затухание сигнала зависит в первую очередь от длины волны излучения. Затухание резко увеличивается с уменьшением длины волны излучения, особенно в оптическом диапазоне, используемом в НЛС. Таким образом, пользователи НЛС не могут устранить ошибки измерений, вызванные затуханием сигнала. Данная задача может быть решена только производителями оборудования.

К случайным изменениям параметров электромагнитной волны, вызванных турбулентностью атмосферного воздуха, относятся флуктуации частоты, фазы, поляризации, амплитуды (интенсивности), направления распространения волны и угол расходимости лазерного луча. Влияние флуктуаций выражается в увеличении спектральной плотности мощности шумов на входе приемника,

вследствие чего ухудшается отношение сигнал/шум. [14] Для исключения влияния турбулентности атмосферного воздуха на результаты НЛС работы необходимо проводить в наиболее благоприятное время суток, известное в геодезии как период «спокойного изображения» (через час после восхода и за час до захода солнца).

Явление рефракции проявляется в том, что из-за разной плотности атмосферы на различных участках электромагнитная волна распространяется не по прямой линии, а по некоторой искривленной траектории. В результате дальномерный блок лазерного сканера измеряет не «истинное» расстояние до объекта, а некоторую удлиненную траекторию. Таким образом, учет влияния рефракции сводится к нахождению этого удлинения ΔD .

На практике для нахождения величины удлинения принимают, что искривленная траектория распространения электромагнитной волны представляет собой дугу некоторой окружности, имеющей средней радиус кривизны. Некоторое представление о величине поправки ΔD дает таблица 2.1. [14] Следовательно, при проведении лазерной съемки резервуаров явлением рефракции можно пренебречь, поскольку расстояние от лазерного сканера до объекта не будет превышать 100 м и поправка на удлинение траектории будет иметь значения гораздо меньше СКО самого прибора.

Таблица 2.1 – Рефракционное удлинение траектории

D , км	Рефракционное удлинение траектории ΔD , м	
	для света	для радиоволн
50	0,002	0,008
100	0,017	0,070
200	-	0,530

Значительную роль в точности определения расстояния блоком лазерного дальномера играет определение скорости света в атмосфере, которая зависит от показателя преломления n . В общем случае для оптического диапазона, в котором работают лазерные сканеры, показатель преломления является функцией,

зависящей от четырех параметров (длины волны, температуры, давления и влажности воздуха) [89]:

$$n = f(\lambda, T, P, e), \quad (2.7)$$

Реальная атмосфера имеет различные величины давления, температуры и влажности в различных ее точках. Поэтому говорят о среднеинтегральном показателе преломления. Именно среднеинтегральный показатель преломления в среде между лазерным сканером и объектом вносит основную погрешность в определение скорости распространения электромагнитной волны. Ошибка показателя преломления зависит от дисперсионной составляющей и от ошибки определения метеопараметров вдоль распространения лазерного луча. Использование в качестве источника сигнала узкоспектральных лазеров позволяет пренебречь дисперсионной ошибкой. [74] Современными наземными лазерными сканерами предусмотрено введение параметров давления, температуры и влажности среды для расчета поправочных коэффициентов, которые учитываются приборами при работе.

При проведении работ по наземному лазерному сканированию наличие вибраций приводит к возникновению ошибок измерения расстояний и углов лазерным сканером. Вибрация, воздействующая на прибор, может возникать от движущихся транспортных средств, машин и механизмов, от оборудования, эксплуатируемого вблизи места проведения работ, от колебаний самого сканера при воздействии на него сильных порывов ветра и т.д. Основное влияние вибрация оказывает на дальномерные измерения, поскольку приводит к хаотическому смещению лазерного пучка относительно заданного направления. На сегодняшний день проведено множество исследований о влиянии вибрации на результаты геодезических измерений, однако практически все они посвящены электронным тахеометрам и нивелирам. Исследования, посвященные наземным лазерным сканерам, отличаются своей непроработанностью. Так, в работе [7] проводились исследования по влиянию вибрации на наземные лазерные сканеры на примере Riegel LMS-Z420i. Автор установил, что вибрация оказывает влияние на результаты измерений. Однако в работе не проводилось измерений уровня

вибрации; не установлено, какой уровень вибрации оказывает влияние на результаты измерений, а какой является приемлемым; не было сделано попытки разработки и использования приспособлений по уменьшению влияния вибрации на прибор и т.д. Несмотря на это, представляется вполне оправданным использование различных средств и способов уменьшения влияния вибрации, например:

- демпфирующих материалов для уменьшения влияния на лазерный сканер низкочастотной вибрации;

- проведение и возможное перенесение работ в зависимости от погодных условий для исключения воздействия резких порывов ветра;

- дистанционное управление лазерным сканером при необходимости его установки на металлоконструкции резервуара, площадки обслуживания и т.д. для исключения влияния самого человека на возникновение вибраций и другие.

Ошибки, обусловленные метрологическими свойствами снимаемого объекта

Большое влияние на точность результатов лазерной съемки оказывает отражающая способность снимаемого объекта и его геометрическая форма, влияние которой тесно связано с расходимостью лазерного пучка. Данные факторы оказывают влияние на погрешность определения расстояния.

Для установления взаимосвязи между расходимостью лазерного пучка и геометрической формой объекта необходимо рассмотреть, как происходит фиксирование расстояния между лазерным дальномером и точкой объекта. Так, при импульсном методе выходной лазерный сигнал в большинстве случаев имеет форму кривой Гаусса. В результате сущность определения расстояния заключается в нахождении времени распространения сигнала между максимумами двух функций, соответствующих выходному и входному опорным электромагнитным сигналам (рисунок 2.5). [74] Аналогичным образом определяется расстояние фазовым методом.

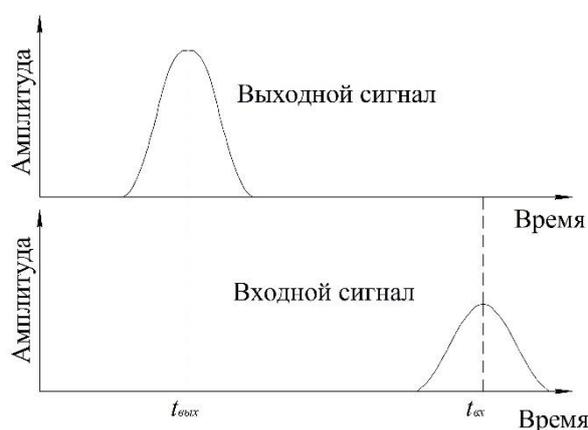


Рисунок 2.5 – Время распространения импульса в пространстве

На форму входного сигнала большое влияние оказывают шумовые составляющие, расстояние до объекта, отражающая способность объекта, расходимость лазерного пучка и другие.

По мере увеличения расстояния, пройденного электромагнитной волной, расхождение лазерного пучка увеличивается. Расходимость пучка может быть выражена следующей формулой [114]:

$$w(\rho_w) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\lambda \rho_w}{\pi w_0^2}\right)^2}, \quad (2.8)$$

где w_0 – минимальный радиус пучка на выходе из лазерного дальномера, м;

λ – длина электромагнитной волны, м;

ρ_w – относительный угол расходимости лазерного пучка.

В результате расхождения лазерный пучок, попадая на объект, имеет некоторый радиус. В случае, когда лазерный луч попадает на какую-то угловатость объекта (на границу двух объектов и т.д.), отраженный (входной) сигнал будет иметь два максимума (или более). Если не учитывать данное обстоятельство, то лазерный дальномер определит не «истинное» расстояние до точек объекта, а расстояние до некоторой точки M , не принадлежащей поверхности объекта (рисунок 2.6).

Устранить данную погрешность могут только производители оборудования для наземного лазерного сканирования посредством увеличения параметров разрешения сканирования, уменьшения начальной расходимости лазерного пучка в дальномерной системе и введения алгоритмов вычисления расстояния, способных

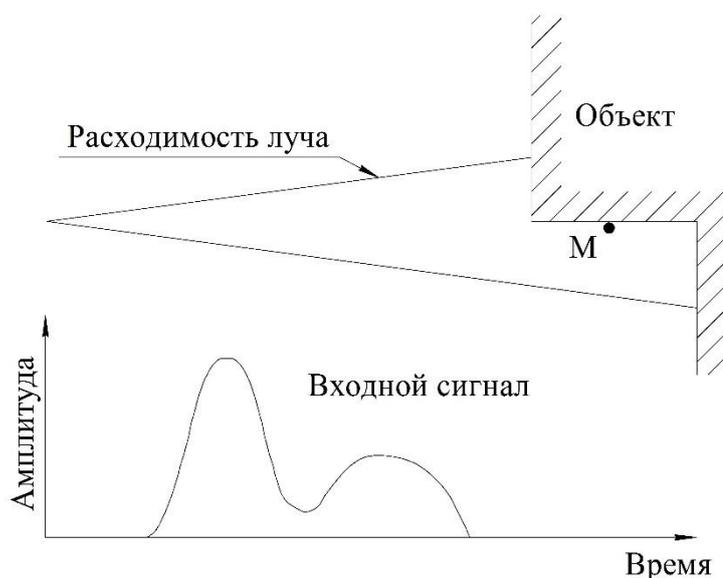


Рисунок 2.6 – Форма входного сигнала при попадании лазерного луча на границу

разрешить подобные ситуации. При сканировании резервуаров возникновение подобных «шумовых» точек не является критичным, потому что они возникнут на границах вспомогательных металлоконструкций резервуара (лестницы, перила и т.д.), которые не являются объектом интереса при оценке НДС стенки резервуаров. Более того, данные «шумовые» точки могут быть легко идентифицированы и удалены на этапе камеральной обработки данных.

На форму входного сигнала (следовательно, и на погрешность определения расстояния до точек объекта) значительное влияние оказывает ориентация поверхности объекта по отношению к падающему лазерному лучу. В работе [39] проведено детальное исследование влияния угла падения лазерного луча на точность определения расстояния. Было установлено, что при углах падения более 50° начинают наблюдаться значительные погрешности в расстояниях, измеренных лазерным сканером. Подобную зависимость можно опосредованно установить и по технической документации на наземные лазерные сканеры, в которой не рекомендуется, чтобы угол падения лазерного луча на специальные светоотражающие марки превышал 45° . Таким образом, при выполнении наземного лазерного сканирования резервуаров с целью их технического диагностирования работы должны выполняться таким образом, чтобы угол падения лазерного луча на поверхность стенки резервуара не превышал $45\text{-}50^\circ$.

Одной из наиболее важных метрологических характеристик снимаемых объектов, влияющей на качество и интенсивность входного сигнала (а значит и на точность измерений), является отражающая способность материала объектов. Отражающая способность – это величина, характеризующая способность поверхности тела или границы раздела двух сред отражать падающий на нее поток электромагнитного излучения. Количественной характеристикой отражающей способности является коэффициент отражения – безразмерная физическая величина, определяемая отношением отраженного потока излучения к падающему потоку излучения.

Величина коэффициента отражения зависит от угла падения и длины волны излучения, шероховатости и физических свойств снимаемого объекта. Зависимость отражательной способности поверхности в области видимого света воспринимается глазом человека как окраска отражающей поверхности. Наличие неровностей (шероховатости) на поверхности снимаемого объекта приводит к увеличению поглощения излучения и, как следствие, к уменьшению точности измерений. Зависимость коэффициента отражения от длины электромагнитной волны проявляется в том, что различные материалы, в зависимости от своих физических свойств, обладают различным коэффициентом отражения для различных длин волн излучения.

В работе [39] проведено исследование по установлению обобщенного влияния цвета материала и его шероховатости на точность результатов измерения НЛС (обобщенного по той причине, что влияние цвета и шероховатости рассматривались отдельно, при этом не учитывалось влияние самого материала объекта на спектральный коэффициент отражения). В результате было установлено, что с уменьшением шероховатости поверхности объекта и с увеличением светлости его цвета погрешность измерений уменьшается.

Стальные вертикальные резервуары имеют преимущественно антикоррозионное лакокрасочное покрытие светлых тонов (белый, серебряный), обладающее малой шероховатостью. Таким образом, при наземном лазерном

сканировании резервуаров будет обеспечиваться высокий коэффициент отражения и его влияние на точность измерений будет минимальным.

2.4. Разработка методики проведения работ по наземному лазерному сканированию резервуаров

Предлагаемая методика проведения работ по наземному лазерному сканированию резервуаров с целью определения их действительного пространственного положением и реальной геометрической формы позволяет выполнить необходимый комплекс работ с наименьшими трудовременными затратами, а также получить данные об отклонениях образующих стенки резервуара от вертикали и высотных отметках окрайки днища. Методика предусматривает построение трехмерной математической модели стенки резервуара для оценки ее НДС с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы (глава 3).

Методика проведения работ по наземному лазерному сканированию резервуаров разработана на основании:

- анализа технологии трехмерного лазерного сканирования и особенностей ее применения (параграф 2.1);
- анализа нормативной технической документации Российской Федерации, Европейского Союза и США в области регламентирования вопросов применения технологии трехмерного лазерного сканирования для различных целей (параграф 2.2);
- анализа ошибок точности, возникающих при проведении работ по наземному лазерному сканированию резервуаров, и разработки мероприятий, в том числе организационных, по снижению их величины (параграф 2.3);
- личного опыта автора по наземному лазерному сканированию резервуаров с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы (глава 4).

Разработанная методика проведения работ по наземному лазерному сканированию резервуаров включает три этапа:

1) предварительная подготовка:

- разработка предварительной схемы расстановки сканерных станций и предварительной схемы размещения специальных марок;
- подбор комплекса оборудования по наземному лазерному сканированию, необходимого для проведения работ;
- выбор разрешения сканирования;

2) проведение полевых работ:

- корректировка расстановки сканерных станций и размещения специальных марок с учетом реальной обстановки на объекте;
- непосредственная съемка резервуара;

3) камеральная обработка полученных данных (параграф 2.5):

- регистрация сканов в единое облако точек, формирующее поверхность резервуара;
- определение отклонений образующих резервуара от вертикали;
- определение высотных отметок окрайка днища;
- построение трехмерной математической модели стенки резервуара, пригодной для оценки ее НДС по результатам НЛС.

Предварительная подготовка

На основании данных о типе и размере резервуара, его конструктивных особенностей, а также плана и схемы расположения резервуара в защитном ограждении необходимо разработать предварительную схему размещения сканерных станций и предварительную схему размещения специальных марок.

Схема размещения сканерных станций должна обеспечить максимально полную съемку поверхности резервуара при минимальном количестве сканерных станций с учетом наличия в зоне проведения работ коммуникаций, трубопроводов и другого технологического оборудования, препятствующего прямой видимости снимаемого объекта.

Ограничения размеров секторов лазерного сканирования с различных сканерных станций должны задаваться на основании следующих требований:

- угол падения лазерного луча на поверхность резервуара не должен превышать $45-50^\circ$ (данное требование должно выполняться как в горизонтальном, так и в вертикальном направлениях);

- скан, получаемый с одной сканерной станции, должен иметь зоны пересечения со сканами, получаемыми со смежных сканерных станций, размерами не менее 1 метра.

Для расположенных в земляных обвалованиях резервуаров для сканирования стенки резервуара должно использовать не менее 8 сканерных станций, расположенных на обваловании (4 станции расположены в угловых точках, 4 станции в середине сторон обвалования). При проведении сканирования резервуаров объемом менее 10000 м^3 с земляным обвалованием число точек сканирования можно уменьшать до 6. В случае, если резервуар располагается в бетонном каре, выполнение съемки с земляного обвалования не представляется возможным или нельзя выполнить указанные выше требования, то сканерные станции располагаются другими удобными способами (в других местах) с учетом требований, приведенных ранее.

Схема размещения марок определяется на основании схемы расположения сканерных станций и следующими условиями:

- угол падения лазерного луча на марку не должен превышать $45-50^\circ$ (рисунок 2.7);



Рисунок 2.7 – Угол падения лазерного луча на поверхность

- любой скан должен быть связан с любым смежным как минимум четырьмя общими специальными марками в местах их наложения (три марки располагаются на стенке резервуара и одна марка на крыше резервуара);

- специальные марки, расположенные на стенке резервуара, не должны располагаться на одной высоте или на одной прямой, оптимальное размещение марок – неравносторонний треугольник с минимальной стороной в 1 метр (рисунок 2.8).

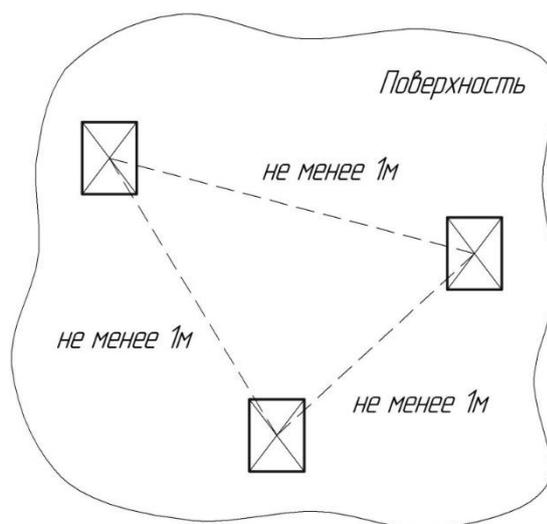


Рисунок 2.8 – Схема размещения плоских марок на поверхности стенки

В результате схема предварительного размещения сканерных станций и специальных марок выполняется в следующей последовательности:

- основываясь на предоставленной информации о типе и размерных характеристиках резервуара, конструктивных особенностях его исполнения, а также планах и схемах расположения резервуара и окружающей обстановки в обваловании строится масштабная модель резервуара в CAD системе;

- на масштабной модели в соответствии с требованиями, приведенными выше, указываются точки размещения сканерных станций;

- на масштабной модели в соответствии с требованиями, приведенными выше, указываются точки размещения специальных марок;

- рассчитываются расстояния от специальных марок до сканерных станций;

- рассчитываются углы падения лазерного луча на каждую специальную марку.

В случае, если для дальнейшей регистрации сканов в единое облако точек будут применяться специальные марки, то необходимое разрешение сканирования выбирается исходя из условия достаточной степени детализации и точности распознавания центра специальной марки.

В этом случае выбор разрешения сканирования проводится по следующему алгоритму:

- на основании данных, рассчитанных при составлении предварительной схемы размещения сканерных станций и марок, определяется марка, расстояние до которой и угол падения лазерного луча на которую наибольшие;
- по таблице 2.2 и известным значениям угла падения и расстояния для выбранной марки определяется оптимальное разрешение;
- данное разрешение применяется при сканировании всей поверхности объекта.

Таблица 2.2 – Значения разрешения в зависимости от расстояния и угла

Разрешение, мм на 10м	Угол падения луча на марку 0°	Угол падения луча на марку 30°	Угол падения луча на марку 45°
12,6	до 12 м	до 10 м	до 8 м
6,3	до 25 м	до 22 м	до 20 м
3,1	до 50 м	до 45 м	до 35 м
1,6	до 100 м	до 90 м	до 70 м
0,6	до 120 м	до 110 м	до 90 м

В случае, если при сканировании не используются специальные марки, выбор параметров разрешения осуществляется в соответствии с необходимым уровнем детализации.

На этапе предварительной подготовки необходимо подобрать оборудования для проведения наземного лазерного сканирования. Выбор конкретного прибора осуществляется в зависимости от его технических характеристик на основании необходимой дальности действия при проведении работ и необходимых параметров разрешения сканирования. На основании анализа технических

характеристик различных приборов и условий и требований проведения работ при техническом диагностировании стальных вертикальных резервуаров можно выделить ряд требований (таблицы 2.3 и 2.4), которым должны удовлетворять все наземные лазерные сканеры, используемые при определении действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуаров.

Таблица 2.3 – Технические параметры наземного лазерного сканера

Технические показатели	Значение
1. Метод измерения	Фазовый
2. Диапазон работы, м	от 0,3 до 150
3. Скорость сканирования, точек\сек	1.000.000
4. Разрешающая способность	2,2 мм на 50м
5. Линейное отклонение	≤1 мм на 180 м
6. Поле зрения по вертикали, °	180
7. Поле зрения по горизонтали, °	180
8. Рабочие температуры, °С	от минус 10 до 45
9. Пыле- и влагозащищенность	IP53

Проведение полевых работ

На сегодняшний день наземные лазерные сканеры не выпускаются во взрывозащищенном исполнении, поэтому перед проведением работ резервуар должен быть опорожнен и очищен от продукта.

До начала непосредственного проведения работ по наземному лазерному сканированию резервуара на объекте требуется определить необходимость корректировки предварительной схемы расположения сканерных станций и/или предварительной схемы расположения специальных марок. Для это следует:

- определить положение сканерных станций и специальных марок с учетом наличия в зоне проведения работ коммуникаций, трубопроводов и оборудования (не отмеченных на предоставленных схемах и планах), которые не подлежат сканированию и могут закрывать сектор сканирования;

Таблица 2.4 – Допустимые СКО измерения расстояния НЛС

Расстояние до объекта, м	Отражающая способность не более, %	СКО не более, мм
10	20	1,0
	50	0,5
	80	0,5
25	20	2,0
	50	1,0
	80	1,0
50	20	3,0
	50	2,0
	80	2,0
100	20	10,0
	50	5,0
	80	5,0

Примечание – Производители наземных лазерных сканеров указывают точность своих сканирующих систем на различных расстояниях и при различной отражающей способности поверхности объекта сканирования. Для корректного выбора сканирующей системы необходимо использовать данную таблицу пределов СКО измерения расстояний.

- проверить возможность установки сканерных станций в выбранных местах;

- с каждой сканерной станции проверить прямую видимость специальных марок наземным лазерным сканером.

В случае выполнения всех необходимых требований перенести на местность места установки сканерных станций и закрепить специальные марки на резервуаре. В противном случае требуется выполнить корректировку расположения сканерных станций и специальных марок.

При переносе мест расположения сканерных станций и специальных марок более чем на 2 метра от первоначального положения необходимо проверить выполнение требований, предъявляемых к предварительной схеме расположения сканерных станций и специальных марок, указанных на этапе «Предварительной

подготовки». После выполнения данных требований можно перенести схему на местность.

Сканирование резервуара выполняется в следующей последовательности:

1) Установить сканер на первую сканерную станцию, обеспечив статичность его положения в течении всего процесса съемки (первой сканерной станцией считается сканерная станция, содержащая в себе первую образующую стенки резервуара);

2) Привести сканер в горизонтальное положение. При необходимости провести его высотную привязку к существующей геодезической сети;

3) Создать новый проект в меню НЛС;

4) Для уменьшения времени сканирования и последующей камеральной обработки данных осуществить настройку граничных горизонтальных и вертикальных углов сканирования;

5) Произвести непосредственное сканирование участка резервуара;

6) При наличии аппаратной возможности после завершения процесса сканирования необходимо провести контроль полученного облака точек. В случае, если будут обнаружены дефекты выполнения сканирования (неверно заданы граничные углы, произошло смещение объекта, сканера или специальных марок в процессе сканирования и т.д.), необходимо провести повторное сканирование с данной сканерной станции;

7) Перенести сканер на следующую сканерную станцию и повторно выполнить действия пунктов 1, 2, 4-6. Сканирование стенки резервуара следует проводить круговым ходом по часовой стрелке по периметру резервуара;

8) После завершения сканирования со всех сканерных станций демонтировать с резервуара все специальные марки.

Дополнительные требования

1) Дополнительные требования к проведению полевых работ:

- способы крепления специальных марок на резервуаре должны не допустить их смещения в течении всего процесса выполнения съемки. Также

должно быть обеспечено статичное положение сканера во время съемки со сканерной станции;

- при выполнении съемки с резервуара для уменьшения воздействия вибраций на результаты сканирования запрещается ходить по его крыши. При наличии аппаратной и технической возможности сканирование в данном случае лучше выполнять с помощью дистанционного управления НЛС;

- наземное лазерное сканирование должно проводиться при температуре окружающей среды, удовлетворяющей диапазону рабочих температур применяемого НЛС.

2) Дополнительные требования к объекту съемки:

- работы по наземному лазерному сканированию рекомендуется проводить на объектах, имеющих окраску поверхности, обеспечивающую высокую отражающую способность. При съемке следующих типов поверхностей могут возникнуть значительные ошибки при измерении расстояния лазерным сканером:

- поверхности с отражающей способностью больше 90% (полированные и анодированные металлические поверхности, поверхности зеркала и т.д.);

- поверхности с высокой поглощающей способностью (черные);

- при проведении работ по лазерному сканированию в зимнее время года необходимо очистить от снега все элементы резервуара, подлежащие съемке (окрайка днища, технологические трубопроводы, элементы крыши и т.д.);

- при проведении съемки поверхность резервуара должна быть сухая. Наличие пленки воды на поверхности резервуара приводит к возникновению значительного количества шумов и неверным дальномерным измерениям, не позволяющим провести дальнейшую адекватную камеральную обработку данных.

3) Требования к метеорологическим условиям проведения работ:

- запрещается проводить сканирование резервуара при дожде, грозе, граде и тумане;

- возможно проведение съемки в условиях снегопада;

- с целью исключения повышения уровня шума сканирование объекта против солнца или в условиях яркой освещенности не проводить;
- при проведении работ в солнечный день следует ограничить попадание солнечных лучей на сканер, для предотвращения его неравномерного нагрева и смещения горизонтальности прибора;
- при наличии аппаратной возможности при проведении сканирования следует учитывать основные климатические параметры (давление, температура, влажность).

2.5. Разработка методики камеральной обработки результатов наземного лазерного сканирования резервуаров

Предлагаемая методика камеральной обработки результатов наземного лазерного сканирования основывается на использовании программных комплексов Z+F LaserControl версии 8.4.5 и Geomagic Studio 2013. Использование двух программных комплексов объясняется следующими причинами:

- многие производители НЛС используют закрытые форматы хранения данных (параграф 2.2), которые могут быть открыты и импортированы в другие распространенные открытые форматы данных только программным обеспечением, предоставляемым производителем используемого оборудования. Данное программное обеспечение имеет ограниченный функционал, не позволяющий выполнить необходимые операции по обработке результатов наземного лазерного сканирования с целью получения оболочечной трехмерной модели резервуара. Примером данной ситуации является оборудование и программное обеспечение компании Z+F, камеральная обработка результатов для которой и была выбрана для рассмотрения;
- в качестве второго программного комплекса был выбран Geomagic Studio, получивший широкое распространение в последнее время, т.к. он позволяет выполнить широкий спектр задач от первичной обработки результатов НЛС до построения трехмерной математической модели стенки резервуара. При

изначальном получении открытого формата хранения данных достаточно использования только Geomagic Studio.

Основные этапы камеральной обработки результатов наземного лазерного сканирования резервуаров:

1) предварительная обработка результатов наземного лазерного сканирования;

2) регистрация данных, полученных с различных сканерных станций, в единое облако точек (формирование единой точечной модели поверхности резервуара);

3) измерение отклонений образующих стенки резервуара от вертикали и определение высотных отметок окрайки днища;

4) конвертирование данных единого облака точек в открытые форматы хранения данных;

5) построение трехмерной модели стенки резервуара, пригодной для дальнейшего анализа ее НДС с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы;

6) анализ и интерпретация результатов, составление технического отчета.

В рамках предложенных программных комплексов для предварительной подготовки и регистрации сканов, измерения отклонений образующих и определения высотных отметок окрайки днища, конвертирования данных в открытые форматы хранения будет использоваться Z+F LaserControl, а для построения трехмерной модели стенки резервуара – Geomagic Studio.

На этапе предварительной подготовки необходимо выполнить обработку сканов, полученных с различных сканерных станций:

- удалить со сканов точки, не принадлежащие поверхности резервуара и его конструктивным элементам и отмостке (каре резервуара, посторонние объекты и т.д.);

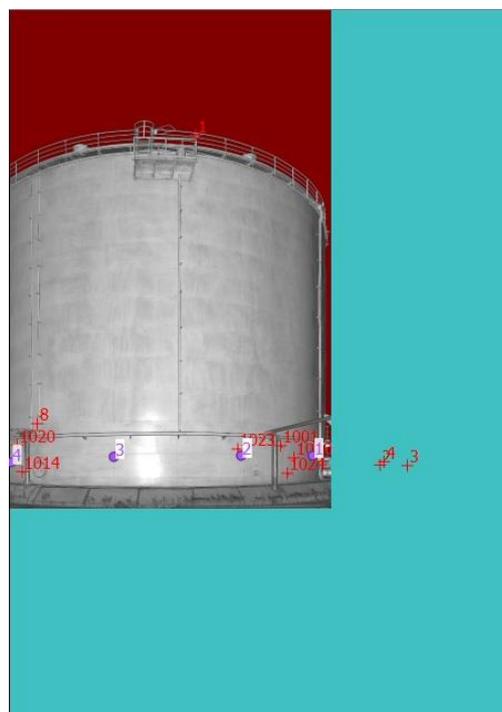
- удалить шумовые составляющие (измерения, имеющие грубые погрешности и не принадлежащие объекту съемку).

Выполнение данного этапа позволит сократить общее количество обрабатываемых точек, уменьшит загрузку персонального компьютера и общее время выполнения операций программными комплексами. Вместе с тем, удаление шумовых составляющих исключит возможность ошибок в измерениях при определении высотных отметок окрайки днища и измерении отклонений образующих стенки резервуара от вертикали.

В рамках программного комплекса Z+F LaserControl для удаления шумовых составляющих сканов предлагается использовать функцию «*Mixed pixed filter*» (вкладка «*Preprocessing*»), которая удаляет «ошибочные» точки, возникающие на границах поверхностей объекта (см. параграф 2.3). Для удаления лишних точек, не принадлежащих поверхности объекта, предлагается использовать функцию «*3D volume selection*» (вкладка «*Preprocessing*»). Данная функция позволяет удалить точки, находящиеся за пределами выделенного объема пространства. На рисунке 2.9 представлен скан до обработки и после.



