

УХТИНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
Кафедра «Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

На правах рукописи



ТЕРЕНТЬЕВА МАРИНА ВЛАДИМИРОВНА

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СООРУЖЕНИЯ  
ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ  
РЕЗЕРВУАРОВ

Специальность 25.00.19 – Строительство и эксплуатация  
нефтегазопроводов, баз и хранилищ

Диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
д-р техн. наук, профессор  
Руслан Викторович Агинец

Ухта – 2019

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИХ ФУНДАМЕНТОВ.....</b>	<b>13</b>
1.1 Современное состояние вопроса обеспечения надежности резервуаров.....	13
1.2 Анализ аварийности и причин разрушения крупногабаритных вертикальных стальных резервуаров .....	17
1.3 Анализ существующих конструктивных решений оснований и фундаментов резервуаров .....	24
1.3.1 Кольцевой железобетонный фундамент .....	27
1.3.2 Фундамент в виде сплошной железобетонной плиты.....	28
1.3.3 Свайные фундаменты .....	31
1.4 Деформированное состояние плитного фундамента резервуара и особенности его взаимодействия с грунтовым основанием .....	33
1.5 Регулируемое взаимодействие фундаментов с грунтовым основанием .....	40
1.6 Постановка цели и задачи исследования.....	49
1.7 Выводы по главе 1 .....	50
<b>ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ.....</b>	<b>52</b>
2.1 Феноменология эффекта памяти формы .....	52
2.2 Постановка задачи экспериментального исследования.....	55
2.3 Выбор материала с ЭПФ для экспериментального исследования.....	58
2.5 Методика экспериментальных исследований (1 этап).....	62
2.6 Методика экспериментальных исследований (2 этап).....	69
2.7 Математическое планирование эксперимента.....	74
2.8 Математический и регрессионный анализ экспериментальных данных .....	84

2.9 Выводы по главе 2.....	89
<b>ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСИЛЕНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА РЕЗЕРВУАРА, АРМИРОВАННОГО СТЕРЖНЯМИ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ.....</b>	<b>91</b>
3.1. Методика расчета армирования бетонной матрицы стержнями с памятью ....	91
3.2 Методика расчета армирования плитного фундамента резервуара стержнями с памятью .....	103
3.3 Методика расчет армирования плитного фундамента резервуара стержнями с памятью с учетом упругого приближения жесткости противодействия бетона.	107
3.4 Численное моделирование системы «резервуар-фундамент-основание».....	109
3.4.1 Аналитические методы расчета деформации плитного фундамента резервуара .....	113
3.4.2 Численный метод расчета деформации плитного фундамента резервуара с использованием программы ANSYS.....	116
3.4.3 Геометрическое моделирование системы «резервуар-фундамент- основание» .....	117
3.4.4 Создание конечно-элементной сетки .....	123
3.4.5 Задание граничных условий и контактных пар .....	124
3.4.6 Нагружение и воздействия на конструкцию .....	126
3.4.7 Обработка результатов численного моделирования .....	127
3.5 Выводы по главе 3.....	135
<b>ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЯ СООРУЖЕНИЯ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛАМИ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ.....</b>	<b>137</b>
4.1 Конструкция основания и плитного фундамента, армированного стержнями с памятью для РВС-20000 .....	138
4.2 Технология устройства основания и плитного фундамента под РВС- 20000 .....	141
4.3 Технологии создания предварительного напряжения в армированных бетонных конструкциях с помощью стержней с ЭПФ .....	148

