

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов
Направление подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Исследование и совершенствование метода диагностики вертикального стального резервуара с использованием технологии наземного лазерного сканирования

УДК 622.692.23-025.71-034.14:528.7

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романюк Вера Борисовна	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемескина Мария Сергеевна	-		

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Макаровских Александра Викторовна	-		

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

Результаты ООП

Код	Результат обучения	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»		
Р1	<p>Применять базовые естественнонаучные, социально-экономические, правовые и специальные знания в области нефтегазового дела, для решения прикладных междисциплинарных задач и инженерных проблем, соответствующих профилю подготовки (в нефтегазовом секторе экономики), самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.</p>	<p>УК-1, УК-2, УК-4, УК-5, УК-6, ОПК-1.0ПК-2, ЕАС-4.2, АВЕТ-3А, АВЕТ-3і, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: 40.083 Профессиональный стандарт "Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов" (утвержден приказом Минтруда России от 26.12.2014 № 1158н), 19.003 Профессиональный стандарт "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 21.11.2014 № 927н); 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования" (утвержден приказом</p>
Р2	<p>Решать профессиональные инженерные задачи на основе информационной и библиографической культуры с применением информационнокоммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности.</p>	<p>УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, УК-8, ОПК-2, ОПК-6, ОПК-7,ПК-2, ПК-4 критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: 40.083 Профессиональный стандарт "Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов" (утвержден приказом Минтруда России от 26.12.2014 № 1158н), 19.003 Профессиональный стандарт "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 21.11.2014 № 927н); 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 26.04.2014 № 1175н).</p>
в области производственно-технологической деятельности		
Р3	<p>Применять процессный подход в практической деятельности, сочетать теорию и практику при эксплуатации и обслуживании технологического оборудования нефтегазовых объектов.</p>	<p>УК-1, УК-2, УК-3, ОПК-2, ОПК-3, ОПК-5, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных</p>

		стандартов: 40.083 17 Профессиональный стандарт "Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов" (утвержден приказом Минтруда России от 26.12.2014 № 1158н), 19.003 Профессиональный стандарт "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 21.11.2014 № 927н); 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 26.04.2014 № 1175н).
P4	Оценивать риски и определять меры по обеспечению безопасности технологических процессов в практической деятельности и применять принципы рационального использования природных ресурсов и защиты окружающей среды в нефтегазовом производстве.	УК-1, УК-2, ОПК-6, ПК-1, ПК-3, ПК-4, ПК-5, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессиональных стандартов: 40.083 Профессиональный стандарт "Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов" (утвержден приказом Минтруда России от 26.12.2014 № 1158н), 19.003 Профессиональный стандарт "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 21.11.2014 № 927н); 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 26.04.2014 № 1175н).
в области организационно-управленческой деятельности		
P5	Эффективно работать индивидуально и в коллективе по междисциплинарной тематике, организовывать работу первичных производственных подразделений, используя принципы менеджмента и управления персоналом и обеспечивая корпоративные интересы.	УК-3, УК-6, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
P6	Участвовать в разработке организационно-технической документации и выполнять задания в области сертификации нефтегазопромышленного оборудования	УК-2, УК-6, ОПК-1, ОПК-2, ОПК-5, ПК-1, ПК-2, ПК-4, требования профессиональных стандартов: 40.083 Профессиональный стандарт "Специалист по компьютерному проектированию технологических процессов" (утвержден приказом Минтруда России от 26.12.2014 № 1158н),

		19.003 Профессиональный стандарт "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 21.11.2014 № 927н); 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования" (утвержден приказом Минтруда России от 26.04.2014 № 1175н).
в области экспериментально-исследовательской деятельности		
P7	Получать, систематизировать необходимые данные и проводить эксперименты с использованием современных методов моделирования и компьютерных технологий для решения расчетно-аналитических задач в области нефтегазового дела.	УК-1, УК-2, ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-5
в области проектной деятельности		
P8	Использовать стандартные программные средства для составления проектной и рабочей и технологической документации объектов бурения нефтяных и газовых скважин, добычи, сбора, подготовки, транспорта и хранения углеводородов	УК-2, ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4
Профиль «Машины и оборудование нефтяных и газовых промыслов»		
P9	Планировать и организовывать работу по проведению планово-предупредительных ремонтов установок, технического обслуживания и ремонта оборудования.	ОПК-3, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, ПК-5, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования "
P10	Планировать внедрение новой техники и передовых технологий, разрабатывать и реализовывать программы модернизации и технического перевооружения предприятия.	УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОПК-1, ОПК-4, ОПК5, ОПК-6, ПК-1, ПК-2, ПК-3, ПК-4, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования"
P11	Организовывать проведение проверок технического состояния и экспертизы	УК-2, УК-3, УК-4, УК-5, ОПК-1, ОПК-2, ОПК3 ОПК-4, ОПК-5, ОПК-6, ПК-1, ПК-

	<p>промышленной безопасности, проводить оценку эксплуатационной надежности технологического оборудования.</p>	<p>2,ПК-3, ПК-4, ПК-5, критерий 5 АИОР (п. 2.1, 2.10...), согласованный с требованиями международных стандартов EUR-ACE и FEANI, требования профессионального стандарта 19.003 "Специалист по ремонту и обслуживанию нефтезаводского оборудования", 19.013 Профессиональный стандарт "Специалист по эксплуатации газотранспортного оборудования "</p>
--	---	---

Министерство образования и науки Российской Федерации
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение
 высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Отделение нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ:
 Руководитель ООП
 _____ К.К. Манабаев
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ84	Никифорову Николаю Андреевичу

Тема работы:

Исследование и совершенствование метода диагностики вертикального стального резервуара с использованием технологии наземного лазерного сканирования	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№79-16/с от 19.03.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<p>Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объектом исследования является напряженно-деформированное состояние вертикального стального резервуара: Номинальный объем: 10000 м³. Конструкция резервуара: вертикальный цилиндрический стальной. Воздействие: собственный вес конструкции, гидростатическое давление продукта, инерционные нагрузки.</p>
<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Анализ аварийности и причин аварий РВС; 2. Анализ методов расчета напряженно-деформированного состояния РВС; 3. Разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния РВС. 4. Финансовый менеджмент. 5. Социальная ответственность. 6. Выводы по работе.

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(если необходимо, с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Романюк Вера Борисовна, доцент, к.э.н.
Социальная ответственность	Черемискина Мария Сергеевна, ассистент
Английский язык	Макаровских Александра Викторовна, старший преподаватель
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Общие сведения о вертикальных стальных резервуарах	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	19.03.2020
---	------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич		

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа природных ресурсов
Направление подготовки 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
Отделение нефтегазового дела
Уровень образования: Магистратура
Период выполнения: весенний семестр 2019/2020 учебного года

Форма представления работы:

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2020
--	------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.02.20	<i>Обзор литературы</i>	20
8.03.20	<i>Введение</i>	10
22.03.20	<i>Общая часть</i>	10
12.04.20	<i>Расчетная часть</i>	10
26.04.20	<i>Финансовый менеджмент</i>	10
10.05.20	<i>Социальная ответственность</i>	10
17.05.20	<i>Английский</i>	10
24.05.20	<i>Заключение</i>	10
1.06.20	<i>Презентация</i>	10

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

СОГЛАСОВАНО:

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев Кайрат Камитович	к.ф.-м.н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит в себе: 150 страниц, 21 рисунок, 39 таблиц, 52 литературных источников.

Ключевые слова: резервуар, конструкция, расчет на прочность, расчет на жесткость, проверка на устойчивость, стенка, днище, крыша, нормативный документ, государственный стандарт, свод правил, антикоррозионная защита, теплоизоляция, листовой прокат, напряженно-деформированное состояние, конечно-элементная модель, напряжение, численный эксперимент.

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.

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:

- Анализ проблем эксплуатации резервуаров, связанных с изменением их пространственного положения и геометрической формы
- Оценка применимости методов расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и реальной геометрической формы
- Разработка методики оценки влияния действительного пространственного положения и реальной геометрической формы на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок
- Экспериментальная оценка напряженно-деформированного состояния стенки «идеального» резервуара под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы.

Объектом исследования данной работы является напряженно-деформированное состояние вертикального стального резервуара объемом 10000 м³.

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. В результате исследования на основании метода конечных элементов была разработана методика оценки напряженно-деформированного состояния стенки вертикальных стальных резервуаров под действием эксплуатационных нагрузок с учетом их действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного лазерного сканирования.

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. На основании результатов оценки НДС стенки резервуаров по данным трехмерного наземного лазерного сканирования может быть принято решение о необходимости ремонта резервуара.

При написании данной выпускной квалификационной работы использовались следующие программные инструменты: Microsoft Word 2016, ANSYS Workbench 2019, а также графический редактор КОМПАС-3D.

Определения, сокращения, нормативные ссылки

В данной работе были применены следующие определения, сокращения и нормативные ссылки:

Резервуар – сооружение, предназначенное для приема, хранения и сдачи нефти и нефтепродуктов;

Кольцевые напряжения – напряжения, действующие в окружном направлении;

Меридиональные напряжения – напряжения, действующие в направлении образующей стенки резервуара (оси балки);

Дефект – каждое отдельное несоответствие параметров (характеристик резервуара или его элемента требованиям нормативно-технической документации);

Окрайки днища резервуара – это утолщенные, по сравнению с центральной частью, листы, располагаемые по периметру резервуара в зоне опирания стенки;

Прочность – свойство конструкции выполнять назначение, не разрушаясь в течение заданного времени под действием напряжений, возникающих под воздействием внешних сил;

Устойчивость – способность сооружений противодействовать усилиям, стремящимся вывести их из исходного состояния статического или динамического равновесия;

Жесткость – способность конструктивных элементов сопротивляться деформации при внешнем воздействии;

РВС-10000 – резервуар вертикальный стальной объемом 10000 м³;

РВС – резервуар вертикальный стальной;

РФ – Российская Федерация;

ГОСТ – государственный стандарт;

СТО – стандарт организации;

РД – руководящий документ;

НДС – напряженно-деформированное состояние;

НЛС – наземный лазерный сканер;

ЛВЖ – легковоспламеняющаяся жидкость;

ГО – газовая обвязка;

УЛФ – улавливания легких фракций;

РВ – резервуарный парк;

ТЗ – техническое задание;

КМД – конструкции металлические деталеровочные;

КМ – конструкции металлические;

ВСН – ведомственная норма;

КЖ – конструкции железобетонные;

ППР – проект производства работ;

ППРк – проект производства работ кранами;

АКЗ – антикоррозионная защита;

ТН – теплонагреватель;

ТИ – теплоизоляция.

ГОСТ 12.1.003-14 ССБТ Шум. Общие требования;

ГОСТ 12.1.029-80 ССБТ Средства и методы защиты от шума. Общие требования;

ГОСТ 12.1.012-2004 ССБТ Вибрационная безопасность. Общие требования;

ГОСТ 12.2.062-81 ССБТ Оборудование производственное. Ограждения защитные;

ГОСТ 17.1.3.13-86 Охрана природы. Гидросфера. Общие технические требования к охране поверхностных вод от загрязнений;

ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ Пожарная безопасность. Общие технические требования;

ГОСТ 17.1.3.06-83 Охрана природы. Гидросфера. Общие технические требования к охране подземных вод.

Оглавление

Введение.....	16
Глава 1. Современное состояние исследуемой проблемы	19
1.1. Общие сведения о вертикальных стальных резервуарах.....	19
1.2. Анализ аварийности и причин аварий вертикальных стальных резервуаров	26
1.3. Методы расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и геометрической формы	32
1.4. Анализ эффективности существующих методов определения пространственного положения и геометрической формы.....	41
Глава 2. Разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуара методом конечных элементов	49
2.1. Выбор метода оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуара.....	49
2.2. Выбор конечного элемента. Аппроксимация стенки резервуара конечными элементами	53
2.3. Определение компонентов разрешающего уравнения для стенки резервуара	59
2.4. Расчет НДС стенки резервуара аналитическим и численным методами	71
Глава 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.....	89
3.1. Потенциальные потребители результатов исследования	90
3.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	90
3.3. SWOT – анализ	92
3.4. Планирование научно-исследовательских работ	95
3.5. Определение ресурсоэффективности проекта	108
Глава 4. Социальная ответственность	114
4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	114
4.2. Производственная безопасность	116
4.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	116
4.4. Экологическая безопасность	125

4.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	127
Заключение	130
Список использованной литературы.....	132
Приложение А	138

Введение

Нефтегазовая промышленность – базовая отрасль Российской экономики. По мере развития нефтяной промышленности возросла потребность в хранении больших объемов нефти и продуктов её переработки. Резервуары служат для хранения, приема и отпуска нефтепродуктов, щелочей, химических веществ, дизельного топлива, воды и других жидкостей в различных климатических условиях. От их правильной работы и надежности при эксплуатации зависит экологическая обстановка местности, где располагается нефтебаза, центральные и промежуточные резервуарные парки. На этапах проектирования и сооружения обеспечивается нужная степень надежности цилиндрического РВС, которая осуществляется на этапе эксплуатации.

Аварии резервуаров с последующей разливкой нефти и нефтепродуктов наносят прилегающей территории огромные экологические загрязнения. Экономический ущерб предприятия включает не только потери продукта, но и большие затраты на восстановление окружающей среды и восполнение запаса потерянных продуктов.

Как известно с практической точки зрения, сохранить углеводородное сырье является сложной задачей, точно также, как и создать идеальные условия для хранения нефтепродуктов различного вида. Это связано с тем, что эти продукции имеют характерные качества, усложняющие процесс добычи, транспортировки и хранения.

В настоящее время по всему миру наиболее распространены вертикальные стальные виды нефтяных резервуаров. Проектирование РВС на территории Российской Федерации регламентируется межгосударственным стандартом ГОСТ 31385-2016 [1] и стандартом СТО-СА-03-002-2009 [2].

В процессе эксплуатации на резервуары действуют различные статические, малоцикловые, снеговые и ветровые нагрузки, воздействие температуры и агрессивной рабочей среды, образующие несовершенства геометрической формы. В последствии существенно уменьшается несущая

способность конструкции, снижается эксплуатационная надежность и сокращается долговечность резервуарной конструкции. В отличие от стандартного метода расчета на прочность и жесткость, метод численного моделирования позволяет разработать геометрическую модель и создать соответствующую конечно-элементную аппроксимацию на этапе проектирования.

Аналитический расчет резервуара связан с безмоментной теорией оболочек, т.к. такой объект представляет собой вертикальную оболочку с днищем. При всем этом, существенно меняется симметрия конструкции из-за наличия геометрических особенностей (наличие в конструкции люков, штуцеров, отверстий, изменение элементов конструкции по сечению и т.д.). Поэтому при расчете распределения напряжений и деформаций в локальных зонах, необходимо использовать технологии численных расчетов, поскольку аналитические методы в данном случае бессильны.

Целью данной магистерской диссертации является теоретическое обоснование и разработка метода оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуара с учетом действительного пространственного положения и реальной геометрической формы, определяемых по результатам трехмерного наземного лазерного сканирования.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- Анализ проблем эксплуатации резервуаров, связанных с изменением их пространственного положения и геометрической формы;
- Оценка применимости методов расчета напряженно-деформированного состояния резервуаров с учетом их пространственного положения и реальной геометрической формы;
- Разработка методики оценки влияния действительного пространственного положения и реальной геометрической формы на напряженно-деформированное состояние стенки резервуара под действием эксплуатационных нагрузок;

- 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.

Глава 1. Современное состояние исследуемой проблемы

1.1. Общие сведения о вертикальных стальных резервуарах

Вертикальный стальной резервуар – наземное инженерное сооружение, служащее главным образом для хранения жидких продуктов, а также применяются для приема, подготовки, учета и выдачи продуктов.

Они представляют из себя вертикальную цилиндрическую оболочку с плоским дном и стационарной крышей.

Основной сферой применения вертикальных стальных резервуаров является нефтегазовая отрасль, которая нуждается в непрерывающейся технологической связи начиная от добычи, заканчивая доставкой продукта потребителю.

На данный момент, за счет экономической эффективности, дешевизны материалов и относительной простоте конструкции, вертикальные стальные резервуары являются самым дешевым видом емкости для хранения нефти и нефтепродуктов. Более того, геометрическая особенность таких резервуаров позволяет соорудить хранилище больших объемов и при всем этом занимать относительно малый участок земли. Еще одним из преимуществ таких резервуаров является относительно легкая транспортировка конструкций к месту монтажа. Такая особенность связано с изготовлением стенок резервуара методами рулонирования и листовой сборки. Благодаря этим факторам, вертикальные стальные резервуары пользуются широким спросом и популярностью для хранения углеводородного сырья и других жидких продуктов по всему миру.

Производство

Несмотря на то, что конструкция вертикальных резервуаров кажется простой, их изготовление представляет собой сложный многостадийный процесс.

Прежде чем приступить к заводскому изготовлению резервуаров, требуется выполнить детализированные рабочие чертежи КМД, разработанные

согласно проекту КМ, и утвержденный в установленном порядке технологический процесс, которая обеспечивает выполнение требований ПБ 03-605-03 и ГОСТ 31385-2016. Гарантией качества конструкции является производство с соблюдением государственных стандартов. Применяются для изготовления материалы подверженные входному контролю на соответствие требованиям нормативной и проектной документации. Металлопрокат подвергается специальной обработке перед подачей в производство.

Конструктивные элементы резервуаров делятся на основные и вспомогательные. К основным относятся: стенка, днище и кольцевые крайки, крыша (каркас и настил), кольца жесткости, анкерные крепления, обечайки люков и патрубков. К вспомогательным: площадки, лестницы, ограждения.

Основные конструкции резервуаров могут выполняться методом рулонирования или методом листовой сборки. Рулонизируемые полотнища собирают, сваривают, проводят контроль и сворачивают в рулоны. При листовой сборке детали стенок вальцуют на проектный радиус и укладывают в ложементы для транспортировки.

После сборки резервуары проходят тщательную проверку на соответствие государственных стандартов и стандартов предприятия-заказчика. Помимо этого, резервуары проверяются на наличие признаков нарушения герметичности, выдержку механических нагрузок и предельных давлений.

Основные конструктивные элементы

Основные конструктивные элементы резервуара для хранения нефти делят на несущие и ограждающие.

Несущими являются: стенка, в том числе врезки патрубков и люков, бескаркасная крыша, анкерное крепление стенок, крайка днища, каркас и опорное кольцо жесткости.

Ограждающие: настил стационарной крыши, центральная часть днища, понтон, плавающая крыша.

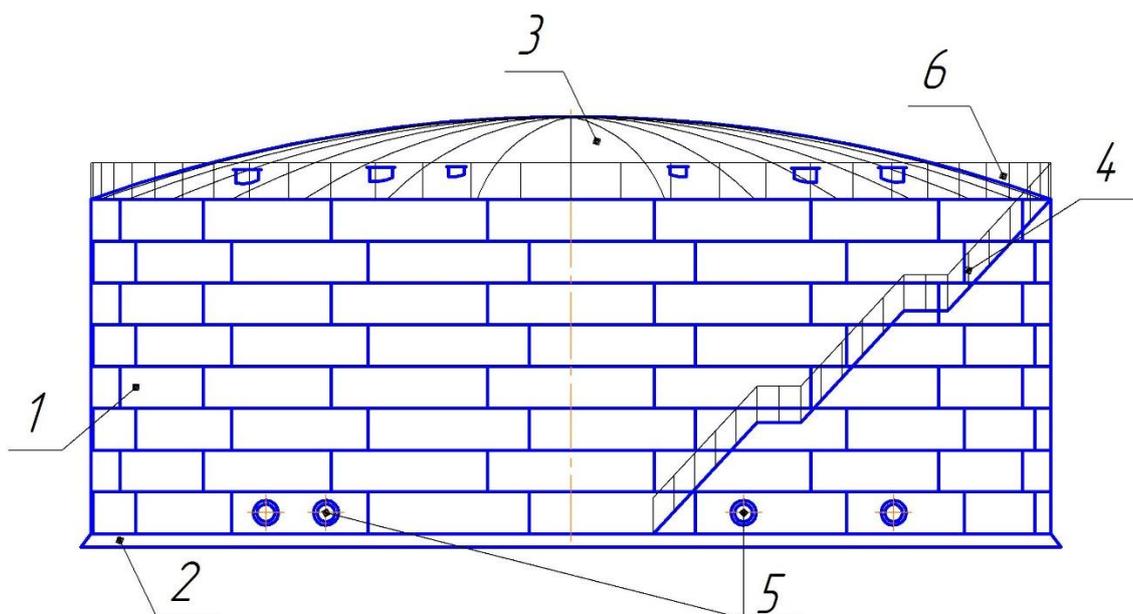


Рисунок 1.1 – Схема вертикального резервуара РВС-10000 м³

1 – стенка; 2 – днище; 3 – крыша; 4 – лестница кольцевая;

5 – люки и патрубки; 6 – площадки и ограждения.

Стенка

Стенка резервуара представляет собой тонкостенную цилиндрическую оболочку, сваренную из металлических листов. Она изготавливается методами рулонирования или полистовой сборки. Стенка состоит из ряда поясов, высотой равной ширине листа. Наименьшую толщину листов стенки принимают равной 4 мм. Наиболее часто используются металлические листы размерами 1500х6000, 1800х8000, 2000х8000 мм, и поэтому, в зависимости от назначенного типоразмера листа, высоту резервуара выбирают такой чтобы она была кратной 1490, 1790, 1990 мм, и длиной окружности кратной 5990 или 7990 мм. С учетом материала при необходимости корректировки листов.

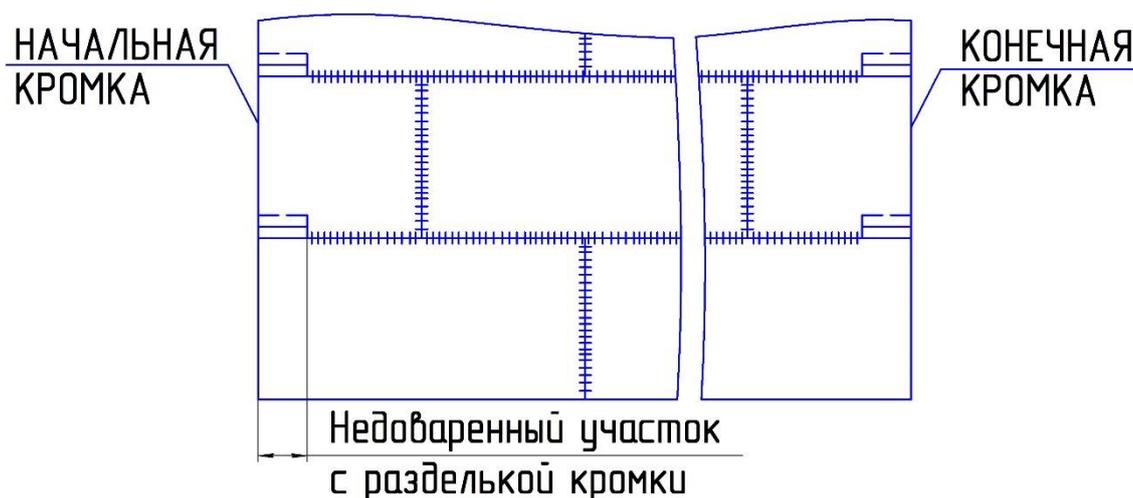


Рисунок 1.2 – Полотнище стенок резервуара

В резервуарной индустрии широко применяется отечественный индустриальный метод рулонирования. Такой метод значительно упрощает трудоемкость сварочно-монтажных работ, т.к. основная часть работ выполняется заводом изготовителем.

Днище

Так как большую часть нагрузки днище испытывает от давления жидкости, толщину подбирают так, чтобы сварочные работы не доставляли трудностей и были выполнены надежно, а также учитывается и припуск на коррозию. Днище резервуара имеют коническую форму с маленьким уклоном в сторону центра либо от нее.