а



б

Рисунок 2.9 – Скан участка резервуара на этапе предварительной подготовки:

а – до обработки, б – после обработки

На этапе регистрации сканов необходимо выполнить внешнее ориентирование сканов, снятых с различных сканерных станций, в общую систему координат для получения единого облака точек поверхности резервуара. Регистрация сканов может быть выполнена следующими способами:

- «cloud to cloud» - способ регистрации сканов в единое облако точек, при котором используются участки перекрытия облаков точек (необходимое перекрытие как правило составляет 30-40%). В данном случае многократно проверяется расстояние между всеми точками участка перекрытия и на основании оценки этого расстояния выравнивает облако точек;

- «surface to surface» - способ регистрации сканов в единое облако точек, при котором для регистрации используется участок перекрытия поверхностей облаков точек. Выравнивание происходит путем оценки евклидова расстояния между поверхностями методом наименьших квадратов и минимизацией этого расстояния;

- с помощью специальных марок.

В рамках предложенной методики выполнения полевых работ с установкой специальных марок используется последний способ выполнения регистрации. Для регистрации двух смежных сканов необходимо 4 специальные марки, расположенные в зоне пересечения сканирования. Регистрация сканов должна быть выполнена замкнутым круговым ходом, совпадающим с ходом выполнения сканирования поверхности резервуара. Для исключения накопления погрешности измерений при переориентировании сканов регистрацию следует выполнять относительно первого скана, снятого с первой сканерной станции. В результате все сканы будут переориентированы в общую систему координат первого скана. В рамках программного комплекса Z+F LaserControl для регистрации сканов в единое облако точек применяется функция «*Register project with targets*» (вкладка «*Register*»). При этом реализуется способ регистрации сканов по специальным маркам. В результате будет получена единая трехмерная точечная модель резервуара. На рисунке 2.10 представлена единая трехмерная точечная модель резервуара РВСП-7500.

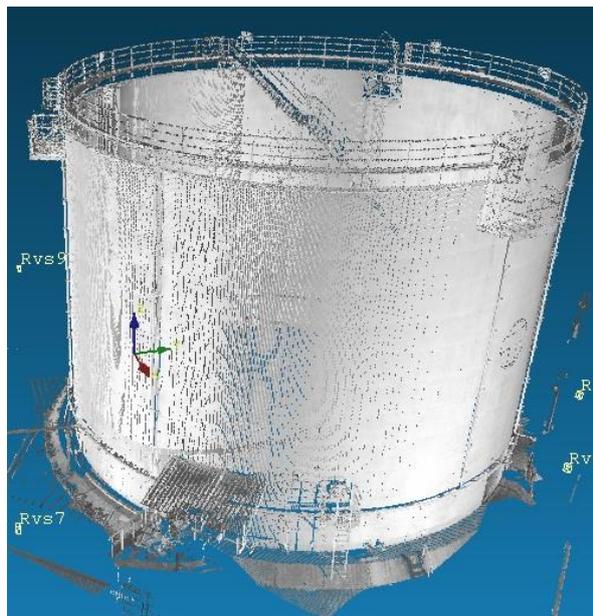


Рисунок 2.10 – Единая трехмерная точечная модель резервуара РВСП-7500

Единая точечная модель резервуара используется на этапе определения высотных отметок окрайки днища и измерения отклонений образующих от вертикали. Для определения высотных отметок окрайки днища на единой точечной модели резервуара необходимо определить высотные значения в точках нивелировки по оси Z (либо другой оси координат, являющейся вертикалью). Относительные и абсолютные высотные отметки окрайки днища определяются на основании данных высотных значений и высоты установки лазерного сканера на первой сканерной станции.

Для определения отклонений образующих стенки от вертикали следует:

- 1) перенести систему координат трехмерной точечной модели в центр резервуара;
- 2) построить секущие плоскости, проходящие через центр резервуара, для получения образующих;
- 3) определить отклонения образующих от вертикали.

Для переноса системы координат в центр резервуара необходимо определить координаты центра резервуара в условной системе координат первого скана. В этом случае определяющее значение имеют координаты X и Y , характеризующие направление осей координат в горизонтальной плоскости.

Высотная составляющая Z влияет на знак величин координат точек по вертикали и не влияет на величину отклонения от нее.

Для определения координат центра резервуара предлагается использовать следующую формулу, где необходимые координаты центра определяются методом последовательных итераций:

$$\sum_{i=1}^k |R - ((x_R - x_i)^2 + (y_R - y_i)^2)^{1/2}| \rightarrow 0, \quad (2.9)$$

где R – радиус резервуара. Принимается равным его паспортной величине, м;

x_R, y_R – координаты центра резервуара, которые необходимо определить, м;

x_i, y_i – координаты точек поверхности стенки резервуара, м. В качестве определяемых точек принимаются точки в количестве k , лежащие не выше 20-30 см от окрайка днища резервуара (менее всего подверженные возможным геометрическим деформациям резервуара в процессе эксплуатации). Координаты точек определяются с шагом $n=1,5 \dots 2$ м;

$$k \geq \frac{2\pi R}{n} - \text{количество точек поверхности резервуара.}$$

Для практической реализации формулы (2.9) предлагается использовать средства *Microsoft Excel* → Данные → Поиск решения. На рисунке 2.11 представлена схема решения задачи по определению центра координат резервуара в *Microsoft Excel*.

В рамках программного комплекса Z+F LaserControl для переноса системы координат в центр резервуара необходимо воспользоваться функцией «*Superior coordinate system*», которая переносит систему координат с помощью задаваемой матрицы (рисунок 2.12).

Для построения образующей резервуара предлагается воспользоваться функцией «*Create cut(s)*», которая построит секущую плоскость, проходящую через центр резервуара и пересекающую стенку. В результате будет получена образующая стенки резервуара, представляющая собой набор точек лазерных отражений, полученных при сканировании резервуара (рисунок 2.13).

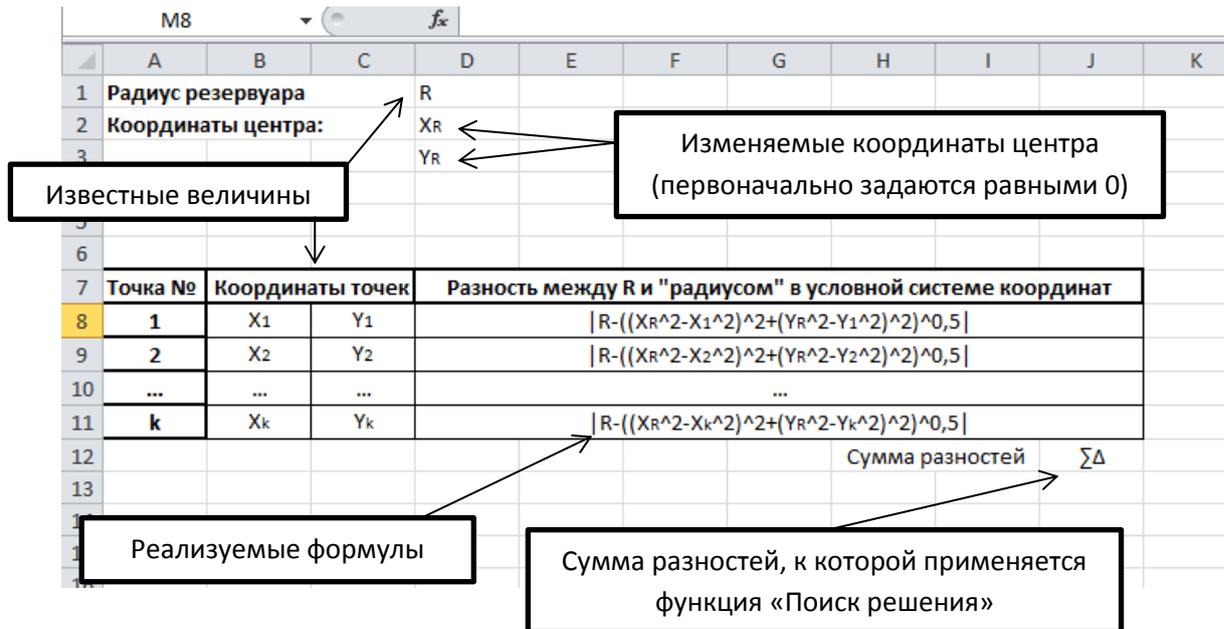


Рисунок 2.11 – Схема решения задачи по определению координат центра резервуара в *Microsoft Excel*

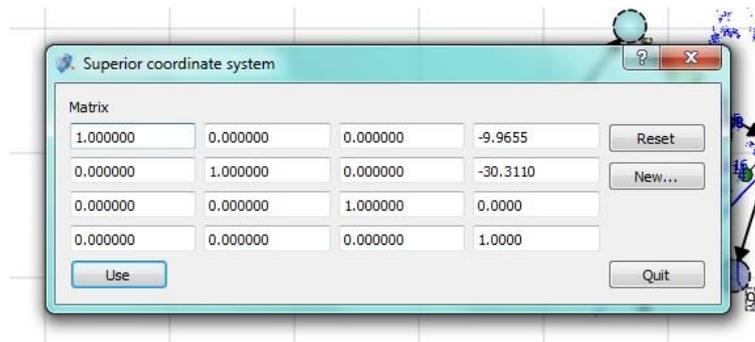


Рисунок 2.12 – Матрица переноса центра системы координат

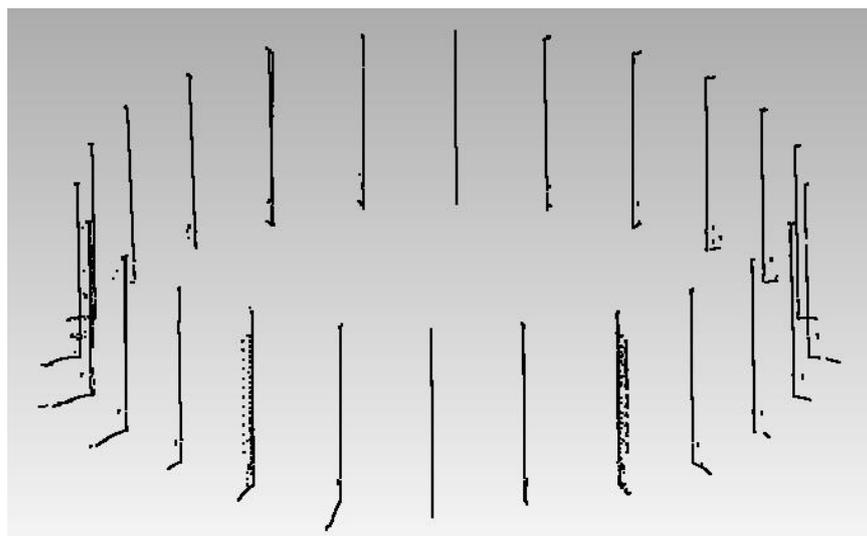


Рисунок 2.13 – Образующие резервуара РВСП-20000 в программном комплексе Geomagic Studio

Полученную образующую рекомендуется сохранить в открытых форматах хранения данных результатов наземного лазерного сканирования для использования в программном комплексе Geomagic Studio, например, *.txt.

Для определения отклонений образующих стенки резервуара от вертикали необходимо на полученном сечении провести вертикаль из точки, лежащей на уторном узле, и провести требуемые измерения. Измерение отклонений образующих стенки от вертикали предлагается выполнять в программном комплексе Geomagic Studio. Для этого с помощью функции «Линия» (закладка «Примитивы») строится вертикальная линия из точки образующей, лежащей на уторном узле (рисунок 2.14).



Рисунок 2.14 – Определение отклонений образующей стенки резервуара от вертикали

Этап конвертирования данных НЛС необходим для того, чтобы данные с единой трехмерной точечной моделью резервуара импортировать из закрытых форматов хранения данных производителей лазерного оборудования в открытые форматы хранения данных для их дальнейшей обработки в соответствующих программных комплексах. Наиболее удобными в применении и распространенными являются форматы *.pts, *.ptx, *.txt. В рамках программного комплекса Z+F LaserControl для импорта данных предлагается использовать

функцию «*Batch convert ZFS file(s)*» и конвертировать данные в формат *.txt, наиболее удобный для открытия в программном комплексе Geomagic Studio.

На этапе построения трехмерной модели стенки первоначально проводится дополнительная ручная очистка единой трехмерной точечной модели резервуара от элементов, не принадлежащих его стенке (технологические площадки и лестницы, ограждающие конструкции, трубопроводы пожаротушения и т.д.). В результате будет получена точечная модель стенки резервуара, содержащая только точки поверхности его стенки.

На следующем этапе точечная модель стенки резервуара преобразуется в WRAP-поверхность, в результате чего будет получена полигональная модель стенки резервуара, состоящая из треугольников, вершинами которых являются точки единого облака. В рамках программного комплекса Geomagic Studio для этого предлагается воспользоваться функцией «*Wrap*» (закладка «*Точки*»).

На данной модели будут отсутствовать некоторые участки, которые были закрыты технологическими площадками и лестницами, ограждающими конструкциями, трубопроводами пожаротушения и т.д. Для их восстановления предлагается воспользоваться функциями закладки «*Заполнить пустоты*». На рисунке 2.15 представлена законченная полигональная модель стенки резервуара РВСП-20000.



Рисунок 2.15 – Полигональная модель стенки резервуара РВСП-20000

Данная полигональная модель используется для получения трехмерной модели стенки резервуара (рисунок 2.16). В рамках программного комплекса Geomagic Studio для этого предлагается воспользоваться функциями закладки «*Точные поверхности*». Для оценки НДС стенки резервуара в программных комп-

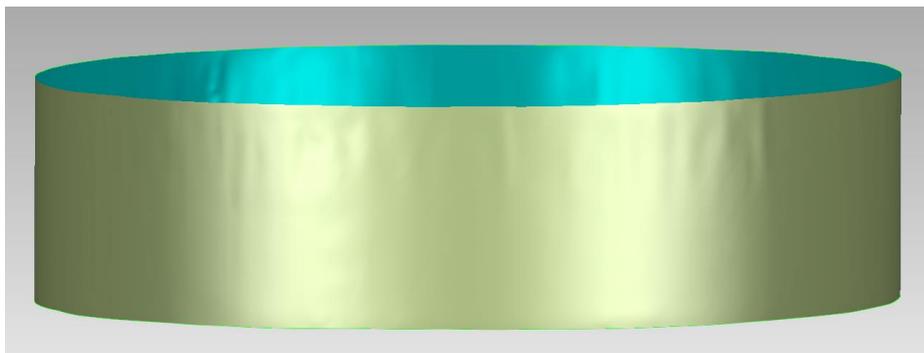


Рисунок 2.16 – Трехмерная модель стенки резервуара РВСП-20000

лексах, реализующих метод конечных элементов, оболочечная модель конвертируется в необходимые форматы хранения данных трехмерных моделей, например, .igs, .iges, .catia и др.

Выводы по главе

1) Анализ действующих нормативно-технических актов Российской Федерации, США и стран Европейского Союза в области трехмерного наземного лазерного сканирования показал, что на сегодняшний день отсутствует нормативно закреплённая методика, устанавливающая требования к проведению наземного лазерного сканирования РВС с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

2) Разработана методика проведения работ по трехмерному наземному лазерному сканированию резервуаров с целью определения их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы. Методика включает в себя требования, позволяющие уменьшить возникающие при наземном лазерном сканировании ошибки, уменьшить влияние внешних факторов (метрологических свойств снимаемого объекта, метеорологических условий проведения работ и т.д.) на точность результатов, а также сократить время выполнения работ

3) Разработка методика камеральной обработки результатов трехмерного наземного лазерного сканирования резервуаров. Данная методика позволяет получить следующие данные:

- высотные отметки окрайки дна и отклонения образующих стенки резервуара от вертикали;

- трехмерную модель стенки резервуара, позволяющую оценить ее НДС с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

ГЛАВА 3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

3.1. Выбор метода оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуара

Оценка совместного влияния пространственного положения и действительной геометрической формы стенки резервуара на ее НДС является нетривиальной задачей, решить которую в аналитической форме, приемлимой для практических расчетов, не представляется возможным. Главная причина этого заключается в сложности математического описания действительной геометрии стенки. По этой причине для решения данной задачи предлагается использовать математический аппарат численных методик прочностного анализа строительных конструкций.

На сегодняшний день разработано большое количество численных методик, позволяющих оценить НДС строительных конструкций. Данные методики основываются на различных теоретических предпосылках, используют различный математический аппарат, с различной эффективностью и точностью способны решать конкретные задачи и т.д. Наибольшее распространение получили метод конечных разностей, вариационно-разностный метод, метод граничных элементов и метод конечных элементов (МКЭ).

Сравнительный анализ численных методик (таблица 3.1) показал, что наиболее эффективным методом для оценки совместного влияния пространственного положения и действительной геометрической формы резервуара на его НДС является МКЭ, т.к. он позволяет точно аппроксимировать геометрию резервуара, проводить расчет для различных толщин стенок поясов и сложной геометрии неравномерной осадки, а также минуется составление дифференциальных уравнений. Рассмотрим данный метод более подробно.

Таблица 3.1 – Выбор численного метода оценки НДС стенки резервуара

Характеристика	Метод конечных разностей	Вариационно-разностный метод	Метод граничных элементов	Метод конечных элементов
Метод решения	Численное решение краевых задач для дифференциальных уравнений	Численное решение краевых задач для дифференциальных уравнений	Замена дифференциальных уравнений набором известных точных решений для полубесконечных элементов	Прямой метод отыскания числовых полей неизвестной функции
Способ решения	Представление дифференциального уравнения в частных производных в конечно-разностной форме	Представление вариационного дифференциального уравнения в частных производных в конечно-разностной форме	Замена дифференциальных уравнений набором известных точных решений для полубесконечных элементов	Замена дифференциальных уравнений системой алгебраических уравнений
Основные достоинства	Слабая зависимость от граничных условий задачи, геометрии конструкции и характера исходного напряженного состояния	<ol style="list-style-type: none"> 1. Дает возможность понизить порядок производных 2. Упрощает формулировку граничных условий 3. Позволяет удобно алгоритмизировать все этапы расчета конструкции 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Удобство описания сложной геометрии 2. Высокая точность решения на достаточном удалении от границы тела 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Допускает широкую математическую и физическую трактовку 2. Простота и гибкость при описании сложной геометрии, соединения конструкций различной размерности и сложных граничных условий 3. Различные пути увеличения точности расчетов 4. Удобство алгоритмизации вычислительных процессов
Основные недостатки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий порядок систем алгебраических уравнений 2. Узлы разностной сетки выходят за границы области интегрирования 3. Сложности при решении задач о сопряжении конструкций различной размерности, многосвязных, при смешанных граничных условиях и т.д. 	Неустойчивость типа «песочные часы»	<ol style="list-style-type: none"> 1. Неприменим для сложных систем 2. Высокая погрешность результатов на границе тела 	Сложность подбора наиболее оптимальной и эффективной аппроксимирующей функции
Область применения	Одно-, двух- и трехмерные тела	Одно-, двух- и трехмерные тела	Одно-, двух- и трехмерные тела	Одно-, двух- и трехмерные тела

Метод конечных элементов (МКЭ) – является численным методом решения дифференциальных уравнений деформируемой среды. Сущность МКЭ заключается в том, что, минуя дифференциальные уравнения деформируемой среды на основе вариационных принципов механики упругого тела, строятся процедуры для отыскания числовых полей неизвестных функций в деформируемом теле – перемещений, усилий, напряжений. [1, 73]

МКЭ относится к методу дискретного анализа. В отличие от остальных численных методов, МКЭ базируется на физической дискретизации рассматриваемого деформируемого тела. Основная идея метода состоит в том, что сплошная среда (все деформируемое тело) аппроксимируется путем разбиения ее на конечные элементы (КЭ), в каждом из которых поведение среды описывается с помощью отдельного набора выбранных функций. Эти функции задаются таким образом, чтобы обеспечить условия непрерывности описываемых ими характеристик во всей среде.

Сущность аппроксимации сплошной среды по МКЭ состоит в следующем:

- рассматриваемый участок сплошной среды с помощью воображаемых линий или поверхностей делится на определенное число КЭ;
- предполагается, что КЭ соединяются между собой в конечном числе точек, которые находятся на контуре элемента и называются узловыми точками или узлами;
- состояние в каждом элементе (например, поле перемещения, деформации, напряжения, распространение температуры) рассматривается с помощью интерполяционных функций и конечного числа параметров в узлах, представляющих основные неизвестные величины в МКЭ;
- для анализа и расчета системы КЭ действительны все принципы и способы, действующие в классической дискретной системе. [26, 75]

Для определения НДС строительных конструкций, в частности НДС стенки резервуара, наиболее удобным и эффективным является рассмотрение статической задачи МКЭ в вариационной энергетической постановке Лагранджа (решение в перемещениях) как варианта метода Рэлея-Ритца. В этом случае

разрешающее уравнение МКЭ может быть представлено в форме [1, 37, 44, 59, 83, 121]:

$$[\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{P}\}, \quad (3.1)$$

где $[\bar{K}]$ – матрица жесткости всей системы (всей конструкции или ее рассматриваемой части)

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} [\bar{K}]_1^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_1^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_1^{(m)} \\ [\bar{K}]_2^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_2^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_2^{(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [\bar{K}]_j^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_j^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_j^{(m)} \\ [\bar{K}]_m^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_m^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_m^{(m)} \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

m – количество узловых точек системы;

$[\bar{K}]_j^{(k)} = \sum_{i \in j} [M]^T [K]_{ij}^{(k)} [M]$ – блок матрицы жесткости всей системы. Здесь индекс $i \in j$ означает суммирование по всем i -ым КЭ системы, сходящимся в узле j . Подматрица $[K]_{ij}^{(k)}$ является блоком матрицы жесткости для i -ого КЭ, определяющим реакции в j -ом узле от единичных перемещений в k -ом узле. Причем, если i -ый КЭ не содержит либо узла j , либо узла k , то подматрица $[K]_{ij}^{(k)}$ принимается равной нулю;

$[M]$ – квазидиагональная матрица направляющих косинусов;

$\{\bar{q}\} = \{\{q\}_i^{(1)} \{q\}_i^{(2)} \dots \{q\}_i^{(k)} \dots \{q\}_i^{(m)}\}$ – вектор узловых перемещений системы;

$\{q\}_i^{(k)}$ – вектор узловых перемещений (перемещения и повороты в направлении соответствующих осей) k -ого узла i -ого КЭ;

$\{\bar{P}\} = \{\{P\}^{(1)} \{P\}^{(2)} \dots \{P\}^{(k)} \dots \{P\}^{(m)}\}$ – вектор узловых внешних сил;

$\{P\}^{(k)} = \{P_u P_v P_\omega M_\vartheta M_\psi M_\theta\}$ – вектор узловых внешних сил (внешние силы и моменты в направлении соответствующих осей), приложенных к k -ому узлу i -ого КЭ.

Общая процедура анализа НДС конструкций по МКЭ состоит из следующих основных этапов:

1. Выбор КЭ наиболее подходящего для решения поставленной задачи. Аппроксимация конструкции выбранными КЭ;
2. Составление матрицы жесткости для выбранного КЭ;
3. Составление матрицы жесткости всей конструкции;
4. Составление вектора внешних узловых сил;
5. Решение разрешающего уравнения МКЭ в перемещениях;
6. Определение необходимых величин, характеризующих НДС конструкции, на основании найденных перемещений.

3.2. Выбор конечного элемента. Аппроксимация стенки резервуара конечными элементами

Выбор КЭ и составление его матрицы жесткости при анализе НДС объекта по МКЭ зависят от аналитической теории, характеризующей напряженно-деформированное состояние рассматриваемого объекта. В рамках одного класса объектов могут применяться различные теории, описывающие их состояние и различающиеся характерными гипотезами и допущениями. Поэтому первым шагом при реализации МКЭ является выбор теоретических предпосылок, определяющих НДС рассматриваемого объекта.

Стенка вертикальных цилиндрических резервуаров любой конструкции (РВС, РВСП, РВСПК) является замкнутой оболочкой. Оболочки принято разделять на толстые и тонкие. К тонким относятся оболочки, для которых выполняется следующее условие [56]:

$$\frac{h}{R} < \frac{1}{20}, \quad (3.3)$$

где h – толщина оболочки;

R – минимальный радиус кривизны срединной поверхности оболочки, либо ее характерный минимальный размер.

Теории тонких оболочек построены на переходе от трехмерной задачи теории упругости к двумерной:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

Наличие средней части в выражении (3.4) объясняется существованием принципиально двумерных теорий оболочек, учитывающих поперечный сдвиг.

В соответствии с выражением (3.3) вертикальные цилиндрические резервуары всех типоразмеров [92, 93, 94, 95, 96] относятся к тонким оболочкам (таблица 3.2). Таким образом, НДС стенки идеальных резервуаров (их строгое проектное положение) может быть определено на основании той или иной двумерной теории оболочек.

Вместе с тем, при оценке изменения НДС стенки резервуара с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы расчет ведется для резервуара, находящегося в эксплуатации. Резервуары, находящиеся в эксплуатации, претерпели значительные отклонения пространственного положения и геометрической формы от своего проектного положения и, не смотря на общую цилиндричность, стенка имеет достаточно свободную форму. Поэтому при рассмотрении НДС стенки резервуара использование теории оболочек лишь на основании отношения толщины стенки к ее срединному радиусу может привести к принципиальной ошибке. В данном случае корректный переход от трехмерной задачи к двумерной (теории оболочек) возможен только с учетом характерного масштаба изменения НДС (длины полуволны поперечной деформации поверхности стенки резервуара). [57, 58] Переход может быть выполнен при соблюдении условия [9]:

$$\frac{h}{l_n} \ll 1, \quad (3.5)$$

где l_n – длина полуволны поперечной деформации поверхности стенки резервуара, соответствующая n -ой форме.

Пространственное положение и геометрическая форма резервуара характеризуются высотными отметками окрайки днища и отклонением образующих стенки от вертикали. Определим характерные масштабы изменения НДС стенки резервуара по двум направлениям: вдоль окружности окрайки днища

и вдоль образующих стенки. В работе [23] показано, что математически осадку резервуара с высокой точностью можно выразить тригонометрическим полиномом следующего вида (рисунок 3.1):

$$u = u_0 + \sum_{n=1}^{k/2} u_n \cos[n(\beta - \theta_n)], \quad (3.6)$$

где u_0 , u_1 , u_n – величины, характеризующие соответственно равномерную осадку, крен резервуара и неравномерную осадку ($n=2, 3, 4, \dots$); k – число точек нивелирования; θ_n – центральный угол.

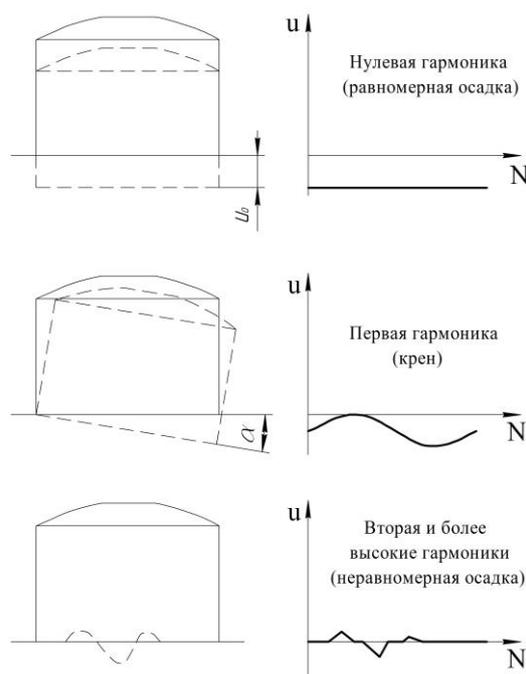


Рисунок 3.1 – Разложение осадки на гармоники

Из выражения (3.6) следует, что гармоникой с наименьшей длиной полуволны будет гармоника порядка $k/2$. В этом случае по периметру резервуара будет располагаться k полуволн, т.е. наименьшая длина полуволны поперечной деформации окрайки днища в независимости от типоразмера резервуара составляет 6 м (таблица 3.2). Данное обстоятельство следует из существующей сегодня методики геодезического обследования резервуаров, предусматривающей определение высотных отметок окрайки днища в точках, отстоящих друг от друга не далее чем на 6 м.

Очевидно, что отклонения образующей от вертикали также могут быть математически выражены с помощью тригонометрического полинома вида (3.6). Применительно к отклонениям образующих он примет вид:

Таблица 3.2 – Характеристики основных типоразмеров резервуаров

Объем резервуара, м ³	5000	10000	20000	30000	50000
Толщина стенки первого пояса, мм	9	12	16	17	27
Радиус резервуара, мм	10460	14250	19950	22800	30350
Длина полуволны вдоль окружности окрайки днища l_n^c , мм	6000	6000	6000	6000	6000
Длина полуволны вдоль образующей стенки l_n^e , мм	1490	1490	1490	1490	2250
Величина h/R	0,00086	0,00084	0,00080	0,00075	0,00089
Величина h/l_n^c	0,00150	0,00200	0,00267	0,00283	0,00450
Величина h/l_n^e	0,00600	0,00810	0,01070	0,01140	0,01200

$$w = w_1 + \sum_{n=1}^{k/2} w_n \cos(nx), \quad (3.7)$$

где w_1 – величина, характеризующая отклонение образующей от вертикали, обусловленное креном резервуара; w_n – величина, характеризующая местные отклонения от вертикали, не обусловленные креном резервуара; k – число точек измерения отклонений образующих от вертикали.

Из выражения (3.7) следует, что по высоте образующей резервуара будет располагаться k полуволн, а длина полуволны поперечной деформации образующей будет равна высоте пояса резервуара и различна в зависимости от типоразмера резервуаров (таблица 3.2).

Таким образом, из таблицы 3.2 следует, что при определении НДС стенки резервуаров всех типоразмеров с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы возможен переход от трехмерной задачи теории упругости к двумерной (теории оболочек).