4.3.1	Заготовка арматуры.....	150
4.3.2	Технология натяжения арматуры .....	150
4.3.3	Выбор сварочного трансформатора для нагрева арматуры.....	154
4.3.4	Отпуск натяжения арматуры.....	158
4.4	Рекомендации по выбору типа фундамента при строительстве вертикальных стальных резервуаров .....	158
4.5	Выводы по главе 4.....	160
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>163</b>
	<b>СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....</b>	<b>164</b>
	<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....</b>	<b>165</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>185</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>186</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** Резервуары вертикальные стальные (далее - РВС) являются неотъемлемой частью парка оборудования добычи, транспорта и переработки углеводородного сырья. В качестве фундаментной конструкции, передающей нагрузку от сооружения на основание, используются преимущественно три типа фундамента: сплошные монолитные железобетонные плиты, железобетонное кольцо под стенку резервуара и свайный фундамент с монолитным ростверком. Сооружение фундаментов - это серьезные затраты материальных и трудовых ресурсов, и в зависимости от габаритов сооружения, их стоимость варьирует в пределах 15-30% от общей стоимости строительства.

Для крупногабаритных резервуаров в качестве фундаментной конструкции выбирают плитный фундамент, в виду технико-экономических показателей и его выносливости при воздействии нагрузок. Свайный фундамент, как правило, трудоемкий и затратный, принимают тогда, когда расчетные деформации плитного фундамента резервуара превышают допустимые пределы.

Согласно исследованиям отечественных и зарубежных авторов - В. Б. Галеева [33-35], М. В. Саяпина [90], Г. Г. Хопёрского [133], С. Ямамото и К. Кавано [142, 143], Р. Бэлла [148], Д. Гринвуда [155], установлено, что около 60% эксплуатируемых резервуаров имеют неравномерную осадку основания, которая впоследствии приводит к возникновению недопустимых напряжений в стенках и элементах конструкции, а иногда к аварийному разрушению.

Освоение нефтегазовых регионов севера Тюменской области и Ямало-Ненецкого округа, острова Сахалин предполагает строительство крупногабаритных резервуаров на грунтах со слабой несущей способностью. В этих условиях актуальной является задача обеспечения устойчивости оснований и надежности фундаментных конструкций для безотказной и безаварийной работы системы хранения углеводородов.

Применение фундаментов традиционных конструкций (кольцевой, плитный, свайный), как показывает опыт эксплуатации, является недопустимым для этих условий.

Для предотвращения неравномерных осадок разработан ряд технологических мероприятий по усилению грунтов. Однако, данные мероприятия материалоемки и трудозатратны, а в ряде случаев не эффективны, в виду невозможности прогнозирования поведения грунтовых условий на весь срок эксплуатации буферных емкостей [34, 36, 57, 58, 125].

Перспективным путем снижения осадки для плитных фундаментов, является армирование преднапряженной арматурой с эффектом памяти формы (далее - ЭПФ) взамен традиционной технологии [153, 156-159, 162, 172], обеспечивающего усиление бетонной конструкции. Эффективность плитных фундаментов с арматурой из сплавов с эффектом памяти обусловлена уменьшением прогибов и внутренних усилий в фундаменте; повышением трещиностойкости самой плиты; сокращением ее материальных затрат; снижением усилий в надземных конструкциях от неравномерных осадок основания. В то же время технология монтажа идентична традиционной.

Таким образом, совершенствование фундаментов традиционных конструкций, усиление плитного фундамента путем арматурного каркаса из материалов с ЭПФ, а также разработка рекомендаций по технологии сооружения усиленной фундаментной конструкции **является актуальной задачей.**

**Степень разработанности темы.** Российскими и зарубежными учеными изучены методы уменьшения деформаций оснований резервуаров, находящихся на слабонесущих грунтах, путем усиления грунтового основания. Исследования в данном направлении проводили В. Б. Березин [16, 17], Г. Г. Васильев [25], В. Б. Галеев [35], А. А. Землянский [58], П. А. Коновалов [64], Р. А. Магушев [127], С. Н. Сотников [90], А. А. Тарасенко [124, 125, 127] и др.

При большой толщине грунтов со слабой несущей способностью для того, чтобы предупредить неравномерную осадку основания резервуара, помимо укрепления грунта, необходимо увеличить несущую способность фундамента.