Рекомендуемая толщина днища не менее 4 мм без учета припуска на коррозию для резервуаров объемом не более 1000 м³. Днище резервуара объемом не менее 2000 м³ должна иметь центральную часть толщиной не менее 4 мм без учета припуска на коррозию и утолщенный кольцевой край толщиной не менее 6 мм.



Рисунок 1.3 – Днище резервуара

Крыша

Крышу вертикальных стальных резервуаров изготавливают по разным стандартам и нормам. Они могут быть плоскими, коническими, купольными, сферическими, а также могут быть оснащены понтонами для сокращения потерь продуктов за счет испарения.

Для резервуаров с объемами от 1 тыс. м³ до 5 тыс. м³. используются **конические каркасные крыши**. В ее состав входят изготовленные на заводе секторные каркасы, центральный щит, кольцевые элементы каркаса и рулонированное полотнище настила. Так же, как и монтаж традиционных щитовых крыш, монтаж каркаса производится по мере развертывания рулона стенки. После того, как соединили между собой каркасы кольцевыми элементами на них укладывают полотнища настила, заранее развернутые недалеко от днища резервуара. Полотнища свариваются друг с другом, а затем припаиваются по периметру к уголку стенки. Не допускается закрепление полотнищ к элементам каркаса.

Чтобы не допустить разрушения стенок резервуара, а также ее отрыва от днища при превышении внутреннего давления аварийного, каркасные крыши проектируют во взрывозащищенном исполнении так, чтобы произошел отрыв сварного шва приварки настила к стенке. Также, взрывозащищенная крыша

выполняет роль аварийного клапана, который в случае чего сбрасывает давление внутри резервуара, сохраняя конструкцию и находящийся внутри продукт.

Для резервуаров с объемами не менее 5 тыс. м³, и диаметром не больше чем 50 м используются **купольные каркасные крыши**. Покрытие представляет собой крышу стационарной конструкции в сферической форме имеющая радиально-кольцевую каркасную систему. При проектировке радиус сферы выбирают так, чтобы она была в пределах от 0,8 до 1,5 диаметров резервуара. Чтобы не допустить разрушения стенок резервуара при превышении внутреннего давления аварийного, сферические крыши изготавливают во взрывозащищенном исполнении. Для этого настил, представляющую собой подготовленные для полистовой сборки металлические листы или же крупногабаритные карты, крепится только на окаймляющий элемент вдоль окружности крыши. Таким образом сохраняется стенка резервуара и его целостное крепление к днищу.

Монтаж

Монтажом называется производственный процесс, при помощи которых осуществляется сборка и установка оборудования, отдельно взятых конструкций или сооружения в целом, изготовленных на заводе целиком или по частям.

После транспортировки к месту эксплуатации проводится монтаж резервуара в соответствии со всеми требованиями.

Подготовка к монтажу начинается с открытия котлована, установки свай, которые забиваются под всем днищем в виде сплошного свайного поля. Верхняя часть фундамента выполняется в виде сплошного железобетонного покрытия. Сверху на фундамент накладывается и уплотняется гидрофобный слой. Также в обязательном порядке к месту монтажа должны быть подведены электроснабжение для работы со сварочными аппаратами и монтажными кранами. Устраивают пути под краны. Рядом с монтажной площадкой

сооружаются бытовые помещения, склады для хранения инструментов и рабочие комнаты.

Следующим этапом является монтаж непосредственно металлоконструкций. Монтаж проводится в зависимости от метода производства основных частей резервуара.

Все работы производятся в соответствии с рабочей документацией. Основными исполнительными документами являются журналы и акты выполненных работ, испытаний и освидетельствований.

Во многом, выбор способа монтажа зависит от конструкции сооружаемого резервуара и его физико-географической характеристики местности, и проводится в соответствии с действующей нормативной базой РФ:

- ВСН 311-89 [5];
- ГОСТ 31385-2016 [1];
- СТО-СА-03-002-2009 [6];
- ГОСТ 17032-2010 [7].

1.2. Анализ аварийности и причин аварий вертикальных стальных резервуаров

Одними из наиболее опасных промышленных объектов в нефтегазовой отрасли являются вертикальные стальные резервуары. Этому способствуют ряд нескольких факторов:

- Высокая степень пожаровзрывоопасности хранимых продуктов;
- Трудность и трудоемкость полного контроля дефектов сварных швов из-за их большой протяженности в конструкции;
- Возникновение на стадии гидравлического испытания несовершенства геометрической формы;
- Существенные деформации стенки резервуара в процессе эксплуатации и технологических операций;
- Быстрый коррозионный износ элементов конструкции из-за коррозионной активностью хранимых продуктов и подтоварными водами;
- Малоцикловая усталость отдельно взятых участков резервуара;
- Сложный характер нагружения конструкции в зоне уторного шва [11].

Аварии резервуаров с последующей разливкой продукта приводят к существенному удару по экономике предприятия, наносят колоссальный экологический и социальный вред. По данным статистики, материальный ущерб предприятий от аварий резервуаров может превышать затраты на сооружение нового резервуара в 500 и более раз. Основными последствиями аварий являются: полное или частичное разрушение сооружения, а также близлежащих конструкций, зданий и строительных объектов; загрязнение литосферы, гидросферы и атмосферы; летальные исходы и причинение различных степеней вреда здоровью людей.

Исходя из этого, важной задачей промышленных предприятий является повышение надежности и безопасности при эксплуатации резервуарных конструкций. Для достижения данной задачи своевременно определяется

техническое состояние конструкции, позволяющее принимать решение о пригодности дальнейшей эксплуатации резервуара, либо необходимости его ремонта. Стоит заметить, что одним из основных показателей технического состояния резервуара является его напряженно-деформированное состояние. Производя анализ основных причин возникновения аварий вертикальных стальных резервуаров, сможем выяснить основные факторы, в той или иной степени оказывающие существенное влияние на формирование их напряженно-деформированного состояния.

Свои работы в сфере анализа причин полного или частичного разрушения резервуаров посвятили Галеев В.Б. [12,13,14,15], Березин В.Л. [16,17], Беляев Б.И. [18], Коновалов П.А., Мангушев Р.А. [19,20], Землянский А.А. [21], Тарасенко А.А. [20,23,24], Коновалова О.П. [25], Розенштейн И.М. [26], Афонская Г.П. [27], Хануков Х.М. [28], Иванов Ю.К. и другие.

Землянский А.А. и Коновалов П.А. в своих работах [21,20] провели исследования 213 аварийных резервуаров и выделили 6 наиболее встречающихся причин выхода из строя резервуаров. Наиболее доминирующей среди них причиной оказалась неравномерная осадка грунтового основания резервуара (таблица 1.1).

Тарасенко А.А. в своих работах [23,24] исследовал причины возникновения известных ему 46 аварий резервуаров и выделил несколько наиболее активных причин. Свое место среди них нашла и неравномерная осадка основания как одна из наиболее часто встречающихся причин (таблица 1.2).

Также свой анализ причин возникновения аварий провели авторы исследования [98] Ханухов Х.М. и Алипов А.В. Ими был произведен анализ 65 аварий произошедших в периоды с 1965 г. по 1995 г. (таблица 1.3) и 54 аварий произошедших с 2002 г. по 2010 г. (таблица 1.4)

Таблица 1.1 – Наиболее активные причины аварий резервуаров

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

Таблица 1.2 – Основные причины аварий резервуара по данным Тарасенко А.А.

Причина аварии резервуара	Количество аварий	Доля из общего количества аварий, %
Нарушение технологии ремонта	3	6,5
Коррозия	2	4,3
Нарушение технологии проведения гидравлических испытаний	4	8,7
Некачественное выполнение сварочных работ	13	28,3
Неравномерная осадка	6	13,1
Нарушение правил эксплуатации	11	23,9
Нарушение технологии изготовления	7	15,2
Всего	46	100,0

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

Причина аварии резервуара	Доля из общего количества аварий, %
Хрупкое разрушение	63,1
Взрыв и пожар	12,3
Образование вакуума	7,7
Коррозионный износ	3,1
Просадка основания	1,5
Ураганный ветер	1,5
Прочие причины	10,8
Всего	100,0

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

Причина аварии резервуара	Количество аварий	Доля из общего количества аварий, %
Нарушение правил промышленной безопасности (ППБ) при проведении подготовительных работ по зачистке резервуара	12	24
Нарушение ППБ при эксплуатации резервуара	15	26
Хрупкое разрушение стенки резервуара	4	8
Неравномерная осадка днища резервуара, повлекшая образование свищей или разрыв по сварным соединениям	3	6
Пожар при попадании молнии в резервуар	4	8
Разрушение элементов конструкции резервуара от снеговой нагрузки (ошибки при проектировании)	2	4
Нарушение условий гидро/пневмоиспытаний, повлекшие недопустимые деформации резервуара	2	4
Аварии или пожар от неуказанных причин	7	12
Всего	54	100

Исходя из рассмотренного выше анализа статистических данных причин возникновения аварий, можем выделить несколько основных причин ее возникновения:

- 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.

Как показано на рисунке 1.4 на долю неравномерной осадки основания приходится 33 % от общего количества рассмотренных аварий РВС, что является главной причиной их разрушения.

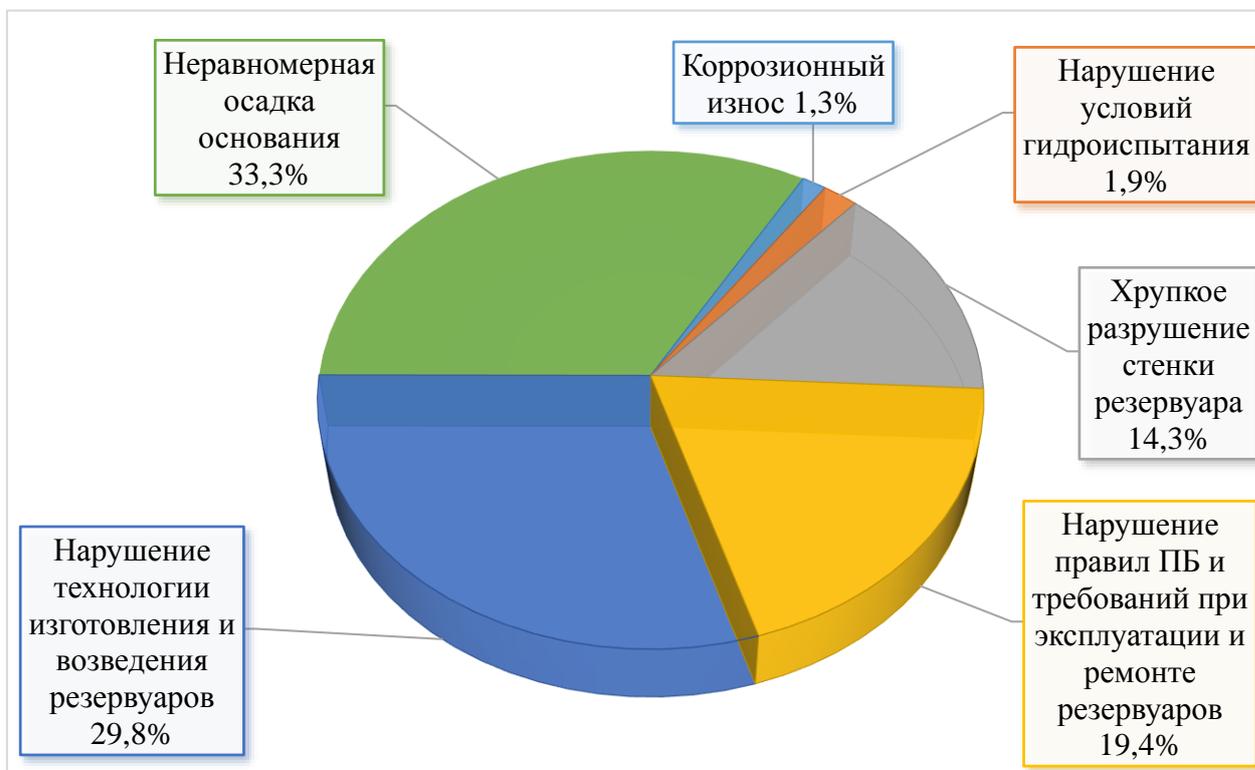


Рисунок 1.4 – Основные причины аварий РВС

Также, ряд крупнейших компаний мира ESSO, BP, Chevron и т.п. считают, что главной причиной разрушения вертикальных стальных резервуаров является неравномерная осадка основания.

На основании анализа причин анализа и аварийности вертикальных стальных резервуаров можем сделать вывод о том, что неравномерная осадка основания резервуарной конструкции является одним из доминирующих причин полного или частичного разрушения резервуарной конструкции. Иными словами, на напряженно-деформированное состояние резервуарной конструкции существенное влияние оказывает его пространственное положение. Также, стоит отметить, что наличие геометрических особенностей формы резервуара повышает возникновение аварийных ситуаций.

Таким образом, оценка напряженно-деформированного состояния резервуаров служит необходимым действием для определения технического

состояния вертикальных стальных резервуаров и принятия решения о проведении ремонтных работ.

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

В настоящий момент, для обеспечения безопасной и надежной работы резервуарной конструкции, оценка технического состояния должна выполняться в периодическом порядке. Резервуары являются неотъемлемой частью трубопроводного транспорта углеводородного сырья, и обеспечение безотказной эксплуатации является главной задачей организации. Для этих целей в отраслевых регламентах Российской Федерации установлены сроки и объемы периодического диагностического обследования резервуаров.

Как показывает практика, в нефтегазовой отрасли широко применяется система продления срока эксплуатации резервуаров после исчерпания их нормативного срока службы. Диагностика технического состояния для обеспечения надежной и безопасной эксплуатации проводится согласно нормативно-технической документации. В них четко указана и установлена периодичность и объем проведения обследования в соответствии со сроком службы и эксплуатации резервуаров. В таблице 2.1 можно ознакомиться с общими сведениями частоты проведения и объема работ диагностики РВС.

Все расчеты поясов стенки резервуара регламентируются следующими нормативными документами, такими как: ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия [1], СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*» [4] и СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [5].

Таблица 2.1 – Общие сведения частоты проведения технической диагностики РВС.

Срок эксплуатации	Частичная техническая диагностика	Полная техническая диагностика
До 20 лет	Через 5 лет после сооружения, а также каждые 5 лет после последней диагностики или ремонта	Через 10 лет после последнего ремонта или через 5 лет после проведения частичной технической диагностики
Более 20 лет	Каждые 4 года после последней диагностики или ремонта	Через 8 лет после последнего ремонта или через 4 года после частичной технической диагностики

Кроме основных межгосударственных стандартов и сводов правил, в организации есть еще свои внутренние стандарты, которые при проектировании и расчете резервуаров обязательно учитываются проектировщиками.

Аналитический метод исследования технического состояния резервуаров связан с теорией тонкостенных оболочек, т.к. резервуар представляет собой вертикальную цилиндрическую оболочку с днищем и кровлей. Как известно, резервуар не может быть сооружен идеально симметричным, а также имеет ряд геометрических особенностей в виду наличия в конструкции люков, патрубков, отверстий и иных элементов. В связи с этим, при расчете напряженно-деформированного состояния резервуарной конструкции не учитывают значительное количество допущений для упрощения ее математической модели. Самым известным из них является принятие гипотезы об однородности грунтового основания, которая позволила

считать осесимметричным напряженно-деформированное состояние строения.

Свои работы в области оценки напряженно-деформированного состояния резервуаров посвятили Арзунян А.С. [25], Ашкиназ М.И. [26,27], Березин В.Л. [28,29,5,6], Бородавкин П.П. [30], Сафарян М.К. [31,32,33], Шутов В.Е. [6,32], Лебедев В.Д. [34,35], Хоперский Г.Г. [36], Галеев В.Б. [23], Слепнев И.В. [38], Тарасенко А.А. и Чепур П.В. [39,40], Головачев А.А. [41,42], Сметанников О.Ю. [41,42,43], Катанов А.А. [44], Евдокимов В.В. [45], Любушкин В.В. [45] и другие.

Сафарян М.К. [69,70,71], Березин Л.В. [13], Шутов В.Е. [13], Ашкинази М.И. [6], Стулов Т.Т. [84] и другие рассматривали в своих работах вопросы напряженно-деформированного состояния узла сопряжения стенки с днищем.

Авторами работ [41,42,44,38] были исследованы вопросы напряженно-деформированного состояния окрайки днища и отдельно взятых дефектов РВС. В итоге, авторами [45] были разработаны методики расчета предельно допустимых вмятин, а также и других дефектов формы. Главной задачей которых был учет геометрических особенностей дефектов, их месторасположения, условия нагружения РВС и других значимых факторов. Доказательным экспериментом достоверности разработанной методики стало сравнение результатов расчета выполненных по разработанной методике с результатами численного моделирования в программном комплексе ANSYS.

В связи с выполнением указанных исследований на начальном этапе развития оценки НДС РВС, а также в период теории тонкостенных оболочек, при расчетах допускали значительное количество допущений для упрощения математических моделей резервуаров. Одним из наиболее популярных была гипотеза об однородности грунтового основания. Такое допущение позволяло считать НДС РВС осесимметричным.

Стоит отметить исследования Галеева В.Б. [23], Тарасенко А.А. [85,86], Хоперского Г.Г. [99], Слепнева И.В. [76], Чепура П.В. [102], в которых особое

внимание направлено на оценку влияния неравномерной осадки резервуаров на напряженно-деформированное состояние стенки РВС.

В своей работе [23], Галеев В.Б. изучает причины возникновения неравномерной осадки резервуара, а также его влияние на напряженно-деформированное состояние. Для того чтобы смоделировать неравномерную осадку Галеев приложил к узлу сопряжения стенки с дном силу, оказывающую деформацию резервуара до искомого состояния. Так как при таком моделировании условия работы не будут соответствовать реальным условиям, такой способ вызывает много спорных вопросов. И к тому же, данная методика не учитывает реальную геометрическую форму самого резервуара.

Первым из отечественных исследователей, применил метод конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния резервуаров в своей работе Слепнев. И.В. [76]. Однако, по ряду причин, его методика определения напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров с учетом пространственного положения является не приемлемой, т.к. данная методика предполагает упругое податливое крепление верхней кромки, что является не соответствующей реальным условиям. В своих работах [86,99] Тарасенко А.А. и Хоперский Г.Г., отметили, что в данной работе допускаются некоторые ошибки при решении уравнений описания неравномерной осадки.

На сегодняшний день, проверочный расчет на прочность поясов стенки резервуара осуществляется в соответствии с действующей нормативной документацией ГОСТ 31385-2016 [1], и выполняется по формуле:

$$\left(\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_{2k} + \sigma_{2k}^2 \right)^{0,5} \leq R, \quad (2.1)$$

где σ_{2k} – кольцевое напряжение, МПа вычисляемое для нижней точки каждого пояса по формуле:

$$\sigma_{2k} = \left[0,001 \rho g (H - x_L) + 1,2 p \right] \frac{r}{t_{ir}}, \quad (2.2)$$

где ρ – плотность продукта, равная 0,9 т/м³;

g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²;

H – высота налива продукта при эксплуатации, $H = 11,2$ м;

x_L – расстояние от дна до нижней кромки i – го пояса, м;

p – нормативное избыточное давление в газовом пространстве, МПа, определяемое по таблице 3.3 в соответствии с документом РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04 [8];

r – радиус срединной поверхности стенки резервуара, $r = 17,1$ м;

t_{ir} – расчетная толщина i – го пояса, м;

σ_1 – меридиональное напряжение, МПа, в i – м поясе стенки для резервуаров со стационарной крышей и определяется по формуле:

$$\sigma_{1i} = \frac{1,05 G_M + 1,05 \psi_1 G_O + 1,3 \psi_2 G_t}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7 c_e p_s + 1,2 \psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}, \quad (2.3)$$

где G_M – вес металлоконструкции выше расчетной точки, МН;

G_O – вес стационарного оборудования выше расчетной точки, МН;

G_t – вес теплоизоляции выше расчетной точки, МН;

p_s – расчетная снеговая нагрузка на поверхности земли, МПа, определяемая по СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» [4];

p_v – нормативное значение вакуума, МПа, определяемое по таблице 3.3 в соответствии с документом РД-23.020.00-КТН-018-14;

$c_e = 0,85$ при $D \leq 60$ м;

r – радиус резервуара, м;

ψ_1, ψ_2, ψ_3 – коэффициенты сочетаний соответственно для длительных и кратковременных нагрузок, назначаемые в соответствии с пп. 6.2-6.4 СП 20.13330.2016 [4].

Проверочный расчет на устойчивость резервуара

Устойчивость стенки для основных сочетаний нагрузок (вес конструкций и теплоизоляции, вес снегового покрова, ветровая нагрузка, относительный вакуум в газовом пространстве) проверяется по формуле:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq 1, \quad (2.4)$$

где σ_1, σ_2 – меридиональные (вертикальные) и кольцевые напряжения в срединной поверхности каждого пояса стенки, МПа, определяемые от действия указанных нагрузок в соответствии с требованиями действующих нормативных документов*;

* На территории РФ действует СП 16.13330.2017 “СНиП II-23-81* Стальные конструкции”.

$\sigma_{cr1}, \sigma_{cr2}$ – критические меридиональные и кольцевые напряжения, МПа, получаемые по формулам:

$$\sigma_{cr1} = C_0 \frac{E}{\delta}, \quad \sigma_{cr2} = 0,55 \frac{r}{H_r} \cdot \frac{E}{\sqrt{\delta^3}}, \quad \delta = \frac{r}{t_{\min}}, \quad (2.5)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,04 + 40/\delta & \text{при } 400 \leq \delta < 1200; \\ 0,085 - 10^{-5} \delta & \text{при } 1220 \leq \delta < 2500; \\ 0,065 - 2 \cdot 10^{-6} \delta & \text{при } 2500 \leq \delta < 5000. \end{cases}, \quad (2.6)$$

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{t_{\min}}{t_i} \right)^{2,5}, \quad (2.7)$$

где E – модуль упругости стали, МПа;

t_{min} – толщина самого тонкого пояса стенки (как правило, верхнего), представляющая его номинальную толщину за вычетом припуска на коррозию и минусового допуска на прокат, м;

H_r – редуцированная высота стенки, м;

n – количество поясов стенки;

h – высота пояса, м;

индекс i в обозначениях указывает на принадлежность соответствующей величины к i – му поясу стенки.

При расчете на устойчивость меридиональные и кольцевые напряжения будут определяться по следующим формулам:

Меридиональные напряжения σ_1 , МПа, в i – м поясе стенки для резервуаров со стационарной крышей определяются по формуле:

$$\sigma_{1i} = \frac{1,05G_M + 1,05\psi_1 G_O + 1,3\psi_2 G_t}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7\psi_1^c p_s + 1,2\psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}. \quad (2.8)$$

Кольцевое напряжение σ_2 в резервуарах со стационарной крышей зависит от p_v и эквивалентного ветрового внешнего давления p_w :

$$\sigma_{2i} = (1,2 \cdot \psi_{t3} \cdot p_v + 0,5 \cdot \psi_{t2} \cdot p_w) \cdot \delta, \quad (2.9)$$

где p_w – нормативное значение ветрового давления (МПа), представляющего сумму средней и пульсационной составляющих и определяемое по п. 11.1.2 СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия».

Важно заметить, что для данных расчетов (2.1) и (2.4) не учитывается геометрическая особенность резервуарной конструкции и неравномерная осадка основания, т.е. разработана для осесимметричного случая нагружения резервуара.

Таким образом, исходя из анализа методов оценки НДС РВС с учетом пространственного положения и реальной геометрической формы можем выразить формулу для нахождения фактического напряженно-деформированного состояния стенки резервуара:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}, \quad (2.10)$$

где σ_{ϕ} – фактические напряжения, МПа;

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

$\Delta\sigma_{н.о.}$ – погрешность, учитывающий изменения напряжений, вызванные неравномерной осадкой, МПа.