При оценке НДС стенки резервуаров по средствам МКЭ выбор конкретной теории оболочек определяется в основном точностью теорий оболочек, т.к., в отличие от аналитического решения, нет необходимости выбора теории оболочек по критерию сложности и громоздкости ее математического и теоретического

аппарата. В соответствии с работой [9] погрешность теорий оболочек по убыванию определяется следующими соотношениями:

классическая теория оболочек - $O\left(\left(\frac{h}{R}\right)^{1-\theta}\right)$;

основная уточненная теория оболочек - $O\left(\frac{h}{R}\left(1 + \left(\frac{h}{R}\right)^{1-2\theta}\right)\right)$;

теория оболочек, учитывающая геометрическую поправку - $O\left(\left(\frac{h}{R}\right)^{2-2\theta}\right)$;

теории оболочек с учетом сдвига - $O\left(\left(\frac{h}{R}\right)^{2-\theta}\left(1 + \left(\frac{h}{R}\right)^{1-2\theta}\right)\right)$.

Другими словами, наименьшей погрешностью обладают теории оболочек, учитывающие влияние поперечного сдвига (сохраняют члены h^2/l_n^2 порядка малости). На рисунке 3.2 представлена схема внутренних сил и напряжений в элементе оболочки с учетом влияния поперечного сдвига.

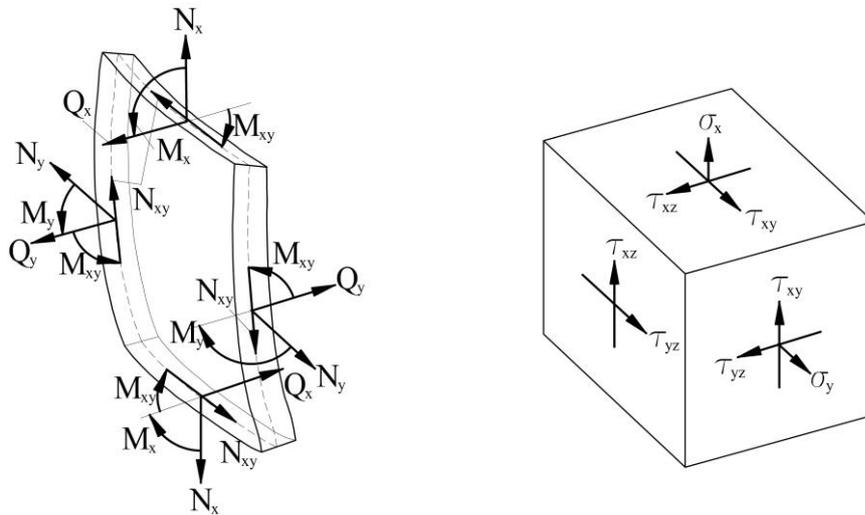


Рисунок 3.2 – Схема внутренних сил и напряжений в оболочке с учетом влияния поперечного сдвига

В качестве КЭ для аппроксимации поверхности стенки резервуара, находящегося в эксплуатации, предлагается использовать плоский КЭ, представленный в работах [109, 110, 115]. Данный КЭ обладает следующими характеристиками (рисунок 3.3):

- основан на теории оболочек Миндлина-Рейсснера, учитывающей влияние поперечного сдвига;

- четырехузловой (узлы располагаются на срединной плоскости);
- четырехугольный;
- плоский;
- вектор его узловых перемещений имеет вид:

$$\{q\}_i = \left\{ \{q\}_i^{(1)} \{q\}_i^{(2)} \{q\}_i^{(3)} \{q\}_i^{(4)} \right\}, \quad (3.8)$$

где $\{q\}_i^{(k)} = \{u_k v_k \omega_k \vartheta_k \psi_k \theta_k\}$ – вектор узловых перемещений (перемещения в направлении и повороты вокруг осей x, y, z соответственно) k -ого узла i -ого КЭ.

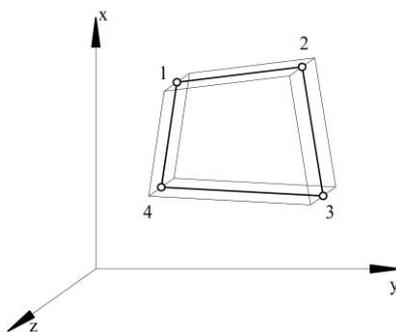


Рисунок 3.3 – Четырехузловой четырехугольный плоский КЭ

Использование четырехугольного КЭ, более сложного в математическом описании, объясняется тем, что невозможно аппроксимировать действительную геометрическую форму поверхности стенки резервуара с помощью прямоугольных КЭ, образующих достаточно простые уравнения МКЭ.

Схема аппроксимации поверхности стенки резервуара на четырехугольные КЭ представлена на рисунке 3.4. При выборе размеров КЭ необходимо учитывать несколько особенностей аппроксимации поверхности стенки резервуара с действительной геометрией:

- чем меньше размеры КЭ, тем точнее аппроксимация поверхности и результаты анализа НДС стенки резервуара. Другими словами, максимальный размер КЭ определяется необходимой точностью анализа;

- минимальные размеры КЭ определяются разрешением выполненного наземного лазерного сканирования резервуара. Данное обстоятельство объясняется тем, что нам не известна информация об элементах меньших, чем разрешение наземного лазерного сканирования (элементах, не принадлежащих множеству облака точек лазерных отражений).



Рисунок 3.4 – Схема аппроксимации поверхности стенки резервуара конечными элементами

3.3. Определение компонентов разрешающего уравнения для стенки резервуара

Определим компоненты матрицы жесткости системы, входящий в разрешающее уравнение МКЭ (3.1). Блок матрица жесткости выбранного i -го КЭ в форме прямоугольника имеет следующий вид [109, 110, 115]:

$$[K]_{ij}^{(k)} = \begin{bmatrix} [K_{pl}]_{ij}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & [K_p]_{ij}^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \max(K_{ij}^{(k)}) \end{bmatrix}, \quad (3.9)$$

где $[K_{pl}]_{ij}^{(k)}$ – блок матрицы жесткости элемента, работающего при плоском напряженном состоянии (характеризует мембранные деформации):

$$[K_{pl}]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega_i} ([B^{pl}]^{(j)})^T [D^{pl}] [B^{pl}]^{(k)} d\Omega, \quad (3.10)$$

$[K_p]_{ij}^{(k)}$ – блок матрицы жесткости элемента, работающего при изгибе:

$$[K_p]_{ij}^{(k)} = [K_c]_{ij}^{(k)} + [K_s]_{ij}^{(k)}, \quad (3.11)$$

$[K_c]_{ij}^{(k)}$ – блок матрицы жесткости элемента, работающего при чистом изгибе (характеризует изгибные деформации):

$$[K_c]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega^i} ([B^c]^{(j)})^T [D^c] [B^c]^{(k)} d\Omega, \quad (3.12)$$

$[K_s]_{ij}^{(k)}$ – блок матрицы жесткости элемента, работающего при чистом сдвиге (характеризует деформации поперечного сдвига):

$$[K_s]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega^i} ([B^s]^{(j)})^T [D^s] [B^s]^{(k)} d\Omega, \quad (3.13)$$

$10^{-3} \max(K_{ij}^{(k)})$ – «штрафная» жесткость, соответствующая углу поворота вокруг оси z . Определяется после составления всего блока матрицы жесткости $[K]_{ij}^{(k)}$ и равна 1/1000 от максимального диагонального значения жесткостей;

Ω^i – ограниченная область на поверхности оболочки.

В формулы (3.10), (3.12) и (3.13) входят компоненты, определяемые следующими выражениями:

$$[D^{pl}] = \frac{Eh_i}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (3.14)$$

$$[D^c] = \frac{Eh_i^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu}{2} \end{bmatrix}, \quad (3.15)$$

$$[D^s] = \frac{kEh_i}{2(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.16)$$

$$[B^{pl}]^{(k)} = \begin{bmatrix} \partial C_k / \partial x & 0 \\ 0 & \partial C_k / \partial y \\ \partial C_k / \partial y & \partial C_k / \partial x \end{bmatrix}, \quad (3.17)$$

$$[B^c]^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \partial C_k / \partial x \\ 0 & \partial C_k / \partial y & 0 \\ 0 & \partial C_k / \partial x & \partial C_k / \partial y \end{bmatrix}, \quad (3.18)$$

$$[B^s]^{(k)} = \begin{bmatrix} \partial C_k / \partial x & 0 & C_k \\ \partial C_k / \partial y & -C_k & 0 \end{bmatrix}, \quad (3.19)$$

где E – модуль упругости;

μ – модуль Пуассона;

h_i – толщина КЭ;

C_k – интерполяционная функция;

$k=5/6$ – понижающий коэффициент, учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по толщине [59].

В выражениях (3.17), (3.18) и (3.19) в качестве интерполяционной функции используется линейный интерполяционный полином Лагранжа, имеющий следующий вид:

$$C_k(\xi, \eta) = \frac{1}{4}(1 + \xi_k \xi)(1 + \eta_k \eta). \quad (3.20)$$

Для описания и аппроксимации действительной геометрической формы поверхности стенки резервуара наиболее эффективным и рациональным является использование четырехугольного КЭ. Работу с данным КЭ удобнее всего проводить не в общей системе координат x - y - z , а в местной нормализованной двумерной системе координат ξ - η , совпадающей с плоскостью КЭ, с последующим переходом к общей системе координат для составления общей матрицы жесткости всей системы. В местной нормализованной системе координат ξ - η выбранный КЭ представляет собой квадрат, координаты узловых точек которого принимают значения равные ± 1 (рисунок 3.5). Для перехода от нормализованной к декартовой системе координат также используются линейные интерполяционные полиномы Лагранжа, определяемые выражением (3.20).

С учетом (3.20) переход от местных нормализованных координат к общим декартовым производится по формулам:

$$\begin{cases} x = \sum_{k=1}^4 C_k(\xi, \eta) x_k \\ y = \sum_{k=1}^4 C_k(\xi, \eta) y_k \end{cases}, \quad (3.21)$$

где ξ, η – значения координат узлов (точек в пределах КЭ) в нормализованной системе.

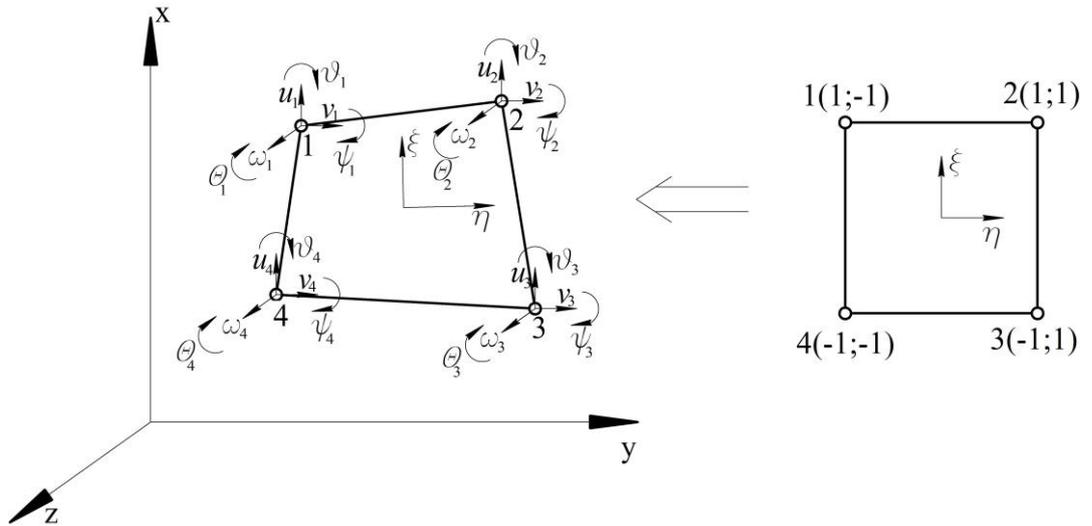


Рисунок 3.5 – Расчетная схема КЭ в общей и местной нормализованной системах координат

С учетом использования местной нормализованной системе координат ξ - η выражения (3.10), (3.12), (3.13) примут вид:

$$[K_{pl}]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 ([B^{pl}]^{(j)})^T [D^{pl}] [B^{pl}]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (3.22)$$

$$[K_c]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 ([B^c]^{(j)})^T [D^c] [B^c]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (3.23)$$

$$[K_s]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 ([B^s]^{(j)})^T [D^s] [B^s]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (3.24)$$

где $|J|$ – определитель матрицы Якоби.

Матрица Якоби используется для перехода от местной нормализованной системы координат к декартовой системе координат. Для ее получения рассмотрим функции (3.21) как сложные функции с взаимозависящими значениями координат. Тогда частные производные будут иметь вид

$$\begin{cases} \frac{\partial C_k(\xi, \eta)}{\partial \xi} = \frac{\partial C_k}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \xi} + \frac{\partial C_k}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_k(\xi, \eta)}{\partial \eta} = \frac{\partial C_k}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial \eta} + \frac{\partial C_k}{\partial y} \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{cases}$$

или в матричной форме

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_k}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (3.25)$$

где J – искомая матрица Якоби.

С учетом выражения (3.21) матрица Якоби примет вид

$$\begin{aligned}
 J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} x_k & \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} y_k \\ \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} x_k & \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} y_k \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial \xi} & \frac{\partial C_2}{\partial \xi} & \frac{\partial C_3}{\partial \xi} & \frac{\partial C_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_1}{\partial \eta} & \frac{\partial C_2}{\partial \eta} & \frac{\partial C_3}{\partial \eta} & \frac{\partial C_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{bmatrix}, \tag{3.26}
 \end{aligned}$$

где x_k, y_k – координаты узлов КЭ в общей системе координат.

Тогда компоненты матрицы Якоби будут равны:

$$\begin{aligned}
 J_{11} &= \frac{1}{4}(1 - \eta)(x_1 - x_4) + \frac{1}{4}(1 + \eta)(x_2 - x_3) = \frac{1}{4}(1 - \eta)x_{14} + \frac{1}{4}(1 + \eta)x_{23}, \\
 J_{12} &= \frac{1}{4}(1 - \eta)(y_1 - y_4) + \frac{1}{4}(1 + \eta)(y_2 - y_3) = \frac{1}{4}(1 - \eta)y_{14} + \frac{1}{4}(1 + \eta)y_{23}, \\
 J_{21} &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(x_2 - x_1) + \frac{1}{4}(1 - \xi)(x_3 - x_4) = \frac{1}{4}(1 + \xi)x_{21} + \frac{1}{4}(1 - \xi)x_{34}, \\
 J_{22} &= \frac{1}{4}(1 + \xi)(y_2 - y_1) + \frac{1}{4}(1 - \xi)(y_3 - y_4) = \frac{1}{4}(1 + \xi)y_{21} + \frac{1}{4}(1 - \xi)y_{34}.
 \end{aligned}$$

Из выражения (3.26) находится определитель матрицы Якоби (якобиан).

Раскрыв скобки и упростив выражение, получим:

$$\begin{aligned}
 |J| &= J_{11}J_{22} - J_{12}J_{21} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} x_k \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} y_k - \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} y_k \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} x_k = \\
 &= \frac{1}{16}(K_0 + \eta K_1 + \xi K_2 + \xi \eta K_3), \tag{3.27}
 \end{aligned}$$

где $K_0 = (x_{14} + x_{23})(y_{21} + y_{34}) - (x_{21} + x_{34})(y_{14} + y_{23})$,

$K_1 = (x_{23} - x_{14})(y_{21} + y_{34}) + (x_{21} + x_{34})(y_{14} - y_{23})$,

$K_2 = (x_{14} + x_{23})(y_{21} - y_{34}) + (x_{34} - x_{21})(y_{14} + y_{23})$,

$K_3 = (x_{23} - x_{14})(y_{34} - y_{21}) + (x_{21} - x_{34})(y_{14} + y_{23})$,

$x_{14} = x_1 - x_4, y_{21} = y_2 - y_1$ и так далее.

Частные производные полиномов C_k входящие в (3.17), (3.18) и (3.19) могут быть найдены из выражения (3.25):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_k}{\partial \eta} \end{bmatrix}, \quad (3.28)$$

где J^{-1} – обратная матрица Якоби, которая может быть определена по следующей формуле:

$$J^{-1} = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix}. \quad (3.29)$$

Подставив в (3.28) выражение (3.29) и проведя соответствующие упрощения, получим:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{|J|} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{16} (K_4 + \xi K_5 + \eta K_6 + \xi \eta K_7) \\ \frac{1}{16} (K_8 + \xi K_9 + \eta K_{10} + \xi \eta K_{11}) \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

где $K_4 = \xi_k(y_{21} - y_{34}) - \eta_k(y_{14} + y_{23})$,

$K_5 = \xi_k(y_{21} - y_{34}) + \eta_k \xi_k(y_{14} + y_{23})$,

$K_6 = \eta_k(y_{14} - y_{23}) + \eta_k \xi_k(y_{21} + y_{34})$,

$K_7 = \xi_k \eta_k(y_{21} - y_{34} + y_{14} - y_{23})$,

$K_8 = -\xi_k(x_{21} + x_{34}) + \eta_k(x_{14} + x_{23})$,

$K_9 = \xi_k(x_{34} - x_{21}) + \eta_k \xi_k(x_{14} + x_{23})$,

$K_{10} = -\xi_k \eta_k(x_{34} + x_{21}) + \eta_k(x_{23} - x_{14})$,

$K_{11} = \xi_k \eta_k(x_{34} - x_{21} - x_{14} + x_{23})$.

Таким образом, определены все необходимые компоненты блока матрицы жесткости КЭ. Для составления общей матрицы жесткости (3.2) всей поверхности стенки резервуара необходимо выразить квазидиагональную матрицу направляющих косинусов по формуле:

$$[M] = \begin{bmatrix} [m] & 0 \\ 0 & [m] \end{bmatrix}, \quad (3.31)$$

где $[m]$ – матрица направляющих косинусов

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{x'x} & m_{x'y} & m_{x'z} \\ m_{y'x} & m_{y'y} & m_{y'z} \\ m_{z'x} & m_{z'y} & m_{z'z} \end{bmatrix}. \quad (3.32)$$

Для получения матрицы направляющих косинусов (3.32) рассмотрим местную систему координат $x'-y'-z'$, в которой центр координат совпадает с узлом

4, и направление оси x' совпадает с направлением вектора $\overrightarrow{V_{14}}$ (рисунок 3.3). Тогда косинусы углов между координатными осями общей системы координат x - y - z и координатной осью x' будут равны:

$$m_{x'x} = \frac{X_{14}}{L_{14}}, \quad m_{x'y} = \frac{Y_{14}}{L_{14}}, \quad m_{x'z} = \frac{Z_{14}}{L_{14}}, \quad (3.33)$$

где L_{14} – длина вектора, образованного стороной 1-4;

X_{14}, Y_{14}, Z_{14} – компоненты вектора $\overrightarrow{V_{14}}$, определяемые выражениями:

$$L_{14} = \sqrt{X_{14}^2 + Y_{14}^2 + Z_{14}^2}, \quad (3.34)$$

$$X_{14} = x_1 - x_4, \quad Y_{14} = y_1 - y_4, \quad Z_{14} = z_1 - z_4. \quad (3.35)$$

Для получения третьей строки матрицы направляющих косинусов (3.32) рассмотрим вектор $\overrightarrow{L_z}$, образуемый векторным произведением $\overrightarrow{V_{14}} \times \overrightarrow{V_{34}}$ (рисунок 3.3). Направление данного вектора будет совпадать с направлением координатной оси z' . Тогда:

$$m_{z'x} = \frac{X_z}{L_z}, \quad m_{z'y} = \frac{Y_z}{L_z}, \quad m_{z'z} = \frac{Z_z}{L_z}, \quad (3.36)$$

где L_z – длина вектора $\overrightarrow{L_z}$;

X_z, Y_z, Z_z – компоненты вектора $\overrightarrow{L_z}$, определяемые выражениями:

$$L_z = \sqrt{X_z^2 + Y_z^2 + Z_z^2}, \quad (3.37)$$

$$X_z = Y_{14}Z_{34} - Z_{14}Y_{34}, \quad Y_z = Z_{14}X_{34} - X_{14}Z_{34}, \quad Z_z = X_{14}Y_{34} - Y_{14}X_{34}, \quad (3.38)$$

$$X_{34} = x_3 - x_4, \quad Y_{34} = y_3 - y_4, \quad Z_{34} = z_3 - z_4. \quad (3.39)$$

Косинусы углов между координатными осями общей системы координат x - y - z и координатной осью y' могут быть найдены из векторного произведения $\overrightarrow{L_y} = \overrightarrow{V_{14}} \times \overrightarrow{L_z}$:

$$m_{y'x} = \frac{Y_{14}Z_z - Z_{14}Y_z}{L_y}, \quad m_{y'y} = \frac{Z_{14}X_z - X_{14}Z_z}{L_y}, \quad m_{y'z} = \frac{X_{14}Y_z - Y_{14}X_z}{L_y}, \quad (3.40)$$

где L_y – длина вектора $\overrightarrow{L_y}$.

Определив для каждого КЭ системы значения выражения (3.33), (3.36) и (3.40), могут быть найдены матрицы направляющих косинусов (3.31) и (3.32) для каждого КЭ соответственно. На их основании для каждого КЭ составляется общая матрица жесткости системы (3.2).

На рисунке 3.6 представлена принятая расчетная схема стенки резервуара. Из расчетной схемы видно, что уторный узел рассматривается как жестко защемленный, а соединение стенки с крышей допускает только вертикальное перемещение. Данные условия являются граничными для рассматриваемой модели и задаются в разрешающем уравнении (3.1) следующим образом:

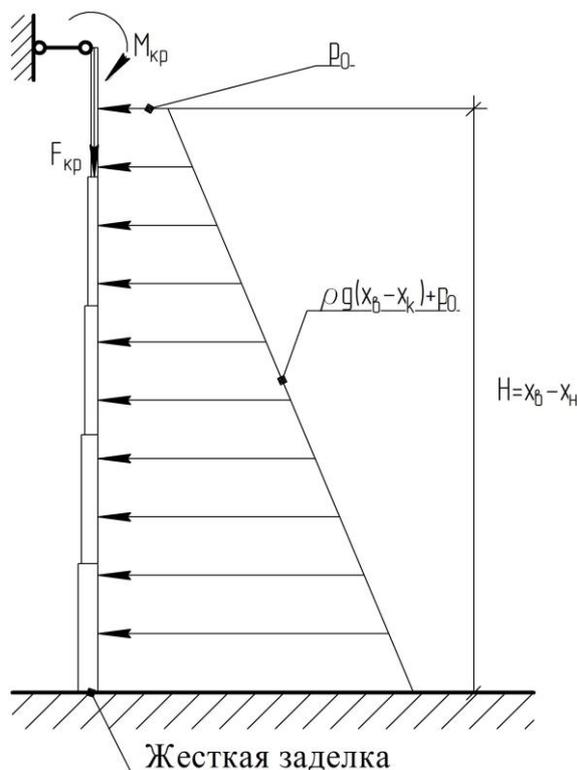


Рисунок 3.6 – Расчетная схема стенки резервуара

- узловые перемещения узлов КЭ, образующих уторный узел, равны нулю в следствие принятого допущения о модели взаимодействия днища со стенкой как жесткой заделки. В уравнении (3.1) это выражается следующим образом:

$$\{q\}_i^{(\text{уторного узла})} = \begin{bmatrix} u_{\text{утор.узел.}} \\ v_{\text{утор.узел.}} \\ \omega_{\text{утор.узел.}} \\ \vartheta_{\text{утор.узел.}} \\ \psi_{\text{утор.узел.}} \\ \theta_{\text{утор.узел.}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.41)$$

- все узловые перемещения, кроме вертикальной составляющей, узлов конечных элементов, образующих соединение стенки с крышей, равны нулю вследствие принятия допущения о модели кольца жесткости как абсолютно жесткого. В уравнении (3.1) это выражается следующим образом:

$$\{q\}_i^{(\text{стенка-крыша})} = \begin{bmatrix} u_{\text{ст.-кр.}} \\ v_{\text{ст.-кр.}} \\ \omega_{\text{ст.-кр.}} \\ \vartheta_{\text{ст.-кр.}} \\ \psi_{\text{ст.-кр.}} \\ \theta_{\text{ст.-кр.}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{\text{ст.-кр.}} \\ 0 \\ 0 \\ \theta_{\text{ст.-кр.}} \end{bmatrix}. \quad (3.42)$$

Вектора узловых внешних сил, действующие в k -ом узле i -ого элемента, образующие вектор внешних узловых сил разрешающего уравнения (3.1), могут быть найдены по формуле:

$$\{P\}^{(k)} = \sum \{P\}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_\omega \\ M_\vartheta \\ M_\psi \\ M_\theta \end{bmatrix} = \sum \{P_V\}_i^{(k)} + \sum \{P_S\}_i^{(k)} + \sum \{P_{\text{кр}}\}_i^{(k)}, \quad (3.43)$$

где $\sum \{P\}_i^{(k)}$ – суммарная нагрузка, действующая на k -ый узел от i -ых КЭ, сходящихся в k -ом узле;

$\{P_V\}_i^{(k)}$ – распределенная объемная нагрузка от собственного веса стенки резервуара, действующая на k -ый узел от i -ого КЭ;

$\{P_S\}_i^{(k)}$ – распределенная поверхностная нагрузка на стенку резервуара от гидростатического давления продукта и избыточного давления в резервуаре, действующая на k -ый узел от i -ого КЭ;

$\{P_{\text{кр}}\}_i^{(k)}$ – распределенная нагрузка от веса крыши.

Объемную нагрузку от собственного веса каждого КЭ на его узлы удобнее всего определять в общей системе координат конструкции. Опуская упрощения, объемная нагрузка от собственного веса, приходящаяся в качестве внешней узловой силы на k -ый узел от i -ого КЭ, может быть найдена по формуле:

$$\begin{aligned} \{P_V\}_i^{(k)} &= \iiint_{V_i} C_k(x, y, z) \{G_V\} dx dy dz = \{G_V\} h_i \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_k) (1 + \\ &+ \eta \eta_k) |J| d\xi d\eta = \{G_V\} \frac{h_i}{12} \left(K_0 + \frac{1}{3} \eta_k K_1 + \frac{1}{3} \xi_k K_2 + \frac{1}{6} \xi_k \eta_k K_3 \right), \end{aligned} \quad (3.44)$$

где $\{G_V\}$ – вектор объемной нагрузки, заданный в общей системе координат:

$$\{G_V\} = \{-\rho g \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}$$

ρ – плотность металла стенки резервуара;

g – ускорение свободного падения.

Поверхностную нагрузку от гидростатического давления продукта и избыточного давления в резервуаре удобнее рассматривать в местной системе координат, т.к. данная нагрузка действует по нормали к рассматриваемым конечным элементам. Нагрузка, приходящаяся на k -ый узел от i -ого КЭ в местной системе координат, может быть найдена по формуле:

$$\{P_S\}_i^{(k)} = \{T_S\} \iint_{\Delta_i} C_k(x, y, z) q dx dy = \{T_S\} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 C_k(\xi, \eta) q |J| d\xi d\eta, \quad (3.45)$$

где $\{T_S\}$ – числовая матрица, равная $\{T_S\} = \{0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0\}$;

$C_k(\xi, \eta)$ – интерполяционная функция, определяемая выражением (3.20);

$|J|$ – определитель матрицы Якоби;

q – распределенная по поверхности нагрузка:

$$q = p_0 + \rho_n g (x_b - x),$$

где p_0 – избыточное давление внутри резервуара;

ρ_n – плотность продукта;

x_b – высотная координата уровня взлива в общей системе координат;

x – высотная координата рассматриваемой точки.

После нахождения значения $\{P_S\}_i^{(k)}$ необходимо перевести в общую систему координат, домножив на квазидиагональную матрицу (3.31).

Нагрузка от веса крыши резервуара на k -ый узел от i -ого КЭ может быть найдена по формуле:

$$\{P_{кр}\}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} -\frac{M_{кр} l_i g}{2L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{M_{кр} l_i g}{2L} e \cdot m_{y' y} \\ \frac{M_{кр} l_i g}{2L} e \cdot m_{z' z} \end{bmatrix}, \quad (3.46)$$

где $M_{кр}$ – масса крыши;

l_i – длина ребра i -ого КЭ, образующего соединение стенки резервуара с крышей;

L – для окружности крыши резервуара;

e – расстояние от стенки резервуара до места приложения нагрузки от массы крыши.

Определив составляющие внешних узловых сил, действующих на k -ый узел от i -ого КЭ, по формулам (3.44), (3.45) и (3.46), можно составить общий вектор внешних узловых сил, действующих на k -ый узел (3.43).

3.4. Расчет НДС стенки резервуара аналитическим и численным методами

Аналитический расчет НДС стенки резервуара представляет собой решение частной задачи общей теории цилиндрических оболочек. Для случая осесимметричного нагружения и одинаковой по всей протяженности толщины стенки может быть получено достаточное простое аналитическое решение, позволяющее определить все характеристики НДС стенки резервуара. Одно из таких решений было получено Тимошенко С.П. [97].

Однако при сооружении резервуаров для экономии металла используется листовая металл с различной толщиной листов. В результате по высоте резервуара толщина стенки меняется ступенчато и аналитическое решение, исходя из теории цилиндрических оболочек, является достаточно сложным и громоздким. Поэтому для случая осесимметричного нагружения резервуара наибольшее распространение получило представление стенки резервуара в виде ступенчатой балки на упругом основании. Основоположниками данного метода расчета резервуаров в отечественной школе резервуаростроения являются Сафарян М.К. и Иванцов О.М. [69, 72].