В СП 22.13330.2016 и РД-91.200.00-КТН-180-14 имеются требования о нормативной величине осадки нефтяных резервуаров, однако рекомендации по ее предотвращению на стадии проектирования в полной мере не разработаны, чему свидетельствуют возникновение аварийных ситуаций с нарушением проектного положения емкостей.

Для грунтов различных типов в качестве фундаментной конструкции крупногабаритных резервуаров наибольшее распространение получил плитный железобетонный фундамент, который имеет конструктивные несовершенства и в процессе эксплуатации деформируется в виде седлообразной эпюры с ярко выраженным максимумом центральной части, что приводит к последующей осадки сооружения.

Исследования зарубежных авторов Q. Chen and B. Andrews [149], C. J. Daniel [150], S. R. Debbarma [151], N. Hakan [156], E. Choi and S. H. Parka [158], A. J. Zak [172] и др. показывают высокую эффективность усиления железобетонных конструкций ответственного назначения путем их армирования материалами с эффектом памяти формы, но методики расчета усиления и технология монтажа, адаптированные для плитных фундаментов нефтяных резервуаров, отсутствуют.

Таким образом, разработка методики и технологии усиления плитных фундаментов, армированных материалами с ЭПФ, для объектов хранения углеводородов, с целью уменьшения осадки, является актуальной проблемой нефтегазовой отрасли и требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

**Целью исследования** является совершенствование технологии сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с эффектом памяти формы, для вертикальных стальных резервуаров нефти и нефтепродуктов.

**Задачи исследования:**

1. Выполнение экспериментальных исследований с учетом теории планирования эксперимента по выбору сплава с ЭПФ, подходящего под

эксплуатационные условия работы плитного фундамента резервуара и определение деформационных эффектов, генерируемых в исследуемом сплаве.

2. Разработка методики расчета усиления плитного фундамента, армированного стержнями из материалов с ЭПФ и определения рациональных параметров армирования.

3. Разработка численных моделей системы «резервуар-фундамент-основание» для сопоставительного анализа деформации фундамента, армированного по традиционной и предлагаемой технологии.

4. Разработка методики сооружения оснований РВС с использованием преднапряженного плитного фундамента, армированного стержнями с ЭПФ.

**Соответствие паспорту специальности.** Представленная диссертационная работа соответствует паспорту специальности 25.00.19 – «Строительство и эксплуатация нефтегазопроводов, баз и хранилищ», а именно областям исследования: «Напряженное состояние и взаимодействие с окружающей средой трубопроводов, резервуаров и оборудования при различных условиях эксплуатации с целью разработки научных основ и методов прочностного, гидравлического и теплового расчетов нефтегазопроводов и газонефтехранилищ» (п. 1), «Разработка и оптимизация методов проектирования, сооружения и эксплуатации сухопутных и морских нефтегазопроводов, нефтебаз и газонефтехранилищ с целью усовершенствования технологических процессов с учетом требований промышленной экологии» (п. 2).

#### **Научная новизна работы:**

1. Установлены зависимости возникающих напряжений в бетонной конструкции и армирующих элементах от величины деформации памяти ( $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34\%$ ) арматуры с ЭПФ и коэффициента армирования ( $2,8\% \leq \mu \leq 5,6\%$ ) железобетонного изделия, которые позволяют осуществить выбор рациональных параметров армирования для усиления плитного фундамента резервуара в условиях эксплуатационного интервала температур.

2. Предложен коэффициент эффективности армирования с применением стержневых систем из материала с ЭПФ ( $K$ ), определяемый выражением



$$K = \frac{E_A}{E_{cm}} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\alpha \cdot (A_k - A_n)},$$

где  $E_{cm}$ ,  $E$ , – модули Юнга арматурных стержней стальных и из материала с ЭПФ, соответственно,  $\alpha$  – температурная деформация арматуры из сплава с ЭПФ в процессе армирования,  $\varepsilon_n$  – деформация памяти арматуры из сплава с ЭПФ,  $A_k$ ,  $A_n$  – температуры аустенитных переходов материалов с ЭПФ, который позволяет оценить степень усиления бетонной конструкции для плитных фундаментов нефтяных резервуаров.