Как видно из выражения (2.10), для определения фактического напряжения не учитывается изменения напряжений, вызванные несовершенством геометрической формы оболочки резервуара.

Основываясь на этом можно сделать вывод о том, что на данный момент не существует аналитической методики оценки напряженно-деформированного состояния стенок резервуара с учетом их эксплуатационных нагрузок при котором, учитываются действительное пространственное положение и фактическая геометрическая форма объекта. Все существующие методики определения напряженно-деформированного состояния вертикальных стальных резервуаров с учетом пространственного положения предполагают использование данных традиционного геодезического обследования РВС.

Таблица 2.2 – Анализ методов расчета НДС РВС с учетом их пространственного положения

Автор	Учет действительной геометрии стенки	Моделирование неравномерной осадки	Учет проектных нагрузок	«Целостность» рассмотрения стенки	Фактические напряжения, рассчитываемые по методике, σ_{ϕ}
Галеев В.Б.	Нет	Приложение к уторному узлу силы, деформирующей стенку до искомого состояния	Гидростатическое и избыточное давление	Полностью	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}$
Слепнев И.В.	Нет	Свободное провисание стенки на определенном участке	Гидростатическое и избыточное давление	Полностью	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}$
Тарасенко А.А.	Аппроксимация вертикальной образующей	Действие сосредоточенной нагрузки	Нет	Участок	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.} \pm \Delta\sigma_{в.о.}$
Хоперский Г.Г.	Нет	Неосесимметричная деформация	Гидростатическое и избыточное давление	Полностью	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}$
Тарасенко А.А. (МКЭ)	Нет	Действие сосредоточенной нагрузки	Нет	Участок	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}$
Чепур П.В.	Нет	Свободное провисание стенки на определенном участке	Все проектные нагрузки	Полностью	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид} \pm \Delta\sigma_{н.о.}$
Действующая НТД	Отклонения образующей от вертикали	Нивелировка окрайки днища	Гидростатическое и избыточное давление	Участок	$\sigma_{\phi} = \sigma_{ид}$
Примечание: $\Delta\sigma_{в.о.}$ – изменения напряжения вдоль образующей, вызванные ее отклонением от вертикали, МПа.					

1.4. Анализ эффективности существующих методов определения пространственного положения и геометрической формы

Полное и частичное техническое обследование РВС включает в себя определение их пространственного положения и реальной геометрической формы. Приведем причины, по которым необходимо проводить определение пространственного положения резервуара: 1) это является наипростейшим способом контроля за изменением его НДС; по результатам определения пространственного положения и реальной геометрической формы определяется остаточный ресурс РВС. 2) Оценка напряженно-деформированного состояния резервуара с помощью численных методов расчета является одним из наиболее прогрессивных методов определения остаточного ресурса. Результаты определения пространственного положения используются для построения компьютерной трехмерной модели; 3) по итогу обследования имеется возможность спрогнозировать развитие осадки и дефектов геометрической формы.

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 приемораздаточного патрубка с нумерацией по часовой стрелке. 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 1.5.

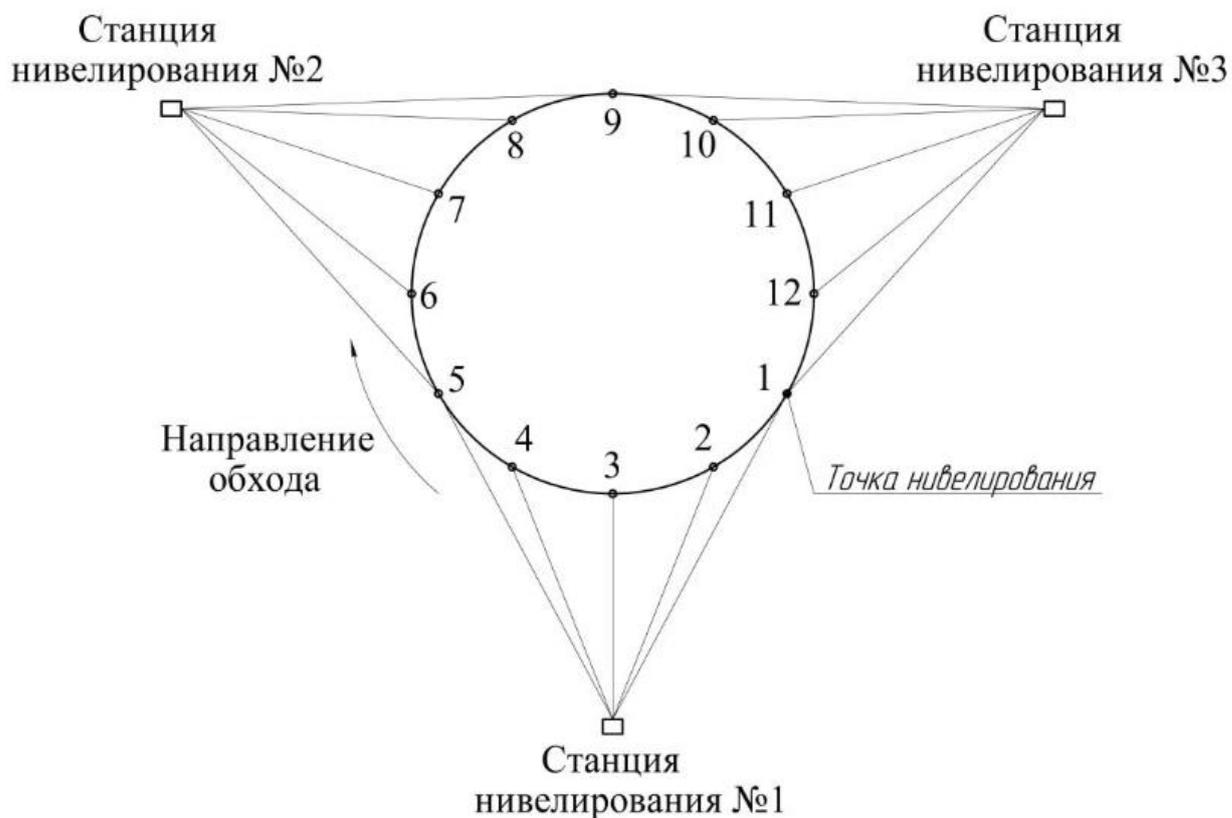


Рисунок 1.5 – Пример исполнительной схемы нивелирования наружного контура днища

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.

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 1.6.

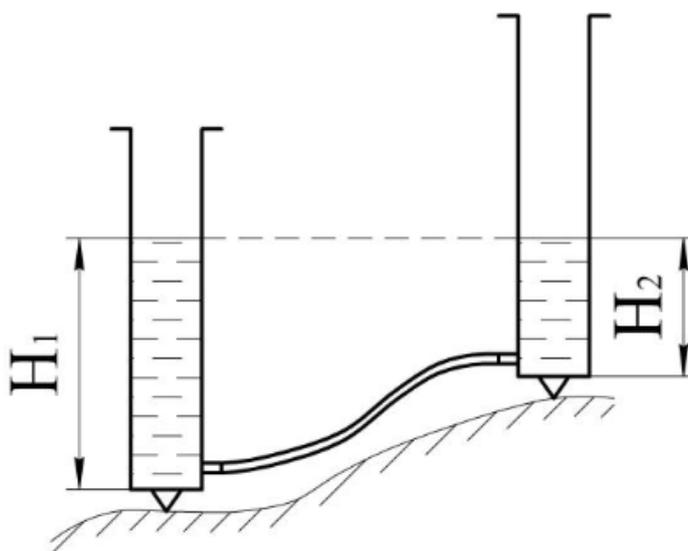


Рисунок 1.6 – Гидростатическое нивелирование

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.

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 1.7.

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 крайки 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 крайки 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;

- отклонения от вертикали образующих с шагом в 1 метр вправо и влево от образующей, имеющих 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 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 угадать, где начинается и заканчивается та или иная вмятина (выпучина), где стенка совпадает с вертикалью и т.д.

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

- б. 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 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).

Глава 2. Разработка методики оценки напряженно-деформированного состояния стенки резервуара методом конечных элементов

2.1. 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 2.1) 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 2.3 – 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 неизвестных 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 	<p>Удобство описания сложной геометрии</p> <p>Высокая точность решения на статочном удалении от границы тела</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Допускает широкую математическую и физическую трактовку 2. Простота и гибкость при описании сложной геометрии, единения конструкций различной размерности и сложных граничных условий 3. Различные пути увеличения точности расчетов 4. Удобство алгоритмизации вычисленных процессов
Основные недостатки	<ol style="list-style-type: none"> 1. Высокий порядок систем алгебраических уравнений 2. Узлы разностной сетки выходят за 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.

Для определения НДС строительных конструкций, в частности НДС стенки резервуара, наиболее удобным и эффективным является рассмотрение

статической задачи МКЭ в вариационной энергетической постановке Лагранжа (решение в перемещениях) как варианта метода Рэлея-Ритца. В этом случае разрешающее уравнение МКЭ может быть представлено в форме:

$$[\bar{K}]\{\bar{q}\} = \{\bar{P}\}, \quad (2.1)$$

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

$$[\bar{K}] = \begin{bmatrix} [\bar{K}]_1^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_1^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_1^{(m)} \\ [\bar{K}]_2^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_2^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_2^{(m)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ [\bar{K}]_j^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_j^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_j^{(m)} \\ [\bar{K}]_m^{(1)} & \dots & [\bar{K}]_m^{(k)} & \dots & [\bar{K}]_m^{(m)} \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

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 -го 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;

S – квазидиагональная матрица направляющих косинусов;

S – вектор узловых перемещений системы;

S – вектор узловых перемещений (перемещения и повороты в направлении соответствующих соей) k -го узла i -го КЭ.

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

1. Выбор КЭ наиболее подходящего для решения поставленной задачи. Аппроксимация конструкции выбранным 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.

2.2. 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]:

$$\frac{h}{R} < \frac{1}{20}, \quad (2.3)$$

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:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_y \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

Наличие средней части в выражении (2.4) объясняется существованием принципиально двухмерных теорий оболочек, учитывающих поперечный сдвиг.

В соответствии с выражением (2.3) вертикальные цилиндрические резервуары всех типоразмеров [92, 93, 94, 95, 96] относятся к тонким оболочкам (таблица 2.2). Таким образом, НДС стенки идеальных резервуаров (их строгое проектное положение) может быть определено на основании той или иной двухмерной 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 двухмерной (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]:

$$\frac{h}{l_n} \ll 1, \quad (2.5)$$

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 2.1):

$$u = u_0 + \sum_{n=1}^{k/2} u_n \cos[n(\beta - \theta_n)], \quad (2.5)$$

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.

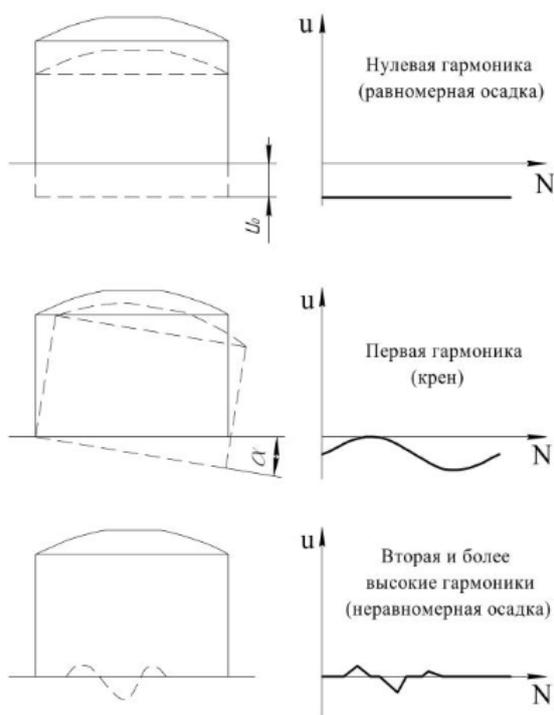


Рисунок 2.1 – Разложение осадки на гармоники

Из выражения (2.6) 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 крайки днища в независимости от типоразмера резервуара составляет 6 м (таблица 2.2). Данное обстоятельство следует из существующей сегодня методики геодезического обследования резервуаров, предусматривающей определения высотных отметок крайки днища в точках, отстающих 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 (2.6). Применительно к отклонениям образующих он примет вид:

Таблица 2.2 – Характеристика основных типоразмеров резервуаров

Объем резервуара	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 крайки днища l_n^2 , мм	6000	6000	6000	6000	6000
Длина полуволны вдоль образующей стенки l_n^B , мм	1490	1490	1490	1490	2250
Величина h/R	0,00086	0,00084	0,00080	0,00075	0,00089
Величина h/l_n^2	0,00150	0,00200	0,00267	0,00283	0,00450
Величина h/l_n^B	0,00600	0,00810	0,01070	0,01140	0,01200

$$w = w_1 + \sum_{n=1}^{k/2} w_n \cos(nx), \quad (2.7)$$

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 (2.7) 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 2.2).

Таким образом, из таблицы 2.2 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:

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

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

$$\text{Теория оболочек, учитывающая геом. поправку} - O\left(\frac{h}{R}\right)^{2-2\theta};$$

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

Другими словами, наименьшей погрешностью обладают теории оболочек, учитывающие влияние поперечного сдвига (сохраняют члены h^2/l_n^2 порядка малости). На рисунке 2.2 представлена схема внутренних сил и напряжений в элементе оболочки с учетом влияния поперечного сдвига.

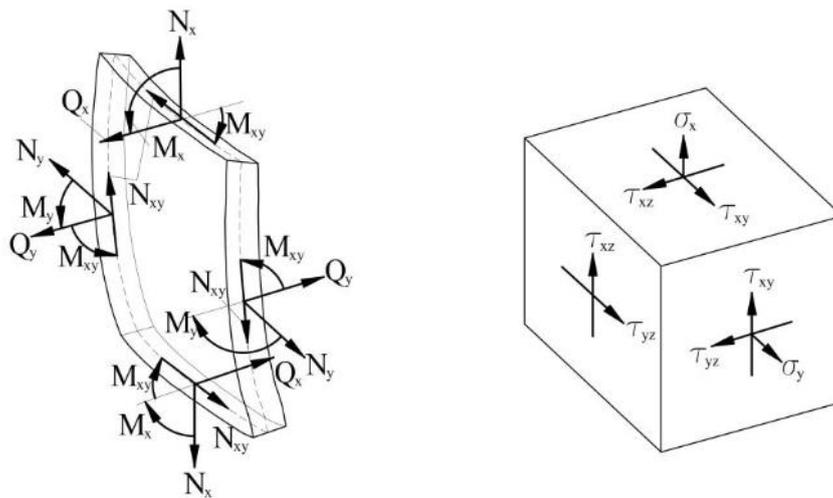


Рисунок 2.2 – Схема внутренних сил и напряжений в оболочке с учетом влияния поперечного сдвига

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 2.3):

- Основан на теории оболочек Миндлина-Рейсснера, учитывающей влияние поперечного сдвига;
- Четырехузловой (узлы располагаются на срединной плоскости);
- Четырехугольный;
- Вектор его узловых перемещений имеет вид:

$$\{\bar{q}\}_i = \left\{ \{q\}_i^{(1)} \{q\}_i^{(2)} \{q\}_i^{(3)} \{q\}_i^{(4)} \right\}, \quad (2.8)$$

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

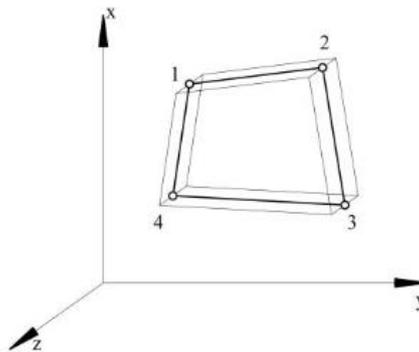


Рисунок 2.3 – Четырехузловой четырехугольный плоский КЭ

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 2.4. 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).

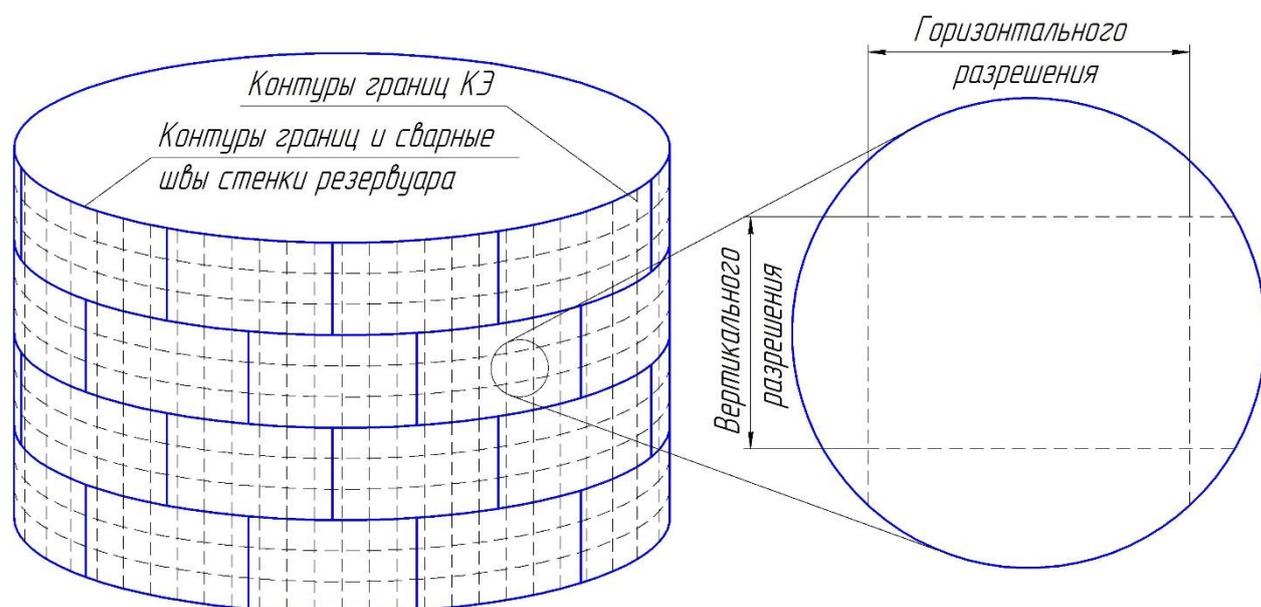


Рисунок 2.4 – Схема аппроксимации поверхности стенки резервуара конечными элементами

2.3. Определение компонентов разрешающего уравнения для стенки резервуара

Определим компоненты матрицы жесткости системы, входящий в разрешающее уравнение МКЭ (2.1). Блок матрица жесткости выбранного i -го КЭ в форме прямоугольника имеет следующий вид:

$$[K]_{ij}^{(k)} = \begin{bmatrix} [K_{pl}]_{ij}^{(k)} & 0 & 0 \\ 0 & [K_p]_{ij}^{(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-3} \max(K_{ij}^{(k)}) \end{bmatrix}, \quad (2.9)$$

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

$$[K_{pl}]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega} \left([B^{pl}]^{(j)} \right)^T [D^{pl}] [B^{pl}]^{(k)} d\Omega, \quad (2.10)$$

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

$$[K_p]_{ij}^{(k)} = [K_C]_{ij}^{(k)} + [K_S]_{ij}^{(k)}, \quad (2.11)$$

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

$$[K_C]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega} \left([B^c]^{(j)} \right)^T [D^c] [B^c]^{(k)} d\Omega, \quad (2.12)$$

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

$$[K_S]_{ij}^{(k)} = \int_{\Omega} \left([B^s]^{(j)} \right)^T [D^s] [B^s]^{(k)} d\Omega, \quad (2.13)$$

$10^{-3} \max(K_{ij}^{(k)})$ – 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 (2.10), (2.12) и (3.13) входят компоненты, определяемые следующими выражениями:

$$[D^{pl}] = \frac{Eh_i}{1-\mu^2} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.14)$$

$$[D^c] = \frac{Eh_i^3}{12(1-\mu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \mu & 0 \\ \mu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\mu^2}{2} \end{bmatrix}, \quad (2.15)$$

$$[D^s] = \frac{kEh_i}{2(1+\mu)} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2.16)$$

$$[B^{pl}]^{(k)} = \begin{bmatrix} \partial C_k / \partial x & 0 \\ 0 & \partial C_k / \partial y \\ \partial C_k / \partial y & \partial C_k / \partial x \end{bmatrix}, \quad (2.17)$$

$$[B^c]^{(k)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \partial C_k / \partial x \\ 0 & \partial C_k / \partial y & 0 \\ 0 & \partial C_k / \partial x & \partial C_k / \partial y \end{bmatrix}, \quad (2.18)$$

$$[B^s] = \begin{bmatrix} \partial C_k / \partial x & 0 & C_k \\ \partial C_k / \partial y & -C_k & 0 \end{bmatrix}, \quad (2.19)$$

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 (2.17), (2.18) и (2.19) в качестве интерполяционной функции используется линейный интерполяционный полином Лагранжа, имеющий следующий вид:

$$C_k(\xi, \eta) = \frac{1}{4} (1 + \xi_k \xi) (1 + \eta_k \eta), \quad (2.20)$$

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 2.5). Для перехода от нормализованной к декартовой системе координат также используются линейные интерполяционные полиномы Лагранжа, определяемые выражением (2.20).

С учетом (2.20) переход от местных нормализованных координат к общим декартовым производится по формулам:

$$\begin{cases} x = \sum_{k=1}^4 C_k(\xi, \eta) x_k \\ y = \sum_{k=1}^4 C_k(\xi, \eta) y_k \end{cases}, \quad (2.21)$$

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

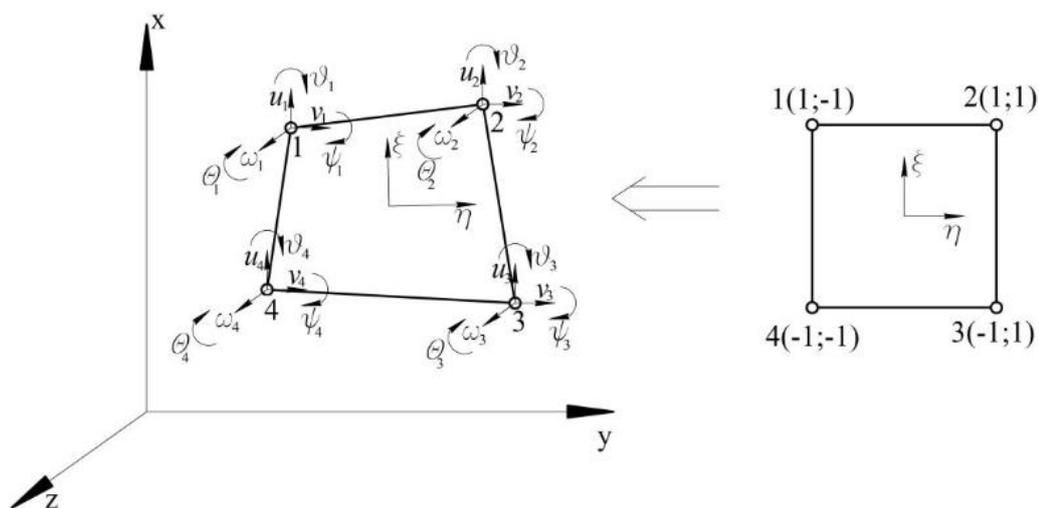


Рисунок 2.5 – Расчетная схема КЭ в общей и местной нормализованной системах координат

С учетом местной нормализованной системы координат ξ - η выражения (2.10), (2.12), (2.13) примут вид:

$$\left[K_{pl} \right]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\left[B^{pl} \right]^{(j)} \right)^T \left[D^{pl} \right] \left[B^{pl} \right]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (2.22)$$

$$\left[K_c \right]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\left[B^c \right]^{(j)} \right)^T \left[D^c \right] \left[B^c \right]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (2.23)$$

$$\left[K_s \right]_{ij}^{(k)} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \left(\left[B^s \right]^{(j)} \right)^T \left[D^s \right] \left[B^s \right]^{(k)} |J| d\xi d\eta, \quad (2.24)$$

где $|J|$ – определитель матрицы Якоби.