Рассмотрим стенку резервуара с переменной толщиной поясов (рисунок 3.7). В узле сопряжения стенки резервуара с днищем действуют изгибающий момент M_0 и поперечная сила Q_0 . Расчетная схема узла сопряжения стенки с днищем и основания система сил представлены на рисунке 3.8 и 3.9. В стыке меж-

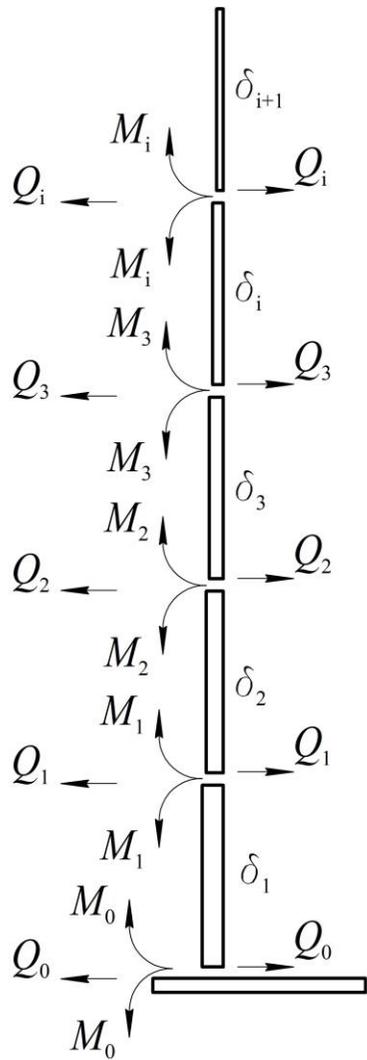


Рисунок 3.7 – Расчетная схема стенки резервуара с переменной толщиной поясов

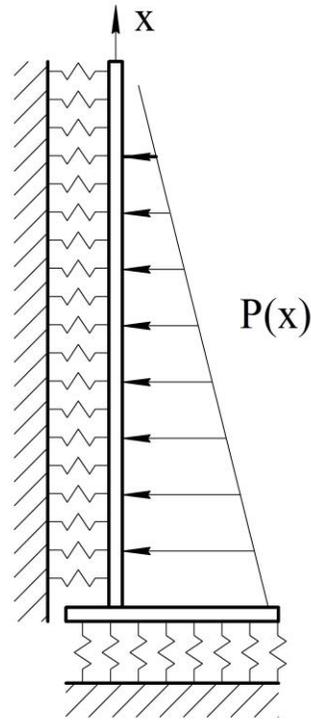


Рисунок 3.8 – Расчетная схема нижнего узла резервуара

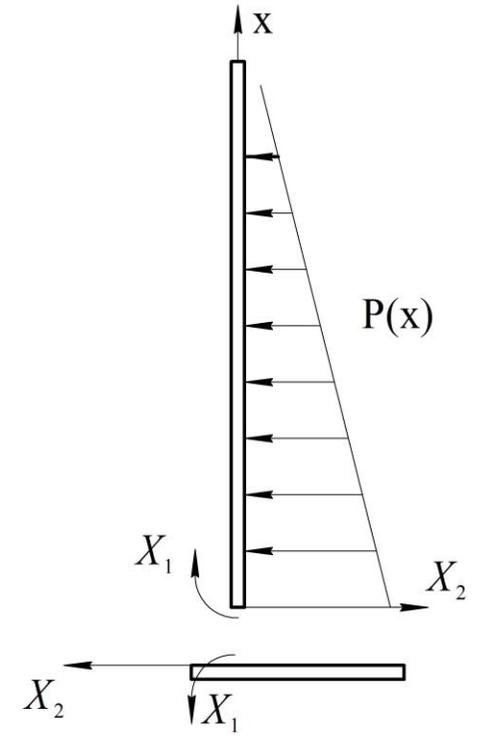


Рисунок 3.9 – Основная система усилий, действующих в утоном узле резервуара

ду поясами, имеющими разные толшины, также возникает краевой эффект с соответствующими изгибающими моментами M_i и поперечными силами Q_i .

Изгибающий момент M_0 и поперечная сила Q_0 , действующие в узле сопряжения стенки с дном, могут быть найдены на основании канонического уравнения метода сил [69]:

$$\begin{cases} (\delta_{11}^{ст} + \delta_{11}^{дн})X_1 + \delta_{12}^{ст}X_2 + \Delta_{1p}^{ст} + \Delta_{1p}^{дн} = 0 \\ \delta_{21}^{ст}X_1 + \delta_{22}^{ст}X_2 + \Delta_{2p}^{ст} = 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

При рассмотрении узла сопряжения стенки резервуара с дном в качестве жесткой заделки уравнение (3.29) примет вид:

$$\begin{cases} \delta_{11}^{ст}X_1 + \delta_{12}^{ст}X_2 + \Delta_{1p}^{ст} = 0 \\ \delta_{21}^{ст}X_1 + \delta_{22}^{ст}X_2 + \Delta_{2p}^{ст} = 0 \end{cases} \quad (3.48)$$

где $X_1 = M_0$ – изгибающий момент, действующий в узле сопряжения;

$X_2 = Q_0$ – поперечная сила, действующая в узле сопряжения;

$\delta_{11}^{ст} = \frac{1}{mD}$ – единичное перемещение от X_1 ;

$\delta_{12}^{ст} = \delta_{21}^{ст} = \frac{1}{2m^2D}$ – единичные перемещения от X_1 и X_2 ;

$\delta_{22}^{ст} = \frac{1}{2m^3D}$ – единичное перемещение от X_2 ;

$\Delta_{1p}^{ст} = \frac{\rho_{п}}{k}$ – грузовой член;

$\Delta_{2p}^{ст} = \frac{\rho_{п}}{k}H$ – грузовой член;

$k = \frac{Eh_1}{r^2}$ – фиктивный коэффициент постели;

$m = \sqrt[4]{\frac{k}{4D}}$ – коэффициент деформации;

$D = \frac{Eh_1^3}{12(1-\mu^2)}$ – цилиндрическая жесткость первого пояса;

H – уровень разлива продукта в резервуаре.

Для определения характера влияния краевого эффекта на изгиб различных поясов стенки резервуара воспользуемся уравнением прогибов для балки на упругом основании, на конце которой приложены изгибающий момент M_i и поперечная сила Q_i . Начало координат выберем на стыке поясов i и $i+1$, ось x

направим вверх, а ось y – перпендикулярно ей. Тогда уравнение упругой линии выразится следующим образом [69, 72]:

для i -ого пояса, лежащего ниже стыка ($x < 0$)

$$y_i = \frac{\rho_{\Pi}}{k_i} (H_{\text{шв}} + x) + A_1 e^{-m_i x} \cos(m_i x) + A_2 e^{-m_i x} \sin(m_i x), \quad (3.49)$$

для $i+1$ пояса, лежащего выше стыка ($x > 0$)

$$y_{i+1} = \frac{\rho_{\Pi}}{k_{i+1}} (H_{\text{шв}} - x) - A_3 e^{-m_{i+1} x} \cos(m_{i+1} x) + A_4 e^{-m_{i+1} x} \sin(m_{i+1} x), \quad (3.50)$$

где $H_{\text{шв}}$ – расстояние от уровня продукта до середины стыка.

В уравнении (3.32) перед произвольной постоянной A_3 стоит знак «-», т.к. произвольные постоянные A_1 и A_3 характеризуют поперечные силы, действующие в стыке между поясами, причем для верхнего пояса поперечная сила направлена в отрицательную сторону.

Произвольные постоянные A_1 , A_2 , A_3 и A_4 определяются из условия сопряжения балок, а именно из равенства (при $x=0$) прогибов, углов поворота и изгибающих моментов и условия равновесия поперечных сил. Таким образом, имеем:

$$\begin{cases} y_i = y_{i+1}, \\ y'_i = y'_{i+1}, \\ D_i y''_i = D_{i+1} y''_{i+1}, \\ D_i y'''_i = D_{i+1} y'''_{i+1}. \end{cases} \quad (3.51)$$

Используя эти условия и уравнения (3.31), (2.36) и их производные, получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\rho_{\Pi}}{k_i} H_{\text{шв}} + A_1 = \frac{\rho_{\Pi}}{k_{i+1}} H_{\text{шв}} - A_3, \\ \frac{\rho_{\Pi}}{k_i} - m_i A_1 + m_i A_2 = -\frac{\rho_{\Pi}}{k_{i+1}} + m_{i+1} A_3 + m_{i+1} A_4, \\ m_i^2 D_i A_2 = m_{i+1}^2 D_{i+1} A_4, \\ m_i^3 D_i A_1 + m_i^3 D_i A_2 = -m_{i+1}^3 D_{i+1} A_3 + m_{i+1}^3 D_{i+1} A_1. \end{cases} \quad (3.52)$$

После определения произвольных постоянных A_1 , A_2 , A_3 и A_4 по уравнениям (3.49) и (3.50) определяются радиальные перемещения соответствующих поясов. Однако, необходимо отметить, что построенные по этим формулам перемещения учитывают только влияние на i -ый и $i+1$ пояса стыка между ними. Но на i -ый пояс также оказывает влияние стык между ним и $i-1$ поясом, а на $i+1$ оказывает

влияние стык между ним и $i+2$ поясом. Поэтому по аналогии с предыдущим необходимо решить задачу по отысканию произвольных постоянных A_1, A_2, A_3 и A_4 для каждого стыка между всеми поясами резервуара. Определив радиальные перемещения от краевого эффекта каждого стыка по (3.49) и (3.50) и сложив их между собой для каждого соответствующего пояса, получим суммарное перемещение каждого пояса.

Рассчитаем аналитически значения радиальных перемещений по высоте стенки идеального резервуара (в его строгом проектном положении) объемом 20000 м^3 согласно представленной выше методике и численно методом конечных элементов согласно уравнениям, разработанным в параграфах 3.2 и 3.3. Расчет методом конечных элементов реализован в программном комплексе ANSYS. Для расчета в ANSYS в качестве КЭ выбран КЭ SHELL181, при соответствующих настройках идентичный выбранному ранее КЭ. Все разработанные в параграфе 3.3 граничные условия и силовые нагрузки задаются в программном комплексе. Исходные данные для расчета представлены ниже и в таблице 3.3:

- плотность нефтепродукта $\rho_n=875 \text{ кг/м}^3$;
- радиус резервуара $r=22,8 \text{ м}$
- высота разлива нефтепродукта $H=11,44 \text{ м}$;
- высота поясов – $1,5 \text{ м}$.

Таблица 3.3 – Данные, для расчета резервуара

Номер пояса	Толщина пояса $h_i, \text{ мм}$	Цилиндрическая жесткость $D_i, \text{ Н}\cdot\text{м}$	Фиктивный коэффициент постели $k_i, \text{ Н/м}^3$	Коэффициент деформации $m_i, \text{ 1/м}$
1	13	42250	5251615	2,36
2 ... 8	11	25596	4443674	2,57

На рисунке 3.10 изображены графики зависимостей радиального перемещения стенки «идеального» резервуара по ее высоте, полученные при аналитическом и численном (реализованном в программном комплексе ANSYS) решениях. Для оценки влияния пространственного положения и действительной геометрической формы резервуара на рисунке 3.10 также представлен график

радиальных перемещений стенки по двум из образующих резервуара РВСП-20000, находящегося в эксплуатации, с учетом его действительного пространственного положения и реальной геометрической формы. Подробные данные о съемке и оценке НДС данного резервуара представлены в параграфе 4.2.

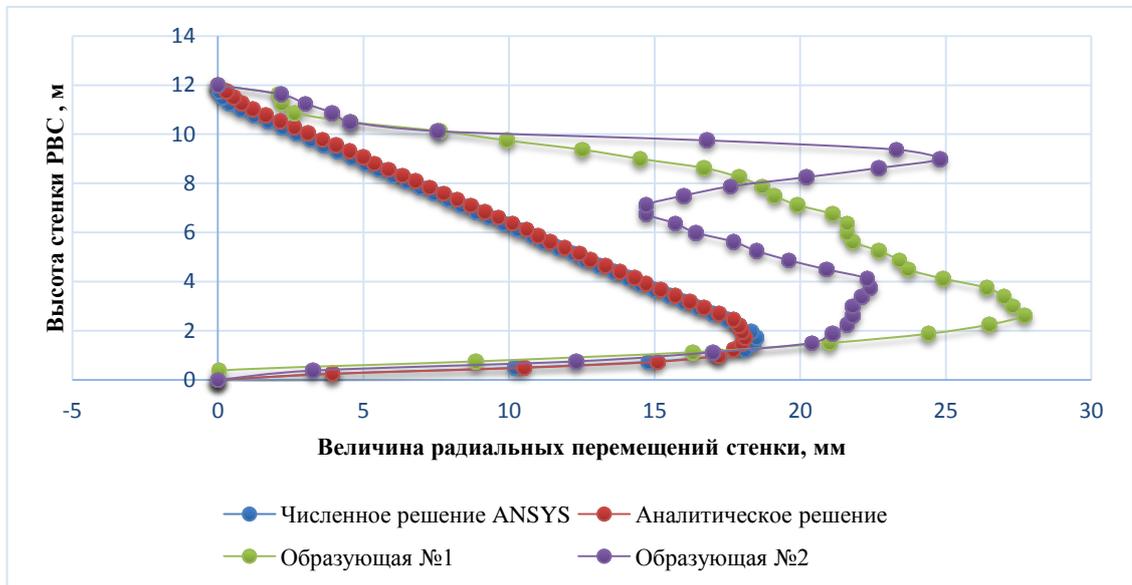


Рисунок 3.10 – Перемещения стенки в радиальном направлении

Максимальная разница результатов аналитического и численного нахождения радиальных перемещений стенки идеального резервуара составила 2,21%.

Выводы по главе

1) На основе метода конечных элементов разработана методика оценки совместного влияния пространственного положения и действительной геометрической формы резервуаров на его НДС по результатам наземного лазерного сканирования. Теоретически обоснован выбор конечного элемента, позволяющего наиболее эффективно и просто описать работу и геометрическую форму стенки резервуара. В рамках методики разработаны уравнения, позволяющие определить все неизвестные разрешающего уравнения метода конечных элементов, такие как матрица жесткости конечного элемента, вектор внешних узловых сил и т.д. Представлена расчетная схема стенки резервуара.

2) Проведено сравнение результатов расчета НДС стенки «идеального» резервуара объемом 20000 м³ аналитическим способом по методике Сафаряна М.К. и методом конечных элементов по разработанной методике. Установлено, что максимальная разница перемещений стенки в радиальном направлении составляет 2,21%. Данные результаты подтверждают правильность разработанной методики, так как отличие от аналитического решения не превышает 5%.

ГЛАВА 4. АПРОБАЦИОННЫЕ РАБОТЫ ПО НАЗЕМНОМУ ЛАЗЕРНОМУ СКАНИРОВАНИЮ РЕЗЕРВУАРОВ

4.1. Постановка задачи и использованное оборудование

В рамках данной части диссертационной работы были проведены апробационные работы по трехмерному наземному лазерному сканированию действующих резервуаров и обработка полученных результатов в соответствии с разработанной системой методик. Целью апробационных работ стало:

- практическое наземное лазерное сканирование действующих резервуаров в соответствии с разработанной методикой;

- определение действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуаров по результатам наземного лазерного сканирования в соответствии с разработанной методикой;

- проведение сравнительного анализа результатов, полученных с помощью наземного лазерного сканирования, с результатами, полученными традиционными геодезическими методами (с использованием нивелиров, теодолитов и тахеометров);

- оценка НДС стенки резервуаров с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы;

- сравнительный анализ НДС стенки резервуара с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы и с учетом только эксплуатационных нагрузок;

- оценка воздействия природно-климатических и производственных условий выполнения работ по наземному лазерному сканированию на результаты;

- анализ полученных данных и выводы об эффективности разработанной системы методик по оценке НДС стенки резервуара.

При проведении апробационных работ было отсканировано 5 резервуаров:

- 1) Номер резервуара: 5;

Тип резервуара: РВСП – 5000 м³;

Объем резервуара: 5000 м³;

Высота резервуара (м): 14,9 м;

2) Номер резервуара: 29;

Тип резервуара: РВСП – 7500 м³;

Объем резервуара: 7500 м³;

Высота резервуара (м): 17,8 м;

3) Номер резервуара: 22;

Тип резервуара: РВСП – 20000 м³;

Объем резервуара: 20000 м³;

Высота резервуара (м): 11,92 м;

4) Номер резервуара: 2;

Тип резервуара: РВСПА – 50000 м³;

Объем резервуара: 50000 м³;

Высота резервуара (м): 18 м;

5) Номер резервуара: 3;

Тип резервуара: РВСПА – 50000 м³;

Объем резервуара: 50000 м³;

Высота резервуара (м): 18 м.

Для проведения сравнения результатов, полученных с помощью наземного лазерного сканирования и полученных традиционными геодезическими методами, были использованы следующие данные:

- для резервуаров РВСП-5000 №5, РВСПА-50000 №2 и РВСПА-50000 №3 использовались данные последней полной диагностики резервуаров, предоставленные эксплуатирующей организацией;

- для резервуаров РВСП-7500 №29 и РВСП-20000 №22 одновременно с проведением наземного лазерного сканирования выполнялась съемка резервуаров традиционными геодезическими методами с использованием электронного тахеометра.

При выполнении работ было использовано следующее оборудование и программные комплексы:

- топографический сканер лазерный Z+F IMAGER 5010 (паспортные технические характеристики представлены в таблице 4.1);

- рулетка металлическая;

- тахеометр УОМЗ 5Т-А5;

- поворотные и плоские специальные марки автоматического распознавания производства Z+F;

- программный комплекс Z+F LaserControl версии 8.4.5;

- программный комплекс Geomagic Studio 2013.

Таблица 4.1 – Технические характеристики Z+F IMAGER 5010

Технические показатели	Значение
1. Метод измерения	Фазовый
2. Диапазон работы, м	от 0,3 до 187,3
3. Скорость сканирования, точек\сек	1.016.000
4. Разрешающая способность	2,2 мм на 50 м
5. Линейное отклонение	≤1 мм на 180 м
6. Расходимость лазерного луча, мрад	<0,3
7. Поле зрения по вертикали, °	320
8. Поле зрения по горизонтали, °	360
9. Рабочие температуры, °С	от минус 10 до 45
10. Пыле- и влагозащищенность	IP53
11. Класс безопасности лазера	1

Основные результаты и выводы по проделанной работе, кроме представленных в последующих параграфах, отражены в работах [17, 18, 19].

4.2. Апробационные работы на резервуаре РВСП-5000

В момент проведения работ по наземному лазерному сканированию РВСП-5000 №5 был опорожнен и зачищен от нефтепродукта. Крыша резервуара щитовая коническая, лестница шахтная. Резервуар располагается в общем

обваловании с тремя резервуарами объемом 5000 м³. Работы проводились в сентябре в солнечную погоду.

При подготовке к сканированию, основываясь на плане резервуарного парка и в соответствии с методикой, приведенной в параграфе 2.4, была разработана схема расположения сканерных станций и специальных марок (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Расположение сканируемого резервуара РВСП-5000 №5 и сканерных станций

Съемка стенки резервуара проводилась с шести сканерных станций, крыши – с четырех. Станции сканирования №4, 5, 6 располагались на земляном обваловании, №1, 2 – внутри земляного обвалования резервуара, №3 – на шахтной лестнице соседнего резервуара. Съемка крыши проводилась с четырех сканерных станций, расположенных на площадке обслуживания. Сканирование проводилось при разрешении 1,6 мм на 10 м.

Схема сканерного хода приведена на рисунке 4.2.

Постобработка сканов проводилась в программном комплексе Z+F LaserControl и включала в себя определение специальных марок и удаление точек, не относящихся к сканируемому объекту. После обработки сканов была выполнена регистрация их в единое облако точек: максимальная погрешность составила — 2,9 мм, среднее отклонение — 0,8 мм, стандартное — 0,6 мм (рисунок 4.3).

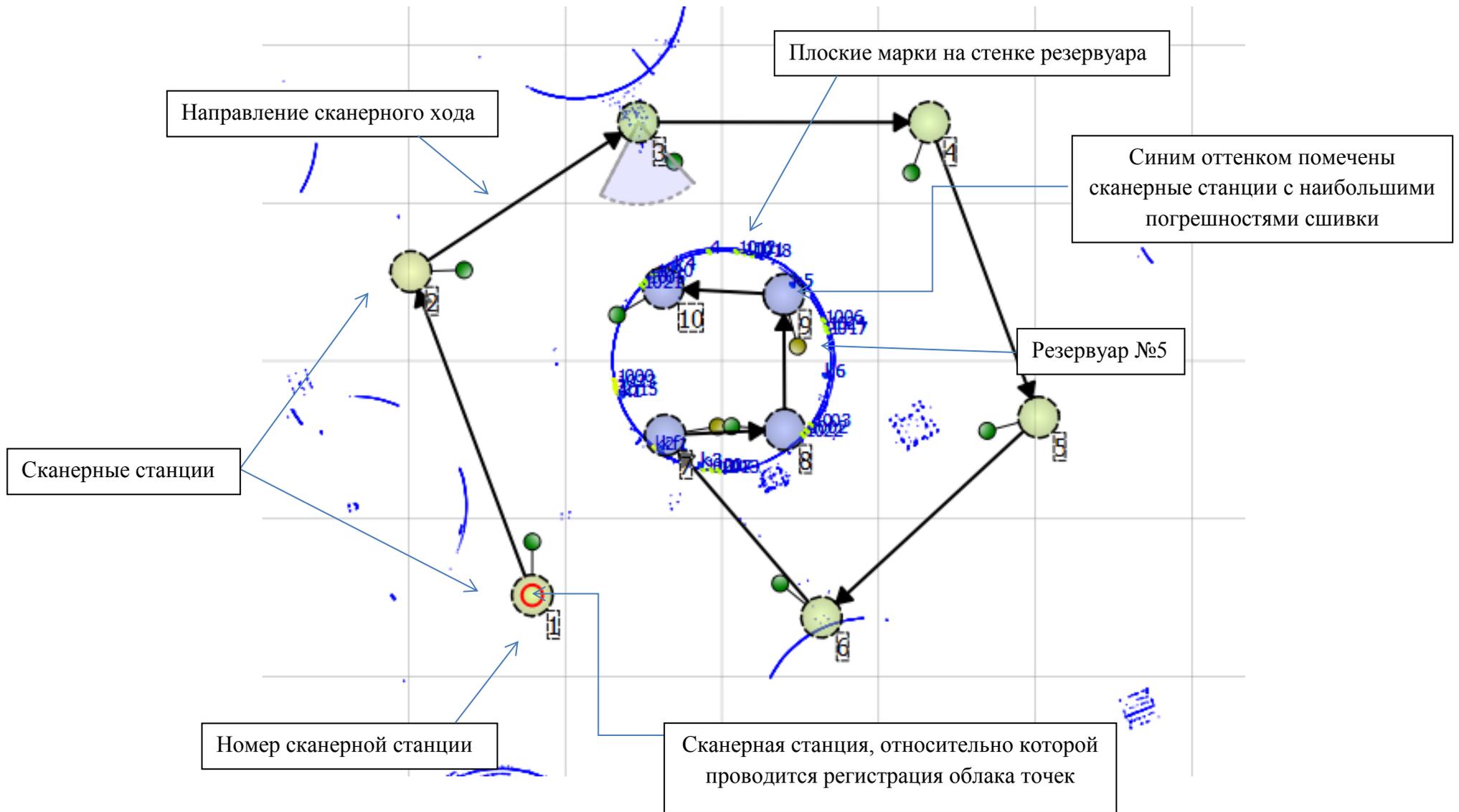


Рисунок 4.2 – Схема сканерного хода в программном комплексе Z+F LaserControl

Register project with targets

Report

Result Report Logging Targets Viewer

Nagornay5003.zfs -- Nagornay5004.zfs

Target	d [mm]	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]
1017	0.3	-0.1	-0.2	0.1
1024	0.3	0.1	0.2	-0.1
1006	0.9	0.5	0.1	0.7

Nagornay5004.zfs -- Nagornay5005.zfs

Target	d [mm]	dx [mm]	dy [mm]	dz [mm]
1022	0.8	0.1	0.7	0.4
1003	0.2	0.1	0.1	0.0
1002	0.9	-0.2	-0.8	-0.3

**Standard Deviation of the Targets,
calculated only from the Scan-Data**

Summary:

0 of 44 enabled targets whose deviations are greater than the defined threshold 7.0 mm	
Total number of targets	47
Number of disabled targets	3
Average Deviation	0.8 mm
Standard Deviation	0.6 mm
Maximal Deviation	2.9 mm

Threshold 7.0000 mm Update

Рисунок 4.3 – Результаты внешнего ориентирования сканов

По результатам проведения наземного лазерного сканирования РВСП-5000 № 5 была получена единая трехмерная точечная модель поверхности стенки резервуара в системе координат, построенной относительно первой сканерной станции. Результаты построения представлены на рисунке 4.4.

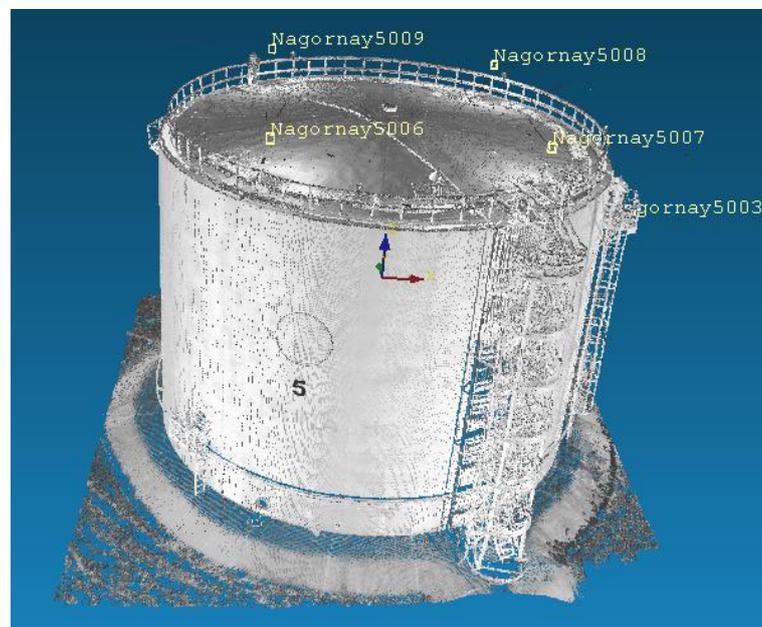


Рисунок 4.4 – Единое облако точек поверхности РВСП-5000 №5 в программном комплексе Z+F LaserControl

На основании единой точечной модели поверхности стенки резервуара в соответствии с разработанной методикой камеральной обработки данных НЛС (параграф 2.5) были определены отклонения образующих стенки резервуара от

вертикали. Результаты проведенных измерений, а также результаты сравнения данных, полученных при помощи НЛС, и данных последней полной диагностики резервуара представлены в таблице 4.2.

Анализ данных таблицы 4.2 показал, что результаты, полученные при использовании НЛС, характеризуются высокой степенью совпадения с данными диагностической организации. Полностью не совпадают только данные, полученные по образующей № 1. Данное обстоятельство объясняется тем, что зона образующей имеет очень сложную и неравномерную геометрию. В месте прохождения образующей в зоне уторного шва присутствует вмятина, в одном сантиметре в сторону начинается резкая выпуклость (рисунок 4.5). В результате получаемые данные сильно зависят от точки, принятой за начало образующей.

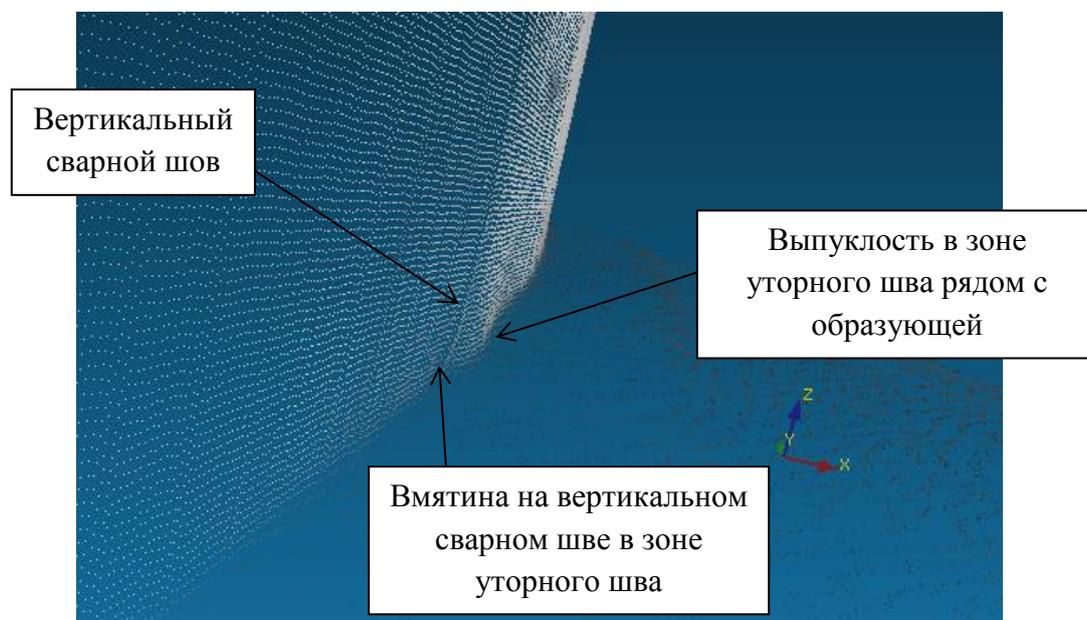


Рисунок 4.5 – Геометрия стенки резервуара в зоне первой образующей

На основании единой точечной модели поверхности стенки резервуара были определены высотные отметки окрайки днища резервуара. Результаты измерений и сравнения полученных данных с данными последней полной диагностики резервуара представлены в таблице 4.3 и на графике рисунка 4.6.