3. Разработан алгоритм выбора типа основания и фундамента для вертикальных стальных резервуаров хранения нефти и нефтепродуктов, в зависимости от инженерно-геологических условий строительства и объема резервуара, позволяющий обеспечить безаварийную эксплуатацию технологических емкостей в условиях нерегулируемого перемещения грунтов.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы.**

Установлены зависимости деформационных откликов и реактивных напряжений сплава ТН-1К для различных концентраций титана и никеля, позволяющие выбрать оптимальный состав сплава для заданного интервала температур эксплуатации арматурного каркаса плитного фундамента резервуара.

Разработана методика определения рациональных параметров армирования материалами с ЭПФ плитного фундамента резервуара с целью его усиления и повышения эксплуатационной надежности.

Представлены результаты моделирования распределения деформаций в фундаменте резервуара, армированном материалами с ЭПФ в зависимости от величины деформации, обусловленной эффектом памяти стержней.

Предложен коэффициент эффективности армирования материалами с ЭПФ от деформации памяти, который позволяет определить степень эффективности армирования предлагаемыми материалами в сравнении со стальной арматурой.

Разработаны рекомендации по технологии сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с памятью для РВС, где армирующие

элементы выполняют функцию усиления бетонной конструкции, предотвращая ее прогибы от перемещения грунта и сливо-наливных операций.

Разработан алгоритм выбора типа основания и фундамента для резервуаров, позволяющий подобрать данные несущие элементы в зависимости от конкретных инженерно-геологических условий строительства и объема емкости, с целью предотвращения неравномерной осадки и надежной эксплуатации конструкции.

Результаты диссертационного исследования **внедрены** в учебный процесс подготовки бакалавриата по направлению 21.03.01 Нефтегазовое дело в рамках дисциплин «Сопrotивление материалов» и «Основания и фундаменты» (приложение А).

**Разработано** техническое решение, защищенное патентом RU 2619578 C1 «Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции» (приложение Б), позволяющее осуществить практическую реализацию усиления бетонной конструкции материалами с ЭПФ.

#### **Методология и методы исследования.**

При выполнении диссертационного исследования применялся комплексный подход, включающий научный анализ, планирование и проведение экспериментальных исследований, измерение, сравнение, компьютерное моделирование.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретически доказано и экспериментально подтверждено, что для резервуара геометрическим объемом 20000 м<sup>3</sup>, расположенного в условиях слабонесущих грунтов, фундамент которого испытывает циклические нагрузки и работает в условиях отрицательных температур, применение арматуры из материалов с ЭПФ позволяет снизить прогиб и осадку фундаментной плиты на 38,5% и 49% соответственно, относительно данных величин при традиционном армировании стальными стержнями.

2. Практическая реализация использования бетонной плиты, армированной материалами с эффектом памяти формы, для резервуаров, позволяет исключить недопустимые неравномерные осадки основания крупногабаритных РВС и

обеспечить нормативную величину прогиба плиты, при этом количество стержней, шаг их установки, коэффициент армирования бетонной конструкции, выбирают в соответствии с разработанной методикой сооружения в зависимости от величины деформации памяти стержневых элементов.

**Степень достоверности и апробация результатов работы.** Основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в работе, базируются на экспериментальных данных, полученных с применением современных методов исследований, имитационного моделирования с использованием современной измерительной техники, научно-исследовательского оборудования и компьютерного обеспечения.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались в рамках международной научной конференции «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы», г. Витебск, Беларусь, 2014 г., Международного семинара «Рассохинские чтения» (г. Ухта, 2014-2018 г.), Международной конференции ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике», Москва, 2015 г., Международной молодежной научной конференции «Севергеозкотех» (г. Ухта, 2014-2018 г.), Межрегиональных вебинарах «Актуальные вопросы нефтегазотранспортной отрасли (г. Ухта, 2014-2018 гг.), II Международной научно-технической конференции молодежи ПАО «Транснефть» (г. Ухта, АО «Транснефть-Север», 2017 г.).