Матрица Якоби используется для перехода от местной нормализованной системы координат к декартовой системе координат. Для ее получения рассмотрим функции (2.21) 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

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_k}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix}, \quad (2.25)$$

где J – искомая матрицы Якоби.

С учетом выражения (2.21) матрица Якоби примет вид:

$$\begin{aligned} J = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \xi} & \frac{\partial y}{\partial \xi} \\ \frac{\partial x}{\partial \eta} & \frac{\partial y}{\partial \eta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} x_k & \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} y_k \\ \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} x_k & \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} y_k \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{\partial C_1}{\partial \xi} & \frac{\partial C_2}{\partial \xi} & \frac{\partial C_3}{\partial \xi} & \frac{\partial C_4}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_1}{\partial \eta} & \frac{\partial C_2}{\partial \eta} & \frac{\partial C_3}{\partial \eta} & \frac{\partial C_4}{\partial \eta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (2.26)$$

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 (2.26) находится определитель матрицы Якоби (якобиан).

Раскрыв скобки и упростив выражение, получим:

$$\begin{aligned} |J| &= J_{11}J_{22} - J_{12}J_{21} = \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} x_k \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} y_k - \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \xi} y_k \sum_{k=1}^4 \frac{\partial C_k}{\partial \eta} x_k = \\ &= \frac{1}{16}(K_0 + \eta K_1 + \xi K_2 + \xi \eta K_3), \end{aligned} \quad (2.27)$$

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

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

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

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

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

Частные производные полиномов C_k входящие в (2.17), (2.18) и (2.19) могут быть найдены из выражения (2.25):

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = J^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial \xi} \\ \frac{\partial C_k}{\partial \eta} \end{bmatrix}, \quad (2.28)$$

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

$$J^{-1} = \frac{1}{|J|} \begin{bmatrix} J_{22} & -J_{12} \\ -J_{21} & J_{11} \end{bmatrix}. \quad (2.29)$$

Подставив в (2.28) выражение (2.29) и проведя соответствующие упрощения, получим:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial C_k}{\partial x} \\ \frac{\partial C_k}{\partial y} \end{bmatrix} = \frac{1}{|J|} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{16}(K_4 + \xi K_5 + \eta K_6 + \xi \eta K_7) \\ \frac{1}{16}(K_8 + \xi K_9 + \eta K_{10} + \xi \eta K_{11}) \end{bmatrix}, \quad (2.30)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

Таким образом, определены все необходимые компоненты блока матрицы жесткости КЭ. Для составления общей матрицы жесткости (2.2) всей поверхности стенки резервуара необходимо выразить квазидиагональную матрицу направляющих косинусов по формуле:

$$[M] = \begin{bmatrix} [m] & 0 \\ 0 & [m] \end{bmatrix}, \quad (2.31)$$

где $[m]$ – матрица направляющих косинусов

$$[m] = \begin{bmatrix} m_{x'x} & m_{x'y} & m_{x'z} \\ m_{y'x} & m_{y'y} & m_{y'z} \\ m_{z'x} & m_{z'y} & m_{z'z} \end{bmatrix}. \quad (2.32)$$

Для получения матрицы направляющих косинусов (2.32) 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 2.3). Тогда косинусы углов между координатными осями общей системы координат $x-y-z$ и координатной осью x' будут равны:

$$m_{x'x} = \frac{X_{14}}{L_{14}}, \quad m_{x'y} = \frac{Y_{14}}{L_{14}}, \quad m_{x'z} = \frac{Z_{14}}{L_{14}}, \quad (2.33)$$

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

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

$$L_{14} = \sqrt{X_{14}^2 + Y_{14}^2 + Z_{14}^2}, \quad (2.34)$$

$$X_{14} = x_1 - x_4, \quad Y_{14} = y_1 - y_4, \quad Z_{14} = z_1 - z_4. \quad (2.35)$$

Для получения третьей строки матрицы направляющих косинусов (2.32) рассмотрим вектор $\overrightarrow{L_z}$, образуемый векторным произведением $\overrightarrow{V_{14}} \times \overrightarrow{V_{34}}$ (рисунок 2.3). Направление данного вектора будет совпадать с направлением координатной оси z' . Тогда:

$$m_{z'x} = \frac{X_z}{L_z}, \quad m_{z'y} = \frac{Y_z}{L_z}, \quad m_{z'z} = \frac{Z_z}{L_z}, \quad (2.36)$$

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

X_z, Y_z, Z_z – компоненты вектора \vec{L}_z , определяемые выражениями:

$$L_z = \sqrt{X_z^2 + Y_z^2 + Z_z^2}, \quad (2.37)$$

$$X_z = Y_{14} Z_{34} - Z_{14} Y_{34}, \quad Y_z = Z_{14} X_{34} - X_{14} Z_{34}, \quad Z_z = X_{14} Y_{34} - Y_{14} X_{34}, \quad (2.38)$$

$$X_{34} = x_3 - x_4, \quad Y_{34} = y_3 - y_4, \quad Z_{34} = z_3 - z_4. \quad (2.39)$$

Косинусы углов между координатными осями общей системы координат x - y - z и координатной осью y' могут быть найдены из векторного произведения $\vec{L}_y = \vec{V}_{34} \times \vec{L}_z$:

$$m_{y'x} = \frac{Y_{14} Z_z - Z_{14} Y_z}{L_y}, \quad m_{y'y} = \frac{Z_{14} X_z - X_{14} Z_z}{L_y}, \quad m_{y'z} = \frac{X_{14} Y_z - Y_{14} X_z}{L_y}, \quad (2.40)$$

где L_y – длина вектора \vec{L}_y .

Определив для каждого КЭ системы значения выражения (2.33), (2.36) и (2.40), могут быть найдены матрицы направляющих косинусов (2.31) и (2.32) для каждого КЭ соответственно. На их основании для каждого КЭ составляется общая матрица жесткости системы (2.2).

На рисунке 3.6 представлена принятая расчетная схема стенки резервуара. Из расчетной схемы видно, что уторный узел рассматривается как жестко заземленный, а соединение стенки с крышей допускает только вертикальное перемещение. Данные условия являются граничными для рассматриваемой модели и задаются в разрешающем уравнении (2.1) следующим образом:

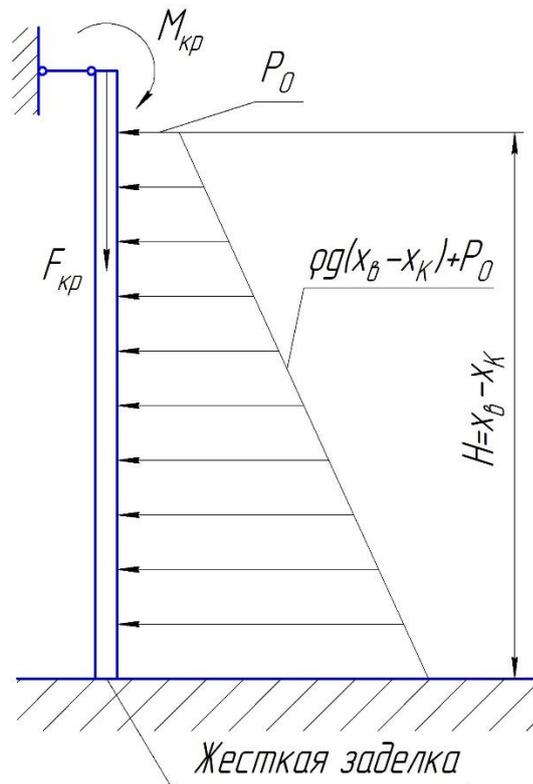


Рисунок 2.6 – Расчетная схема стенки резервуара

– узловые перемещения узлов КЭ, образующих уторный узел, равны нулю в следствие принятого допущения о модели взаимодействия днища со стенкой как жесткой заделки. В уравнении (2.1) это выражается следующим образом:

$$\{q\}_i^{(ут.узла)} = \begin{bmatrix} u_{\text{утор.узл.}} \\ v_{\text{утор.узл.}} \\ \omega_{\text{утор.узл.}} \\ \vartheta_{\text{утор.узл.}} \\ \psi_{\text{утор.узл.}} \\ \theta_{\text{утор.узл.}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.41)$$

– 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 (2.1) это выражается следующим образом:

$$\{q\}_i^{(ст.-кр.)} = \begin{bmatrix} u_{ст.-кр.} \\ v_{ст.-кр.} \\ \omega_{ст.-кр.} \\ \vartheta_{ст.-кр.} \\ \psi_{ст.-кр.} \\ \theta_{ст.-кр.} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_{ст.-кр.} \\ 0 \\ 0 \\ \theta_{ст.-кр.} \end{bmatrix}. \quad (2.42)$$

Вектора узловых внешних сил, действующие в k -ом узле i -го элемента, образующие вектор внешних узловых сил разрешающего уравнения (2.1), могут быть найдены по формуле:

$$\{P\}^{(k)} = \sum \{P\}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} P_u \\ P_v \\ P_\omega \\ M_\vartheta \\ M_\psi \\ M_\theta \end{bmatrix} = \sum \{P_V\}_i^{(k)} + \sum \{P_S\}_i^{(k)} + \sum \{P_{кр}\}_i^{(k)}, \quad (2.43)$$

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 i -го 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 -го КЭ;

$\{P_{кр}\}_i^{(k)}$ – 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:

$$\begin{aligned} \{P_V\}_i^{(k)} &= \iiint_{V_i} C_k(x, y, z) \{G_V\} dx dy dz = \{G_V\}_i \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{1}{4} (1 + \xi \xi_k) (1 + \eta \eta_k) |J| d\xi d\eta = \\ &= \{G_V\}_i \frac{h_i}{12} \left(K_0 + \frac{1}{3} \eta_k K_1 + \frac{1}{3} \xi_k K_2 + \frac{1}{6} \xi_k \eta_k K_3 \right), \end{aligned} \quad (2.44)$$

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

$$\{G_V\} = \{-\rho \cdot g \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\},$$

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:

$$\{P_S\}_i^{(k)} = \{T_S\} \iint_{\Delta_i} C_k(x, y, z) q dx dy = \{T_S\} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 C_k(\xi, \eta) q |J| d\xi d\eta, \quad (2.45)$$

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

$C_k(\xi, \eta)$ – интерполяционная функция, определяемая выражением (2.20);

$|J|$ – определитель матрицы Якоби.

q – распределенная по поверхности нагрузка:

$$q = p_0 + \rho_n g (x_в - x),$$

где p_0 – избыточное давление внутри резервуара;

ρ_n – плотность продукта;

$x_в$ – высотная координата уровня взлива в общей системе координат;

x – высотная координата рассматриваемой точки.

После нахождения $\{P_S\}_i^{(k)}$ необходимо перевести в общую систему координат, домножив на квазидиагональную матрицу (2.31).

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

$$\left\{ P_{кр} \right\}_i^{(k)} = \begin{bmatrix} -\frac{M_{кр} l_i g}{2L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{M_{кр} l_i g}{2L} e \cdot m_{y'y} \\ \frac{M_{кр} l_i g}{2L} e \cdot m_{z'z} \end{bmatrix}, \quad (2.46)$$

где $M_{кр}$ – масса крыши;

l_i – длина ребра i -го 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 -го КЭ, по формулам (2.44), (2.45) и (2.46), можно составить общий вектор внешних узловых сил, действующих на k -ый узел (2.43).

2.4. Расчет НДС стенки резервуара аналитическим и численным методами

Рассчитаем аналитически значения радиальных перемещений по высоте стенки идеального резервуара (в его строгом проектном положении) объемом 10000 м³ согласно действующей нормативно-технической документации, ГОСТ 31385-2016 [1], методика расчетов которого, описаны в параграфе 1.3 и численно методом конечных элементов согласно уравнениям, разработанными в параграфах 2.2 и 2.3. Расчет методом конечных элементов реализован в программном комплексе ANSYS. Для расчета в ANSYS в качестве КЭ выбран SHELL181, при соответствующих настройках идентичный выбранному ранее КЭ. Все разработанные в параграфе 2.3 граничные условия и силовые нагрузки задаются в программном комплексе. Исходные данные для расчета представлены ниже и в таблице 2.3:

- Плотность нефтепродукта $\rho_n = 900$ кг/м³;

- Радиус резервуара $r = 17,1$ м;
- Высота налива продукта $H = 11,2$ м;
- Высота поясов – 1,5 м;
- Материал – Ст3сп5 (аналог стали С245).

Таблица 2.3 – Толщины поясов

Номер пояса	1	2	3	4-8
Толщина пояса h_i , мм	13	11	10	9

Проверка стенки на прочность

Проверочный расчет на прочность поясов стенки резервуара осуществляется в соответствии с ГОСТ 31385-2016 [1], по формуле:

$$\left(\sigma_1^2 - \sigma_1 \cdot \sigma_{2k} + \sigma_{2k}^2 \right)^{0,5} \leq R, \quad (2.47)$$

где σ_{2k} – кольцевое напряжение, МПа вычисляемое для нижней точки каждого пояса по формуле:

$$\sigma_{2k} = \left[0,001 \rho g (H - x_L) + 1,2p \right] \frac{r}{t_{ir}}, \quad (2.48)$$

где ρ – плотность продукта, равная 0,9 т/м³;

g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с²;

H – высота налива продукта при эксплуатации, $H = 11,2$ м;

x_L – расстояние от дна до нижней кромки i – го пояса, м;

p – нормативное избыточное давление в газовом пространстве, МПа, определяемое по таблице 3.3 в соответствии с документом РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04 [8];

r – радиус срединной поверхности стенки резервуара, $r = 17,1$ м;

t_{ir} – расчетная толщина i – го пояса, м;

Вычислим кольцевое напряжение для нижней точки первого пояса РВС, используя формулу (2.48):

$$\sigma_{2k_1} = \left[0,001 \cdot 0,9 \cdot 9,81 \cdot (11,2 - 0) + 1,2 \cdot 0,002 \right] \cdot \frac{17,1}{0,013} = 133,23 \text{ (МПа)}.$$

Аналогичным способом вычисляем кольцевые напряжения для остальных поясов стенки и, для удобства, занесем их в таблицу 2.4:

Таблица 2.4 – Кольцевые напряжения нижних точек поясов резервуара

№ пояса	σ_{2k_i} , МПа
1	133,23
2	136,86
3	127,90
4	116,95
5	91,79
6	66,63
7	41,47
8	16,30

Меридиональные напряжения σ_1 , МПа, в i – м поясе стенки для резервуаров со стационарной крышей определяются по формуле

$$\sigma_{1i} = \frac{1,05G_M + 1,05\psi_1 G_O + 1,3\psi_2 G_t}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7c_e p_s + 1,2\psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}, \quad (2.49)$$

где G_M – вес металлоконструкции выше расчетной точки, МН;

G_O – вес стационарного оборудования выше расчетной точки, МН;

G_t – вес теплоизоляции выше расчетной точки, МН;

p_s – расчетная снеговая нагрузка на поверхности земли, МПа, определяемая по СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» [4];

p_v – нормативное значение вакуума, МПа, определяемое по таблице 3.3 в соответствии с документом РД-23.020.00-КТН-018-14;

$c_e = 0,85$ при $D \leq 60$ м;

r – радиус резервуара, м;

ψ_1, ψ_2, ψ_3 – коэффициенты сочетаний соответственно для длительных и кратковременных нагрузок, назначаемые в соответствии с пп. 6.2-6.4 СП 20.13330.2016 [4].

Примем вес теплоизоляции равным нулю, тогда формула примет вид:

$$\sigma_{li} = \frac{1,05G_M + 1,05\psi_1 G_O}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7c_e p_s + 1,2\psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}. \quad (2.50)$$

Вес металлоконструкции выше расчетной точки складывается из массы стенки и крыши по формуле:

$$G_M = G_{M, \text{стенки}} + G_{M, \text{крыши}}, \quad (2.51)$$

где $G_{M, \text{стенки}}$ – вес металлоконструкции стенки выше расчетной точки, МН;

$G_{M, \text{крыши}}$ – вес металлоконструкции крыши выше расчетной точки, МН;

Вес каждого пояса определяется по формуле:

$$G_{M, \Pi_i} = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot h_l \cdot t_i \cdot \rho_{ст} \cdot g, \quad (2.52)$$

где r – радиус резервуара;

h_l – высота листа;

t_i – номинальная толщина стенки i – го пояса, м;

$\rho_{ст}$ – плотность стали, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с².

Вес металлоконструкции стенки выше расчетной точки определяется по формуле:

$$G_{M, \text{стенки}_i} = \sum_{k=i}^8 G_{M, \Pi_k}. \quad (2.53)$$

Подставляя значения в формулу (2.52), определим вес каждого пояса стенки:

$$G_{M, \Pi_1} = 2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 1,5 \cdot 0,013 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 0,1613 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \Pi_2} = 2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 1,5 \cdot 0,011 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 0,1365 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \Pi_3} = 2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 1,5 \cdot 0,010 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 0,1241 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \Pi_{4-8}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 1,5 \cdot 0,009 \cdot 7850 \cdot 9,81 = 0,1117 \text{ (МН)}.$$

Зная вес каждого пояса, вычислим вес металлоконструкции стенки выше расчетных точек по формуле (2.53):

$$G_{M, \text{стенки}_1} = 0,1613 + 0,1365 + 0,1241 + 5 \cdot 0,1117 = 0,9804 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_2} = 0,1365 + 0,1241 + 5 \cdot 0,1117 = 0,8191 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_3} = 0,1241 + 5 \cdot 0,1117 = 0,6826 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_4} = 5 \cdot 0,1117 = 0,5585 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_5} = 4 \cdot 0,1117 = 0,4468 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_6} = 3 \cdot 0,1117 = 0,3351 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_7} = 2 \cdot 0,1117 = 0,2234 \text{ (МН)};$$

$$G_{M, \text{стенки}_8} = 0,1117 \text{ (МН)}.$$

Вес металлоконструкции крыши равен $G_{M, \text{крыши}} = 0,771$ МН, тогда, по формуле (2.51) имеем:

$$G_{M_1} = 0,9804 + 0,771 = 1,7514 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_2} = 0,8191 + 0,771 = 1,5901 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_3} = 0,6826 + 0,771 = 1,4536 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_4} = 0,5585 + 0,771 = 1,3295 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_5} = 0,4468 + 0,771 = 1,2178 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_6} = 0,3351 + 0,771 = 1,1061 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_7} = 0,2234 + 0,771 = 0,9944 \text{ (МН)};$$

$$G_{M_8} = 0,1117 + 0,771 = 0,8827 \text{ (МН)}.$$

Масса стационарного оборудования складывается из массы лестницы, площадок на крыше и комплектующих конструкций и рассчитывается по формуле:

$$G_O = G_{O, \text{лестницы}} + G_{O, \text{площадок}} + G_{O, \text{кк}} \quad (2.54)$$

Рассчитаем массу стационарного оборудования по формуле (2.54):

$$G_O = 0,059 + 0,012 + 0,029 = 0,1 \text{ (МН)}.$$

Нормативное значение снеговой нагрузки следует определять по формуле:

$$p_s = 0,7 c_e c_t \mu S_g \quad (2.55)$$

где c_e – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий под действием ветра или иных факторов, принимаемый в соответствии с 10.5-10.9 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [4].

c_t – термический коэффициент, принимаемый в соответствии с п. 10.10 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [4].

μ – коэффициент перехода от веса снегового покрова земли к снеговой нагрузке на покрытие, принимаемый в соответствии с 10.4 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [4].

S_g – вес снегового покрова на 1 м² горизонтальной поверхности земли, принимаемый в соответствии 10.2 СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия [4].

Нормативное значение снеговой нагрузки по формуле (2.55):

$$p_s = 0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,8 \cdot 1 \cdot 2,4 = 0,00114 \text{ (МПа)}.$$

Вычислим меридиональные напряжения для каждого из поясов по формуле (2.50):

$$\sigma_{1,1} = \frac{1,05 \cdot 1,7514 + 1,05 \cdot 0,95 \cdot 0,1}{2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 0,013} + \frac{1,4 \cdot 0,7 \cdot 0,85 \cdot 0,00114 + 1,2 \cdot 0,9 \cdot 0,00025}{0,013} \cdot \frac{17,1}{2} = 2,19 \text{ (МПа)}.$$

Аналогично вычисляем меридиональные напряжения для остальных поясов стенки и занесем в таблицу 2.5:

Таблица 2.5 – Меридиональные напряжения нижних точек поясов резервуара

№ пояса	$\sigma_{1,i}$, МПа
1	2,19
2	2,45
3	2,56
4	2,71
5	2,58
6	2,46
7	2,34
8	2,22

Подставляя значения в формулу (2.47), проверим на условие прочности каждый пояс стенки резервуара:

Таблица 2.6 – Условие прочности для каждого пояса стенки

Номер пояса	Условие прочности, МПа
1	$\left(2,19^2 - 2,19 \cdot 133,23 + 133,23^2 \right)^{0,5} \leq 159$ $132,2 \leq 159$
2	$\left(2,45^2 - 2,45 \cdot 136,86 + 136,86^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $135,7 \leq 182$
3	$\left(2,56^2 - 2,56 \cdot 127,90 + 127,90^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $126,7 \leq 182$
4	$\left(2,71^2 - 2,71 \cdot 116,95 + 116,95^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $115,7 \leq 182$
5	$\left(2,58^2 - 2,58 \cdot 91,79 + 91,79^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $90,5 \leq 182$
6	$\left(2,46^2 - 2,46 \cdot 66,63 + 66,63^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $65,4 \leq 182$
7	$\left(2,34^2 - 2,34 \cdot 41,47 + 41,47^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $40,4 \leq 182$
8	$\left(2,22^2 - 2,22 \cdot 16,30 + 16,30^2 \right)^{0,5} \leq 182$ $15,3 \leq 182$

Условие прочности для всех поясов стенки резервуара выполняется.

Проверка стенки на устойчивость

Устойчивость стенки для основных сочетаний нагрузок (вес конструкций и теплоизоляции, вес снегового покрова, ветровая нагрузка, относительный вакуум в газовом пространстве) проверяется по формуле:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}} \leq 1, \quad (2.55)$$

где σ_1, σ_2 – меридиональные (вертикальные) и кольцевые напряжения в срединной поверхности каждого пояса стенки, МПа, определяемые от действия указанных нагрузок в соответствии с требованиями действующих нормативных документов*;

* На территории РФ действует СП 16.13330.2017 “СНиП II-23-81* Стальные конструкции”.

$\sigma_{cr1}, \sigma_{cr2}$ – критические меридиональные и кольцевые напряжения, МПа, получаемые по формулам:

$$\sigma_{cr1} = C_0 \frac{E}{\delta}, \quad \sigma_{cr2} = 0,55 \frac{r}{H_r} \cdot \frac{E}{\sqrt{\delta^3}}, \quad \delta = \frac{r}{t_{min}}, \quad (2.56)$$

$$C_0 = \begin{cases} 0,04 + 40/\delta & \text{при } 400 \leq \delta < 1200; \\ 0,085 - 10^{-5} \delta & \text{при } 1220 \leq \delta < 2500; \\ 0,065 - 2 \cdot 10^{-6} \delta & \text{при } 2500 \leq \delta < 5000. \end{cases}, \quad (2.57)$$

$$H_r = \sum_{i=1}^n h_i \left(\frac{t_{min}}{t_i} \right)^{2,5}, \quad (2.58)$$

где E – модуль упругости стали, МПа;

t_{min} – толщина самого тонкого пояса стенки (как правило, верхнего), представляющая его номинальную толщину за вычетом припуска на коррозию и минусового допуска на прокат, м;

H_r – редуцированная высота стенки, м;

n – количество поясов стенки;

h – высота пояса, м;

индекс i в обозначениях указывает на принадлежность соответствующей величины к i – му поясу стенки.