По методике, представленной в параграфе 2.5, из единой трехмерной точечной модели поверхности стенки резервуара была получена трехмерная мо-

Таблица 4.2 – Результаты измерения отклонений образующих стенки РВСП-5000 м³ № 5 от вертикали

№ пояса	Образующая № 1			Образующая № 2			Образующая № 3			Образующая № 4		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм
1	1,0	-9,0	8,0	11,3	7,0	4,3	-12,9	-2,0	10,9	1,3	0,0	1,3
2	-4,8	-15,0	10,2	27,9	15,0	12,9	-9,0	-6,0	3,0	0,4	0,0	0,4
3	-7,2	-16,0	8,8	47,6	38,0	9,6	-18,5	-14,0	4,5	6,3	5,0	1,3
4	-12,0	-25,0	13,0	53,7	50,0	3,7	-8,4	-8,0	0,4	16,6	15,0	1,6
5	-14,2	-23,0	8,8	50,9	52,0	1,1	-10,4	-11,0	0,6	13,3	10,0	3,3
6	-18,3	-30,0	11,7	51,4	50,0	1,4	-9,0	-12,0	3,0	21,9	20,0	1,9
7	-29,5	-41,0	11,5	22,4	14,0	8,4	-18,3	-17,0	1,3	31,9	25,0	6,9
8	-42,8	-59,0	16,2	-8,4	-19,0	10,6	-50,5	-52,0	1,5	41,3	38,0	3,3
9	-36,7	-57,0	20,3	-27,4	-44,0	16,6	-2,6	-11,0	8,4	52,4	45,0	7,4
10	-29,2	-43,0	13,8	-93,7	-74,0	19,7	-4,7	-5,0	0,3	45,4	46,0	0,6
№ пояса	Образующая № 5			Образующая № 6			Образующая № 7			Образующая № 8		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Разница, мм
1	-0,5	-4,0	3,5	-1,3	-4,0	2,7	-10,3	-18,0	7,7	-2,8	-3,0	0,2
2	2,1	-1,0	1,1	2,5	-1,0	1,5	-3,9	-15,0	11,1	-8,5	-7,0	1,5
3	6,4	2,0	4,4	2,9	-3,0	0,1	-3,4	-9,0	5,6	-15,6	-11,0	4,6
4	20,0	25,0	5,0	18,7	8,0	10,7	-7,4	-7,0	0,4	-19,3	-19,0	0,3
5	18,4	21,0	2,6	21,9	13,0	8,9	2,6	-3,0	0,4	-24,8	-23,0	1,8
6	20,7	21,0	0,3	28,4	29,0	0,6	8,7	5,0	3,7	-23,0	-23,0	0,0
7	36,5	33,0	3,5	31,8	29,0	2,8	14,5	10,0	4,5	-26,4	-22,0	4,4
8	45,9	43,0	2,9	29,0	27,0	2,0	24,5	22,0	2,5	-22,5	-11,0	11,5
9	58,5	59,0	0,5	49,5	48,0	1,5	30,3	24,0	6,3	-12,9	-7,0	5,9
10	70,7	75,0	4,3	56,6	55,0	1,6	28,7	24,0	4,7	-2,2	4,0	1,8

Окончание таблицы 4.2.

№ пояса	Образующая № 9			Образующая № 10			Образующая № 11		
	НЛС, мм	Гео- дезия, мм	Разни- ца, мм	НЛС, мм	Гео- дезия, мм	Разни- ца, мм	НЛС, мм	Гео- дезия, мм	Разни- ца, мм
1	1,0	-4,0	3,0	-7,7	-13,0	5,3	-6,9	-12,0	5,1
2	-7,0	-9,0	2,0	-20,5	-27,0	6,5	-14,8	-14,0	0,8
3	-14,1	-18,0	3,9	-31,4	-35,0	3,6	-19,2	-16,0	3,2
4	-16,2	-20,0	3,8	-42,4	-48,0	5,6	-27,1	-24,0	3,1
5	-19,8	-24,0	4,2	-53,1	-53,0	0,1	-42,2	-39,0	3,2
6	-30,6	-33,0	2,4	-58,9	-69,0	10,1	-68,5	-70,0	1,5
7	-39,5	-41,0	1,5	-61,3	-74,0	12,7	-78,8	-78,0	0,8
8	-43,6	-39,0	4,6	-58,9	-61,0	2,1	-83,2	-82,0	1,2
9	-37,2	-36,0	1,2	-43,9	-42,0	1,9	-58,7	-61,0	2,3
10	-24,4	-21,0	3,4	-36,3	-36,0	0,3	-46,9	-45,0	1,9
Примечание – Значение отклонения стенки резервуара от вертикали со знаком « - » означает наличие вогнутости, знак «+» - выпуклости.									

Таблица 4.3 – Результаты нивелирования окрайки днища РВСП-5000 №5

№ образующей	Измеренные относительные отклонение окрайки, мм	Относительное отклонение по представленным данным, мм	Разница, мм
1	3,8	3	0,8
2	0	0	0
3	47,7	42	5,7
4	61,6	57	4,6
5	63,8	66	2,2
6	65,7	76	10,3
7	55,3	59	3,8
8	47,9	42	5,9
9	42,9	32	10,9
10	19,1	17	2,1
11	18,8	14	4,4

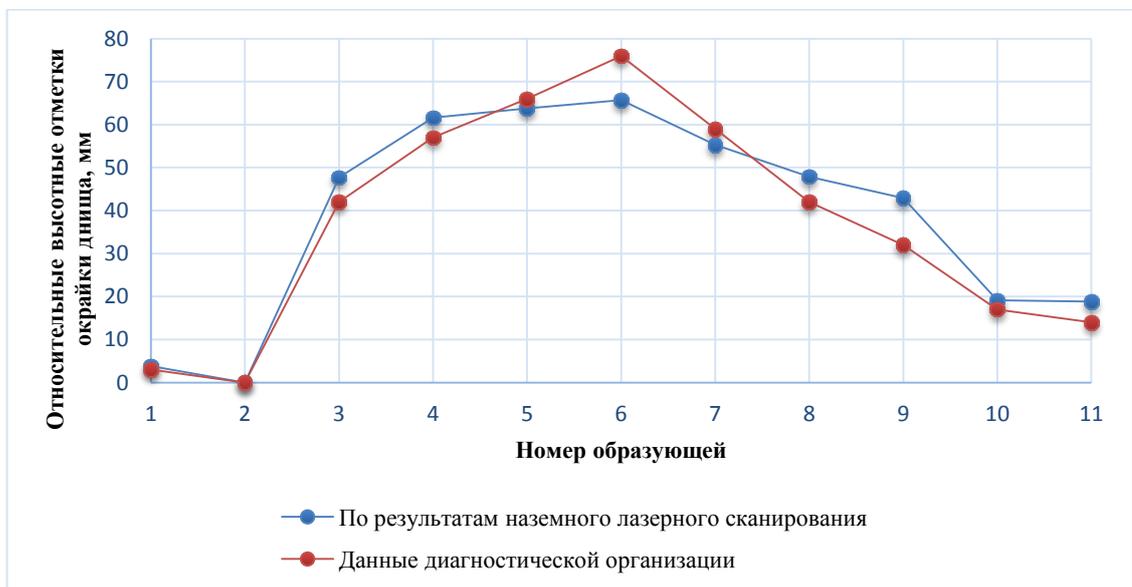


Рисунок 4.6 – График нивелирования окрайки днища

дель стенки, пригодная для дальнейшего анализа ее НДС методом конечных элементов по методике, разработанной в главе 3.

Разработанная в главе 3 методика была осуществлена в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. В качестве КЭ, соответствующего КЭ, выбранному в параграфе 3.2, был применен КЭ

SHELL181. Результаты моделирования НДС стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической представлены на рисунках 4.7 и 4.8.

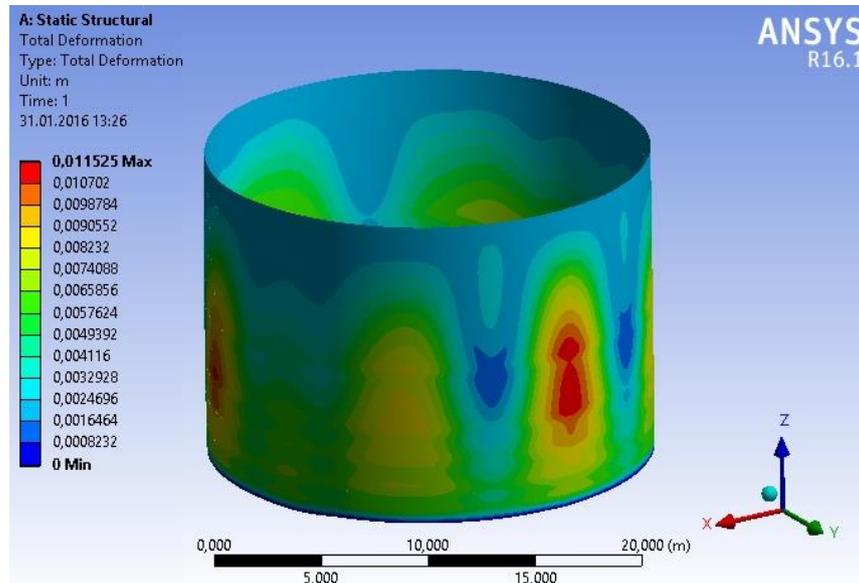


Рисунок 4.7 – Перемещения стенки РВСП-5000

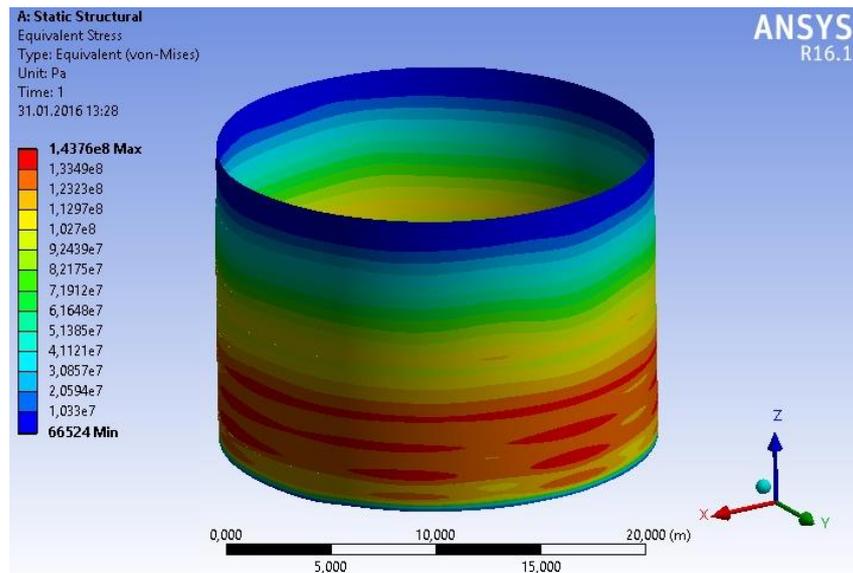


Рисунок 4.8 – Эквивалентные срединные напряжения в стенке РВСП-5000

Сравнительный анализ максимальных напряжений, возникающих в стенке резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы и без их учета, представлен в таблице 4.4. При сравнительном анализе по формуле (1.1) рассчитаны как максимальные проектные напряжения, возникающие в различных поясах стенки резервуара, так и проектные напряжения на расчетной

высоте, соответствующей максимальным напряжениям, полученным при расчете по разработанным методикам.

Таблица 4.4 – Сравнительный анализ максимальных напряжений в стенке резервуара РВСП-5000

Номер пояса	Толщина пояса, мм	Расчетная высота, мм	Максимальное действующее напряжение, МПа	Максимальное проектное напряжение, МПа	Проектное напряжение на расчетной высоте, МПа
1	10	745	136,6	125,0	119,2
2	8	2235	143,8	140,7	132,3
3	7	3352	139,1	141,6	136,8
4	6	4842	138,4	142,9	137,9
5	6	5960	119,5	120,5	120,5
6	5	7748	114,5	117,8	112,5

4.3. Апробационные работы на резервуаре РВСП-20000

В момент проведения работ по наземному лазерному сканированию РВСП-20000 №22 был опорожнен и зачищен от нефтепродукта. Крыша резервуара сферическая, лестница шахтная. Резервуар располагается в индивидуальном земляном обваловании. Работы проводились в июне после дождя.

Перед началом выполнения работ в соответствии с методикой, изложенной в параграфе 2.4, была разработана схема размещения сканерных станций и специальных марок на основании предоставленной информации о типе и размерных характеристиках резервуара, конструктивных особенностях его исполнения, а также планах и схемах расположения резервуара и окружающей обстановке в обваловании. Схема расположения сканерных станций приведена на рисунке 4.9.

Сканирование стенки резервуара выполнялось с вершины земляного обвалования с 8 сканерных станций. Сканирование крыши резервуара выполнялось



Рисунок 4.9 – Расположение сканируемого резервуара РВСП-20000 №22 и сканерных станций

с 5 сканерных станций. Сканирование проводилось при разрешении 1,6 мм на 10 м.

Схема сканерного хода приведена на рисунке 4.10.

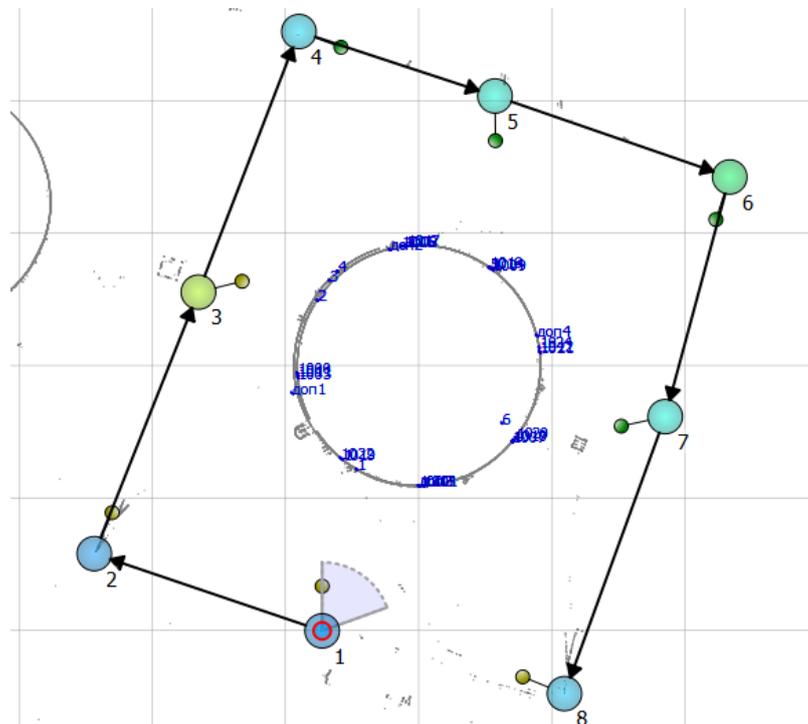


Рисунок 4.10 – Схема сканерного хода в программном комплексе Z+F LaserControl

По результатам проведения наземного лазерного сканирования РВСП-20000 №22 была получена единая трехмерная точечная модель поверхности стенки

резервуара в системе координат, построенной относительно первой сканерной станции. Результаты построения представлены на рисунке 4.11.

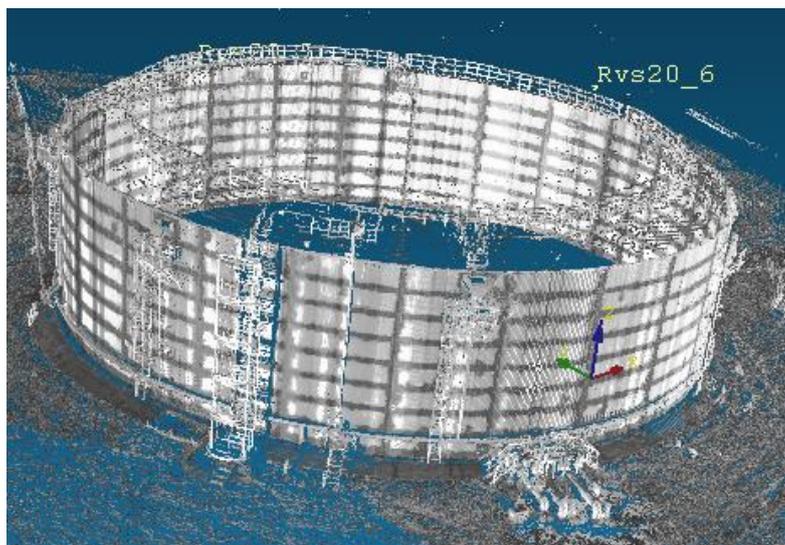


Рисунок 4.11 – Единое облако точек поверхности РВСП-20000 №22 в программном комплексе LaserControl

На основании единой точечной модели поверхности стенки резервуара в соответствии с разработанной методикой камеральной обработки данных НЛС (параграф 2.5) были определены отклонения образующих стенки резервуара от вертикали. Результаты проведенных измерений, а также результаты сравнения данных, полученных при помощи НЛС, и данных, полученных при одновременной с НЛС традиционной геодезической съемкой резервуара, представлены в Приложении А.

Результаты определения высотных отметок окрайки днища и сравнения полученных данных с данными геодезической съемки представлены на рисунке 4.12 и в Приложении Б.

Анализ результатов (Приложение А) показал, что по образующим №6-13, 20 наблюдается значительное расхождение в данных по отклонениям от вертикали, полученных при помощи НЛС и при геодезической съемке. Данные расхождения объясняются тем, что сканирование резервуара выполнялась после дождя, в результате чего часть поверхности стенки была постоянно залита водой, стекающей с крыши (рисунок 4.13).



Рисунок 4.12 – График нивелирования окрайки днища РВСП-20000 № 22

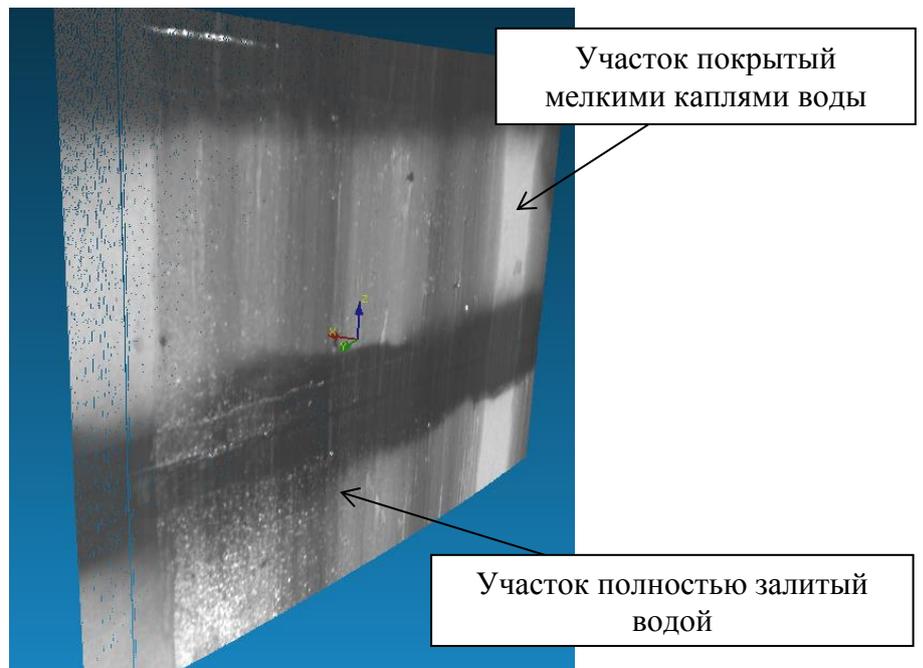


Рисунок 4.13 – Часть стенки резервуара в трехмерном виде в программном комплексе Z+F LaserControl

Стекающая по поверхности стенки резервуара вода образовала аналог зеркала. В результате преломления лазерного луча и его многократного отражения в слое воды в сканер приходит не один обратный отраженный сигнал, а несколько. Данные сигналы прошли различный путь, и пришли в приемник под различным углом. Поэтому вместо одной точки лазерного отражения с действительными координатами мы имеем несколько точек с неверными

координатами. В результате формируется широкая «шумовая полоса» (доходящая до 15 мм шириной) на стенке резервуара, из-за которой определение истинной координаты поверхности резервуара на образующих №6-13, 20 не представляется возможным. Таким образом, подтверждается положение разработай методики о запрете проведения НЛС во время дождя.

По методике, представленной в параграфе 3.5, из единой трехмерной точечной модели поверхности стенки резервуара была получена трехмерная модель стенки, пригодная для дальнейшего анализа ее НДС методом конечных элементов по методике, разработанной в главе 3. Разработанная в главе 3 методика была осуществлена в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. В качестве КЭ, соответствующего КЭ, выбранному в параграфе 3.2, был применен КЭ SHELL181. Результаты моделирования НДС стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы представлены на рисунках 4.14 и 4.15.

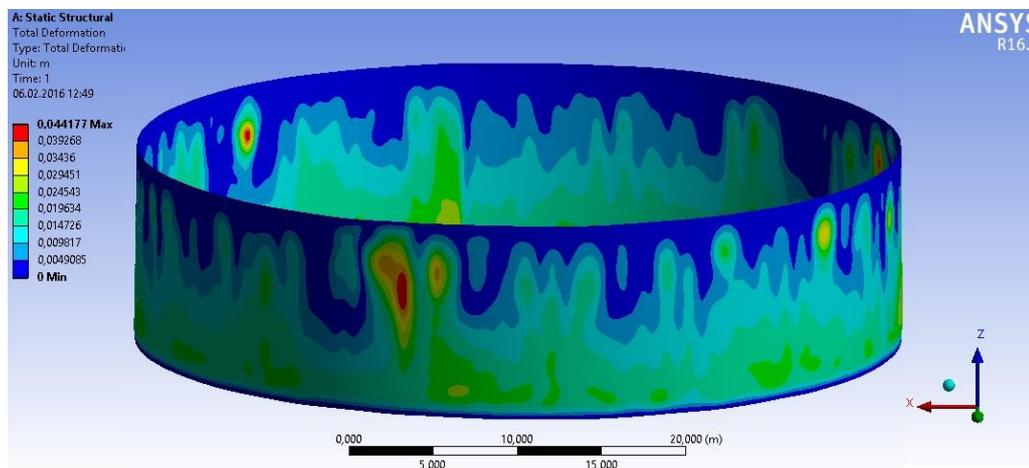


Рисунок 4.14 – Перемещения стенки РВСП-20000

Сравнительный анализ максимальных напряжений, возникающих в стенке резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы и без их учета представлен в таблице 4.5. При сравнительном анализе по формуле (1.1) рассчитаны как максимальные проектные напряжения, возникающие в различных поясах стенки резервуара, так и проектные напряжения на расчетной высоте, соот-

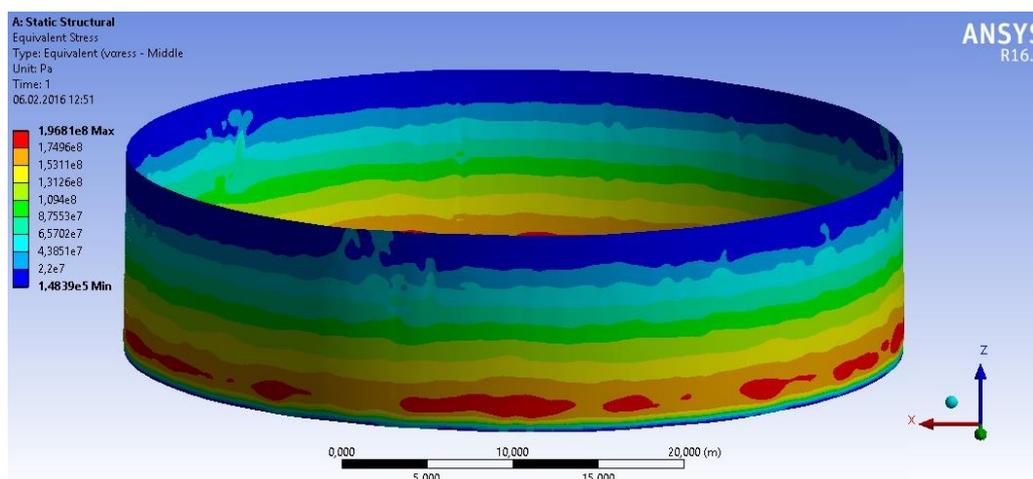


Рисунок 4.15 – Эквивалентные срединные напряжения в стенке РВСП-20000 ветствующей максимальным напряжениям, полученным при расчете по разработанным методикам.

Таблица 4.5 – Сравнительный анализ максимальных напряжений в стенке резервуара РВСП-20000

Номер пояса	Толщина пояса, мм	Расчетная высота, мм	Максимальное действующее напряжение, МПа	Максимальное проектное напряжение, МПа	Проектное напряжение на расчетной высоте, МПа
1	12,0	1489	196,8	160,0	138,0
2	10,2	1491	196,8	162,7	162,7
3	10,1	2980	165,2	138,6	138,6
4	10,0	4470	135,6	114,0	114,0
5	10,1	5960	121,0	87,1	87,1
6	10,2	8692	87,4	60,8	39,5

4.4. Апробационные работы на резервуаре РВСП-7500

В момент проведения работ по наземному лазерному сканированию РВСП-7500 №29 был опорожнен и зачищен от нефтепродукта. Крыша резервуара щитовая коническая, лестница круговая. Резервуар располагается в индивидуальном бетонном каре. Работы проводились в июне в солнечный день.

Перед началом выполнения работ в соответствии с методикой, изложенной в параграфе 2.4, была разработана схема размещения сканерных станций и специальных марок на основании предоставленной информации о типе и размерных характеристиках резервуара, конструктивных особенностях его исполнения, а также планах и схемах расположения резервуара и окружающей обстановки в обваловании. Схема расположения сканерных станций приведена на рисунке 4.16.



Рисунок 4.16 – Расположение сканируемого резервуара РВСП-7500 №29 и сканерных станций

Наличие значительного количества технологического оборудования, площадок, лестниц и трубопроводов в защитном каре и само бетонное защитное обвалование существенно усложнили проведение работ по сканированию резервуара и не позволяли отсканировать всю стенку резервуара по высоте с одной сканерной станции. Поэтому сканирование поверхности стенки резервуара выполнялось с 9 сканерных станций, расположенных внутри и за пределами бетонного каре. Со сканерных станций №5, 8, 9, располагавшихся на технологических площадках вне защитного обвалования резервуара, выполнялась съемка верхней части стенки резервуара, а со сканерных станций №1, 6, 7 – нижней части. Сканирование проводилось при разрешении 1,6 мм на 10 м.

Схема сканерного хода приведена на рисунке 4.17.

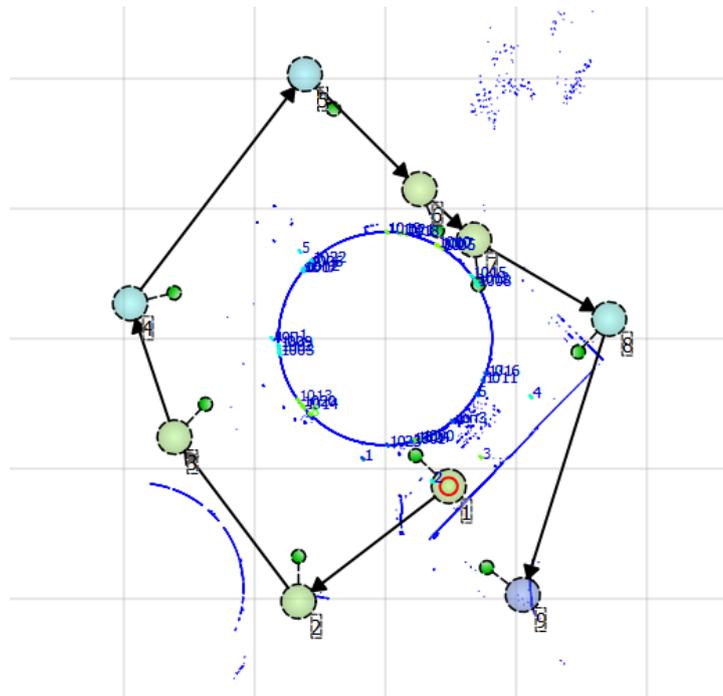


Рисунок 4.17 – Схема сканерного хода в программном комплексе Z+F
LaserControl

По результатам проведения наземного лазерного сканирования РВСП-7500 №29 была получена единая трехмерная точечная модель поверхности стенки резервуара в системе координат, построенной относительно первой сканерной станции. Результаты построения представлены на рисунке 4.18.

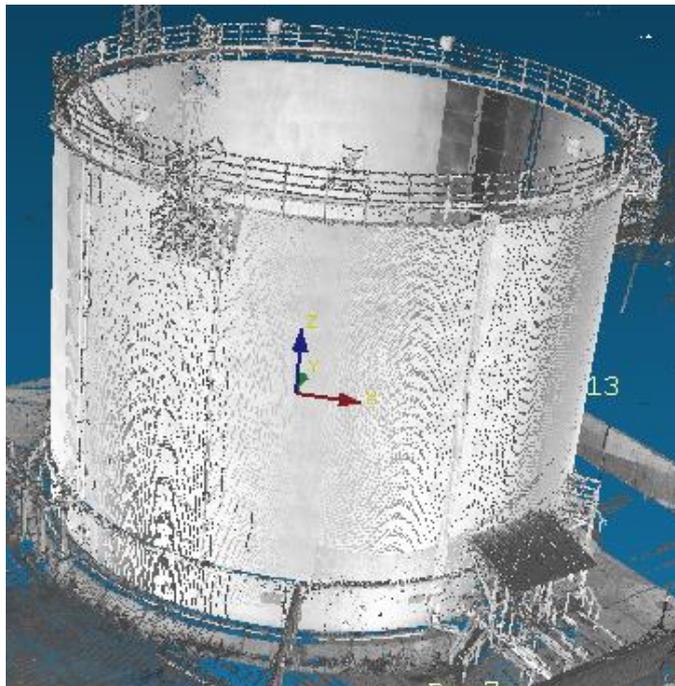


Рисунок 4.18 – Единое облако точек поверхности РВСП-7500 №29 в программном комплексе LaserControl

На основании единой точечной модели поверхности стенки резервуара в соответствии с разработанной методикой камеральной обработки данных НЛС (параграф 2.5) были определены отклонения образующих стенки резервуара от вертикали. Результаты проведенных измерений, а также результаты сравнения данных, полученных при помощи НЛС, и данных, полученных при одновременной с НЛС традиционной геодезической съемкой резервуара, представлены в Приложении В.