**Сведения о публикациях автора:** по теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 3 – в ведущих рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, получен 1 патент РФ на изобретение «Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции».

**Структура и объем диссертации.** Диссертация изложена на 186 страницах машинописного текста, состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложений, включает 27 таблиц, 65 рисунков. Библиографический список включает 172 наименования, в том числе 28 иностранных.

**Личный вклад автора** состоит в постановке цели и задач диссертационного исследования, изучении отечественных и зарубежных разработок в соответствующей области науки, проведении аналитических, теоретических и экспериментальных исследований, анализе полученных результатов, их апробации, подготовке публикаций по выполненной работе.

# ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРИЧИН РАЗРУШЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И МЕТОДОВ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИХ ФУНДАМЕНТОВ

## 1.1 Современное состояние вопроса обеспечения надежности резервуаров

Резервуарный парк предприятий нефтегазового комплекса России составляет порядка 50 млн. м<sup>3</sup>. В качестве емкости для резервного хранения углеводородов преимущественно используются стальные вертикальные резервуары, функциональное значение которых обеспечивает технологический процесс транспорта углеводородов.

Резервуарам назначается высокая степень опасности, в виду их потенциальной угрозы для окружающей среды в районе их расположения, эксплуатирующего предприятия и обслуживающего персонала.

На этапе проектирования и строительства к РВС предъявляют высокие требования промышленной безопасности с целью обеспечения безаварийной эксплуатации, и определяют им категорию особо ответственных сооружений.

Проблеме обеспечения эксплуатационной надежности резервного хранения нефтепродуктов посвящены работы: В. Л. Березина [16, 17], Г. Г. Васильева [25], В. Б. Галеева [35], М. К. Сафаряна [106], В. Е. Шутова [138] и др.

По мнению данных авторов считается, что на конструктивную надежность резервуаров влияет ряд факторов, генеральным из которых является напряженно-деформированное состояние (НДС) уторного узла, расположенного между стенкой и днищем резервуара, а также деформированное состояние конструкции в результате оседания его основания.

Анализ научно-технических публикаций [12, 16, 17, 25] свидетельствует о том, что нефтяные предприятия стремятся обеспечить безаварийную и надежную работу конструкции с минимальными затратами на этапе возведения и эксплуатации.

Надежность резервуара понимают, как свойство его конструкции осуществлять функции сливо-наливных операций и хранения углеводородов при определенных параметрах (плотность и вязкость, оборачиваемость, уровень и скорость наполнения емкости продуктом, температура, масса снежного покрова, силы ветра, величина сейсмического воздействия и т.д.) [10].

Существует ряд критериев, которые характеризуют эксплуатационную надежность резервуара: работоспособность, безотказность, долговечность и ремонтпригодность.

Для оценки надежности резервуара, его рассматривают как сложную техническую систему, которая состоит из элементов, характеризующихся определенными выходными параметрами и назначающими степень качества конструкции [12, 13, 33, 35]. Данные элементы разделяют на группы, отказ которых влияет или не влияет на работоспособность резервуара (таблица 1.1) [10].