Рассчитаем безразмерный параметр δ по формуле (2.56):

$$\delta = \frac{17,1}{0,009} = 1900.$$

Исходя из полученного значения δ , следует, что C_0 определяется по второй формуле из (2.57):

$$C_0 = 0,085 - 1900 \cdot 10^{-5} = 0,06.$$

Вычислим критическое меридиональное напряжение, используя формулу (2.56):

$$\sigma_{cr1} = 0,06 \cdot \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{1900} = 7,3 \text{ (МПа)}.$$

Найдем редуцированную высоту стенки резервуара по формуле (2.58):

$$H_r = 1,49 \left(\frac{0,009}{0,013} \right)^{2,5} + 1,49 \left(\frac{0,009}{0,011} \right)^{2,5} + 1,49 \left(\frac{0,009}{0,010} \right)^{2,5} + 5 \cdot 1,49 \left(\frac{0,009}{0,009} \right)^{2,5} = 10,16 \text{ (м)}.$$

Критическое кольцевое напряжение σ_{cr2} по формуле (2.56) будет равна:

$$\sigma_{cr2} = 0,55 \cdot \frac{17,1}{10,16} \cdot \frac{2,1 \cdot 10^{11}}{\sqrt{1900}} = 2,35 \text{ (МПа)}.$$

При расчете на устойчивость меридиональные и кольцевые напряжения будут определяться по следующим формулам:

Меридиональные напряжения σ_{1i} , МПа, в i – м поясе стенки для резервуаров со стационарной крышей определяются по формуле:

$$\sigma_{1i} = \frac{1,05G_M + 1,05\psi_1 G_O + 1,3\psi_2 G_t}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7\psi_1^c e p_s + 1,2\psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}. \quad (2.59)$$

Примем вес теплоизоляции равным нулю, тогда формула примет вид:

$$\sigma_{1i} = \frac{1,05G_M + 1,05\psi_1 G_O}{2\pi \cdot r \cdot t_{ir}} + \frac{1,4 \cdot 0,7\psi_1^c e p_s + 1,2\psi_3 p_v}{t_{ir}} \cdot \frac{r}{2}. \quad (2.60)$$

И сразу же определим меридиональные напряжения для каждого из поясов стенки в соответствии с формулой (2.60):

$$\sigma_{1,1} = \frac{1,05 \cdot 1,7514 + 1,05 \cdot 0,95 \cdot 0,1}{2 \cdot 3,14 \cdot 17,1 \cdot 0,013} + \frac{1,4 \cdot 0,7 \cdot 0,95 \cdot 0,85 \cdot 0,00114 + 1,2 \cdot 0,9 \cdot 0,00025}{0,013} \cdot \frac{17,1}{2} = 2,16$$

(МПа).

Аналогично вычисляем меридиональные напряжения для остальных поясов стенки и запишем в таблицу 2.7:

Таблица 2.7 – Меридиональные напряжения нижних точек поясов резервуара

№ пояса	$\sigma_{1,i}$, МПа
1	2,16
2	2,41
3	2,52
4	2,66
5	2,54
6	2,42
7	2,30
8	2,18

Кольцевое напряжение σ_2 в резервуарах со стационарной крышей зависит от p_v и эквивалентного ветрового внешнего давления p_w :

$$\sigma_{2i} = (1,2 \cdot \psi_{t3} \cdot p_v + 0,5 \cdot \psi_{t2} \cdot p_w) \cdot \delta, \quad (2.61)$$

где p_w – нормативное значение ветрового давления (МПа), представляющего сумму средней и пульсационной составляющих и определяемое по п. 11.1.2 СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия».

Рассчитаем кольцевое напряжение в i – ом поясе стенки по формуле (2.61):

$$\sigma_{2i} = (1,2 \cdot 0,95 \cdot 0,00025 + 0,5 \cdot 0,9 \cdot 0,00048) \cdot 1900 = 0,95 \text{ (МПа)}.$$

Проверим условие устойчивости для всех поясов стенки резервуара, т.е. выполнение неравенства (2.55):

Таблица 2.8 – Условие устойчивости для каждого пояса стенки

Номер пояса	Условие устойчивости
1	$\frac{2,16}{7,3} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,70 \leq 1$
2	$\frac{2,41}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,70 \leq 1$
3	$\frac{2,52}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,67 \leq 1$
4	$\frac{2,66}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,68 \leq 1$
5	$\frac{2,54}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,67 \leq 1$
6	$\frac{2,42}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,66 \leq 1$
7	$\frac{2,30}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,64 \leq 1$
8	$\frac{2,18}{9,6} + \frac{0,95}{2,35} \leq 1$ $0,63 \leq 1$

Условие устойчивости для всех поясов стенки выполняется. Толщины поясов стенки резервуара корректировке не требуются. Установка колец жесткости не требуется.

Расчет на жесткость

Относительная окружная деформация для цилиндрической оболочки вычисляется по закону Гука:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} (\sigma_{2k} - \mu\sigma_1) \quad (2.62)$$

где σ_{2k} – кольцевое напряжение;
 σ_1 – меридиональное напряжение;
 E – модуль упругости.
 $\mu = 0,3$ – коэффициент Пуассона.

Но с другой стороны относительная окружная деформация:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta l}{l} = \frac{2\pi R - 2\pi(R-w)}{2\pi R} = \frac{w}{R} \quad (2.63)$$

Приравняв выражения (3.21) и (3.22), найдем радиальное перемещение:

$$w = \frac{R}{E} \cdot (\sigma_{2k} - \mu\sigma_1) \quad (2.64)$$

где R – радиус оболочки, м;
 E – модуль упругости, МПа;
 σ_{2k} – кольцевое напряжение, МПа;
 σ_1 – меридиональное напряжение, МПа.

По формуле (2.64) проведем расчет стенок на жесткость и определим окружные деформации:

Для 1-го пояса:

$$w_1 = \frac{17,1}{2,1 \cdot 10^{11}} \cdot (154,64 - 0,3 \cdot 2,54) \cdot 10^6 = 0,01153 \text{ (м)}$$

Аналогично вычисляем окружные деформации для остальных поясов и занесем их результаты в таблицу 2.9:

Таблица 2.9 – Радиальные перемещения нижних точек поясов резервуара

№ пояса	w_i , мм
1	11,53
2	10,8
3	9,7
4	8,1
5	6,1

6	4,6
7	3,1
8	1,2

Решение в программном комплексе ANSYS

Численный расчет напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов выполним в программном комплексе ANSYS.

При решении задачи использовались следующие граничные условия:

- 1) Фиксированное крепление днища;
- 2) Гидростатическое давление, $\rho=0,9 \text{ т/м}^3$;
- 3) Действие веса металлоконструкции, $g=9,81 \text{ кг/мс}^2$;
- 4) Снеговая нагрузка – 1140 Па по Томской области. Расчетная снеговая нагрузка на поверхности земли. Определяется по СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»;
- 5) Ветровая нагрузка – 480 Па по Томской области. Нормативное значение ветрового давления представляющая сумму средней и пульсационной составляющих. Определяется по п. 11.1.2 СП 20.13330.2016 «Свод правил «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия»;
- 6) Температурное поле не меняется и равна 22 °С.

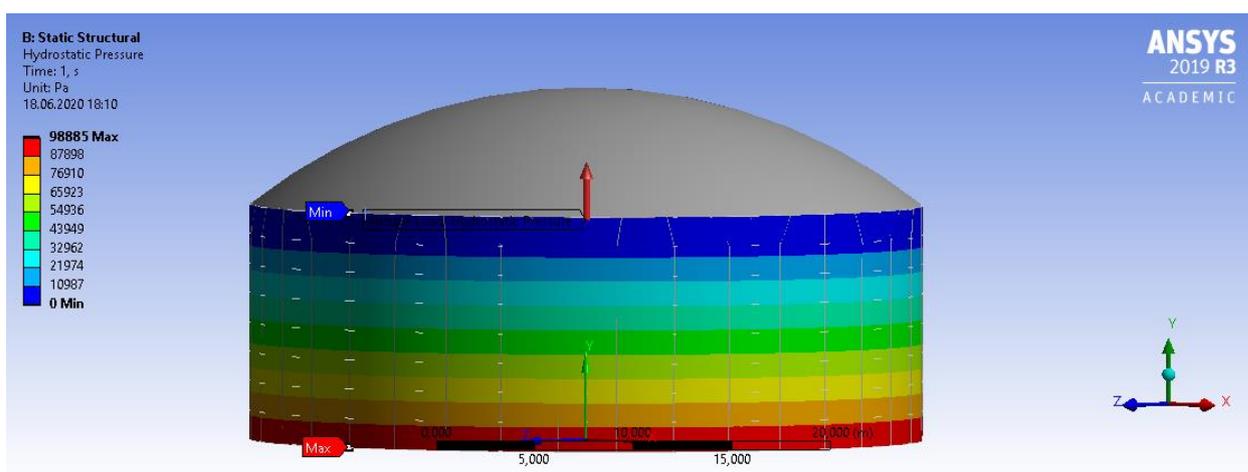


Рисунок 2.7 – Гидростатическое давление

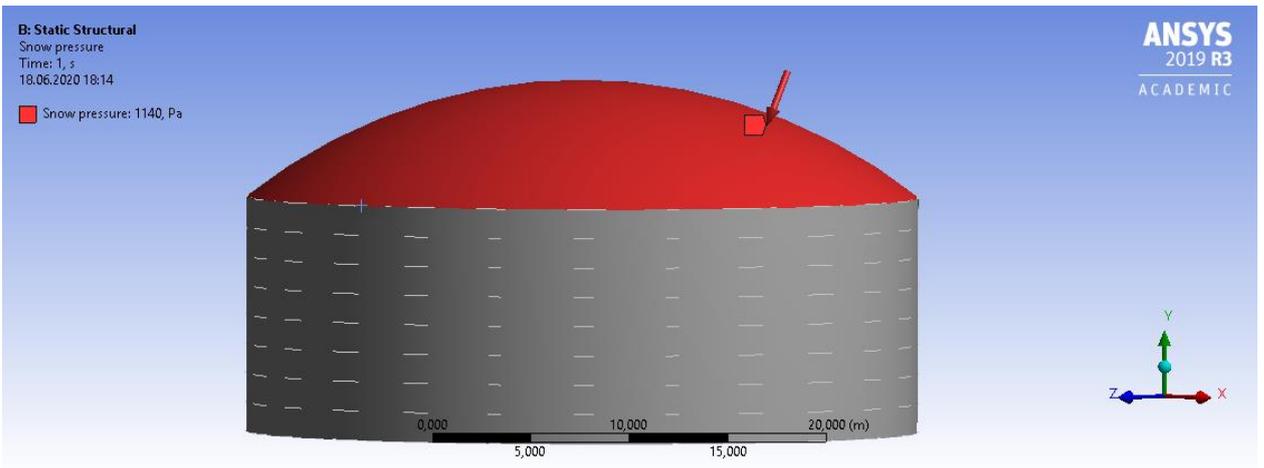


Рисунок 2.8 – Снеговая нагрузка

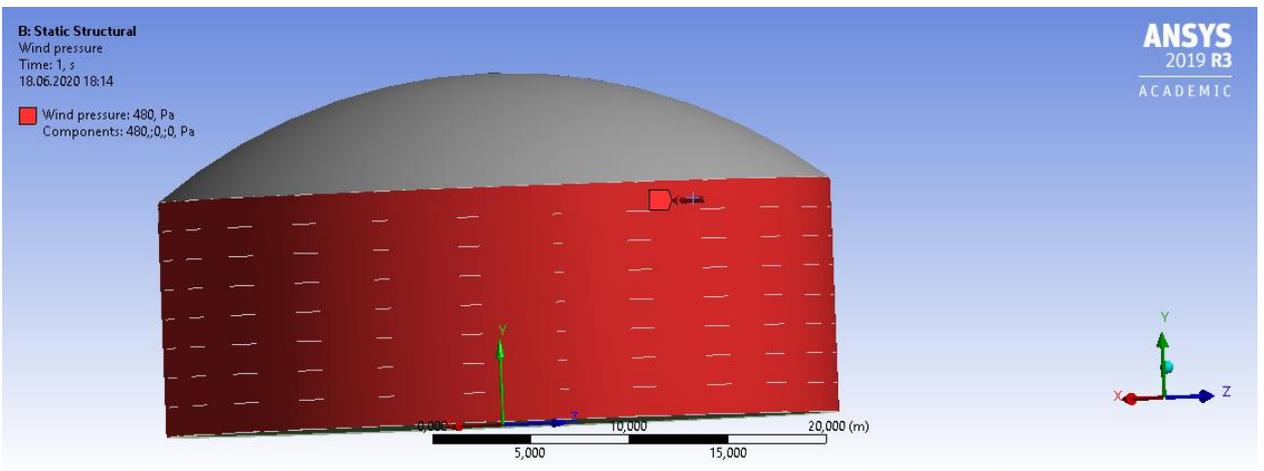


Рисунок 2.9 – Ветровая нагрузка

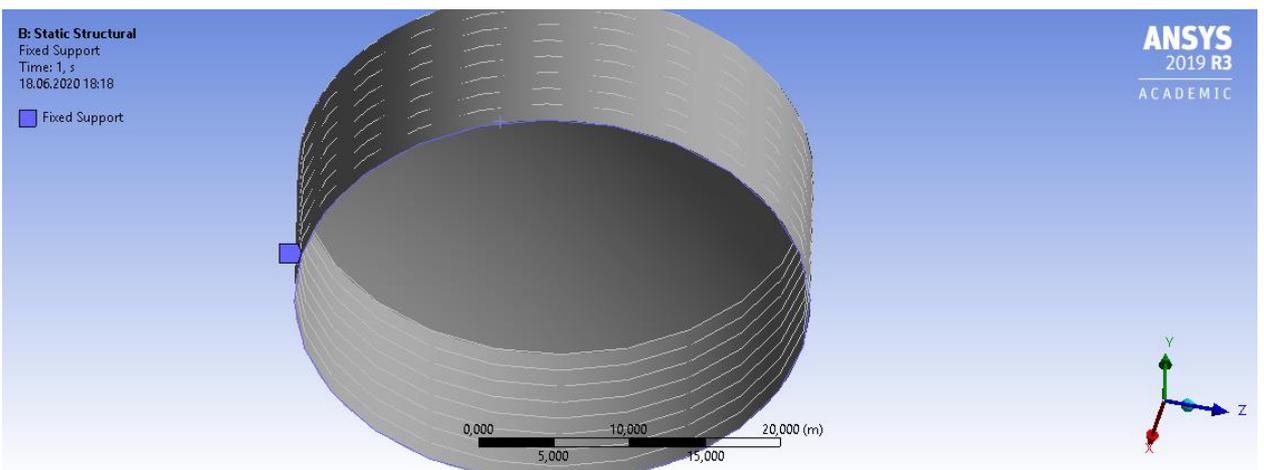


Рисунок 2.10 – Жесткое крепление днища

Table of Properties Row 2: Structural Steel Field Variables					
	A	B	C	D	E
1	Variable Name	Unit	Default Data	Lower Limit	Upper Limit
2	Temperature	C	22	Program Controlled	Program Controlled
3	Mean Stress	Pa	0	Program Controlled	Program Controlled

Рисунок 2.11 – Температурное поле

В результате численного эксперимента получили значения эквивалентных напряжений по критерию Мизеса. Распределение напряжений по высоте стенки резервуара представлено на рисунке 19.

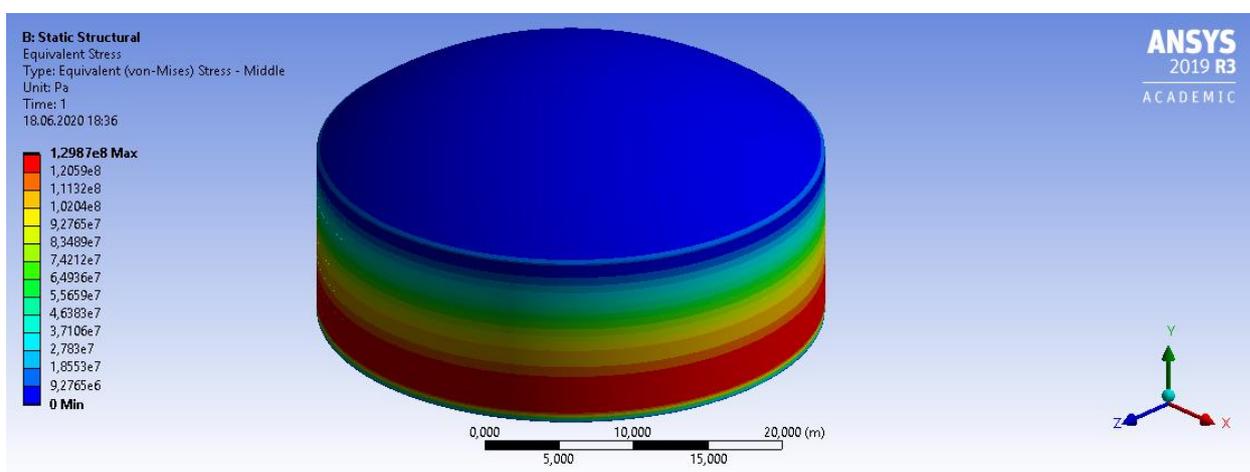


Рисунок 2.12 – Распределение эквивалентных напряжений на стенку резервуара

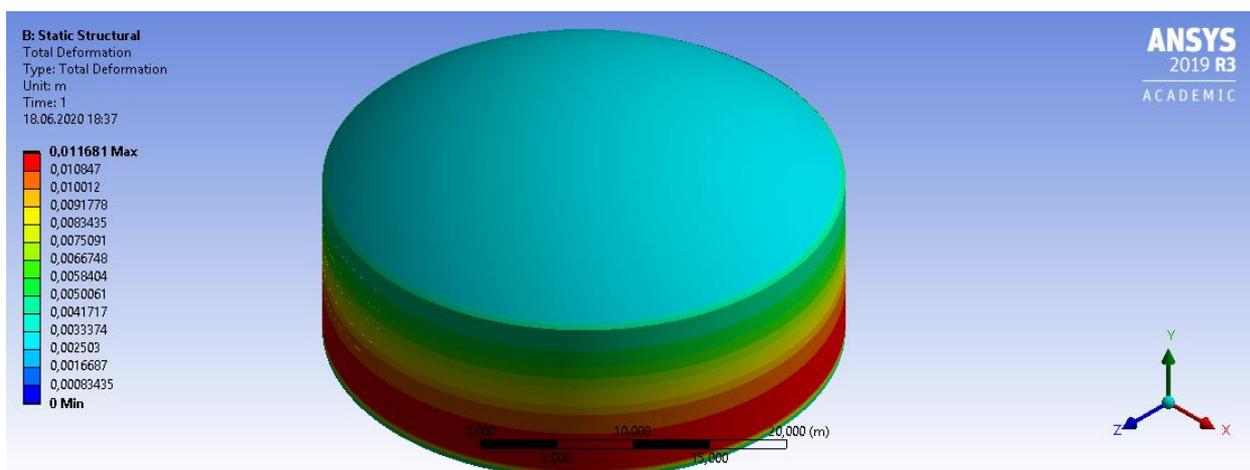


Рисунок 2.13 – Деформации стенки резервуара

Анализ результатов

Анализ результатов показывает, что условие прочности выполняется для всех поясов стенки. Максимальное значение эквивалентных напряжений составляет 129,87 МПа и находится в пределах допустимого значения ($\sigma_T=325$ МПа). Также были рассмотрены общие деформации конструкции (рисунок 2.13), где максимальные значения располагаются вблизи третьего и четвертого пояса оболочки конструкции.

На рисунке 2.14 изображены графики зависимостей радиального перемещения стенки «идеального» резервуара по ее высоте, полученные при аналитическом и численном решениях.

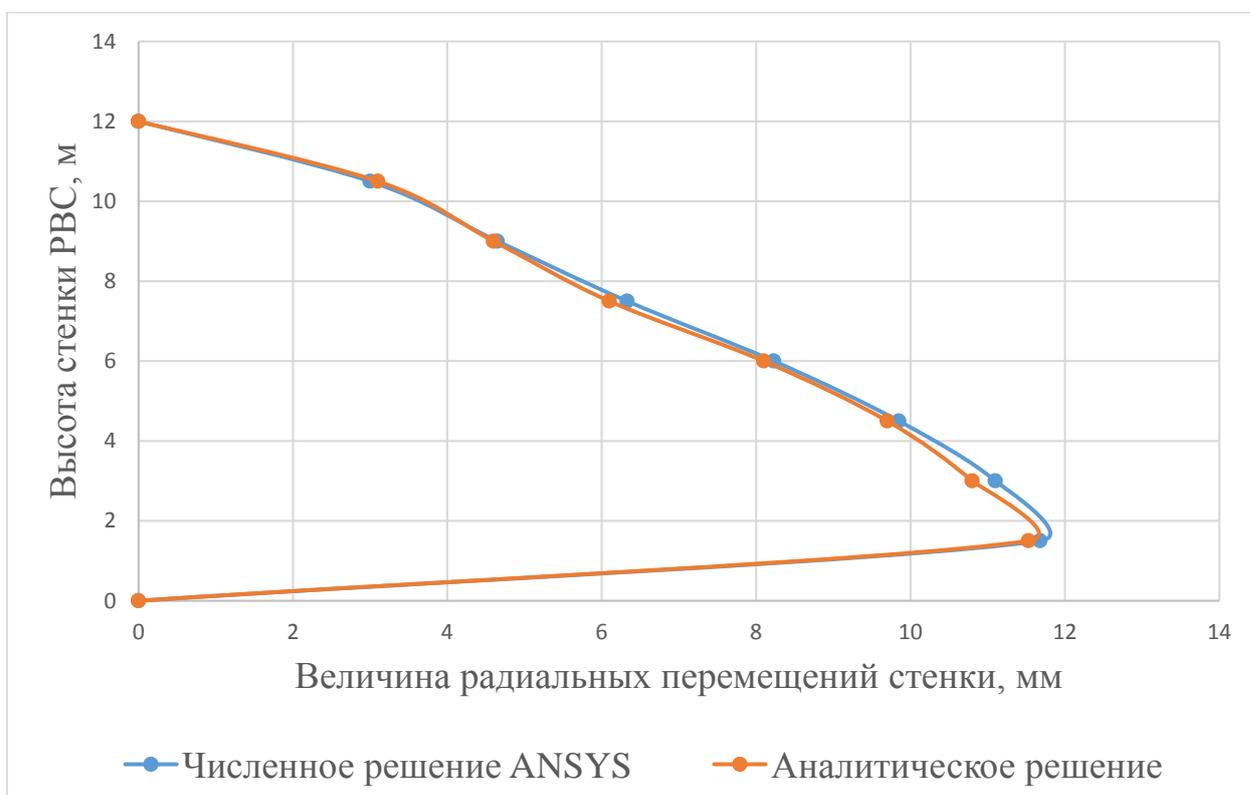


Рисунок 2.14 – Перемещения стенки в радиальном направлении

Максимальная разница результатов аналитического и численного нахождения радиальных перемещений стенки идеального резервуара составила 2,86%.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ84	Никифорову Николаю Андреевичу

Инженерная школа	природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	нефтегазового дела
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело»

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов определялась по средней стоимости по г. Томску, включая стоимость интернета – 360 руб. в месяц.</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Устанавливаются в соответствии с заданным уровнем нормы оплат труда: 30 % премии к заработной плате 20 % надбавки за профессиональное мастерство 1,3 - районный коэффициент для расчета заработной платы.</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Общая система налогообложения с учетом льгот для образовательных учреждений, в том числе отчисления во внебюджетные фонды - 30%.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>1. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования. 2. Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований. 3. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований, отвечающих современным требованиям в области ресурсоэффективности и ресурсосбережения.</i>
<i>2. Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Бюджет научно – технического исследования (НТИ) 1. Структура работ в рамках научного исследования. 2. Определение трудоемкости выполнения работ. 3. Разработка графика проведения научного исследования. 4. Бюджет научно-технического исследования. 5. Основная заработная плата исполнителей темы. 6. Дополнительная заработная плата исполнителей темы. 7. Отчисление во внебюджетные фонды. 8. Накладные ресурсы. 9. Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта.</i>
<i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>1. Определение интегрального показателя эффективности научного исследования. 2. Расчет показателей ресурсоэффективности.</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Оценка конкурентоспособности технических решений.
2. Матрица SWOT.
3. Определение возможных альтернатив проведения научных исследований.
4. Альтернативы проведения НИ.
5. График проведения и бюджет НИ.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Романюк В.Б.	к.э.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич		

Глава 3. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Введение

В настоящее время, более 70% эксплуатирующего оборудования в России выработало свой ресурс (срок эксплуатации 30-35 лет). Известно, что аварии и отказы происходят в начальный период эксплуатации из-за дефектов монтажа, затем следует период безаварийной работы, а после 15-20 лет эксплуатации количество отказов, аварийных ситуаций резко возрастает, вследствие накопления повреждений, возникших при эксплуатации. Одним из наиболее опасных объектов были и остаются различные виды резервуаров. В системе трубопроводного транспорта, например, более 3000 РВС находятся в эксплуатации более 50 лет, свыше 1000 РВС - от 40 до 50 лет. Экономически выгодная эксплуатация резервуара не может быть обеспечена без должного наблюдения за техническим состоянием и своевременным устранением неполадок. Нарушение прочности и герметичности в резервуарах в большинстве случаев вызывается совокупностью различных неблагоприятных воздействий на конструкции. Элементы резервуара в эксплуатационных условиях испытывают значительные быстроменяющиеся температурные режимы, повышение давления, вакуум, вибрацию, неравномерные осадки и коррозию. Практически каждый из резервуаров представляет собой объект повышенной опасности для персонала предприятия, населения, соседних сооружений и окружающей среды. Также можно отметить, что резервуары, как и любой технический объект, имеют свой ресурс и каждое предприятие стремится повысить экономическую эффективность производства товаров или услуги с наименьшими издержками, что означает отсутствие потерь в использовании ресурсов.