Результаты определения высотных отметок окрайки днища и сравнения полученных данных с данными геодезической съемки представлены на рисунке 4.19 и в Приложении Г.

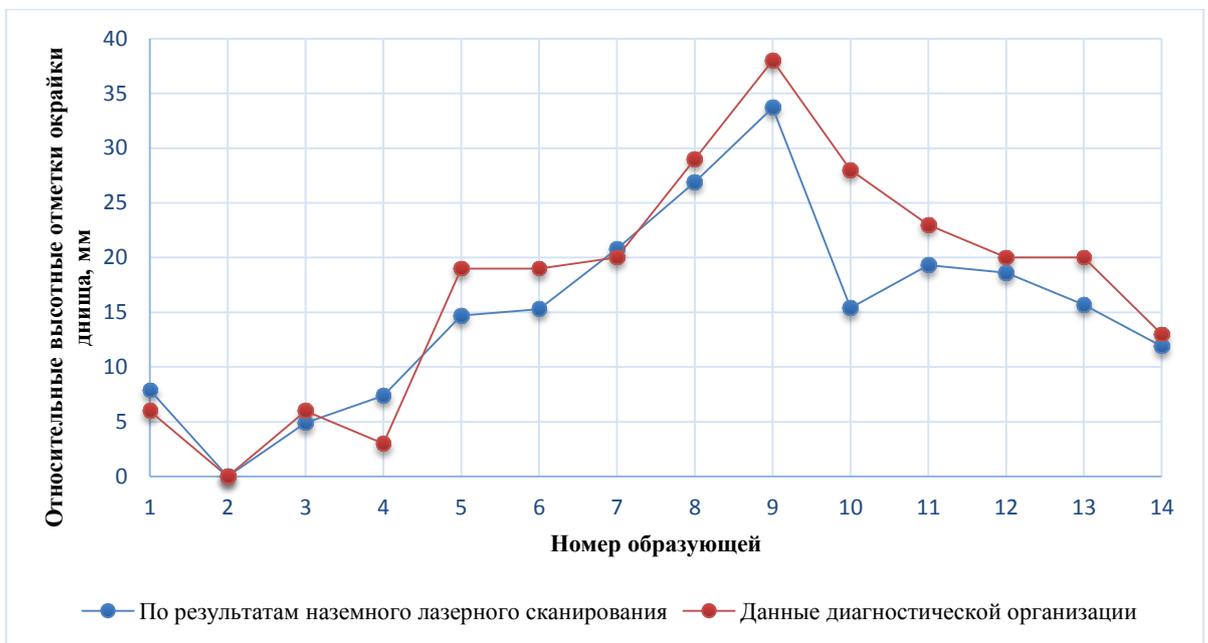


Рисунок 4.19 – График нивелирования окрайки днища РВСП-7500 № 29

По методике, представленной в параграфе 3.5, из единой трехмерной точечной модели поверхности стенки резервуара была получена трехмерная модель стенки, пригодная для дальнейшего анализа ее НДС методом конечных элементов по методике, разработанной в главе 3. Разработанная в главе 3 методика была осуществлена в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. В качестве КЭ, соответствующего КЭ, выбранному в параграфе 3.2, был применен КЭ SHELL181. Результаты моделирования НДС

состояния стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок представлены на рисунках 4.20 и 4.21.

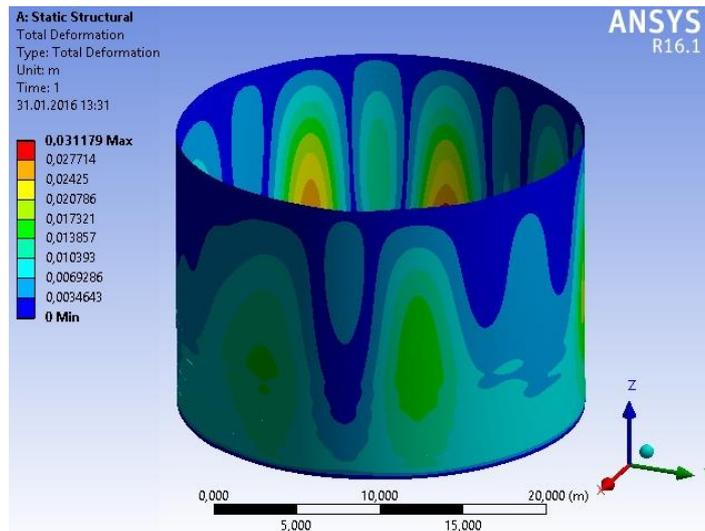


Рисунок 4.20 – Перемещения стенки РВСП-7500

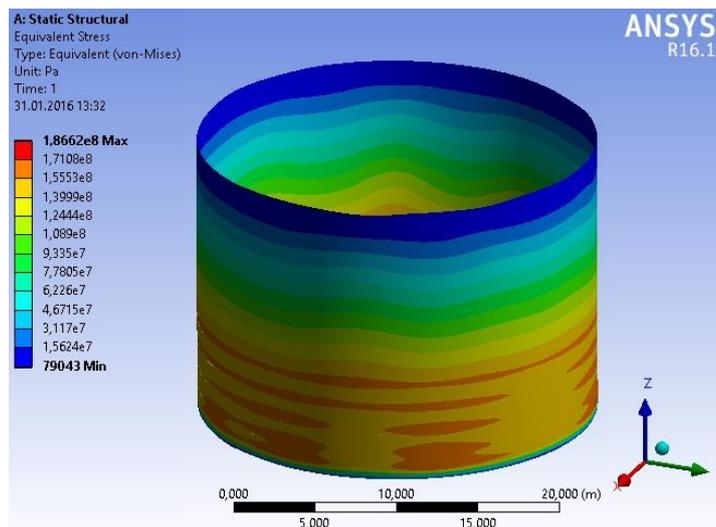


Рисунок 4.21 – Эквивалентные срединные напряжения в стенке РВСП-7500

Сравнительный анализ максимальных напряжений, возникающих в стенке резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы и без их учета представлен в таблице 4.6. При сравнительном анализе по формуле (1.1) рассчитаны как максимальные проектные напряжения, возникающие в различных поясах стенки резервуара, так и проектные напряжения на расчетной высоте, соответствующей максимальным напряжениям, полученным при расчете по разработанным методикам.

Таблица 4.6 – Сравнительный анализ максимальных напряжений в стенке резервуара РВСП-7500

Номер пояса	Толщина пояса, мм	Расчетная высота, мм	Максимальное действующее напряжение, МПа	Максимальное проектное напряжение, МПа	Проектное напряжение на расчетной высоте, МПа
1	11	745	186,6	139,0	132,9
2	10	1863	165,7	139,5	136,2
3	9	3352	161,9	140,1	136,4
4	8	4470	158,1	140,9	140,9
5	7	6330	163,6	141,9	137,1

4.5. Апробационные работы на резервуарах РВСПА-50000

Работы по лазерному сканированию РВСПА-50000 №2 и №3 проводились при нижнем нормативном уровне налива (2,19 м). Работы проводились в октябре в условиях мороза, сильного ветра и снегопада.

Перед началом выполнения работ в соответствии с методикой, изложенной в параграфе 2.4, была разработана схема размещения сканерных станций и марок на основании предоставленной информации о типе и размерных характеристиках резервуаров, конструктивных особенностях их исполнения, а также планах и схемах расположения резервуаров и окружающей обстановки в обваловании. Схема расположения сканерных станций при съемке РВСПА-50000 №3 представлена на рисунке 4.22. Схема расположения сканерных станций при съемке РВСПА-50000 №2 аналогична схеме для РВСПА-50000 №3.

Сканирование стенки резервуаров выполнялось с 8 сканерных станций: 7 сканерных станций располагалось на вершине земляного обвалования, и 1 сканерная станция – на площадке технологического перехода над трубопроводами. Сканирование проводилось при разрешении 1,6 мм на 10 м.

По результатам проведения наземного лазерного сканирования РВСПА-50000 №2 и №3 были получены единые трехмерные точечные модели поверхнос-



Рисунок 4.22 – Расположение сканируемого резервуара РВСПА-50000 №3 и сканерных станций

тей стенок резервуаров в системе координат, построенной относительно первых сканерных станций. Результаты построения представлены на рисунке 4.23 и 4.24.



Рисунок 4.23 – Единое облако точек поверхности РВСПА-50000 №2 в программном комплексе LaserControl

На основании единых точечных моделей поверхностей стенок резервуаров в соответствии с разработанной методикой камеральной обработки данных НЛС (параграф 2.5) были определены отклонения образующих стенки резервуаров от вертикали. Результаты проведенных измерений, а также результаты сравнения



Рисунок 4.24 – Единое облако точек поверхности РВСПА-50000 №3 в программном комплексе LaserControl

данных, полученных при помощи НЛС, и данных последней полной диагностики резервуаров представлены в Приложении Д и Е.

Результаты определения высотных отметок окрайки дна и сравнения полученных данных с данными геодезической съемки представлены на рисунках 4.25 и 4.26 и в Приложении Ж и З.



Рисунок 4.25 – График нивелирования окрайки дна РВСПА-50000 №2



Рисунок 4.26 – График нивелирования окрайки днища РВСПА-50000 №3

По методике, представленной в параграфе 2.5, из единых трехмерных точечных моделей поверхностей стенок резервуаров были получены трехмерные модели стенки, пригодные для дальнейшего анализа их НДС методом конечных элементов по методике, разработанной в главе 3. Разработанная в главе 3 методика была осуществлена в программном комплексе ANSYS, реализующем метод конечных элементов. В качестве КЭ, соответствующего КЭ, выбранному в параграфе 3.2, был применен КЭ SHELL181. Результаты моделирования НДС состояния стенок резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок представлены на рисунках 4.27-4.30.

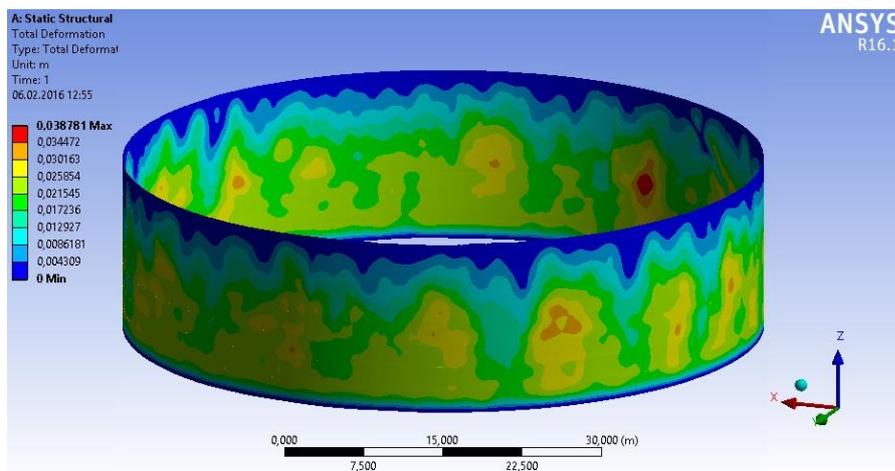


Рисунок 4.27 – Перемещения стенки РВСПА-50000 №2

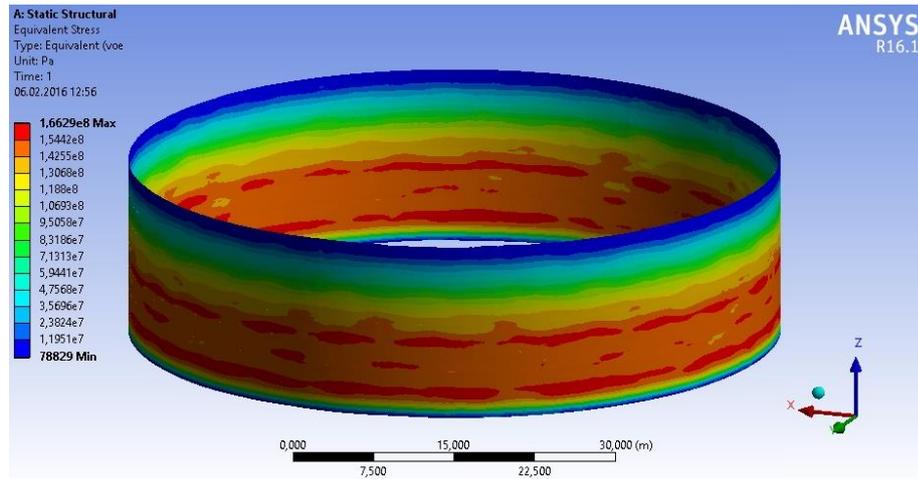


Рисунок 4.28 – Эквивалентные срединные напряжения в стенке РВСПА-50000 №2

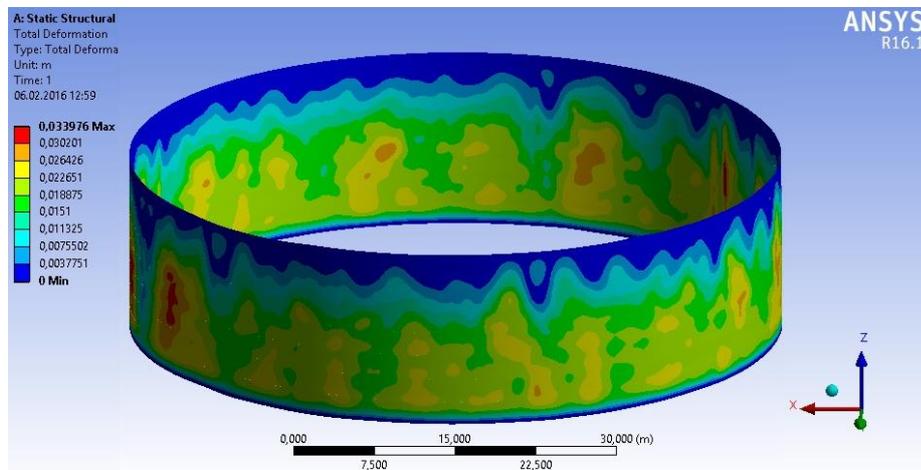


Рисунок 4.29 – Перемещения стенки РВСПА-50000 №3

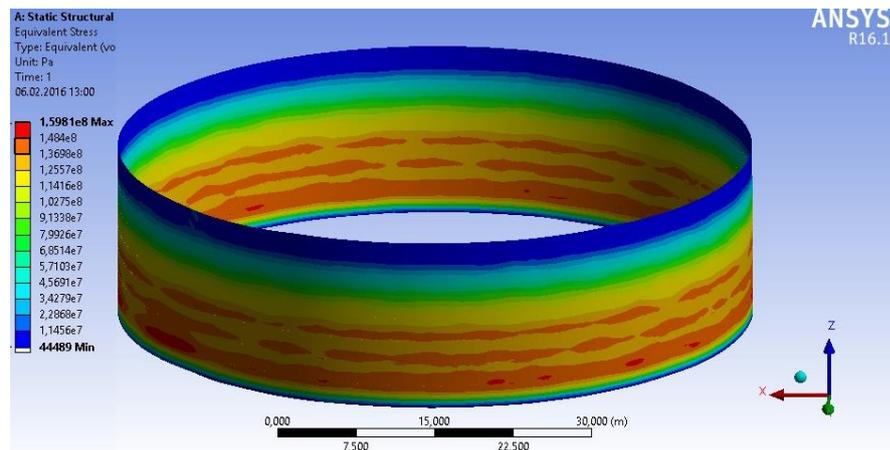


Рисунок 4.30 – Эквивалентные срединные напряжения в стенке РВСПА-50000 №3

Сравнительный анализ максимальных напряжений, возникающих в стенке резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы и без их учета представлен в таблице 4.7. При сравнительном анализе по

формуле (1.1) рассчитаны как максимальные проектные напряжения, возникающие в различных поясах стенки резервуара, так и проектные напряжения на расчетной высоте, соответствующей максимальным напряжениям, полученным при расчете по разработанным методикам.

Таблица 4.7 – Сравнительный анализ максимальных напряжений в стенке резервуара РВСПА-50000

Номер пояса	Толщина пояса, мм	Расчетная высота, мм	Максимальное действующее напряжение, МПа	Максимальное проектное напряжение, МПа	Проектное напряжение на расчетной высоте, МПа
1	26	2200	166,3	163,4	163,4
2	22	4450	158,5	166,0	139,4
3	18	5062	161,5	170,0	161,4
4	14	7875	156,2	175,5	154,1
5	12	9562	148,6	154,9	142,4
6	12	11250	107,0	105,1	105,1

Выводы по главе

1) По разработанной системе методик были проведены апробационные экспериментальные работы по наземному лазерному сканированию резервуаров и оценке их НДС. Комплекс проделанных работ включал в себя:

- практическую наземную лазерную съемку резервуаров, находящихся в эксплуатации;
- определение действительного пространственного положения и реальной геометрической формы резервуаров;
- проведение сравнения результатов, полученных с помощью наземного лазерного сканирования, с результатами, полученными традиционными геодезическими методами;
- определение перемещений и НДС стенки резервуаров.

2) Опыт проведенных работ показал, что существует ряд особенностей, которые необходимо учитывать при проведении наземного лазерного сканирования резервуаров в различных природно-климатических условиях. Данные особенности послужили основой для разработки дополнительных требований и рекомендаций по проведению работ по наземному лазерному сканированию резервуаров, вошедших в разработанную методику (параграф 3.3).

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) Установлено, что неравномерная осадка в сочетании с дефектами геометрической формы стенки оказывает основное влияние на изменение напряженно-деформированного состояния резервуаров в процессе их эксплуатации и является причиной порядка 33% всех случаев аварий резервуаров.

2) Показано, что существующие методы расчета НДС резервуаров не дают решения задачи оценки совместного воздействия действительного пространственного положения и реальной геометрической формы стенки резервуара на ее НДС, а ограничиваются только учетом пространственного положения. При этом в действующей нормативно-технической документации при определении НДС стенки резервуаров не учтены как реальная геометрическая форма, так и действительное пространственное положение стенки резервуара.

3) Разработана методика проведения работ по трехмерному наземному лазерному сканированию резервуаров (резервуар опорожнен и зачищен), позволяющая:

- оценить с точностью до 0,5 мм отклонения действительного пространственного положения и реальной геометрической формы стенки резервуара от идеального проектного положения резервуара;

- уменьшить влияние внешних факторов (метрологических свойств снимаемого объекта, метеорологических условий проведения работ и т.д.) на результаты;

- сократить время выполнения работ по обследованию резервуара всех типоразмеров до 8 часов.

Получаемая в результате трехмерного наземного лазерного сканирования резервуаров по разработанной методике трехмерная модель стенки резервуара пригодна для дальнейшего анализа ее НДС методом конечных элементов.

4) Доказано, что при расчете НДС стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного

положения и реальной геометрической формы возможен переход от трехмерной к двумерной задаче теории упругости (теории оболочек).

5) Разработана методика оценки изменения НДС стенки резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок при использовании плоского четырехугольного конечного элемента, основанного на теории оболочек, учитывающей влияние поперечного сдвига, узловые варьируемые параметры которого включают в себя 6 компонентов вектора перемещений.

Методика позволяет комплексно оценивать совместное воздействие отклонений формы и положения стенки резервуара в процессе эксплуатации на НДС стенки резервуаров с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы элементов стенки резервуаров.

6) Натурные экспериментальные работы по оценке НДС стенки резервуаров различных типоразмеров по разработанной методике показали, что напряжения в стенке резервуара с учетом ее действительного пространственного положения и реальной геометрической формы могут превышать проектные напряжения в стенке резервуара, рассчитываемые как для идеального цилиндра, более чем на 20%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1) Александров А.В. Основы теории упругости и пластичности: учеб. для строит. спец. Вузов / Александров А.В., Потапов В.Д. – М.: Высш. шк., 1990. – 400 с.: ил.
- 2) Арзунян А.С. Резервуары с безмоментной кровлей для хранения нефти и нефтепродуктов / Арзунян А.С. – М.: ЦНИИТЭнефть, 1956. – с. 72.
- 3) Афанасьев В.А. Сооружение газохранилищ и нефтебаз / Афанасьев В.А., Березин В.А. – М.: Недра, 1986. – 334 с.
- 4) Афонская Г.П. Влияние дефектов на несущую способность резервуаров, эксплуатируемых в условиях Севера: дисс. ... канд. техн. наук: 01.02.06 / Афонская Галина Петровна. – Якутск, 2000. – 141 с.
- 5) Ашкинази М.И. К расчету местных напряжений в стальных резервуарах / Ашкинази М.И., Ланда М.Ш. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1975. – №4. – С. 21-23.
- 6) Ашкинази М.И. К расчету вертикальных цилиндрических резервуаров большой емкости / Ашкинази М.И., Егоров Е.А. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. – 1976. – №4. – С. 17-18.
- 7) Ашраф Абдель Ванис Абдель Мавла Бешр. Разработка и совершенствование технологий определения деформаций инженерных сооружений с помощью современных высокоточных геодезических способов и средств измерений: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.32 / Ашраф Абдель Ванис Абдель Мавла Бешр. – Новосибирск, 2010. – 205 с.
- 8) Беляев Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Беляев Б.И., Корниенко В.С. – М.: Стройиздат, 1968. – 205 с.
- 9) Бердичевский В.Л. Вариационно-асимптотический метод построения теории оболочек и стержней: дисс. ... д-ра физ.-мат. Наук.: 01.02.04 / Бердичевский Виктор Львович. – М., 1981. – 299 с.
- 10) Березин В.Л. Устойчивость верхних поясов вертикальных цилиндрических резервуаров / Березин В.Л., Гумеров А.Г., Ясин Э.М. //

Проектирование, строительство и эксплуатация магистральных газонефтепроводов и баз: Труды НТС Уфимского нефтяного института. – 1969, вып. 3 – С. 316-325.

11) Березин В.Л. Устойчивость верхних поясов стальных вертикальных цилиндрических резервуаров / Березин В.Л., Гумеров А.Г., Ясин Э.М. // Нефть и газ. – 1969. – №4. – С. 81-85.

12) Березин В.Л. Вопросы эксплуатационной надежности резервуаров на нефтеперерабатывающих заводах / Березин В.Л., Мацкин А.А., Гумеров А.Г., Ясин Э.М. – М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – 67 с.

13) Березин В.Л. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов / Березин В.Л., Шутов В.Е. – М.: Недра, 1973. – 223 с.

14) Большаков В.Д. Радиогодезические и электрооптические измерения: учебник для вузов / Большаков В.Д., Деймлих Ф., Голубев А.Н., Васильев В.П. – М.: Недра, 1985. – 303 с. ил.

15) Бородавкин П.П. Характер осадки резервуаров и ее влияние на эксплуатационную надежность при хранении нефтепродуктов / Бородавкин П.П., Маслов Л.С., Шадрин О.Б. // РНТС ВНИИОНГ. – 1965. – №6. – С. 26-29.

16) Буренин В.А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Буренин Владимир Алексеевич – Уфа, 1981. – 157 с.

17) Васильев Г.Г. О применении наземного лазерного сканирования в нефтегазовой отрасли / Васильев Г.Г., Лежнев М.А., Сальников А.П., Леонович И.А., Катанов А.А., Лиховцев М.В. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2014. – № 4 (16). – С. 47-51.

18) Васильев Г.Г. О проведении работ по трехмерному лазерному сканированию РВСП 20000 / Васильев Г.Г., Лежнев М.А., Сальников А.П., Леонович И.А., Катанов А.А., Лиховцев М.В. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 1 (17). – С. 54-59.

19) Васильев Г.Г. Анализ опыта применения трехмерного лазерного сканирования на объект ОАО «АК «Транснефть» / Васильев Г.Г., Лежнев М.А., Сальников А.П., Леонович И.А., Катанов А.А., Лиховцев М.В. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2015. – № 2 (18). – С. 48-55.

20) Васильев Г.Г. Анализ причин аварий вертикальных стальных резервуаров / Васильев Г.Г., Сальников А.П. // Нефтяное хозяйство. – 2015. – № 2. – С. 106-108.

21) Галеев В.Б. Проектирование оснований резервуаров на слабых водонасыщенных грунтах / Галеев В.Б. // Нефтепромысловое строительство. – М.: ВНИИОЭНГ, 1976. – С. 13-15.

22) Галеев В.Б. Экспериментальное исследование механических свойств материала днища вертикальных цилиндрических резервуаров после длительной эксплуатации / Галеев В.Б., Гафаров Р.Х., Любушкин В.В., Юсупов Ф.Ш. // Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов. РНТС ВНИИОЭНГ. – 1977. – №5. – С. 40-45.

23) Галеев В.Б. Эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в сложных условиях / Галеев В.Б. – М.: Недра, 1981. – 149 с.

24) Галеев В.Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.15.13 / Галеев Виль Бареевич. – Тюмень, 1987. – 668 с.

25) Галеев В.Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения / Галеев В.Б., Гагарин Д.Ю., Фролов Ю.А. – Уфа, 2004. – 164 с.

26) Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы / Пер. с англ. – М.: Издательство «Мир», 1984. – 428 с.: ил.

27) Головачев А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния стенки нефтеналивного резервуара с дефектом формы в виде вмятины / Головачев А.А., Марков П.В., Сметанников О.Ю. // Прикладная математика и механика: сб. науч. тр. – 2007 – № 8(10).

- 28) Головачев А.А. Исследования концентрации напряжений в тонкостенных конструкциях со сверхнормативными дефектами формы и материала и создание технологии оценки условий их эксплуатации / Головачев А.А., Сметанников О.Ю. // Вестник ПГТУ. Механика. –2009. – №1. – С. 93-102.
- 29) ГОСТ 10528-90 Нивелиры. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1991. – 15 с.
- 30) ГОСТ 10529-90 Теодолиты. Общие технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1991. – 19 с
- 31) ГОСТ 24846-2012 Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. – М.: Стандартинформ, 2014. – 19 с.
- 32) ГОСТ 31385-2008 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. – М.: Стандартинформ, 2010. – 56 с.
- 33) ГОСТ Р 51774-2001 Тахеометры электронные. Общие технические условия. – М.: Госстандарт России, 2001. – 12 с.
- 34) Дорофеев В.А. Вычислительная технология определения напряженно-деформированного состояния конструкций вертикальных стальных резервуаров с использованием метода конечных элементов / Дорофеев В.А., Кузьмин В.А., Киреев В.А. // Наука и технология трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013. – №1. – С. 94-100.
- 35) Евдокимов В.В. Дифференцированный подход к определению допустимых размеров вмятин на поверхности стенки вертикальных цилиндрических резервуаров / Евдокимов В.В., Труфанов Н.А., Сметанников О.Ю. // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – №6. – С. 15-16.
- 36) Землянский А.А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.02 / Землянский Анатолий Андреевич. – Балаково, 2006. – 417 с.
- 37) Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. – М.: Издательство «Мир», 1975. – 543 с.: ил.

- 38) Иванов А.В. Разработка методики геодезического контроля инженерных объектов на основании данных наземного лазерного сканирования: дисс. ...канд. техн. наук: 25.00.32 / Иванов Андрей Васильевич. – Новосибирск, 2012. – 150 с.
- 39) Иванов Ю.К. Основания и фундаменты резервуаров / Иванов Ю.К., Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н. – М.: «Стройиздат», 1989. – 95 с.
- 40) Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса сварных вертикальных резервуаров. Утверждено ОАО «НК «Роснефть» 28.01.2004 г.
- 41) Исима Т. Исследование причин аварий при хранении нефти в резервуарах на предприятиях фирмы «Мицубиси Сэкию» / Исима Т. // Перевод с японского языка из журнала «Добоку Сэко». – 1975. – т. 16, №9.
- 42) Катанов А.А. Расчет напряжений и перемещений в уторном узле и окрайке днища резервуара / Востров В.К., Катанов А.А. // Монтажные и специальные работы. – 2005. – №8. – С. 22-26.
- 43) Кафтан В.И. Полевая калибровка наземных лазерных сканеров на эталонных базисах / Кафтан В.И., Никифоров М.В. // 8-я Международная научно-практическая конференция «Геопространственные технологии и сферы их применения». Материалы конференции. – М.: Информационное агентство «ГРОМ», 2012. – С. 98-100.
- 44) Клованич С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики / Клованич С.Ф. – Запорожье: Издательство журнала «Свет геотехники», 2009. – 400 с.: ил.
- 45) Кондаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения / Кондаков Г.П. // Промышленное и гражданское строительство. – 1998. – №5.
- 46) Кондрашева О.Г. Причинно-следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / Кондрашева О.Г., Назарова М.Н. // Нефтегазовое дело. – №2, 2004. – С. 36-43.
- 47) Коновалов П.А. Устройство фундаментов на заторфованных грунтах / Коновалов П.А. – М.: Стройиздат, 1980. – 160 с.

48) Коновалов П.А. Предельные значения средних и неравномерных осадок металлических резервуаров / Коновалов П.А., Иванов Ю.К. // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1985. – №5. – С. 27.

49) Коновалов П.А. Фундаменты стальных резервуаров и деформации их оснований / Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н., Землянский А.А., Тарасенко А.А. – М.: Издательство Ассоциация строительных вузов, 2009. – 336 с.

50) Коновалова О.П. Учет консолидации в повышении эксплуатационной надежности стальных резервуаров большой емкости: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Коновалова Ольга Павловна. – Тюмень, 2002. – 176 с.

51) Куприянов В.М. Повышение эффективности эксплуатации вертикальных стальных резервуаров путем внедрения новых конструктивных решений в основания фундаментов: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Куприянов Василий Михайлович. – Уфа, 2007. – 131 с.

52) Лебедев В.Д. Напряженно-деформированное состояние вертикальных резервуаров с учетом консолидации грунтов основания: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Лебедев Владимир Дмитриевич. – Тюмень, 2006. – 125 с.