Таблица 1.1 – Группы элементов резервуара

Номер группы	Элементы резервуара	Вид разрушения	Влияние на работоспособность резервуара
1	отмостка	излом	100% не влияет
	цвет конструкции	изменение цвета и качества покрытий	
2	ограждение	излом	90% не влияет, возможен ремонт при эксплуатации емкости
	замерный люк	выход из строя	
	лестница	излом	
3	система дыхательных клапанов	изменение качества работы	90% не влияет, возможна регулировка при оперативном хранении
	другие вспомогательные системы		
4	днище	разрывы по сварным шва	100% влияет, невозможно осуществлять дальнейшую эксплуатацию емкости
	фундамент	прогибы, локальные просадки или выпучены, механические разрушения	
	основание	осадки, просадки, разуплотнения	

Согласно данной классификации, группы с первой по третью незначительно влияют на эксплуатацию резервуара, их ремонт и регулировка возможна в период оперативной работы емкости. Только последняя группа характеризуется отказом конструкции, в которую входят элементы: основание, днище и фундамент.

Поэтому детальное изучение работы этих элементов при эксплуатации, выбор оптимальных методов и материалов при их проектировании и строительстве, является первостепенным фактором, который послужит для дальнейшей надежности и долговечности конструкции [40].

Увеличивающийся рост потребности в нефтепродуктах, чему свидетельствует динамика добычи нефти российскими нефтяными компаниями (таблица 1.2, рисунок 1.1), значительное снижение объемов углеводородов разработанных месторождений и переход к освоению запасов морского шельфа и Крайнего Севера, потребует сооружения новых нефтебаз и нефтехранилищ.

Требования экологической безопасности к этим объектам предъявляются более жесткие [41].

Таблица 1.2 – Динамика добычи нефти нефтяными компаниями России (млн. тонн)

Компании	2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Роснефть	115,8	122,6	125,80	193,00	190,89	189,20	189,71	210,81
ЛУКОЙЛ	95,9	96,0	84,20	85,50	86,57	81,65	82,99	83,20
Сургутнефтегаз	59,5	60,8	61,40	61,40	61,43	61,62	61,85	62,50
Газпромнефть	29,8	35,3	31,60	32,70	33,62	34,32	37,76	59,90
Татнефть	26,1	26,1	26,30	26,45	26,53	27,25	28,69	28,90
Башнефть	14,1	15,1	15,40	17,80	16,19	19,92	21,38	21,40
Славнефть	18,4	18,1	17,90	16,20	17,79	15,48	15,00	15,80
Руснефть	13,0	13,6	7,11	7,45	8,53	7,38	7,00	7,10

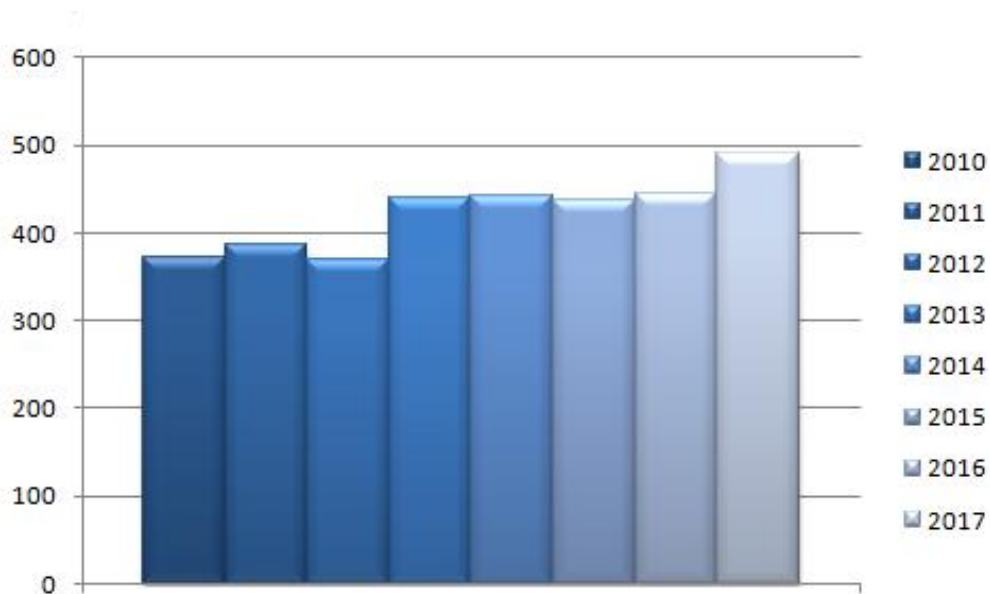


Рисунок 1.1 – Динамика роста общего объема нефти нефтяными компаниями России за период с 2010 по 2017 г.