3.1. Потенциальные потребители результатов исследования

Продукт: Резервуар вертикальный стальной 10000 м³

Целевой рынок: нефтяные и газовые компании.

Таблица 3.1 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке интернет-ресурсов

		Вид исследования пускового устройства		
		Расчет РВС	3D модель и анализ работы РВС	Конструирование РВС
Размер компании	Крупные			
	Средние			
	Мелкие			

- «Роснефть»
 - «Сургутнефтегаз»
 - «Транснефть»

В различных исследованиях резервуар вертикальный стальной необходим в основном крупным компаниям, так как данный резервуар прост в сборке и обслуживании. Крупным компаниям важна простота и долговечность. Для каждого резервуарного парка используют оборудование с разными техническими характеристиками.

3D модель имеет не мало важную роль для конструирования РВС, так как при создании трехмерной модели, в специальных программах, типа SolidWorks, Ansys, можно смоделировать отклонение от вертикали и посмотреть, как он будет вести себя в рабочем режиме, где будут максимальные нагрузки. На основе расчетов и трехмерной модели ведется конструирование, учитываются все просчеты.

3.2. Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное

исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам. Важно реалистично оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения. Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты.

Таблица 3.2 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _Ф	Б _{к1}	Б _б	К _Ф	К _{к1}	К _б
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1. Срок службы	0,13	3	2	2	0,39	0,26	0,26
2. Ремонтопригодность	0,1	4	2	3	0,4	0,2	0,3
3. Надежность	0,12	3	3	3	0,36	0,36	0,36
4. Простота ремонта	0,1	3	2	1	0,3	0,2	0,1
5. Удобство в эксплуатации	0,08	4	3	3	0,32	0,24	0,24
6. Уровень шума	0,11	4	3	3	0,44	0,33	0,33
Экономические критерии оценки эффективности							
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	4	3	2	0,12	0,09	0,06
2. Уровень проникновения на рынок	0,08	4	2	3	0,32	0,16	0,24
3. Цена	0,1	3	3	3	0,3	0,3	0,3
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,07	4	4	4	0,28	0,28	0,28
5. Послепродажное обслуживание	0,06	4	3	3	0,24	0,18	0,18
6. Наличие финансирования поставщиками оборудования	0,02	2	3	2	0,04	0,06	0,04
Итого	1	43	33	32	3,51	2,66	2,69

Б_Ф – Резервуар вертикальный стальной;

Б_{к1} – Резервуар вертикальный стальной с понтоном;

Б_б – Резервуар вертикальный стальной с плавающей крышей.

По таблице 3.2 видно, что наиболее эффективно использовать резервуар вертикальный стальной, так же он является наиболее конкурентоспособным к другому виду, так как обладает рядом преимуществ, например, удобство в эксплуатации, а также минимальное количество подвижных частей, что обеспечивает долговечность работы резервуара.

$$K1 = \frac{B_{\phi}}{B_{\kappa 1}} = \frac{43}{33} = 1,3. \quad (3.1)$$

3.3. SWOT – анализ

SWOT-анализ представляет собой комплексный анализ инженерного проекта. Его применяют для того, чтобы перед организацией или менеджером проекта появилась отчетливая картина, состоящая из лучшей возможной информации и данных, а также сложилось понимание внешних сил, тенденций и подводных камней, в условиях которых научно-исследовательский проект будет реализовываться.

В первом этапе обычно описываются сильные и слабые стороны проекта, а также возможности и угрозы для реализации проекта, которые проявились или могут появиться в его внешней среде.

Результаты первого этапа SWOT-анализа:

1. Сильные стороны проекта:

- простота конструкций;
- нулевые отклонения от вертикали;
- использование 3D моделирования;
- квалифицированный персонал.

2. Слабые стороны проекта:

- дороговизна вспомогательного оборудования;
- невозможность проверки технических характеристик на лабораторных стендах;
- внутренние производственные проблемы.

3. Возможности проекта:

- сотрудничество с изготовителями резервуаров вертикальных стальных;

- использование инновационной инфраструктуры ТПУ;

- повышение стоимости конкурентных разработок.

4. Угрозы проекта:

- отсутствие спроса на новые производства;

- снижение бюджета на разработку;

- высокая конкуренция в данной отрасли.

После того как сформулированы четыре области SWOT переходим к реализации второго этапа. Второй этап состоит в выявлении соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений. Интерактивная матрица проекта представлена в таблицах 3.3-3.6.

Таблица 3.3 – Интерактивная матрица возможностей и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Возможности проекта		C1	C2	C3	C4
	B1	+	+	-	0
	B2	-	-	+	-
	B3	-	0	-	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие возможности и сильные стороны проекта: B1C1C2, B2C3.

Таблица 3.4 – Интерактивная матрица возможностей и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта				
Возможности проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	B1	+	-	0
	B2	-	0	-
	B3	-	-	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие возможности и слабые стороны проекта: В1Сл1.

Таблица 3.5 – Интерактивная матрица угроз и сильных сторон проекта

Сильные стороны проекта					
Угрозы проекта		С1	С2	С3	С4
	У1	+	+	-	0
	У2	-	-	-	-
	У3	+	+	0	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У1У3С1С2.

Таблица 3.6 – Интерактивная матрица угроз и слабых сторон проекта

Слабые стороны проекта				
Угрозы проекта		Сл1	Сл2	Сл3
	У1	+	-	0
	У2	-	0	-
	У3	-	-	0

При анализе данной интерактивной таблицы можно выделить следующие сильно коррелирующие угрозы и сильные стороны проекта: У1Сл1.

В рамках третьего этапа составляем итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Матрица SWOT

	Сильные стороны научно-исследовательского проекта:	Слабые стороны научно-исследовательского проекта:
	С1. Высокая экономичность и энергоэффективность технологии С2. Экономичность технологии	Сл1. Трудность внедрения функции Сл2. Отсутствие на предприятии собственного специалиста, способного

	<p>С3. Повышение безопасности производства</p> <p>С4. Уменьшение затрат на ремонт оборудования</p> <p>С5. Качественное обслуживание потребителей</p>	<p>произвести внедрение функции</p> <p>Сл3. Снижение бюджета на разработку</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Повышение эффективности работы предприятия за счет модернизации</p> <p>В2. Развитие технологий в данной отрасли</p> <p>В3. Использование инновационной инфраструктуры ТПУ</p>	<p>– Достижение повышения производительности агрегатов</p> <p>– Исключение поломок оборудования в результате сбоев в электроснабжении</p> <p>– Своевременная поставка нефти и природного газа потребителям</p>	<p>1. Поиск заинтересованных лиц</p> <p>2. Разработка научного исследования</p> <p>3. Принятие на работу квалифицированного специалиста</p> <p>4. Переподготовка имеющихся специалистов</p>
<p>Угрозы:</p> <p>У1: Отсутствие спроса на новые производства</p> <p>У2: Долгий срок доставки оборудования</p> <p>У3: Высокая конкуренция в отрасли.</p>	<p>1. Отсутствие спроса на новые технологии производства.</p> <p>2. Доработка проекта</p> <p>3. Сложность реализации проекта.</p>	<p>1. Приобретение необходимого оборудования опытного испытания</p> <p>2. Остановка проекта.</p> <p>3. Проведения других проектов</p>

3.4. Планирование научно-исследовательских работ

Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса предполагаемых работ осуществляется в следующем порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;

- определение участников каждой работы;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться. По каждому виду запланированных работ устанавливается соответствующая должность исполнителей. В данном разделе необходимо составить перечень этапов и работ в рамках проведения научного исследования, провести распределение исполнителей по видам работ. Примерный порядок составления этапов и работ, распределение исполнителей по данным видам работ приведен в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей.

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Выбор темы исследований	1	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, исполнитель
	2	Выбор алгоритма исследований	Руководитель
	3	Подбор и изучение литературы по теме	Исполнитель
Разработка тех. задания	4	Составление и утверждение тех. задания	Руководитель
Теоретические и экспериментальные исследования	5	Проведение теоретических расчетов и обоснование	Исполнитель
	6	Проектирование модели и проведение экспериментов	Исполнитель
Обобщение и оценка результатов	7	Оценка результатов исследования	Руководитель, Исполнитель
Оформление отчета по исследовательской работе	8	Составление пояснительной записки	Руководитель, Исполнитель

Определение трудоемкости выполнения работ

Трудовые затраты в большинстве случаев образуют основную часть стоимости разработки, поэтому важным моментом является определение трудоемкости работ каждого из участников научного исследования.

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости $t_{ожі}$ используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{2t_{\min i} + 2t_{\max i}}{5}, \quad (3.2)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы чел.-дн.;

$t_{\min i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях T_p , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{q_i}, \quad (3.3)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка графика проведения научного исследования

Наиболее удобным и наглядным является построение ленточного графика проведения научных работ в форме диаграммы Ганта.

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ. Для удобства построения графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot K_{кал}, \quad (3.4)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i -й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (3.5)$$

где $T_{кал}=365$ – количество календарных дней в году;

$T_{вых}=66$ – количество выходных дней в году;

$T_{пр}=15$ – количество праздничных дней в году.

$$k_{кал} = \frac{365}{365 - 66 - 15} = 1,28.$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе T_{ki} округляем до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоемкость работ			Исполнители	Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}	Длительность работ в календарных днях, T_{ki}
	t_{min} , Чел-дни	t_{max} , Чел-дни	$t_{ож}$, Чел-дни			
Календарное планирование работ по теме	3	6	4,2	Руководитель, Исполнитель	2	3
Составление и утверждение тех. задания	1	3	1,8	Руководитель	2	3
Подбор и изучение материалов по теме	10	15	12	Исполнитель	12	16
Согласование материалов по теме	5	8	6,2	Руководитель	6	8
Проведение теоретических расчетов и обоснование	6	18	10	Исполнитель	10	13
Проектирование 3D модели резервуара	3	12	6,6	Исполнитель	7	9
Оценка результатов исследования	3	5	3,8	Руководитель, Исполнитель	2	3
Составление пояснительной записки	7	16	11,4	Руководитель, Исполнитель	6	8

На основе таблицы 3.9 строим план график, представленный в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Календарный план график проведения НИР по теме

№	Вид работ	Исполнители	Т _{кi} , кал. дни	Продолжительность выполнения работ															
				Фев.		Март			Апрель			Май							
				2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3					
1	Составление и утверждение тех. задания	Р	3	■															
2	Подбор и изучение материалов по теме	И	18		□														
3	Согласование материалов по теме	Р	9			■													
4	Календарное планирование работ по теме	Р, И	3				■												
5	Проведение теоретических расчетов и обоснование	И	15					□											
6	Проектирование 3D модели резервуара	И	10							□									
7	Оценка результатов исследования	Р, И	3,8								■								

Установка специальных программ для исследования и моделирования объекта производится бесплатно.

Основная заработная плата исполнителей темы

В данную статью включается основная заработная плата научных и инженерно-технических работников, а также рабочих опытных производств, непосредственно участвующих в выполнении работ по данной теме. Величина расходов по заработной плате определяется на основе трудоемкости выполняемых работ и действующей системы тарифных ставок и окладов. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 – 30 % от тарифа или оклада.

Таблица 3.12 – Расчет основной заработной платы

№	Наименование этапов	Исполнители по категориям	Трудоемкость, чел.-дн.			Заработная плата, приходящаяся на один чел.-дн., тыс. руб.	Всего заработная плата по тарифу, тыс. руб.		
			Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3		Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
1	Календарное планирование работ по теме	Руководитель, Исполнитель	2	3	2	1,16	2,32	3,48	2,32
2	Выбор темы исследований	Руководитель	7	9	8	0,93	6,51	8,37	7,44
3	Составление и утверждение тех. задания	Руководитель	2	2	2	0,93	1,86	1,86	1,86
4	Подбор и изучение	Исполнитель	1 2	1 2	1 2	0,23	2,76	2,76	2,76

	материалов по теме								
5	Проведение теоретических расчетов и обоснование	Исполнитель	8	9	9	0,23	1,84	2,07	2,07
6	Проектирование 3D модели резервуара	Исполнитель	6	9	8	0,23	1,38	2,07	1,84
7	Оценка результатов исследования	Руководитель, Исполнитель	4	5	6	1,16	4,64	5,8	6,96
8	Составление пояснительной записки	Руководитель, Исполнитель	5	5	5	1,16	5,8	5,8	5,8
Итого:							27,11	32,21	31,05

Настоящая статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением научно-технического исследования, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_n = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (3.7)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата;

$Z_{доп}$ – дополнительная заработная плата (12-20 % от $Z_{осн}$).

Основная заработная плата ($Z_{осн}$) руководителя (лаборанта, инженера) от предприятия (при наличии руководителя от предприятия) рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = T_p \cdot Z_{дн}, \quad (3.8)$$

где $Z_{осн}$ – основная заработная плата одного работника;

T_p – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.;

$Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$Z_{\partial n} = \frac{Z_M \cdot M}{F_{\partial}} = \frac{74256 \cdot 10,4}{185} = 4174 \text{ (руб)}, \quad (3.9)$$

где Z_M – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года: при отпуске в 24 раб. дня $M = 11,2$ месяца, 5-дневная неделя; при отпуске в 48 раб. дней $M = 10,4$ месяца, 6-дневная неделя;

F_{∂} – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Таблица 3.13 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Исполнитель
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней: - выходные - праздничные	118	118
Потери рабочего времени: - отпуск - невыходы по болезни	62	72
Действительный годовой фонд рабочего времени	185	175

Месячный должностной оклад работника:

$$Z_M = Z_{ТС} \cdot (1 + k_{np} + k_{\partial}) \cdot k_p = 33600 \cdot (1 + 0,3 + 0,4) \cdot 1,3 = 74256 \text{ (руб)}, \quad (5.10)$$

где $Z_{ТС}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

k_{np} – премиальный коэффициент, равный 0,3 (т.е. 30% от $Z_{ТС}$);

k_{∂} – коэффициент доплат и надбавок составляет примерно 0,2 - 0,5;

k_p – районный коэффициент, равный 1,3 (для Томска).

За основу оклада берется ставка работника ТПУ, согласно занимаемой должности. Из таблицы окладов для доцента (степень – кандидат наук) – 33600 руб., для ассистента (степень отсутствует) – 14584 руб.

Таблица 3.14 – Расчет основной заработной платы для исполнения 1

Исполнители	З _{тс} , тыс. руб.	к _{пр}	к _д	к _р	З _м , тыс. руб.	З _{дн} , тыс. руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , тыс. руб.
Руководитель	33600	0,3	0,4	1,3	74256	4,174	20	83,48
Исполнитель	14584	0	0	1,3	18959	1,126	37	41,66
Итого:								125,14

Таблица 3.15 – Расчет основной заработной платы для исполнения 2

Исполнители	З _{тс} , тыс. руб.	к _{пр}	к _д	к _р	З _м , тыс. руб.	З _{дн} , тыс. руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , тыс. руб.
Руководитель	33600	0,3	0,4	1,3	74256	4,174	24	100,18
Исполнитель	14584	0	0	1,3	18959	1,126	43	48,41
Итого:								148,59

Таблица 3.16 – Расчет основной заработной платы для исполнения 3

Исполнители	З _{тс} , тыс. руб.	к _{пр}	к _д	к _р	З _м , тыс. руб.	З _{дн} , тыс. руб.	Т _р , раб. дн.	З _{осн} , тыс. руб.
Руководитель	33600	0,3	0,4	1,3	74256	4,174	28	116,88
Исполнитель	14584	0	0	1,3	18959	1,126	49	55,17
Итого:								172,05

Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн}, \quad (3.11)$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Для исполнения 1 расчет дополнительной заработной платы составит:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 83480 = 10852 \text{ (руб);}$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 41660 = 5416 \text{ (руб).}$$

Для исполнения 2 расчет дополнительной заработной платы составит:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 100180 = 13023 \text{ (руб);}$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 48410 = 6293 \text{ (руб).}$$

Для исполнения 3 расчет дополнительной заработной платы составит:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 116880 = 15194 \text{ (руб);}$$

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} = 0,13 \cdot 55170 = 7172 \text{ (руб).}$$

Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} \cdot (Z_{осн} + Z_{доп}) = 0,302 \cdot (83480 + 10852) = 28488 \text{ (руб)}, \quad (3.12)$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.). На 2014 г. в соответствии с Федеральным законом от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 статьи 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих

образовательную и научную деятельность, в 2014 году водится пониженная ставка – 30,2%.

Таблица 3.17 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, тыс. руб			Дополнительная заработная плата, тыс. руб		
	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3	Исп. 1	Исп. 2	Исп. 3
Руководитель	83,480	100,180	116,880	10,852	13,023	15,194
Исполнитель проекта	41,660	48,410	55,170	5,416	6,293	7,172
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	0,302					
Итого:						
Исполнение 1	Исполнение 2		Исполнение 3			
42,705	50,707		58,713			

Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов. Их величина определяется по следующей формуле:

$$Z_{\text{накл}} = \left(\text{сумма предыдущих статей} \right) \cdot k_{\text{нр}}, \quad (3.13)$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы.

Величину коэффициента накладных расходов можно взять в размере 16%.

Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитанная величина затрат научно-исследовательской работы (темы) является основой для формирования бюджета затрат проекта, который при формировании договора с заказчиком защищается научной организацией в

качестве нижнего предела затрат на разработку научно-технической продукции.

Таблица 3.18 – Расчет бюджета затрат НТИ

Наименование статьи	Сумма, руб. (исп. 1)	Сумма, руб. (исп. 2)	Сумма, руб. (исп. 3)	Примечание
1. Материальные затраты	2872108	3272108	3222108	
2. Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	125140	148590	172050	
3. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	16268	19316	22366	
4. Отчисления во внебюджетные фонды	42705	50707	58713	
5. Затраты на покупку компьютера	28000	28000	28000	
6. Накладные расходы	493475	562995	560518	
7. Бюджет затрат НТИ	3577696	4081716	4063755	Сумма ст. 1-6

3.5. Определение ресурсоэффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности. Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования.

Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{финр}^{испi} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{max}}, \quad (3.14)$$

где $I_{финр}^{испi}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i-го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Для 1-ого варианта исполнения имеем:

$$I_{финр}^{исп1} = \frac{\Phi_{p1}}{\Phi_{max}} = \frac{3060750}{3485812} = 0,878.$$

Для 2-ого варианта имеем:

$$I_{финр}^{исп2} = \frac{\Phi_{p2}}{\Phi_{max}} = \frac{3485812}{3485812} = 1.$$

Для 3-ого варианта имеем:

$$I_{финр}^{исп3} = \frac{\Phi_{p3}}{\Phi_{max}} = \frac{3460875}{3485812} = 0,993.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (3.15)$$

где I_{pi} – интегральный показатель ресурсоэффективности;

a_i – весовой коэффициент разработки;

b_i – балльная оценка разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания.

Таблица 3.19 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весо- вой коэф.	Резервуар вертикаль- ный стальной (исп. 1)	Резервуар вертикаль- ный стальной с понтонном (исп. 2)	Резервуар вертикаль- ный стальной с плавающей крышей (исп. 3)
1. Безопасность	0,1	5	4	4
2. Удобство в эксплуатации	0,15	4	3	4
3. Срок службы	0,15	5	3	3
4. Ремонтпригодность	0,20	5	3	5
5. Надёжность	0,25	4	4	4
6. Материалоёмкость	0,15	5	4	3
Итого:	1	4,6	3,05	3,9

Рассчитываем показатель ресурсоэффективности:

$$I_{p-исп1} = 0,1 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 4,6;$$

$$I_{p-исп2} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 3 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,05;$$

$$I_{p-исп3} = 0,1 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 + 0,2 \cdot 5 + 0,25 \cdot 4 + 0,15 \cdot 3 = 3,9.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ($I_{исп.i}$) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр.i}}, \quad (3.16)$$

соответственно,

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр.1}} = \frac{4,6}{0,878} = 5,24;$$

$$I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр.2}} = \frac{3,05}{1} = 3,05;$$

$$I_{исп.3} = \frac{I_{p-исп3}}{I_{финр.3}} = \frac{3,9}{0,993} = 3,93.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта (\mathcal{E}_{cpi}):

$$\mathcal{E}_{cpi} = \frac{I_{ucni}}{I_{ucn \min}}, \quad (3.17)$$

соответственно, $\mathcal{E}_{cp1} = 1,72$; $\mathcal{E}_{cp2} = 1$; $\mathcal{E}_{cp3} = 1,29$.

Таблица 3.20 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,878	1	0,993
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,6	3,05	3,9
3	Интегральный показатель эффективности	5,24	3,05	3,93
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,72	1	1,29

Показатель ресурсоэффективности проекта имеет высокое значение, что говорит об эффективности использования технического проекта.

Таким образом, резервуар вертикальный стальной остается эффективным и сохраняет конкурентоспособность.