53) Лебедев В.Д. Напряженно-деформированное состояние конструктивных частей резервуара при нестабилизированном состоянии его грунтового основания / Лебедев В.Д. // Проблемы эксплуатации систем транспорта: материалы региональной научно-практической конференции. – 2006. – Тюмень: ТюмГНГУ. – С. 162-164.

54) МДС 11-20.2009 Методика высокоточной бесконтактной исполнительной съемки навесных фасадных систем с воздушными зазорами при возведении высотных зданий. – М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 41

55) МИ 3171-2008 Резервуары стальные вертикальные цилиндрические. Методика калибровки геометрическим методом с применением лазерных сканирующих координатно-измерительных систем. – М.: ФГУП «ВНИИМС», 2008. – 30 с.

56) Новожилов В.В. Линейная теория тонких оболочек / Новожилов В.В., Черных К.Ф., Михайловский Е.И. – Л.: Политехника, 1991. – 656 с.

57) Поляков В.А. Разработка методики нормирования вибрации трубопроводов больших диаметров с целью повышения их надежности: автореферат дисс. ... канд. техн. наук.: 05.15.13 / Поляков Вадим Алексеевич. – М., 1989. – 19 с.

58) Поляков В.А. Разработка методологии расчета и оценки процессов деформации технологических трубопроводов в условиях снижения несущей способности: дисс. ... д-ра техн. наук.: 25.00.19 / Поляков Вадим Алексеевич. – М., 2003. – 310 с.

59) Постнов В.А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / Постнов В.А., Хархурим И.Я. – Л.:Судостроение, 1974. – 342 с.

60) РД 08-95-95 Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2010. – 35 с.

61) РД 16.01-60.30.00-КТН-063-1-05 Правила технической диагностики резервуаров. – М.: ОАО ЦТД «Диаскан», 2005. – 275 с.

62) РД-23.020.00-КТН-018-14 Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары стальные вертикальные для хранения нефти и нефтепродуктов объемом 1000-50000 куб. м. Нормы проектирования. – М.: ООО «НИИ ТНН», 2014. – 42 с.

63) РД 23.020.00-КТН-027-10 Методика обследования фундаментов и оснований резервуаров. – М.: ООО «НИИ ТНН», 2010. – 78 с.

64) РД 153-112-017-97 Инструкция по диагностике и оценке остаточного ресурса вертикальных стальных резервуаров. – Уфа: ЗАО «Нефтемонтаждиагностика», 1997. – 74 с.

65) Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров / Розенштейн И.М. – М.: Недра, 1995 – 253 с.

66) Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. Утвержден Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору приказом №780 от 26 декабря 2012 г. – М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2013. – 240 с.

- 67) СА-03-008-08 Резервуары вертикальные стальные сварные для нефти и нефтепродуктов. Техническое диагностирование и анализ безопасности. – М.: Ростехэкспертиза, НПК «Изотермик», 2009. – 288 с.
- 68) Сальников А.В. Резервуар вертикальный стальной с двудечной плавающей крышей для нефти и нефтепродуктов объемом 50000 м³:метод. указания / Сальников А.В., Агинеи Р.В. – Ухта, УГТУ, 2006. – 54 с.
- 69) Сафарян М.К. Проектирование и сооружение стальных резервуаров / Сафарян М.К., Иванцов О.М. – М.: Гостопттехихдат, 1961. – 328 с.
- 70) Сафарян М.К. Основные положения расчета цилиндрических и сферических оболочек на устойчивость (применительно к резервуаростроению) / Сафарян М.К. // «Монтажные работы в строительстве». – 1967. – М., вып. 2. – С. 20-33.
- 71) Сафарян М.К. Расчет стальных вертикальных цилиндрических резервуаров большой емкости на действие ветровой нагрузки / Сафарян М.К., Шутов В.Е. // Экспресс-информация ВНИИГазпрома. –1968. – №1. – С. 15-22.
- 72) Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры / Сафарян М.К. – М.: Недра, 1987. – 200 с.
- 73) Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. Пер. с английского / Сегерлинд Л. – М.: Издательство «Мир», 1979. – 393 с.: ил.
- 74) Середович В.А. Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова. – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261с.
- 75) Секулович М. Метод конечных элементов / Пер. с серб. Ю.Н. Зуева; под ред. В.Ш. Барбакадзе. – М.: Стройиздат, 1993. – 664 с.: ил.
- 76) Слепнев И.В. Напряженно-деформированное упруго-пластическое состояние стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при неравномерных осадках оснований: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Слепнев Игорь Владимирович. – Москва, 1988. – 225 с.

- 77) Сотников С.Н. Измерение вертикальных перемещений поверхности основания цилиндрического резервуара / Сотников С.Н., Мангушев Р.Л. // Тр. ЛИСИ. – Л.: 1978. – С. 31-36.
- 78) Сотников С.Н. Конструкция фундамента и осадка резервуара вместимостью 50 тыс. куб. м с плавающей крышей на неоднородном основании / Сотников С.Н., Мангушев Р.А., Ганнущенко И.В. // Нефтепромысловое строительство. – М.: ВНИИОЭНГ, 1984. – С. 36.
- 79) Справочник по специальным функциям / Под ред. М. Абрамовица и И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.
- 80) СТО Методологическая инструкция 71.12.12 Инструкция по проведению работ в области геодезии с применением 3D-сканера. – М.: ОАО «Экспертиза», 2013. – 10 с.
- 81) СТО-СА-03-002-2009 Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов. – М.: Ассоциация Ростехэкспертиза, 2009. – 216 с.
- 82) СТО 0030-2004 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции. – М.: ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова», 2004. – 31 с.
- 83) Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Стренг Г., Фикс Дж. Пер. с англ. – М.: Издательство «Мир», 1977. – 351 с.: ил.
- 84) Стулов Т.Т. Расчет наземных резервуаров с учетом устойчивости основания / Стулов Т.Т. // Труды МИНХ и ГП. – 1997. – №5. – С. 95-105.
- 85) Тарасенко А.А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Тарасенко Александр Алексеевич. – Тюмень, 1991. – 253 с.
- 86) Тарасенко А.А. Разработка научных основ методов ремонта вертикальных стальных резервуаров: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.15.13 / Тарасенко Александр Алексеевич. – Тюмень, 1999. – 299 с.
- 87) Тарасенко А.А. Использование программных комплексов при оценке технического состояния и проектировании ремонтов вертикальных стальных

резервуаров / Тарасенко А.А., Семин Е.Е., Тарасенко Т.В. // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. – 2006. – №4. – С. 85-87.

88) Тарасенко А.А. Исследование изменения напряженно-деформированного состояния вертикального стального резервуара при развитии неравномерной осадки наружного контура днища / Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3409-3413.

89) Тарасенко А.А. Модель резервуара в среде ANSYS Workbench 14.5 / Тарасенко А.А., Чепур П.В., Чирков С.В., Тарасенко Д.А. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10-15. – С. 3404-3408.

90) Тарасенко А.А. Деформирование верхнего края оболочки при развитии неравномерных осадок резервуара / Тарасенко А.А., Чепур П.В., Тарасенко Д.А. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 6-3. – С. 485-489.

91) ТД 23.115-96 Технология геодезического обследования стальных вертикальных резервуаров. – М.: ОАО ЦТД «Диаскан», 1996. – 35 с.

92) Типовой проект 704-1-169.84 Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 5000 м³.

93) Типовой проект 704-1-170.84 Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 10000 м³.

94) Типовой проект 704-1-171.84 Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 20000 м³.

95) Типовой проект 704-1-172.84 Резервуар стальной вертикальный цилиндрический для нефти и нефтепродуктов емкостью 30000 м³.

96) Тишкин В.О. Методика сбора и обработки данных, полученных в процессе 3D-сканирования / Тишкин В.О. // Научно-технический вестник Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики. – 2011. – №1 (71). – С. 87-92.

97) Тимошенко С.П. Пластинки и оболочки / Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. – М.: Издательство «Наука», 1966. – 636 с.

98) Ханухов Х.М. Нормативно-техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций / Ханухов

Х.М., Алипов А.В. // Электронный журнал «Предотвращение аварий зданий и сооружений». – 2011.

99) Хоперский Г.Г. Исследование напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при неравномерных осадках основания: дисс. ... канд. техн. наук: 05.15.13 / Хоперский Геннадий Григорьевич. – Тюмень, 1998. – 197 с.

100) Цапко И.В. Алгоритмы и методы обработки информации в задачах трехмерного сканирования объектов / Цапко И.В., Цапко С.Г. // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 317. №5. – С. 134-139.

101) Чепур П.В. Влияние параметров неравномерной осадки на возникновение предельных состояний в резервуаре / Чепур П.В., Тарасенко А.А. // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 8 (7). – С. 1560-1564.

102) Чепур П.В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадок его основания: дисс. ... канд. техн. наук: 25.00.19 / Чепур Петр Владимирович. – Москва, 2015. – 181 с

103) Ямамото С. Напряжения и деформации, образующиеся в резервуарах вследствие неравномерного оседания основания / Ямамото С., Ковано К. // ВДП. №А-49231, с. 18 «Нихон Кикай Гакайси». – 1977. – т. 80, №703. – С. 534-539.

104) ASTM E2544 – 11a. Standard Terminology for Three-Dimensional (3D) Imaging Systems. – West Conshohocken: ASTM International, 2011. – 10 p.

105) ASTM E2641 – 09. Standard Practice for Best Practices for Safe Application of 3D Imaging Technology. – West Conshohocken: ASTM International, 2009. – 3 p.

106) ASTM E2807 – 11. Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange. – West Conshohocken: ASTM International, 2011. – 26 p.

107) ASTM E2919 – 13. Standard Test Method for Evaluating the Performance of Systems that Measure Static, Six Degrees of Freedom (6DOF), Pose. – West Conshohocken: ASTM International, 2014. – 15 p.

108) Balaam M.P. Grown settlement analysis of soft clay reinforced with granular piles / Balaam M.P. // Proc. 5-th Southeast Asian Conference On Soil Engineering. – Thailand, 1977. – P. 81-90.

109) Bathe K.-J. Short communication a four-node plate bending element based on Mindlin/Reissner plate theory and a mixed interpolation / Bathe K.-J., Dvorkin E.N. // International journal for numerical methods in engineering. – 1985. – Vol. 21. – P. 367-383.

110) Bathe K.-J. Finite element procedures / Bathe K.-J. – New Jersey: Printice-Hall, 1996. – 1052 p.

111) ISO 17123-4:2012 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 4: Electro-optical distance meters (EDM measurements to reflectors). – Switzerland: International Organization for Standardization, 2012. – 22 p.

112) ISO 17123-6:2012 Optics and optical instruments – Field procedures for testing geodetic and surveying instruments – Part 6: Rotating lasers. – Switzerland: International Organization for Standardization, 2012. – 27 p.

113) Krupka V. Borceni Kruveho Plaste Velkych Nadrzi Vlivem Sedani / Krupka V. // «Inzenyrske stavbi». – 1974. – r. 22, №11. – S. 538-542.

114) Mario Santana Quintero at al. Theory and practice on terrestrial laser scanning. Training material based on practical applications / Mario Santana Quintero at al. – Leonardo Da Vinci agents chap, 2008. – 241 p.

115) Nguyen-Thanh N. A smoothed finite element method for shell analysis / Nguyen-Thanh N., Rabczuk T., Nguyen-Xuan H., Bordas S.P.A. // Computer methods in applied mechanics and engineering. – 2008. – №2 (198). – P.165-177.

116) Reinhard Gottwald. Field Procedures for Testing Terrestrial Laser Scanners (TLS). A Contribution to a Future ISO Standard / Reinhard Gottwald // FIG Working Week 2008. Integration Generations and FIG/UN-HABITAT Seminar (Stockholm). – 2008. – P. 1-14.

117) Reshetyuk Y. Calibration of terrestrial laser scanners for the purposes of geodetic engineering / Y. Reshetyuk // 3rd IAG – 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24. – 2006. – 10 p.

118) VDI/VDE 2634 Blatt 1. Optical 3D measuring systems – Imaging systems with point-by-point probing. – Dusseldorf: The Association of German Engineers, 2008. – 7 p.

119) VDI/VDE 2634 Blatt 2. Optical 3-D measuring systems – Optical systems based on area scanning. – Dusseldorf: The Association of German Engineers, 2008. – 9 p.

120) VDI/VDE 2634 Blatt 3. Optical 3D-measuring systems – Multiple view systems based on area scanning. – Dusseldorf: The Association of German Engineers, 2008. – 20 p.

121) Zhang Y. Accuracy evaluation of three dimensional laser range scanner based on field calibration / Y. Zhang, H. Wu, X. Cheng, C. Liu // Proceedings of the 8th International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences Shanghai (China). – 2008. – P. 119-126.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1 – Результаты измерения отклонений образующих стенки РВСП-20000 № 22 от вертикали

№ пояса	Образующая №1			Образующая №2			Образующая №3			Образующая №4			Образующая №5		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	16,8	16	0,8	14,9	16	-1,1	53,4	52	-1,4	48,1	46	2,1	27,6	29	-1,4
2	18,0	20	-2,0	21,6	20	1,6	57,6	58	0,4	60,6	57	3,6	34,8	37	-2,2
3	23,8	25	-1,2	20,3	20	0,3	50,4	53	2,6	85,4	82	3,4	41,6	46	-4,4
4	23,3	24	-0,7	21,1	19	2,1	54,1	52	-2,1	105,9	101	4,9	59,1	61	-1,9
5	25,8	26	-0,2	21,6	22	-0,4	36,9	38	1,1	125,9	125	0,9	63,8	68	-4,2
6	27,2	27	0,2	25,3	25	0,3	19,7	15	-4,7	144,4	141	3,4	64,0	68	-4,0
7	31,7	30	1,7	28,9	29	-0,1	36,3	40	3,7	165,6	161	4,6	72,4	74	-1,6
8	35,9	34	1,9	54,6	53	1,6	114,9	109	-5,9	165,4	168	-2,6	81,8	83	-1,2
№ пояса	Образующая №6			Образующая №7			Образующая №8			Образующая №9			Образующая №10		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	25,5	25	0,5	1,4	5	-3,6	24,7	26	-1,3	4,9	3	1,9	-2,1	-1	-1,1
2	31,3	37	-5,7	-6,8	-2	-4,8	2,7	5	-2,3	-17,4	-18	0,6	-20,0	-16	-4,0
3	36,6	47	-10,4	-16,5	2	-18,5	-16,9	-11	-5,9	-41,0	-36	-5,0	-43,9	-39	-4,9
4	37,2	52	-14,8	-18,5	4	-22,5	-36,6	-25	-11,6	-56,5	-58	1,5	-67,6	-63	-4,6
5	41,3	63	-21,7	-23,9	6	-29,9	-60,6	-39	-21,6	-93,9	-83	-10,9	-109,7	-83	-26,7
6	45,4	67	-21,6	-29,1	10	-39,1	-88,7	-57	-31,7	-132,8	-104	-28,8	-140,7	-101	-39,7
7	49,3	76	-26,7	-32,7	7	-39,7	-106,1	-65	-41,1	-160,5	-129	-31,5	-169,6	-126	-43,6
8	40,6	71	-30,4	-60,3	17	-77,3	-135,2	-97	-38,2	-178,2	-139	-39,2	-178,9	-126	-52,9

Продолжение таблицы А.1

№ пояса	Образующая №11			Образующая №12			Образующая №13			Образующая №14			Образующая №15		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	21,2	31,0	-9,8	13,3	12	1,3	13,1	14	-0,9	10,9	8	2,9	17,9	15	2,9
2	19,3	26,0	-6,7	3,7	6	-2,3	9,6	13	-3,4	1,5	0	1,5	1,1	2	-0,9
3	12,9	33,0	-20,1	-18,3	-3	-15,3	-2,5	7	-9,5	-13,8	-13	-0,8	-6,9	-7	0,1
4	-24,1	8,0	-32,1	-34,5	-12	-22,5	-5,9	6	-11,9	-35,4	-32	-3,4	-19,8	-18	-1,8
5	-32,6	3,0	-35,6	-41,2	-12	-29,2	-23,5	1	-24,5	-44,9	-42	-2,9	-29,5	-28	-1,5
6	-85,9	-49,0	-36,9	-57,2	-18	-39,2	-33,5	-3	-30,5	-49,5	-48	-1,5	-47,4	-46	-1,4
7	-141,1	-102,0	-39,1	-59,7	-16	-43,7	-42,0	-9	-33,0	-51,8	-47	-4,8	-59,7	-55	-4,7
8	-141,9	-84,0	-57,9	-84,7	-38	-46,7	-67,9	-17	-50,9	-69,0	-67	-2,0	-65,9	-63	-2,9
№ пояса	Образующая №16			Образующая №17			Образующая №18			Образующая №19			Образующая №20		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	10,1	11	-0,9	21,8	22	-0,2	36,7	38	-1,3	26,2	28	-1,8	29,0	95	-66,0
2	6,2	5	1,2	22,2	23	-0,8	39,9	40	-0,1	39,9	38	1,9	29,1	91	-61,9
3	-2,4	-4	1,6	21,3	21	0,3	42,9	41	1,9	56,8	54	2,8	26,8	83	-56,2
4	-11,4	-11	-0,4	26,9	25	1,9	42,6	40	2,6	76,3	73	3,3	25,0	74	-49,0
5	-21,2	-21	-0,2	29,4	29	0,4	41,2	40	1,2	78,9	74	4,9	21,9	70	-48,1
6	-27,3	-28	0,7	30,2	31	-0,8	47,7	45	2,7	92,8	90	2,8	16,2	55	-38,8
7	-35,6	-33	-2,6	36,3	37	-0,7	57,3	49	8,3	48,5	24	24,5	21,5	53	-31,5
8	-46,5	-45	-1,5	21,8	23	-1,2	52,7	51	1,7	-2,2	-33	30,8	16,8	40	-23,2

Окончание таблицы А.1

№ пояса	Образующая №21			Образующая №22			Образующая №23			Образующая №24		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	10,1	11,0	-0,9	21,9	18,0	3,9	8,5	10,0	-1,5	17,7	17,0	0,7
2	8,1	7,0	1,1	24,6	21,0	3,6	14,8	13,0	1,8	13,9	11,0	2,9
3	3,1	3,0	0,1	30,9	23,0	7,9	10,2	9,0	1,2	9,3	7,0	2,3
4	15,5	3,0	12,5	39,7	26,0	13,7	10,7	11,0	-0,3	5,1	5,0	0,1
5	19,9	9,0	10,9	49,9	29,0	20,9	12,9	12,0	0,9	1,3	0,0	1,3
6	19,8	5,0	14,8	57,3	33,0	24,3	12,5	11,0	1,5	1,4	1,0	0,4
7	25,8	4,0	21,8	71,3	37,0	34,3	12,1	12,0	0,1	7,6	4,0	3,6
8	34,7	-1,0	35,7	77,3	39,0	38,3	27,9	25,0	2,9	6,4	4,0	2,4
Примечание – Значение отклонения стенки резервуара от вертикали со знаком « - » означает наличие вогнутости, знак «+» - выпуклости.												

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1 – Результаты нивелирования крайки днища РВСП-20000 №22

№ образующей	Измеренное отклонение, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
1	19,4	15,0	4,4
2	37,3	33,0	4,3
3	56,4	61,0	-4,6
4	29,8	25,0	4,8
5	13,8	8,0	5,8
6	16,8	18,0	-1,2
7	45,2	41,0	4,2
8	44,7	40,0	4,7
9	37,5	35,0	2,5
10	36,8	31,0	5,8
11	21,8	17,0	4,8
12	25,8	23,0	2,8
13	48,3	44,0	4,3
14	47,8	43,0	4,8
15	47,7	45,0	2,7
16	46,2	44,0	2,2
17	21,6	24,0	-2,4
18	12,5	17,0	-4,5
19	6,0	5,0	1,0
20	0,0	0,0	0,0
21	8,9	9,0	-0,1
22	8,7	9,0	-0,3
23	18,7	17,0	1,7
24	15,3	13,0	2,3

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Таблица В.1 – Результаты измерения отклонений образующих стенки РВСП-7500 № 29 от вертикали

№ пояса	Образующая №1			Образующая №2			Образующая №3			Образующая №4			Образующая №5		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	27,3	24,0	3,3	8,9	9,0	-0,1	12,5	14,0	-1,5	6,6	8,0	-1,4	-2,7	2,0	-4,7
2	38,9	36,0	2,9	16,4	15,0	1,4	15,8	15,0	0,8	1,7	4,0	-2,3	5,1	7,0	-1,9
3	50,9	48,0	2,9	13,6	14,0	-0,4	26,9	22,0	4,9	4,6	7,0	-2,4	3,1	4,0	-0,9
4	44,3	41,0	3,3	11,7	10,0	1,7	18,1	17,0	1,1	0,5	1,0	-0,5	-20,9	-17,0	-3,9
5	65,6	64,0	1,6	15,4	16,0	-0,6	30,9	26,0	4,9	7,6	11,0	-3,4	8,4	10,0	-1,6
6	64,8	57,0	7,8	9,9	10,0	-0,1	30,6	22,0	8,6	6,2	11,0	-4,8	26,6	31,0	-4,4
7	71,9	72,0	-0,1	12,2	13,0	-0,8	31,5	27,0	4,5	3,6	14,0	-10,4	27,3	32,0	-4,7
8	55,1	51,0	4,1	9,5	8,0	1,5	31,5	20,0	11,5	9,4	14,0	-4,6	29,3	31,0	-1,7
9	56,8	54,0	2,8	11,5	13,0	-1,5	30,8	22,0	8,8	8,5	19,0	-10,5	18,9	23,0	-4,1
10	46,3	41,0	5,3	14,5	14,0	0,5	34,1	18,0	16,1	14,9	20,0	-5,1	33,5	38,0	-4,5
11	37,9	37,0	0,9	4,4	2,0	2,4	36,1	21,0	15,1	9,5	24,0	-14,5	17,4	22,0	-4,6
12	23,1	21,0	2,1	14,9	11,0	3,9	26,5	14,0	12,5	19,7	24,0	-4,3	12,4	17,0	-4,6

Продолжение таблицы В.1

№ пояса	Образующая №6			Образующая №7			Образующая №8			Образующая №9			Образующая №10		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	19,2	20,0	-0,8	10,5	10,0	0,5	8,6	9,0	-0,4	-0,8	0,0	-0,8	0,1	5,0	-4,9
2	18,8	20,0	-1,2	15,1	14,0	1,1	2,2	4,0	-1,8	-7,8	-8,0	0,2	4,9	10,0	-5,1
3	15,6	19,0	-3,4	13,1	15,0	-1,9	7,5	9,0	-1,5	-14,3	-14,0	-0,3	22,3	23,0	-0,7
4	-8,1	-7,0	-1,1	14,7	18,0	-3,3	6,6	8,0	-1,4	-26,3	-25,0	-1,3	29,6	28,0	1,6
5	-6,2	-2,0	-4,2	19,7	22,0	-2,3	1,1	2,0	-0,9	-23,9	-24,0	0,1	17,4	19,0	-1,6
6	30,5	33,0	-2,5	20,4	21,0	-0,6	11,1	13,0	-1,9	-40,2	-43,0	2,8	19,9	22,0	-2,1
7	38,7	45,0	-6,3	19,4	21,0	-1,6	11,6	15,0	-3,4	-37,2	-37,0	-0,2	10,8	15,0	-4,2
8	36,8	40,0	-3,2	12,8	13,0	-0,2	11,2	13,0	-1,8	-56,5	-61,0	4,5	-18,8	-10,0	-8,8
9	32,4	45,0	-12,6	2,4	3,0	-0,6	9,9	9,0	0,9	-54,8	-56,0	1,2	-46,8	-46,0	-0,8
10	29,1	32,0	-2,9	12,6	11,0	1,6	7,5	4,0	3,5	-61,4	-68,0	6,6	-57,5	-49,0	-8,5
11	6,5	10,0	-3,5	5,7	8,0	-2,3	5,0	-6,0	11,0	-62,8	-66,0	3,2	-61,3	-60,0	-1,3
12	18,9	22,0	-3,1	3,3	4,0	-0,7	-9,9	-7,0	-2,9	-74,6	-72,0	-2,6	-53,4	-54,0	0,6

Окончание таблицы В.1

№ пояса	Образующая №11			Образующая №12			Образующая №13			Образующая №14		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	14,9	7,0	7,9	10,1	9,0	1,1	8,8	9,0	-0,2	5,5	7,0	-1,5
2	18,9	14,0	4,9	5,1	4,0	1,1	10,1	12,0	-1,9	1,2	1,0	0,2
3	34,6	15,0	19,6	9,7	9,0	0,7	9,5	13,0	-3,5	11,4	16,0	-4,6
4	22,3	18,0	4,3	4,9	8,0	-3,1	3,2	5,0	-1,8	-3,9	-1,0	-2,9
5	22,6	9,0	13,6	-2,7	2,0	-4,7	11,3	14,0	-2,7	5,6	13,0	-7,4
6	22,8	19,0	3,8	-9,0	-5,0	-4,0	0,9	0,0	0,9	2,3	5,0	-2,7
7	21,6	17,0	4,6	-14,5	-10,0	-4,5	-0,7	3,0	-3,7	6,9	16,0	-9,1
8	17,8	13,0	4,8	-18,4	-15,0	-3,4	-15,5	-12,0	-3,5	7,2	10,0	-2,8
9	6,1	3,0	3,1	-34,7	-25,0	-9,7	-17,6	-10,0	-7,6	7,4	17,0	-9,6
10	-12,5	-8,0	-4,5	-37,8	-31,0	-6,8	-26,0	-24,0	-2,0	9,6	14,0	-4,4
11	-32,2	-30,0	-2,2	-48,6	-48,0	-0,6	-29,5	-21,0	-8,5	6,5	10,0	-3,5
12	-33,7	-25,0	-8,7	-39,2	-39,0	-0,2	-26,3	-25,0	-1,3	10,9	15,0	-4,1
Примечание – Значение отклонения стенки резервуара от вертикали со знаком « - » означает наличие вогнутости, знак «+» - выпуклости												

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Таблица Г.1 – Результаты нивелирования крайки днища РВСП-7500 №29

№ образующей	Измеренное отклонение, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
1	7,9	6,0	1,9
2	0,0	0,0	0,0
3	4,9	6,0	-1,1
4	7,4	3,0	4,4
5	14,7	19,0	-4,3
6	15,3	19,0	-3,7
7	20,8	20,0	0,0
8	26,9	29,0	-2,1
9	33,7	38,0	-4,3
10	15,4	28,0	-12,6
11	19,3	23,0	-3,7
12	18,6	20,0	-1,4
13	15,7	20,0	-4,3
14	11,9	13,0	-1,1

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Таблица Д.1 – Результаты измерения отклонений образующих стенки РВСПА-50000 №2 от вертикали

№ пояса	Образующая №1			Образующая №2			Образующая №3			Образующая №4			Образующая №5		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	6,1	8,0	1,9	6,2	5,0	-1,2	-6,3	-5,0	1,3	-0,4	2,0	2,4	6,2	7,0	0,8
2	-13,5	-7,0	6,5	1,5	3,0	1,5	-8,3	-4,0	4,3	-2,1	6,0	8,1	-15,6	-4,0	11,6
3	-3,4	1,0	4,4	-17,5	-15,0	2,5	-16,0	-10,0	6,0	-5,8	5,0	10,8	-11,9	-8,0	3,9
4	-13,4	-6,0	7,4	7,8	9,0	1,2	-2,8	0,0	2,8	2,6	10,0	7,4	-13,4	-8,0	5,4
5	0,7	1,0	0,3	-13,4	-8,0	5,4	-6,7	-4,0	2,7	1,0	7,0	6,0	-20,9	-16,0	4,9
6	-16,4	-10,0	6,4	20,4	-23,0	-43,4	-10,2	-3,0	7,2	-7,3	-1,0	6,3	-29,5	-25,0	4,5
7	-14,5	-11,0	3,5	16,8	14,0	-2,8	2,7	5,0	2,3	-6,8	-4,0	2,8	-26,2	-25,0	1,2
8	-16,0	-14,0	2,0	0,4	0,0	-0,4	-7,9	-7,0	0,9	-4,3	-1,0	3,3	-29,7	-28,0	1,7
№ пояса	Образующая №6			Образующая №7			Образующая №8			Образующая №9			Образующая №10		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	6,7	6,0	-0,7	7,8	7,0	-0,8	8,6	6,0	-2,6	-1,3	-1,0	0,3	4,4	5,0	-0,6
2	0,9	2,0	1,1	-6,3	8,0	14,3	3,9	7,0	3,1	5,4	7,0	1,6	0,0	4,0	-4,0
3	-1,6	2,0	3,6	-8,9	-5,0	3,9	1,1	8,0	6,9	2,6	2,0	-0,6	7,2	9,0	-1,8
4	-9,1	-8,0	1,1	-5,5	-2,0	3,5	0,5	5,0	4,5	9,9	10,0	0,1	-0,6	5,0	-5,6
5	-12,2	-9,0	3,2	-11,1	-8,0	3,1	-0,7	-3,0	-2,3	-0,9	1,0	1,9	6,3	9,0	-2,7
6	-13,8	-10,0	3,8	-13,5	-11,0	2,5	0,4	1,0	0,6	-6,1	7,0	13,1	-4,4	-2,0	-2,4
7	-16,8	-16,0	0,8	-19,1	-15,0	4,1	-8,6	-4,0	4,6	-7,8	-7,0	0,8	10,4	10,0	0,4
8	-28,9	-24,0	4,9	-21,4	-20,0	1,4	-16,1	-17,0	-0,9	-12,8	-11,0	1,8	0,5	1,0	-0,5