В ходе выполнения данной части выпускной работы была доказана конкурентоспособность данного технического решения, был произведен SWOT-анализ, посчитан бюджет НТИ, основная часть которого приходится на материальные затраты, связанные с приобретением спецоборудования. Все, вышперечисленные технико-экономические показатели проекта, позволяют сделать вывод о том, что данная конструкция резервуара экономически выгодна.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич

Школа	Инженерная школа природных ресурсов	Отделение (НОЦ)	Отделение нефтегазового дела
Уровень образования	Магистратура	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело»

Тема ВКР:

Исследование и совершенствование метода диагностики вертикального стального резервуара с использованием технологии наземного лазерного сканирования

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: конструкция вертикального стального резервуара Область применения: резервуарный парк
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>1. Трудовой кодекс РФ: - ст. 92 ТК РФ; - ст. 117 ТК РФ; - ст. 147 ТК РФ.</p> <p>2. Руководство по безопасности для нефтебаз и складов нефтепродуктов.</p>
<p>2. Производственная безопасность:</p> <p>2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов</p> <p>2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия</p>	<p>При эксплуатации резервуаров и резервуарных парков возможно наличие следующих опасных и вредных производственных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> -образование взрывоопасной среды; -загазованность воздуха рабочей зоны; -повышенный уровень статического электричества; -повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны; -выполнение работ на высоте; -повышенная или пониженная подвижность воздуха; -недостаточная освещенность на рабочем месте; -воздействие на организм человека электрического тока; -повышенная или пониженная влажность воздуха.
<p>3. Экологическая безопасность:</p>	<p>Атмосфера: выброс вредных и токсичных веществ.</p> <p>Гидросфера: загрязнение поверхностных и подземных вод.</p> <p>Литосфера: утечка или разлив вредных и токсичных веществ.</p>

4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС: возгорание ГСМ, техногенного характера, попадание молнии, отказ приборов. Наиболее вероятные ЧС: возгорание на производственном объекте.
--	---

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Черемискина М.С.	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич		

Глава 4. Социальная ответственность

Выпускная квалификационная работа посвящена исследованию резервуара вертикального цилиндрического стального резервуара объемом 10000 м³. В данном разделе рассматривается возможное влияние используемого оборудования, сырья, энергии, продукции и условий работы на человека и окружающую среду; техника безопасности при работе с оборудованием и действия при чрезвычайных ситуациях.

В соответствии с ФЗ №116 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» РВС-10000 относится к опасному производственному объекту. Опасность связана с используемыми в процессе производства опасными веществами, необходимостью обслуживания оборудования, находящегося под высоким давлением, при низкой и высокой температурах, необходимостью работы во взрывоопасных и пожароопасных помещениях. Режим работы объекта - непрерывный круглосуточный.

4.1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Требования промышленной безопасности должны соблюдаться согласно Федеральному закону от 21.07.1997 №116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» и Постановлению Правительства РФ «Об организации и осуществлении производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах» с использованием «Методических рекомендаций по организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах» РД 04-355-00 [44].

Правилами безопасности в нефтяной и газовой промышленности [45] установлены требования, процедуры и условия ведения работ при проектировании, строительстве, реконструкции, эксплуатации, консервации и ликвидации производственных объектов; конструировании, изготовлении, ремонте машин, механизмов, других технических устройств; разработке

технологических процессов; подготовке и аттестации работников; организации производства и труда; взаимодействии Госгортехнадзора России с организациями по обеспечению безопасных условий производства и рационального использования природных ресурсов.

Способ работы на предприятии – вахтовый.

Возраст сотрудников составляет от 18 до 55 лет.

Государственные гарантии и компенсации лицам, работающим в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях, устанавливаются настоящим Кодексом, другими федеральными законами и иными нормативными правовыми актами Российской Федерации.

Для работников, выезжающих в районы крайнего Севера и приравненные к ним местности: устанавливается районный коэффициент и выплачиваются процентные надбавки к заработной плате в порядке и размерах, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих в районах Крайнего Севера и приравненных к ним местностях; предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в порядке и на условиях, которые предусмотрены для лиц, постоянно работающих: в районах крайнего Севера – 24 календарных дня, в местностях, приравненных к районам крайнего севера, - 16 календарных дней.

Дополнительные гарантии и компенсации указанным лицам могут устанавливаться законами и иными нормативными правовыми актами субъектов Российской Федерации, нормативными правовыми актами органов местного самоуправления, коллективными договорами, соглашениями, локальными нормативными актами исходя из финансовых возможностей соответствующих субъектов Российской Федерации, органов местного самоуправления и работодателей.

Обработка персональной информации работника подразумевает соблюдение определенных правил. Целью соблюдения правил является обеспечение прав и свобод гражданина и человека. Выполнять требования по обработке должны работодатель и его представитель, выполняющий эти

обязанности. Требования к защите персональных данных работника установлены в 14 главе Трудового Кодекса РФ.

4.2. Производственная безопасность

Выполнение работ на резервуарах для хранения нефти сопровождается вредными и опасными факторами согласно [20], приведенными в таблице 5.1.

Таблица 4.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Факторы (Гост 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра- ботка	Изгото- вление	Эксплуа- тация	
Образование взрывоопасной среды	-	+	+	Санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (температура, влажность, подвижность воздуха рабочей зоны, предельно допустимое содержание вредных веществ, методы контроля) должны соответствовать ГОСТ 12.1.005-88 [46]. Требования к СИЗ не накапливающих статическое электричество ГОСТ 12.4.124-83 [47]. Для выполнения работ на высоте необходимо предусмотреть наличие исправных оградительных средств по ГОСТ 12.4.059-89 [48] и защитных приспособлений по ГОСТ 26887-86 [49], ГОСТ 27321-2018 [50], ГОСТ 27372-87 [51]. Требования к освещению устанавливаются СП 52.13330.2016 [52].
Загазованность воздуха рабочей зоны	-	+	+	
Повышенный уровень статического электричества	-	-	+	
Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны	+	+	+	
Выполнение работ на высоте	+	+	+	
Повышенная или пониженная подвижность воздуха	+	+	+	
Недостаточная освещенность на рабочем месте	+	+	+	
Воздействие на организм человека электрического тока	+	+	+	
Повышенная или пониженная влажность воздуха	+	+	+	

4.3. Анализ опасных и вредных производственных факторов

Обслуживание резервуара является работой повышенной опасности, при эксплуатации которой возможны опасные и вредные производственные факторы. К опасным производственным факторам на объекте относятся факторы, которые могут привести к травме, а к вредным – факторы, которые могут привести к заболеванию. Опасные и вредные факторы (ОВПФ) делятся

на физические, химические, биологические и психофизиологические. Объекты нефтепроводного транспорта, как носители опасных и вредных факторов, относятся к категории повышенной опасности.

Рассмотрим вредные производственные факторы, которые действуют или могут воздействовать на организм человека при обслуживании резервуарного парка.

А также рассмотрим нормативные значения этих факторов и мероприятия, направленные на снижение или устранение этих факторов.

Утечки токсичных и вредных веществ в атмосферу

Главным источником формирования данного фактора является возможная разгерметизация трубопроводов или оборудования в процессе работы, что может вызвать отравление парами углеводородов.

Взрывопожароопасные, токсические свойства сырья, продуктов, готовой продукции и отходов производства приведены в таблице 5.2 [14].

В целях достижения безопасности персонала необходимо соблюдать требования:

- допуска персонала, имеющего специальную подготовку, определенную требованиями норм и правил и квалификацию;
- безопасных приемов и методов труда;
- мер газовой и пожарной безопасности;
- по применению средств индивидуальной защиты, средств пожаротушения с отработкой приемов их использования,
- к спецодежде из термостойких и антистатичных материалов и индивидуальным средствам защиты.

Таблица 4.2 – Взрывопожароопасные, токсические свойства сырья, продуктов, готовой продукции и отходов производства

№	Наименование сырья, полупродуктов, готовой продукции, отходов производства	Агрегатное состояние	Класс опасности	Температура, °С			Концентр. пределы распространения пламени, % об.		Характеристика токсичности	ПДК в воздухе рабочей зоны производственных помещений, мг/м ³
				Вспышки	Воспламенения	Самовоспламенение	Нижний	Верхний		
1	Природный газ	газ	4	-188	–	550	3	15	Наркотическое воздействие, удушье	300
2	Нестабильный газовый конденсат	ж	4	-44	–	286	2,5	5,2	Наркотическое воздействие	300
3	Стабильный газовый конденсат	ж	4	-23	–	233	4,9	5,2	Наркотическое воздействие	300
4	Смесь пропана и бутана технических	ж	4	-74	–	450	2,0	9,1	Обморожение	300
5	Метанол	ж	3	6	13	440	7,3	36	Опьянение, потеря зрения	5

Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе, рабочей зоны

В настоящее время для оценки допустимости проведения работ и их нормирования на открытом воздухе в условиях крайнего севера (а также в районах, приравненных к районам крайнего Севера) используется понятие предельной жесткости погоды (эквивалентная температура, численно равная сумме отрицательной температуре воздуха в градусах Цельсия и удвоенной скорости ветра в м/с), устанавливаемая для каждого района решением местных региональных органов управления.

Предельная жесткость погоды, ниже которой не могут выполняться работы на открытом воздухе, колеблется в пределах от -40 до -45 °С.

При эквивалентной температуре наружного воздуха ниже $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ работающим на открытом воздухе или в закрытых необогреваемых помещениях, а также грузчикам, занятым на погрузочно-разгрузочных работах, и другим работникам, ежедневно должен быть обеспечен обогрев в помещении, где необходимо поддерживать температуру около $+25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Работающие на открытом воздухе должны быть обеспечены в зимнее время спецодеждой и спецобувью с повышенным суммарным тепловым сопротивлением, а также защитными масками для лица. При работах, связанных с ограниченностью движения, следует применять спецодежду и спецобувь со специальными видами обогрева.

Работники должны быть обучены мерам защиты от обморожения и оказанию доврачебной помощи.

В рабочих зонах помещения и площадки обслуживания температура воздуха различна в теплый и холодный периоды года.

Интенсивность теплового облучения от работающих агрегатов и от нагретых поверхностей не должна превышать 35 Вт/м^2 при облучении 50% поверхности тела, 70 Вт/м^2 при облучении 25-50% поверхности тела и 100 Вт/м^2 при облучении менее 25%. Максимальная температура при этом 28°C (301 K).

Для поддержания микроклимата предусматриваются приточная и вытяжная вентиляции, нагреватели и кондиционеры.

Профилактика перегревания работников осуществляется организацией рационального режима труда и отдыха путем сокращения рабочего времени для введения перерывов для отдыха, использования средств индивидуальной защиты.

Превышение уровней шума

В настоящее время эксплуатация подавляющего большинства технологического оборудования неизбежно связана с возникновением шумов и вибраций различной частоты и интенсивности, оказывающих весьма неблагоприятное воздействие на организм человека.

Шум - это совокупность звуков различной частоты и интенсивности, возникающих в результате колебательного движения частиц в упругих средах (твёрдых, жидких, газообразных).

Допустимые шумовые характеристики рабочих мест регламентируются ГОСТ 12.1.003-2014 [21]. В соответствии с требованиями ГОСТ громкость ниже 80 дБ обычно не влияет на органы слуха.

Длительное действие шума > 85 дБ приводит к постоянному повышению порога слуха, к повышению кровяного давления.

Вибрация - это механические колебания твёрдых тел - частей аппаратов, машин, оборудования, воспринимаемое организмом человека как сотрясения. Часто вибрации сопровождаются слышимым шумом.

Гигиенические допустимые уровни вибрации регламентирует ГОСТ 12.1.012-2004 «ССБТ. Вибрационная безопасность. Общие требования» [22].

Нормируемые параметры вибрации – среднеквадратичные значения виброскорости в м/с или её логарифмические уровни в дБ в октавных полосах частот. Базовая частота предельного спектра для общей вибрации равна 63 Гц (95 дБ), для локальной - 125 Гц (110дБ).

В производственных условиях с целью предотвращения вредного воздействия шума и вибрации на организм человека необходимо всегда добиваться, чтобы уровни шума и вибрации не превышали допустимых значений. Снижение шума и вибрации можно достичь следующими методами:

- уменьшение шума и вибрации в источнике их образования;
- изоляция источников шума и вибрации средствами звукоизоляции и звукопоглощения, виброизоляции и вибродемпфирования; – применение средств индивидуальной защиты.

Средства защиты от шума подразделяют на две группы: вкладыши, вкладываемые в устье слухового аппарата, и наружные противοшумы - наушники, шлемы, накладываемые на ушную раковину. Наиболее эффективны вкладыши «Беруши», позволяющие снижать уровень звука на различных частотах от 15 до 30 дБ.

Превышение уровней вибрации

Для санитарного нормирования и контроля используются средние квадратические значения виброускорения или виброскорости, а также их логарифмические уровни в децибелах. Для первой категории общей вибрации, по санитарным нормам скорректированное по частоте значение виброускорения составляет 62 дБ, а для виброскорости – 116дБ. Наиболее опасной для человека является вибрация с частотой 6-9 Гц.

Вибробезопасные условия труда должны быть обеспечены:

- применением вибробезопасного оборудования и инструмента; применением средств виброзащиты, снижающих воздействие на работающих вибрации на путях ее распространения от источника возбуждения;
- организационно-техническими мероприятиями (поддержание в условиях эксплуатации технического состояния машин и механизмов на уровне, предусмотренном НТД на них; введение режимов труда, регулирующих продолжительность воздействия вибрации на работающих; вывод работников из мест с превышением ДУ по вибрации).

Недостаточная освещенность рабочей зоны

Для резервуарных парков и участков работ необходимо предусматривать общее равномерное освещение. При этом освещенность должна быть не менее 2 лк независимо от применяемых источников света, за исключением автодорог. При подъеме или перемещении грузов должна быть освещенность места работ не менее 5 лк при работе вручную и не менее 10 лк при работе с помощью машин и механизмов.

Повышенная запыленность и загазованность рабочей зоны

Контроль воздушной среды должен проводиться в зоне дыхания при характерных производственных условиях посредством газоанализатора или рудничной лампы. Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК). Предельно допустимая концентрация пыли, как вещества умеренно опасного, в воздухе рабочей зоны составляет 1,1-10 мг/м³, для природного газа ПДК 300 мг/м³.

При работе в местах, где концентрация вредных веществ в воздухе может превышать ПДК, работников должны обеспечивать соответствующими противогазами.

При работе с вредными веществами 1-, 2-, 3-го классов опасности (ртуть, одорант, сероводород, метанол, диэтиленгликоль и т.д.) должно быть обеспечено регулярное обезвреживание и дезодорирование СИЗ.

Уменьшение неблагоприятного воздействия запыленности и загазованности воздуха достигается за счет регулярной вентиляции рабочей зоны.

Работающие в условиях пылеобразования должны быть в противопыльных респираторах («Лепесток», Ф-62Ш, У-2К, «Астра-2», РП-КМ и др.), защитных очках и комбинезонах. При загазованности траншеи или котлована в результате утечки газа необходимо прекратить работу и вывести людей, запретив курить, зажигать спички или пользоваться открытым огнем.

Опасность поражения электрическим током

Выполнено заземление оборудования, обеспечивающее безопасность обслуживания персонала при эксплуатации и ремонте, молниезащита объекта.

Опасность воздействия электрического тока на организм человека зависит от электрического сопротивления тела и приложенного к нему напряжения, силы тока, длительности его воздействия, путей прохождения тока через человека, рода и частоты тока, индивидуальных особенностей человека, окружающей среды и ряда других факторов. Степень воздействия токов на человека указана в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Воздействие тока на человека

Сила тока, проходящая через человека, мА	Воздействие на человека	
	переменный ток	
	50-60 Гц	постоянный ток
0,5-1,5	начало ощущения, лёгкое дрожание пальцев рук	не ощущается
2,0-3,0	сильное дрожание пальцев рук	не ощущается

5,0-7,0	судороги в руках	зуд, ощущение нагрева
8,0-10,0	трудно, но ещё можно оторвать руки от электродов, сильные боли в пальцах, кистях рук и предплечьях	усиление нагрева
20,0-25,0	паралич рук, оторвать их от электрода невозможно, очень сильные боли, дыхание затруднено	ещё большее усиление нагрева
50,0-80,0	остановка дыхания, начало фибрилляции сердца	сильное ощущение нагрева, сокращение мышц рук, судороги, затруднение дыхания
90,-100,0	остановка дыхания, при длительном воздействии - 3 сек. и более следует остановка сердца	остановка дыхания

Существенное влияние на исход действия электрического тока оказывает путь прохождения тока в теле человека: чем больше жизненно важных органов подвержено действию тока, тем тяжелее исход поражения.

Согласно ГОСТ ИЕС 61140-2012 [24] для максимальной защиты персонала необходимо предпринимать следующие меры:

- изолировать токоведущие части оборудования;
- заземлять точки источника питания или искусственной нейтральной точки;
- применять СИЗ, не проводящие токи
- устанавливать знаки предостережения в местах повышенной опасности.

Опасность механических повреждений

При работе с РВС обслуживающий персонал подвергается опасности получения механических повреждений. Для предотвращения повреждений необходимо соблюдать технику безопасности.

В целях достижения безопасности персонала необходимо соблюдать требования:

- оформлять наряд-допуск на проведение работ повышенной опасности;
- места прохода и доступа к техническим устройствам, на которых требуется подъем обслуживающего персонала на высоту до 0,75 м, оборудуются ступенями, а на высоту выше 0,75 м - лестницами с перилами;
- в местах прохода людей над трубопроводами, расположенными на высоте 0,25 м и выше от поверхности земли, площадки или пола, должны быть устроены переходные мостики, которые оборудуются перилами, если высота расположения трубопровода более 0,75 м;
- рабочие площадки и площадки обслуживания, расположенные на высоте, должны иметь настил, выполненный из металлических листов с поверхностью, исключающей возможность скольжения, или досок толщиной не менее 0,04 м, и, начиная с высоты 0,75 м, перила высотой 1,25 м с продольными планками, расположенными на расстоянии не более 0,4 м друг от друга, и борт высотой не менее 0,15 м, образующий с настилом зазор не более 0,01 м для стока жидкости;
- работы, связанные с опасностью падения работающего с высоты, должны проводиться с применением предохранительного пояса;
- узлы, детали, приспособления и элементы технических устройств, которые могут служить источником опасности для работающих, а также поверхности оградительных и защитных устройств должны быть окрашены в сигнальные цвета;
- открытые движущиеся и вращающиеся части технических устройств ограждаются или заключаются в кожухи; такие технические устройства должны быть оснащены системами блокировки с пусковыми устройствами, исключающими пуск их в работу при отсутствующем или открытом ограждении;
- снятие кожухов, ограждений, ремонт технических устройств проводится только после отключения электроэнергии, сброса давления, остановки движущихся частей и принятия мер, предотвращающих случайное

приведение их в движение вследствие ошибочного или самопроизвольного включения аппаратов, под действием силы тяжести или других факторов; на штурвалах задвижек, шиберов, вентилей должны быть вывешены плакаты "Не открывать! Работают люди", на пусковом устройстве обязательно вывешивается плакат: "Не включать, работают люди".

4.4. Экологическая безопасность

В процессе разработки месторождений в системе добычи, сбора, подготовки и транспорта углеводородного сырья проводятся мероприятия, направленные на повышение экологической безопасности. В частности, ведется реконструкция действующих производств, вносятся изменения в противокоррозионные мероприятия, систему диагностики газопромыслового оборудования и трубопроводного транспорта, совершенствуются технологии сбора и промышленной подготовки газа.

Защита окружающей среды

Основными типами антропогенных воздействий на природу являются:

– загрязнение окружающей среды промышленными и бытовыми отходами; развитие отрицательных физико-геологических процессов в зоне строительства и эксплуатации объектов (изменение поверхностного стока, заболачивание, подтопление, развитие оврагов, оползней, эрозии, активизация криогенных процессов на участках распространения многолетнемерзлых пород, засоление выходом сеноманских вод).

– загрязнение окружающей среды нефтью и конденсатом вследствие несовершенства технологии, аварийных разливов и несоблюдение природоохранных требований;

– Основными мерами по охране окружающей среды являются: – сокращение потерь нефти и конденсата, повышение герметичности и надежности промышленного оборудования;

– оптимизация процессов сжигания топлива, снижение образования токсичных продуктов сгорания.

Защита атмосферного воздуха от загрязнения

Одним из основных источников выбросов загрязняющих веществ являются факельное хозяйство, предназначенное для сжигания газа при работе оборудования.

Большой ущерб природным комплексам наносится в случае аварийных ситуаций.

Основные мероприятия по охране атмосферного воздуха от загрязнений является:

- полная герметизация оборудования для сбора и транспортировки газа;
- контроль швов сварных соединений трубопроводов;
- защита оборудования от коррозии;
- утилизация попутного газа;
- разработанный план действий при аварийной ситуации.

Строительство и запуск в работу БКС ННГ позволило сократить сжигание низконапорного газа, образующегося на УКПГиК в процессе подготовки газа и конденсата к транспорту.

Защита поверхностных и подземных вод от загрязнения и истощения

Отрицательное воздействие на химический состав водоемов при эксплуатации объектов нефтегазодобычи оказывают разливы продуктов нефти и вод с высокой минерализацией. При попадании нефтепродуктов в водоемы на поверхности воды образуется пленка, препятствующая воздушному обмену

На Мыльджинском нефтегазоконденсатном месторождении осуществлен ряд мероприятий, способствующих снижению вредного воздействия и охране водных ресурсов:

- производится очистка промышленных стоков и дальнейшая их закачка в пласт на узле закачки очищенных стоков;

– созданы очистные сооружения для бытовых стоков (канализационные устройства, септики).

Защита литосферы от загрязнения

Защита почв от химических веществ прежде всего предполагает применение ограниченного количества быстроразлагающихся пестицидов или их замену естественными (экологически чистыми) способами борьбы с насекомыми.

Снижение воздействия на литосферу отходов производства прежде всего должно включать построение безотходного производства и вторичное использование сырья. Отходы – это не пригодные для производства данного вида продукции виды сырья, его неупотребляемые остатки или возникающие в ходе технологических процессов вещества (твёрдые, жидкие и газообразные) и энергия, не подвергающиеся утилизации в рассматриваемом производстве. Безотходную технологию можно рассматривать как технологию, дающую технически достигнутый минимальный объём отходов, т.е. малоотходную. Достижение полной безотходности практически нереально, поэтому отходы одного производства должны использоваться как сырьё для другого.

Особое внимание следует уделить высокой культуре земледелия, проведению работ по восстановлению разрушенных почв, широкому внедрению биотехнологий.

4.5. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Чрезвычайная ситуация (ЧС) – это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей природной среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей.

Чрезвычайные ситуации бывают различных типов: техногенного, природного и социального характера. ЧС природного характера на территории резервуарного парка могут возникнуть по различным причинам, например:

- Паводковые наводнения;
- Бури, ураганы, смерчи, шквалы, сильные метели;
- Сильный дождь, сильный снегопад, крупный град;
- Заморозки, засуха.

ЧС биолого-социального (антропогенного) характера состоят из ЧС, связанных с изменением состояния литосферы – суши (почвы, недр, ландшафта), состояния и свойства атмосферы (воздушной среды), состояния гидросферы (водной среды), состояния биосферы, инфекционной заболеваемости людей, животных (в том числе и диких) и растений.

ЧС техногенного характера:

- транспортные аварии (катастрофы);
- пожары и взрывы;
- аварии с выбросом аварийно-химически опасных веществ.

Аварии могут привести к чрезвычайным ситуациям. Возможными причинами аварий могут быть:

- ошибочные действия персонала при производстве работ;
- отказ приборов контроля и сигнализации;
- отказ электрооборудования и исчезновение электроэнергии;
- старение оборудования (моральный или физический износ);
- коррозия оборудования;
- факторы внешнего воздействия (ураганы, удары молнией и др.).

Наиболее вероятным ЧС в нефтегазовой сфере является возгорание на производственном объекте, как частный случай техногенной ЧС. Его источником могут быть несчастный случай, халатность работников, неисправность электрооборудования, недостаточная герметичность в пожароопасных территориях производственного комплекса и другие причины.

В случае обнаружения подобной ЧС основными для работника являются следующие действия:

– если справиться с огнем за несколько секунд не удалось, нужно немедленно сообщить о пожаре по телефону в пожарную охрану (при этом необходимо назвать адрес объекта, место возникновения пожара, а также сообщить свою фамилию);

– вызвать к месту пожара руководителя подразделения;

– принять посильные меры по эвакуации людей и тушению пожара.

Действия прибывшего к месту пожара руководителя подразделения:

– продублировать сообщение о пожаре в пожарную часть;

– привлечь к тушению добровольную пожарную дружину и поставить в известность администрацию объекта;

– организовать спасение людей;

– при необходимости отключить электроэнергию, остановить работу агрегатов, перекрыть сырьевые, газовые и другие коммуникации;

– прекратить все работы на объекте;

– осуществлять руководство тушением пожара до прибытия подразделения пожарной команды, а затем действовать по указаниям руководителя тушением пожара.

Выводы по главе

Практическая значимость полученных результатов важна для организации безопасных производственных условий. Производственная работа на территории резервуарных парков организована в соответствии со всеми требованиями и нормами и не нуждается в улучшении и совершенствовании.

Заключение

Представленный метод исследования конструкции резервуаров заключающийся в использовании технологии наземного лазерного сканирования, построение геометрической 3D модели, удовлетворяющей реальной конструкции, и численное моделирование методом конечных элементов, позволяет провести анализ надежности и долговечности резервуаров.

Также, в ходе выполнения исследовательской работы:

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.

3) 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.

4) Проведено сравнение результатов расчета НДС стенки «идеального» резервуара объемом 10000 м^3 аналитическим способом согласно

действующей НТД ГОСТ 31385-2016 и методом конечных элементов по разработанной методике. Установлено, что максимальная разница перемещений стенки в радиальном направлении составляет 2,86%. Данные результаты подтверждают правильность разработанной методики, так как отличие от аналитического решения не превышает 5%.

Список использованной литературы

1. ГОСТ 31385-2016 Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия.
2. СТО-СА-03-002-2009 Правила проектирования, изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
3. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*».
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*.
5. ВСН 311-89 Монтаж вертикальных стальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов объемом от 100 до 50000 куб. м.
6. Николаев Н.В., Иванов В.А., Новоселов В.В. Стальные вертикальные резервуары низкого давления для нефти и нефтепродуктов: учебник для вузов. – Изд-во ООО "ЦентрЛитНефтеГаз", 2007. – 492 с.
7. ГОСТ 17032-2010 Резервуары стальные горизонтальные для нефтепродуктов. Технические условия.
8. РД 16.01-60.30.00-КТН-026-1-04 «Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000-50000 м³».
9. Руководство по безопасности вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов.
10. Лапшин, А. А. Конструирование и расчёт вертикальных цилиндрических резервуаров низкого давления: учебное пособие / А. А. Лапшин, А. И. Колесов, М. А. Агеева; Нижегород. гос. архит.-строит. ун-т. – Н. Новгород, ННГАСУ, 2009. – 122 с.
11. Кондаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения / Кондаков Г.П. // Промышленное и гражданское строительство. –1998. –№5.

12. Галеев В.Б. Проектирование оснований резервуаров на слабых водонасыщенных грунтах / Галеев В.Б. // Нефтепромысловое строительство. –М.: ВНИИОЭНГ, 1976. –С. 13-15.
13. Галеев В.Б. Эксплуатация стальных вертикальных резервуаров в сложных условиях / Галеев В.Б. –М.: Недра, 1981. –149 с.
14. 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.
15. Галеев В.Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения / Галеев В.Б., Гагарин Д.Ю., Фролов Ю.А. –Уфа, 2004. –164 с.
16. 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.
17. Березин В.Л. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов / Березин В.Л., Шутов В.Е. –М.: Недра, 1973. –223 с.
18. Беляев Б.И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Беляев Б.И., Корниенко В.С. –М.: Стройиздат, 1968. –205 с.
19. Иванов Ю.К. Основания и фундаменты резервуаров / Иванов Ю.К., Коновалов П.А., Мангушев Р.А., Сотников С.Н. –М.: «Стройиздат», 1989. –95 с.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
- 23.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.
- 24.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.
- 25.Розенштейн И.М. Аварии и надежность стальных резервуаров / Розенштейн И.М. –М.: Недра, 1995 –253 с.
- 26.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.
- 27.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.
- 28.Арзунян А.С. Резервуары с безмоментной кровлей для хранения нефти и нефтепродуктов / Арзунян А.С. –М.: ЦНИИТЭнефть, 1956. –с. 72.
- 29.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.
- 30.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.
- 31.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.

32. 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.
33. 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.
34. Березин В.Л. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов / Березин В.Л., Шутов В.Е. –М.: Недра, 1973. –223 с.
35. 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.
36. 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.
37. 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.
38. Сафарян М.К. Металлические резервуары и газгольдеры / Сафарян М.К. –М.: Недра, 1987. –200 с.
39. 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
40. 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.

41. 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).
42. 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.
43. 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
44. РД 04-355-00 Методические рекомендации по организации производственного контроля за соблюдением требований промышленной безопасности на опасных производственных объектах.
45. Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности в нефтяной и газовой промышленности" (с изменениями на 12 января 2015 года) (редакция, действующая с 1 января 2017 года)/
46. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1).
47. ГОСТ 12.4.124-83 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Средства защиты от статического электричества. Общие технические требования.
48. ГОСТ 12.4.059-89 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Строительство. Ограждения предохранительные инвентарные. Общие технические условия.

- 49.ГОСТ 26887-86 Площадки и лестницы для строительного-монтажных работ. Общие технические условия.
- 50.ГОСТ 27321-2018 Леса стоечные приставные для строительного-монтажных работ. Технические условия.
- 51.ГОСТ 27372-87 Люльки для строительного-монтажных работ. Технические условия.
- 52.СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95* (с Изменением N 1).

Приложение А
(справочное)

Research and improvement of the diagnostic method for a vertical steel storage oil tank
using ground-based laser scanning technology

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ84	Никифоров Николай Андреевич		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Манабаев К.К.	к.ф.-м.н.		

Консультант-лингвист отделения иностранных языков ШБИП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель	Макаровских А.В.	-		

Introduction

The oil and gas industry is a basic branch of the Russian economy. As the oil industry developed, the need to store large quantities of oil and its refined products increased. The tanks are used for storing, receiving and dispensing petroleum products, alkalis, chemicals, diesel fuel, water and other liquids under different climatic conditions. The ecological situation of the area, where the oil base and the central and intermediate tank parks are located, depends on their correct operation and reliability during exploitation. During the design and construction phases, the required degree of reliability of the cylindrical AST is achieved during the operational phase.

The accidents of the tanks followed by the spill of petroleum and petroleum products cause huge environmental pollution in the surrounding area. Economic damage to an enterprise includes not only the loss of a product, but also the high cost of environmental restoration and replenishment of lost products.

From a practical point of view, preserving hydrocarbon raw materials is known to be a difficult task, just as it is to create ideal conditions for the storage of different types of petroleum products. This is because these products have characteristics that make it difficult to produce, transport and store.

Currently, vertical steel types of oil tanks are the most common worldwide. The design of the AST in the territory of the Russian Federation is regulated by the inter-state standard GOST 31385-2016 [1] and the standard STO-SA-03-002-2009 [2].

In the course of operation, the tanks are subjected to various static, low-cycle, snow and wind loads, temperature and aggressive working conditions, which make defects of geometric shape. As a result, the carrying capacity of the structure is significantly reduced, operational reliability is reduced and the durability of the tank structure is reduced. In contrast to the standard method for calculating strength and rigidity, the numerical simulation method allows the development of a geometric model and the creation of a corresponding finite element approximation during the design stage.

The analytical calculation of the tank is related to the membrane theory of shells, because such an object is a vertical shell with a bottom. Beside this, the symmetry of the structure changes substantially due to the presence of geometric features (the presence of hatches, connections, openings in the structure, cross-section changes of the structural elements, etc.). Therefore, in calculating the distribution of stresses and deformations in local areas, it is necessary to use numerical calculation technologies, because analytical methods are powerless in this case.

The purpose of this thesis is to study and improve the method of diagnostics of a vertical steel tank using ground-based laser scanning technology and calculate the stress-strain condition and the strength of the tank structure by the finite element method using ground-based laser scanning technology.

To achieve the objective of this work, the following issues need to be considered:

- Analysis of hydrocarbon storage tanks designs;
- Methods for calculating the strain condition of tanks;
- Stress-strain diagnosis on the ANSYS platform.

Chapter 1. Current state of the research problem

Literature review

One of the main tasks in the industrial field is to preserve the integrity of structures and other industrial facilities during the period of their operation. During use, the walls of the tank are subjected to stress deformation resulting from tensile, compressive and shearing stresses. The walls of the tank, when filled with an oil product, are expanded by the pressure of the liquid column and the pressure in the gas space. And when the oil product is discharged, the tank is compressed and the pressure in it becomes less than atmospheric pressure. Careful calculation and timely inspection will guarantee the long-term operation of the tanks. Particular attention should be paid to the monitoring of the technical condition of the facility for the forecasting and prevention of possible on-site accidents. Since industrial facilities are hazardous production facilities, their technical condition should be monitored periodically.

At present, the rules for the development, adoption, updating and cancellation of most above-ground hydrocarbon storage tanks are governed by the following standard: GOST 31385-2016 Vertical cylinder steel tanks for petroleum and petroleum products [1]. Also, general technical conditions, STO-CA-03-002-2009 Rules for designing, manufacturing and mounting vertical cylindrical steel tanks for petroleum and petroleum products [2], SP 16.13330.2017 Steel constructions. Updated edition of Snip II-23-81*» [3] and SP 20.13330.2016 Loads and effects. Updated version Snip 2.01.07-85* [4]. These standards establish requirements for the design, construction, installation and testing of vertical cylindrical steel tanks with a nominal capacity of 100 to 120,000 m³, including a protective wall used in mining, transport, processing and storage of petroleum and petroleum products, as well as requirements aimed at ensuring mechanical and industrial safety and preventing accidents and industrial accidents.

Training manuals of A. A. Lapshin, A. I. Kolesova, M. A. Ageeva «Design and calculation of vertical cylindrical low pressure tanks», as well as work «Construction and operation of gas pipelines and gas oil storage tanks» by Kretz

V.G., Shadrina A.V., Anthropova N.A. give a general view of the design and, not least, acquaint us with the design and equipment of tanks.

The standard method of strength calculation is related to the membrane theory of shells. In his work «Elements of the Theory of Elasticity» A.A. Svetashkov gives the main sections of the theory of elasticity: the theory of tension and deformations, the flat and spatial problems, the thermal spring, as well as the theory of plates and shells. The work also considers the calculation of cylindrical tanks for the determination of internal force factors, the construction of bending moment curves and the determination of equivalent stresses at dangerous points.

In their article «Assessment of the stress-deformed state of the steel cylindrical tank taking into account the operational loads» Mansurova S.M., Tleyasheva R.R., Iwakin A.V., Shaizakova G.A., Bayramgulov A.S. compare the standard endurance calculation method with the finite element method. In their work they showed that the presence of geometric features in the tanks significantly changes the symmetry of the structure, stress distribution and deformations in the local zones, which is difficult to take into account in the analytical calculations.

1.1. General information on vertical steel tanks

A vertical steel tank is a ground-based engineering facility which serves mainly for the storage of liquid products and is also used for the reception, preparation, accounting and dispensing of products.

They are a vertical cylindrical shell with a flat bottom and a fixed roof.

The main sphere of use of vertical steel tanks is the oil and gas industry, which needs a continuous technological connection from extraction to delivery of the product to the consumer.

For the time being, due to cost-effectiveness, low cost of materials and relatively simple construction, vertical steel tanks are the cheapest form of storage for petroleum and petroleum products. Moreover, the geometry of such tanks makes it possible to build a large tank while still occupying a relatively small plot of land. Another advantage of such tanks is the relatively easy transport of the structures to the mounting site. This feature is related to the construction of the tank walls by the methods of rolling and polishing. Due to these factors, vertical steel tanks are in high demand and popular for the storage of hydrocarbons and other liquid products worldwide.

Manufacture

Although the construction of vertical tanks seems simple, their construction is a complex multi-stage process.

Detailed structural steel drawings developed under the steel construction project and a process approved in accordance with the established procedure, which meets the requirements of metal structures, are required to be completed prior to the factory manufacture of the tanks safety regulations 03-605-03 and GOST 31385-2016. The quality of the construction is guaranteed by production in compliance with State standards. Materials subject to input control for compliance with regulatory and project documentation requirements are used for production. The metal rolling is subjected to special treatment before being fed into the production.

The structural elements of the tanks are divided into main and auxiliary. The main ones are: wall, bottom and annular plates, roof (frame and flooring), reinforcing rings, anchor fixing, hatch shells and branch pipes. To the auxiliary: pads, stairs, fences.

The main structures of the tanks may be made by rolling or by plate-by-plate assembly. Rolled sheets are collected, welded, controlled and rolled into rolls. When the wall parts are assembled, they are waltzed to the design radius and placed in the shaped location plate for transportation.

Once assembled, the tanks are thoroughly checked for compliance with the State standards and those of the contracting enterprise. In addition, the shells are checked for leakproofness, mechanical endurance and pressure limits.

Basic building blocks

The main structural elements of the oil storage tank are divided into bearing and fencing elements.

The bearing walls are: a wall, including the stub-in of branch pipes and hatches, a frameless roof, anchor fixing of the walls, bottom plates, a frame and a reinforcing ring.

Fencing: permanent roof flooring, central part of the bottom, pontoon, floating roof.

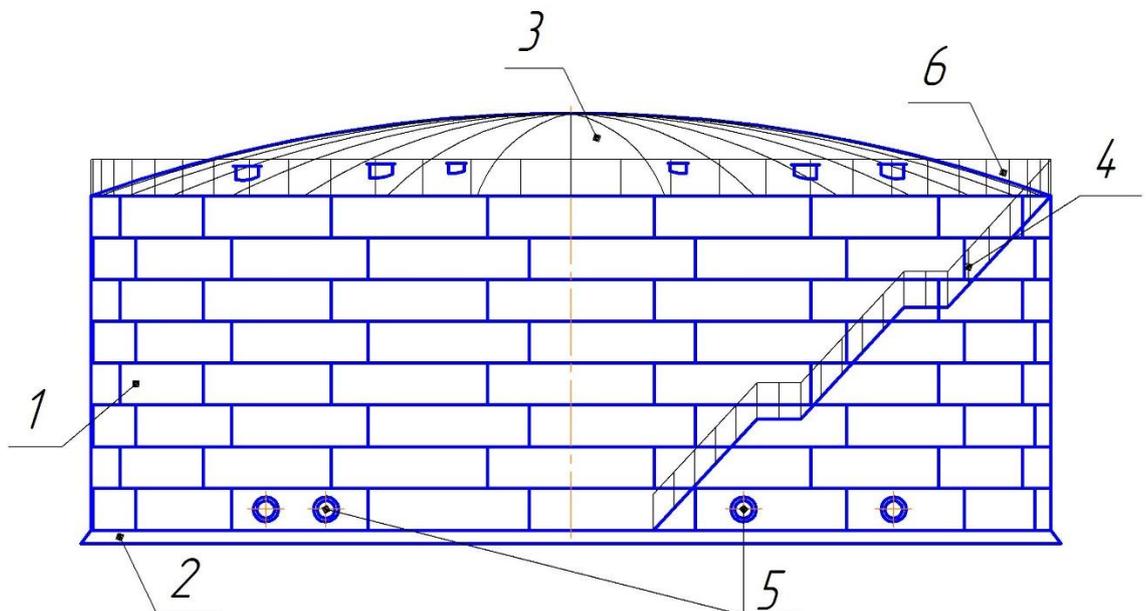


Figure 1 – Diagram of vertical tank AST -10000 m³

- 1 - wall; 2 bottom; 3 - roof; 4 - staircase ring;
- 5 - hatches and branch pipes; Six - pads and fences.

Wall

The tank wall is a thin-walled cylindrical shell welded from metal sheets. It is made by rolling or plate-by-plate assembly methods. The wall consists of a series of belts equal to the width of the sheet. The smallest wall thickness taken is 4 mm. The most commonly used metal sheets are 150,0x6,000, 1800x8000, 2000x8,000 mm, and therefore, depending on the prescribed sheet size, the tank height is chosen to be a multiple of 1490, 1790, 1990 mm, and the circumference is a multiple of 5990 or 7990 mm, with material adjustment if necessary.

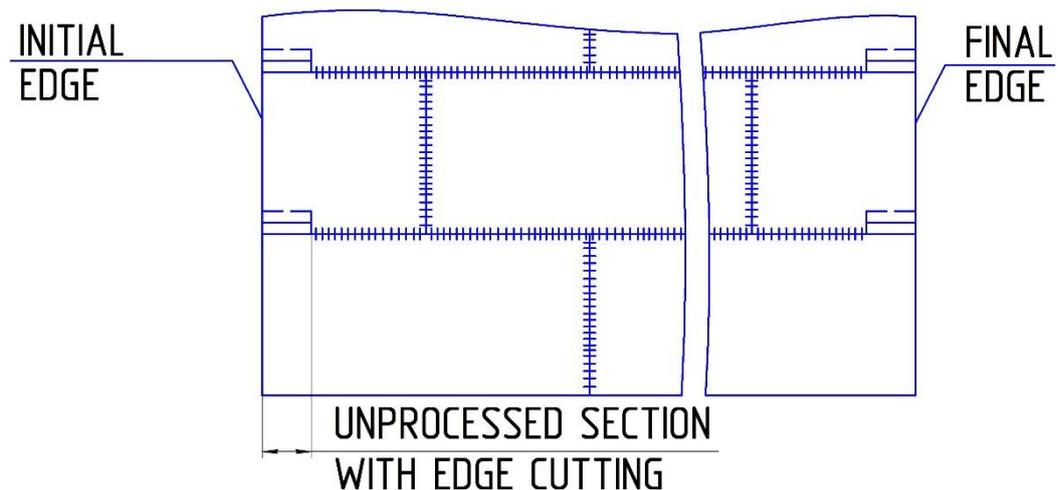


Figure 2 - Tank wall sheets

In the tank industry, the domestic industrial method of rolling is widely used. This method considerably simplifies the labour intensity of the welding and mounting work, since the main part of the work is performed by the manufacturer. The manufacturer is responsible for the production of the welding and mounting work.

Bottom

Since most of the load on the bottom is caused by the pressure of the liquid, the thickness is selected in such a way that the welding work is not difficult and is

performed safely, and the corrosion charge is also taken into account. The bottom of the tank is conical with a small slope towards or away from the centre.

Bottom thickness is recommended to be not less than 4 mm, excluding corrosion injection for tank of not more than 1000 m³. The bottom of the tank with a volume of not less than 2,000 m³ must have a central part of a thickness of not less than 4 mm, excluding the corrosion injection and a thickened annular edge of not less than 6 mm thickness.



Figure 3 - Bottom of the tank

Roof

The roof of vertical steel tanks is made according to different standards and norms. They can be flat, conical, domed, spherical, and can be fitted with pontoons to reduce product losses through evaporation.

For tanks with volumes of 1,000 m³ to 5,000 m³ conical frame roofs are used. It consists of sector frames, a central shield, ring elements of a frame and a rolled sheet of a flooring made at the plant. As with traditional shield roofs, the frame is mounted as the roll of the wall is deployed. After the frames have been connected to each other by annular elements, the flooring is placed on the frames, which are pre-deployed near the bottom of the tank. The sheets are welded together, and then assembled along the perimeter to the corner of the wall. It is not permitted to attach the sheets to the elements of the framework.

In order to prevent the destruction of the walls of the tank as well as its removal from the bottom when the internal pressure of the emergency is exceeded, the frame roofs are designed in an explosion-proof version in such a way that the welded seam of the weld of the flooring is detached from the wall. In addition, the explosion protected roof acts as an emergency valve which, in the event of failure, relieves the pressure inside the tank, preserving the structure and the product inside.

Domed frame roofs are used for tanks with a volume of not less than 5,000 m³ and a diameter of not more than 50 m. The coating is in the form of a roof of fixed structure in a spherical form having a radial-annular framework system. When designing, the sphere radius is chosen to be within 0.8 to 1.5 of the tank diameter. Spherical roofs are manufactured in an explosion-proof form in order to prevent damage to the tank walls when the internal pressure of the emergency is exceeded. For this purpose, the flooring, in the form of metal sheets prepared for plate-by-plate assembly or large-size maps, is affixed only to the boundary element along the circumference of the roof. The tank wall and its integral attachment to the bottom are thus preserved.

Assembly and Installation

Assembly is the production process by means of which the equipment, individual structures or structures as a whole, manufactured in the plant in whole or in parts, is assembled and installed.

After transportation to the place of operation, the tank is installed in accordance with all requirements.

Preparation for installation begins with the opening of the pit, the installation of piles, which are packed under the entire bottom in the form of a solid pile field. The upper part of the foundation is embodied in the form of a solid reinforced concrete covering. A hydrophobic layer is superimposed on the foundation and compacted. It is also necessarily to provide electrical power to the installation site for use with welders and cranes. The way to the cranes is made. In addition to the

installation site, living facilities, tool storage depots and working rooms are being constructed.

The next stage is the installation of metal structures directly. Installation depends on the method of production of the main parts of the tank.

All works are carried out in accordance with working documents. The main executive documents are the registers and acts of the work, tests and inspections performed.

To a large extent, the choice of the method of installation depends on the construction of the tank being constructed and the physical and geographical characteristics of the area, and is carried out in accordance with the current regulatory framework of the Russian Federation:

- VSN 311-89 [5];
- GOST 31385-2016 [1];
- STO-SA-03-002-2009 [6];
- GOST 17032-2010 [7].

1.2. Means of monitoring the technical condition of vertical steel tanks

For the time being, in order to ensure the safe and reliable operation of the tank structure, the condition assessment has to be carried out periodically. Tanks are an integral part of hydrocarbon pipeline transport, and ensuring safe operation is the organization's main task. For these purposes, the sectoral regulations of the Russian Federation set the deadlines and the scope for the periodic diagnostic examination of tanks.

The oil and gas industry has shown a widespread system of extending the service life of tanks after their legal service life has expired. The diagnosis of the technical condition to ensure reliable and safe operation is carried out in accordance with the regulatory and technical documentation. They clearly indicate and establish the frequency and extent of the survey according to the life and operation of the tanks. Table 1 provides an overview of the frequency and scope of AST diagnostics.

Table 1 - General frequency of technical diagnosis of AST.

Operational Lifetime	Partial technical diagnosis	Complete technical diagnosis
Up to the age of 20	5 years after construction and 5 years after last diagnosis or repair	10 years after last repair or 5 years after partial technical diagnosis
More than 20 years	Every 4 years since the last diagnosis or repair	8 years after last repair or 4 years after partial technical diagnosis

All calculations of the tank wall belts are regulated by the following normative documents, such as: GOST 31385-2016 Vertical cylindrical steel tanks for petroleum and petroleum products. General technical conditions [1], rulebook 16.13330.2017 Steel constructions. Updated edition of Snip II-23-81*» [4] and rulebook 20.13330.2016 Loads and effects. Updated version Snip 2.01.07-85* [5].

In addition to the main inter-state standards and sets of rules, the organization has its own internal standards, which are necessarily taken into account by the designers when designing and calculating tanks.

The analytical method for the examination of the technical condition of the tanks is related to the theory of thin-walled shells, because the tank is a vertical cylindrical shell with the bottom and roof. As it is known, the tank cannot be perfectly symmetrical and also has a number of geometrical features due to the presence of hatches, pipes, holes and other elements in the structure. Therefore, the calculation of the stress-strain condition of the tank structure does not take into account a large number of assumptions to simplify its mathematical model. The best-known of these is the assumption of the homogeneity hypothesis of the ground base, which allowed to consider the axially symmetrical stress-deformed state of the structure.