Продолжение таблицы Д.1

№ пояса	Образующая №11			Образующая №12			Образующая №13			Образующая №14			Образующая №15		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	-3,4	-3,0	-0,4	2,6	2,0	-0,6	7,5	9,0	1,5	1,2	0,0	-1,2	-3,3	-3,0	0,3
2	-15,0	-5,0	-10,0	-22,1	-14,0	8,1	-13,6	-10,0	3,6	8,6	7,0	-1,6	-12,9	-9,0	3,9
3	-7,1	-2,0	-5,1	-24,3	-15,0	9,3	-8,6	-5,0	3,6	-5,1	-2,0	3,1	-27,8	-25,0	2,8
4	-12,3	5,0	-17,3	-16,2	-21,0	-4,8	-18,2	-11,0	7,2	-2,1	2,0	4,1	-20,5	-15,0	5,5
5	-1,4	5,0	-6,4	-28,9	-10,0	18,9	-19,8	-15,0	4,8	-17,3	-12,0	5,3	-31,3	-26,0	5,3
6	-12,6	-8,0	-4,6	-14,8	-12,0	2,8	-32,7	-25,0	7,7	-17,9	-13,0	4,9	-37,1	-31,0	6,1
7	0,7	8,0	-7,3	-21,4	-22,0	-0,6	-13,7	-11,0	2,7	-36,8	-31,0	5,8	-39,6	-35,0	4,6
8	-8,9	-9,0	0,1	-20,7	-24,0	-3,3	-22,9	-18,0	4,9	-40,6	-38,0	2,6	-45,6	-44,0	1,6
№ пояса	Образующая №16			Образующая №17			Образующая №18			Образующая №19			Образующая №20		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	2,3	1,0	-1,3	1,1	1,0	-0,1	2,4	3,0	0,6	-2,8	-2,0	0,8	8,5	9,0	0,5
2	-8,4	-8,0	0,4	-6,9	-8,0	-1,1	-3,3	-3,0	0,3	-4,5	-1,0	3,5	7,2	10,0	2,8
3	-13,4	-14,0	-0,6	-10,5	-14,0	-3,5	-10,2	-9,0	1,2	-15,5	-11,0	4,5	13,7	17,0	3,3
4	-15,9	-15,0	0,9	-11,2	-15,0	-3,8	-19,3	-17,0	2,3	-13,7	3,0	16,7	-1,0	5,0	6,0
5	-21,1	-21,0	0,1	-17,4	-21,0	-3,6	-20,8	-18,0	2,8	-8,4	-8,0	0,4	3,4	5,0	1,6
6	-33,7	-28,0	5,7	-23,1	-28,0	-4,9	-2,2	-3,0	-0,8	-9,1	-8,0	1,1	-5,8	-2,0	3,8
7	-33,4	-34,0	-0,6	-28,9	-34,0	-5,1	-7,3	-11,0	-3,7	-17,3	-11,0	6,3	-4,2	2,0	6,2
8	-43,6	-41,0	2,6	-36,8	-41,0	-4,2	-12,8	-15,0	-2,2	-21,5	-17,0	4,5	-15,8	-14,0	1,8

Продолжение таблицы Д.1

№ пояса	Образующая №21			Образующая №22			Образующая №23			Образующая №24			Образующая №25		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	4,2	6,0	1,8	5,9	6,0	0,1	1,9	4,0	2,1	-0,5	-1,0	-0,5	7,1	10,0	2,9
2	-5,8	8,0	13,8	-1,5	8,0	9,5	-7,2	-3,0	4,2	20,1	18,0	-2,1	6,2	8,0	1,8
3	-4,2	-2,0	2,2	-6,7	-2,0	4,7	-7,2	-2,0	5,2	-7,3	-8,0	-0,7	5,6	3,0	-2,6
4	-0,5	4,0	4,5	-2,6	4,0	6,6	-16,4	-10,0	6,4	-9,1	-10,0	-0,9	-18,5	-12,0	6,5
5	-10,7	-6,0	4,7	-10,6	-6,0	4,6	-1,9	4,0	5,9	-21,3	-25,0	-3,7	-10,8	-9,0	1,8
6	-7,7	-4,0	3,7	-7,0	-4,0	3,0	-20,1	-16,0	4,1	-13,7	-15,0	-1,3	-14,6	-17,0	-2,4
7	1,0	7,0	6,0	5,9	7,0	1,1	-6,8	-3,0	3,8	-21,5	-30,0	-8,5	-17,6	-11,0	6,6
8	-8,2	-5,0	3,2	-20,6	-5,0	15,6	-21,2	-7,0	14,2	-29,7	-35,0	-5,3	-17,8	-13,0	4,8
№ пояса	Образующая №26			Образующая №27			Образующая №28			Образующая №29			Образующая №30		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	6,7	9,0	2,3	-4,3	-4,0	0,3	-1,3	-4,0	-2,7	1,8	1,0	-0,8	10,5	10,0	-0,5
2	-6,4	9,0	15,4	-11,4	-11,0	0,4	10,4	8,0	-2,4	-5,2	-6,0	-0,8	-12,4	11,0	23,4
3	-15,1	-3,0	12,1	-1,6	-2,0	-0,4	-10,1	-9,0	1,1	-9,1	-7,0	2,1	-1,5	1,0	2,5
4	-10,9	-8,0	2,9	-0,4	2,0	2,4	9,6	8,0	-1,6	-10,6	10,0	20,6	-5,0	1,0	6,0
5	-16,4	-14,0	2,4	-3,7	-4,0	-0,3	-11,7	-17,0	-5,3	-9,1	-7,0	2,1	-2,0	-3,0	-1,0
6	-10,1	-13,0	-2,9	-15,1	2,0	17,1	-6,4	-11,0	-4,6	-17,7	-18,0	-0,3	-7,2	-11,0	-3,8
7	-16,9	-17,0	-0,1	-6,0	1,0	7,0	-8,1	-15,0	-6,9	-14,9	-10,0	4,9	0,6	0,0	-0,6
8	-21,7	-14,0	7,7	-20,6	-18,0	2,6	-19,8	-22,0	-2,2	-19,9	-10,0	9,9	-10,3	-6,0	4,3

Продолжение таблицы Д.1

№ пояса	Образующая №31			Образующая №32			Образующая №33			Образующая №34			Образующая №35		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	3,3	3,0	-0,3	7,6	7,0	-0,6	9,2	8,0	-1,2	8,2	9,0	0,8	2,2	2,0	-0,2
2	5,5	6,0	0,5	16,1	17,0	0,9	-10,7	-6,0	4,7	-5,5	-5,0	0,5	-4,5	-2,0	2,5
3	2,5	7,0	4,5	14,8	18,0	3,2	-9,4	-7,0	2,4	-8,2	-5,0	3,2	-26,7	-25,0	1,7
4	7,4	10,0	2,6	-8,6	-5,0	3,6	-15,3	-11,0	4,3	-20,2	-17,0	3,2	-23,2	-20,0	3,2
5	-13,5	-7,0	6,5	-13,4	-15,0	-1,6	-30,9	-27,0	3,9	-19,7	-18,0	1,7	-1,8	-3,0	-1,2
6	-1,7	2,0	3,7	-11,3	-10,0	1,3	-33,6	-30,0	3,6	2,2	3,0	0,8	-6,5	-5,0	1,5
7	-8,6	-6,0	2,6	-15,1	-15,0	0,1	-13,6	-11,0	2,6	-1,2	-4,0	-2,8	2,1	1,0	-1,1
8	-18,5	-18,0	0,5	-18,0	-17,0	1,0	-24,1	-19,0	5,1	-10,9	-11,0	-0,1	-9,2	-7,0	2,2
№ пояса	Образующая №36			Образующая №37			Образующая №38			Образующая №39			Образующая №40		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	-8,4	-9,0	-0,6	-8,1	-9,0	-0,9	-5,9	-7,0	-1,1	4,6	6,0	1,4	7,1	8,0	0,9
2	-23,7	-25,0	-1,3	-16,7	-20,0	-3,3	4,3	5,0	0,7	-3,1	5,0	8,1	5,1	4,0	-1,1
3	-30,2	-29,0	1,2	-17,1	-19,0	-1,9	-10,2	-8,0	2,2	27,1	30,0	2,9	7,4	10,0	2,6
4	-15,7	-17,0	-1,3	-27,7	-27,0	0,7	-23,8	-19,0	4,8	8,5	15,0	6,5	8,4	7,0	-1,4
5	-28,9	-27,0	1,9	-28,2	-28,0	0,2	-37,8	-30,0	7,8	13,8	18,0	4,2	6,6	8,0	1,4
6	-10,8	-11,0	-0,2	-35,5	-38,0	-2,5	-18,1	-10,0	8,1	1,1	0,0	-1,1	-5,5	-3,0	2,5
7	-14,1	-10,0	4,1	-18,1	-17,0	1,1	-26,9	-22,0	4,9	0,9	1,0	0,1	2,3	2,0	-0,3
8	-18,7	-16,0	2,7	-13,4	-18,0	-4,6	-29,3	-24,0	5,3	-8,6	-4,0	4,6	-5,5	-4,0	1,5

Окончание таблицы Д.1

№ пояса	Образующая №41			Образующая №42			Образующая №43			Образующая №44			Образующая №45		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	6,1	8,0	1,9	8,5	7,0	-1,5	1,6	1,0	-0,6	7,8	9,0	1,2	-4,1	-3,0	1,1
2	2,8	9,0	6,2	3,1	2,0	-1,1	2,6	3,0	0,4	-6,9	-6,0	0,9	-13,2	-9,0	4,2
3	16,5	22,0	5,5	0,4	4,0	3,6	-6,1	-4,0	2,1	-9,1	-10,0	-0,9	-18,1	-13,0	5,1
4	0,1	2,0	1,9	-4,1	0,0	4,1	0,0	-2,0	-2,0	-5,2	-2,0	3,2	-22,9	-15,0	7,9
5	-8,7	-4,0	4,7	-4,3	-3,0	1,3	-4,2	-4,0	0,2	-10,8	-9,0	1,8	-24,9	-16,0	8,9
6	-7,7	-5,0	2,7	-14,8	-9,0	5,8	-2,8	-3,0	-0,2	-5,3	-5,0	0,3	-29,1	-24,0	5,1
7	-8,0	-6,0	2,0	-9,8	-9,0	0,8	-10,9	-10,0	0,9	-5,5	-5,0	0,5	-24,1	-20,0	4,1
8	-9,7	-11,0	-1,3	-13,2	-14,0	-0,8	-11,5	-16,0	-4,5	-14,7	-17,0	-2,3	-33,1	-31,0	2,1
№ пояса	Образующая №46			Образующая №47			Образующая №48								
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	-	-	-	-	-	-
1	-2,7	-3,0	-0,3	-5,6	-2,0	3,6	1,7	3,0	1,3	-	-	-	-	-	-
2	-19,1	-11,0	8,1	-8,2	-6,0	2,2	-4,4	-4,0	0,4	-	-	-	-	-	-
3	-19,5	-17,0	2,5	-24,5	-16,0	8,5	-12,6	-10,0	2,6	-	-	-	-	-	-
4	-36,5	-28,0	8,5	-30,2	-20,0	10,2	-1,6	5,0	6,6	-	-	-	-	-	-
5	-39,1	-34,0	5,1	-19,9	-15,0	4,9	-5,6	-8,0	-2,4	-	-	-	-	-	-
6	-26,1	-26,0	0,1	-27,1	-22,0	5,1	3,4	0,0	-3,4	-	-	-	-	-	-
7	-32,6	-30,0	2,6	-21,9	-18,0	3,9	-2,2	-11,0	-8,8	-	-	-	-	-	-
8	-38,9	-35,0	3,9	-23,9	-21,0	2,9	-13,6	-14,0	-0,4	-	-	-	-	-	-
Примечание – Значение отклонения стенки резервуара от вертикали со знаком « - » означает наличие вогнутости, знак «+» - выпуклости.															

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

Таблица Е.1 – Результаты измерения отклонений образующих стенки РВСПА-50000 №3 от вертикали

№ пояса	Образующая №1			Образующая №2			Образующая №3			Образующая №4			Образующая №5		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	9,9	11,0	1,1	15,4	18,0	2,6	42,2	47,0	4,8	24,2	22,0	-2,2	2,1	5,0	2,9
2	-7,1	-4,0	3,1	3,7	7,0	3,3	29,6	26,0	-3,6	4,5	8,0	3,5	0,2	4,0	3,8
3	-6,7	-1,0	5,7	15,7	18,0	2,3	43,9	42,0	-1,9	1,9	10,0	8,1	-7,8	-5,0	2,8
4	-14,8	-13,0	1,8	3,2	8,0	4,8	19,1	17,0	-2,1	6,6	7,0	0,4	1,2	5,0	3,8
5	-13,3	-14,0	-0,7	-9,1	-12,0	-2,9	19,3	18,0	-1,3	3,9	6,0	2,1	-15,1	-11,0	4,1
6	-24,7	-22,0	2,7	-7,7	-6,0	1,7	-1,3	-1,0	0,3	5,9	4,0	-1,9	-1,1	-1,0	0,1
7	-27,2	-29,0	-1,8	-19,1	18,0	37,1	5,4	4,0	-1,4	0,8	7,0	6,2	-12,1	-8,0	4,1
8	-28,2	-14,0	14,2	-32,1	-8,0	24,1	-19,3	0,0	19,3	-2,4	5,0	7,4	-12,5	-10,0	2,5
№ пояса	Образующая №6			Образующая №7			Образующая №8			Образующая №9			Образующая №10		
	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм	НЛС, мм	Геодезия, мм	Разница, мм
1	7,6	11,0	3,4	14,6	17,0	2,4	14,3	11,0	-3,3	22,9	17,0	-5,9	13,3	18,0	4,7
2	2,5	4,0	1,5	0,3	1,0	0,7	3,7	6,0	2,3	3,2	1,0	-2,2	14,2	13,0	-1,2
3	-3,1	-3,0	0,1	-11,7	-10,0	1,7	-2,3	0,0	2,3	9,4	10,0	0,6	2,3	3,0	0,7
4	-9,8	-7,0	2,8	-21,1	-20,0	1,1	-9,2	-11,0	-1,8	-3,7	-5,0	-1,3	4,6	3,0	-1,6
5	-10,1	-12,0	-1,9	-21,7	-22,0	-0,3	-11,9	-13,0	-1,1	0,7	-3,0	-3,7	-7,7	-6,0	1,7
6	-4,4	-6,0	-1,6	-21,8	-19,0	2,8	-6,9	-7,0	-0,1	-11,3	-12,0	-0,7	2,4	-1,0	-3,4
7	-12,1	-14,0	-1,9	-19,4	-20,0	-0,6	-14,5	-15,0	-0,5	-19,5	-24,0	-4,5	-3,9	-6,0	-2,1
8	-16,9	-17,0	-0,1	-19,8	-13,0	6,8	-17,8	-10,0	7,8	-20,7	-23,0	-2,3	-12,9	-13,0	-0,1

Продолжение таблицы Е.1

№ пояса	Образующая №11			Образующая №12			Образующая №13			Образующая №14			Образующая №15		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	13,1	11,0	-2,1	12,2	11,0	-1,2	11,3	6,0	-5,3	8,4	11,0	2,6	12,3	8,0	-4,3
2	10,2	10,0	-0,2	3,8	-3,0	-6,8	2,5	4,0	1,5	12,9	16,0	3,1	0,6	1,0	0,4
3	-0,8	-2,0	-1,2	0,1	2,0	1,9	-7,9	-12,0	-4,1	0,2	1,0	0,8	-4,9	-3,0	1,9
4	1,2	0,0	-1,2	-4,7	-1,0	3,7	-3,5	-7,0	-3,5	0,2	2,0	1,8	14,2	12,0	-2,2
5	-7,9	-7,0	0,9	-6,9	-9,0	-2,1	-2,2	-4,0	-1,8	6,4	4,0	-2,4	0,2	1,0	0,8
6	-14,6	-12,0	2,6	-17,5	-17,0	0,5	-6,9	-6,0	0,9	-1,3	0,0	1,3	8,3	5,0	-3,3
7	-18,9	-18,0	0,9	-18,8	-16,0	2,8	-8,1	-9,0	-0,9	5,2	4,0	-1,2	-6,8	-4,0	2,8
8	-22,1	-20,0	2,1	-15,9	-10,0	5,9	-28,6	-25,0	3,6	-8,5	-2,0	6,5	-16,6	-12,0	4,6
№ пояса	Образующая №16			Образующая №17			Образующая №18			Образующая №19			Образующая №20		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	19,6	25,0	5,4	15,6	21,0	5,4	12,5	16,0	3,5	15,2	16,0	0,8	12,2	10,0	-2,2
2	18,5	21,0	2,5	5,5	8,0	2,5	10,2	11,0	0,8	12,6	9,0	-3,6	0,3	-1,0	-1,3
3	10,6	12,0	1,4	-1,2	0,0	1,2	2,1	3,0	0,9	8,9	7,0	-1,9	-9,6	-7,0	2,6
4	6,4	10,0	3,6	-8,9	-7,0	1,9	-8,6	-6,0	2,6	0,3	1,0	0,7	-3,2	-6,0	-2,8
5	11,7	15,0	3,3	-2,1	1,0	3,1	-6,8	-4,0	2,8	0,5	1,0	0,5	-12,1	-9,0	3,1
6	10,3	8,0	-2,3	-12,6	-10,0	2,6	-4,5	-3,0	1,5	-11,6	-6,0	5,6	-2,3	-7,0	-4,7
7	-3,3	3,0	6,3	-18,9	-17,0	1,9	-14,3	-12,0	2,3	-15,3	-12,0	3,3	-20,5	-19,0	1,5
8	10,2	11,0	0,8	-19,2	-8,0	11,2	-14,1	-9,0	5,1	-19,2	-17,0	2,2	-30,2	-25,0	5,2

Продолжение таблицы Е.1

№ пояса	Образующая №21			Образующая №22			Образующая №23			Образующая №24			Образующая №25		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	12,5	8,0	-4,5	5,6	3,0	-2,6	20,3	22,0	1,7	8,8	14,0	5,2	14,2	16,0	1,8
2	0,3	0,0	-0,3	0,2	1,0	0,8	0,2	3,0	2,8	2,4	6,0	3,6	10,2	11,0	0,8
3	-8,2	-7,0	1,2	-6,8	-5,0	1,8	-3,5	-6,0	-2,5	0,5	4,0	3,5	4,1	6,0	1,9
4	-21,6	-20,0	1,6	-12,3	-9,0	3,3	-23,4	-19,0	4,4	-9,8	-6,0	3,8	0,2	3,0	2,8
5	-25,3	-22,0	3,3	-25,6	-22,0	3,6	-10,2	-14,0	-3,8	-14,3	-11,0	3,3	-2,2	1,0	3,2
6	-41,1	-36,0	5,1	-11,5	-14,0	-2,5	-35,9	-33,0	2,9	-21,5	-18,0	3,5	-9,8	-7,0	2,8
7	-38,5	-34,0	4,5	-29,6	-27,0	2,6	-39,2	-33,0	6,2	-26,9	-24,0	2,9	-16,4	-12,0	4,4
8	-34,6	-30,0	4,6	-29,5	-25,0	4,5	-28,2	-24,0	4,2	-26,8	-20,0	6,8	-17,2	-11,0	6,2
№ пояса	Образующая №26			Образующая №27			Образующая №28			Образующая №29			Образующая №30		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	15,6	10,0	-5,6	12,3	7,0	-5,3	14,5	13,0	-1,5	30,1	26,0	-4,1	12,5	15,0	2,5
2	6,3	8,0	1,7	0,3	1,0	0,7	8,6	6,0	-2,6	28,5	25,0	-3,5	11,4	9,0	-2,4
3	2,1	4,0	1,9	-7,8	-10,0	-2,2	16,8	14,0	-2,8	12,4	10,0	-2,4	8,5	9,0	0,5
4	-2,3	0,0	2,3	-4,2	-7,0	-2,8	10,3	12,0	1,7	8,6	10,0	1,4	6,4	6,0	-0,4
5	-4,8	-2,0	2,8	-12,3	-9,0	3,3	9,5	13,0	3,5	14,2	11,0	-3,2	0,6	3,0	2,4
6	-6,8	-3,0	3,8	-1,3	-7,0	-5,7	4,5	2,0	-2,5	18,3	15,0	-3,3	14,2	10,0	-4,2
7	-22,3	-19,0	3,3	-5,8	-4,0	1,8	-2,9	-2,0	0,9	2,2	4,0	1,8	0,8	4,0	3,2
8	-18,6	-12,0	6,6	-6,2	-2,0	4,2	-4,2	0,0	4,2	-6,5	-2,0	4,5	-1,2	7,0	8,2

Продолжение таблицы Е.1

№ пояса	Образующая №31			Образующая №32			Образующая №33			Образующая №34			Образующая №35		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	2,3	1,0	-1,3	21,5	18,0	-3,5	12,3	14,0	1,7	12,5	10,0	-2,5	12,4	15,0	2,6
2	8,6	5,0	-3,6	16,8	18,0	1,2	2,5	7,0	4,5	5,8	9,0	3,2	0,9	3,0	2,1
3	17,8	15,0	-2,8	11,3	8,0	-3,3	-10,6	-15,0	-4,4	0,2	1,0	0,8	-8,6	-4,0	4,6
4	6,2	7,0	0,8	16,6	11,0	-5,6	-16,2	-15,0	1,2	-9,6	-8,0	1,6	-9,3	-6,0	3,3
5	2,5	5,0	2,5	-9,6	-8,0	1,6	-12,4	-14,0	-1,6	-12,1	-7,0	5,1	-18,5	-15,0	3,5
6	13,6	11,0	-2,6	-8,3	-5,0	3,3	-18,5	-16,0	2,5	-8,9	-8,0	0,9	-20,6	-17,0	3,6
7	4,3	2,0	-2,3	-21,6	-18,0	3,6	-39,3	-34,0	5,3	-16,8	-14,0	2,8	-35,9	-30,0	5,9
8	6,9	3,0	-3,9	-19,8	-14,0	5,8	-44,2	-38,0	6,2	-26,4	-20,0	6,4	-31,8	-25,0	6,8
№ пояса	Образующая №36			Образующая №37			Образующая №38			Образующая №39			Образующая №40		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	13,2	10,0	-3,2	26,1	28,0	1,9	18,5	20,0	1,5	12,5	14,0	1,5	12,3	15,0	2,7
2	10,2	12,0	1,8	8,7	10,0	1,3	8,3	9,0	0,7	11,9	10,0	-1,9	11,6	12,0	0,4
3	0,1	2,0	1,9	-2,3	0,0	2,3	1,5	4,0	2,5	-2,3	3,0	5,3	5,2	6,0	0,8
4	-8,6	-5,0	3,6	-14,2	-15,0	-0,8	16,2	10,0	-6,2	4,2	8,0	3,8	0,6	4,0	3,4
5	-14,8	-9,0	5,8	-1,5	-5,0	-3,5	1,2	4,0	2,8	2,1	3,0	0,9	-8,6	-6,0	2,6
6	-20,3	-15,0	5,3	-32,8	-31,0	1,8	5,1	1,0	-4,1	-6,5	-4,0	2,5	-12,5	-10,0	2,5
7	-36,2	-32,0	4,2	-36,9	-33,0	3,9	-16,2	-14,0	2,2	-18,9	-15,0	3,9	-21,1	-17,0	4,1
8	-20,6	-37,0	-16,4	-44,2	-38,0	6,2	-12,5	-10,0	2,5	-16,4	-11,0	5,4	-24,7	-21,0	3,7

Окончание таблицы Е.1

№ пояса	Образующая №41			Образующая №42			Образующая №43			Образующая №44			Образующая №45		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм
1	8,7	10,0	1,3	10,2	12,0	1,8	11,2	13,0	1,8	0,5	3,0	2,5	10,5	11,0	0,5
2	0,2	2,0	1,8	12,3	9,0	-3,3	8,1	11,0	2,9	6,4	5,0	-1,4	2,7	7,0	4,3
3	-6,9	-3,0	3,9	8,1	9,0	0,9	14,8	12,0	-2,8	4,3	5,0	0,7	5,1	6,0	0,9
4	3,2	2,0	-1,2	0,9	4,0	3,1	8,2	11,0	2,8	-0,5	1,0	1,5	-3,2	-2,0	1,2
5	0,4	5,0	4,6	12,5	9,0	-3,5	0,3	1,0	0,7	-2,3	1,0	3,3	-9,7	-10,0	-0,3
6	-12,6	-8,0	4,6	-0,6	4,0	4,6	-4,3	-1,0	3,3	4,6	3,0	-1,6	-9,4	-6,0	3,4
7	-14,3	-10,0	4,3	12,3	14,0	1,7	-16,2	-11,0	5,2	-20,3	-17,0	3,3	-21,7	-22,0	-0,3
8	-16,2	-8,0	8,2	1,9	8,0	6,1	-8,4	-2,0	6,4	-15,3	-12,0	3,3	-19,2	-28,0	-8,8
№ пояса	Образующая №46			Образующая №47			Образующая №48			-			-		
	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	НЛС, мм	Гео-дезия, мм	Раз-ница, мм	-	-	-	-	-	-
1	7,9	10,0	2,1	20,7	26,0	5,3	11,4	13,0	1,6	-	-	-	-	-	-
2	8,3	12,0	3,7	13,7	16,0	2,3	8,3	9,0	0,7	-	-	-	-	-	-
3	7,9	10,0	2,1	4,8	8,0	3,2	7,1	8,0	0,9	-	-	-	-	-	-
4	7,6	5,0	-2,6	4,4	5,0	0,6	2,1	3,0	0,9	-	-	-	-	-	-
5	0,5	-2,0	-2,5	9,1	9,0	-0,1	-8,6	-6,0	2,6	-	-	-	-	-	-
6	-0,6	1,0	1,6	5,7	6,0	0,3	-11,5	-7,0	4,5	-	-	-	-	-	-
7	-5,8	-15,0	-9,2	-4,9	-1,0	3,9	-14,6	-14,0	0,6	-	-	-	-	-	-
8	-13,7	-17,0	-3,3	-8,9	0,0	8,9	-21,3	-17,0	4,3	-	-	-	-	-	-

Примечание – Значение отклонения стенки резервуара от вертикали со знаком « - » означает наличие вогнутости, знак «+» - выпуклости.

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

Таблица Ж.1 – Результаты нивелирования окрайки днища РВСПА-50000

№2

№ образующей	Измеренное отклонение относительно 3 образующей, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
1	3,1	4,0	0,9
2	4,3	6,0	1,7
3	8,3	7,0	-1,3
4	10,5	10,0	-0,5
5	14,2	13,0	-1,2
6	15,2	14,0	-1,2
7	15,9	15,0	-0,9
8	21,3	18,0	-3,3
9	21,9	19,0	-2,9
10	19,9	16,0	-3,9
11	16,8	14,0	-2,8
12	8,2	8,0	-0,2
13	7,3	6,0	-1,3
14	7,9	5,0	-2,9
15	10,9	8,0	-2,9
16	10,2	7,0	-3,2
17	9,4	8,0	-1,4
18	10,7	10,0	-0,7
19	14,1	13,0	-1,1
20	10,3	11,0	0,7
21	8,0	7,0	-1,0
22	6,7	6,0	-0,7
23	5,8	3,0	-2,8
24	0,5	1,0	0,5
25	0,0	0,0	0,0
26	1,0	2,0	1,0
27	4,5	5,0	0,5
28	9,7	11,0	1,3
29	10,1	12,0	1,9
30	10,7	13,0	2,3
31	13,2	17,0	3,8
32	14,1	15,0	0,9
33	15,3	14,0	-1,3
34	9,3	11,0	1,7
35	10,2	12,0	1,8
36	8,7	12,0	3,3
37	5,8	9,0	3,2
38	4,7	6,0	1,3
39	7,0	9,0	2,0
40	9,5	9,0	-0,5
41	11,8	13,0	1,2
42	11,9	14,0	2,1

№ образующей	Измеренное отклонение относительно 3 образующей, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
43	13,8	13,0	-0,8
44	10,3	10,0	-0,3
45	9,7	10,0	0,3
46	7,5	8,0	0,5
47	5,0	6,0	1,0
48	3,9	4,0	0,1

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица 3.1 – Результаты нивелирования окрайки днища РВСПА-50000

№3

№ образующей	Измеренное отклонение относительно 3 образующей, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
1	18,7	14,0	-4,7
2	18,5	15,0	-3,5
3	19,3	14,0	-5,3
4	18,2	15,0	-3,2
5	18,7	11,0	-7,7
6	16,1	10,0	-6,1
7	13,5	10,0	-3,5
8	12,1	12,0	-0,1
9	9,1	13,0	3,9
10	11,7	13,0	1,3
11	20,5	16,0	-4,5
12	22,1	18,0	-4,1
13	25,5	21,0	-4,5
14	23,1	20,0	-3,1
15	17,8	18,0	0,2
16	17,5	17,0	-0,5
17	17,1	14,0	-3,1
18	12,3	13,0	0,7
19	9,5	10,0	0,5
20	5,8	7,0	1,2
21	3,3	4,0	0,7
22	0,7	2,0	1,3
23	0,0	0,0	0,0
24	2,1	1,0	-1,1
25	3,5	4,0	0,5
26	5,0	7,0	2,0
27	8,3	11,0	2,7
28	8,5	12,0	3,5
29	10,3	13,0	2,7
30	11,8	16,0	4,2
31	13,0	12,0	-1,0
32	12,8	15,0	2,2
33	12,5	11,0	-1,5
34	10,9	10,0	-0,9
35	9,7	10,0	0,3
36	9,2	9,0	-0,2
37	8,9	10,0	1,1
38	12,3	10,0	-2,3
39	23,5	18,0	-5,5
40	24,2	19,0	-5,2
41	25,3	19,0	-6,3
42	22,5	18,0	-4,5

№ образующей	Измеренное отклонение относительно 3 образующей, мм	Относительное отклонение по данным традиционного геодезического обследования, мм	Разница, мм
43	22,1	18,0	-4,1
44	19,8	17,0	-2,8
45	19,0	16,0	-3,0
46	18,7	16,0	-2,7
47	18,5	15,0	-3,5
48	19,6	16,0	-3,6