За последние десятилетия у зарубежных стран выросли потребности в области экспорта нефти РФ, это факт поспособствовал созданию терминалов прибрежной части Сахалина, Ямала, Балтики, что сопровождается расширением нефтехранилищ и сооружением крупногабаритных резервуаров объема от 20000 м<sup>3</sup> и более [72].

Перспективные проекты нефтепроводных магистралей (Трубопроводная система «Восточная Сибирь - Тихий океан», магистральный нефтепровод «Заполярье-Пурпе») предполагают строительство крупногабаритных резервуаров на грунтах со слабой несущей способностью, где возникает необходимость повышения устойчивости оснований и прочности фундаментных конструкций для безаварийного функционирования системы хранения углеводородов.

Таким образом, повышение надежности и ресурса существующих конструкций оснований и фундаментов, которые будут безаварийно работать в экстремальных условиях согласно нормативно-техническим требованиям безопасности, является актуальной задачей настоящего исследования.



## 1.2 Анализ аварийности и причин разрушения крупногабаритных вертикальных стальных резервуаров

Вертикальные стальные резервуары – это объекты повышенной опасности нефтяной отрасли.

Существует ряд факторов, которые подтверждают высокую степень опасности данных объектов (таблица 1.3).

Таблица 1.3 – Факторы, обуславливающие степень опасности РВС [62]

Конструктивные несовершенства	Внешние и внутренние воздействия
Сложно контролируемая протяженность сварных швов конструкций	Большая пожаро-взрывоопасность хранимого продукта
Конструктивные несовершенства геометрической формы емкости	Возможные деформации стенки резервуаров в процессе эксплуатации
Разрушение отдельных зон при небольшом числе циклов работы	Быстрое течение коррозионных процессов элементов емкости
Появление НДС на границе раздела между стенкой и дном сооружения	

Аварийная ситуация резервуара связана с большим объемом экономических, экологических и социальных затрат. В критических ситуациях экономический ущерб от аварии резервуаров может в 500 раз превысить первичные затраты на их строительство. Поэтому важную роль имеет выбор надежных конструктивных решений на этапе строительства резервуара.

Аналізу разрушений резервуаров посвящены работы Афонской Г. П. [9], Беляева Б. И. [15], Березина В. Л. [16, 17], Васильева Г. Г. [25], Галеева В. Б. [33-35], Землянского А. А. [58], Иванова Ю. К. и Коновалова П. А. [64], Мангушева Р. А. [127], Розенштейна И. М. [104], Тарасенко А. А. [124, 125, 127], Ханухова Х. М. [128], Хоперского Г. Г. [133] и других.

Наблюдаемый в последние десятилетия интенсивный рост добычи нефти приводит к увеличению габаритных размеров резервуаров и их объёмов, что значительно увеличивает нагрузку на их основания [98].

Для увеличения максимально допустимого объема резервуара необходимы фундаменты принципиально надежной конструкции, поскольку при значительных размерах площадки изменяются условия консолидации грунтовых оснований.

Анализ литературных источников [11, 15, 20, 23, 25, 33, 48] показал, что до 60% эксплуатируемых в настоящее время РВС имеют неравномерную осадку основания.

По данным статистического анализа причин аварий 213 резервуаров, рассмотренных в работе Г. Г. Васильева и А. П. Сальникова [25], выделено несколько существенных направлений доминирующих причин разрушения крупногабаритных резервуаров и установлено, что 46% всех аварий РВС вызваны недопустимо большими и неравномерными осадками основания (рисунок 1.2).

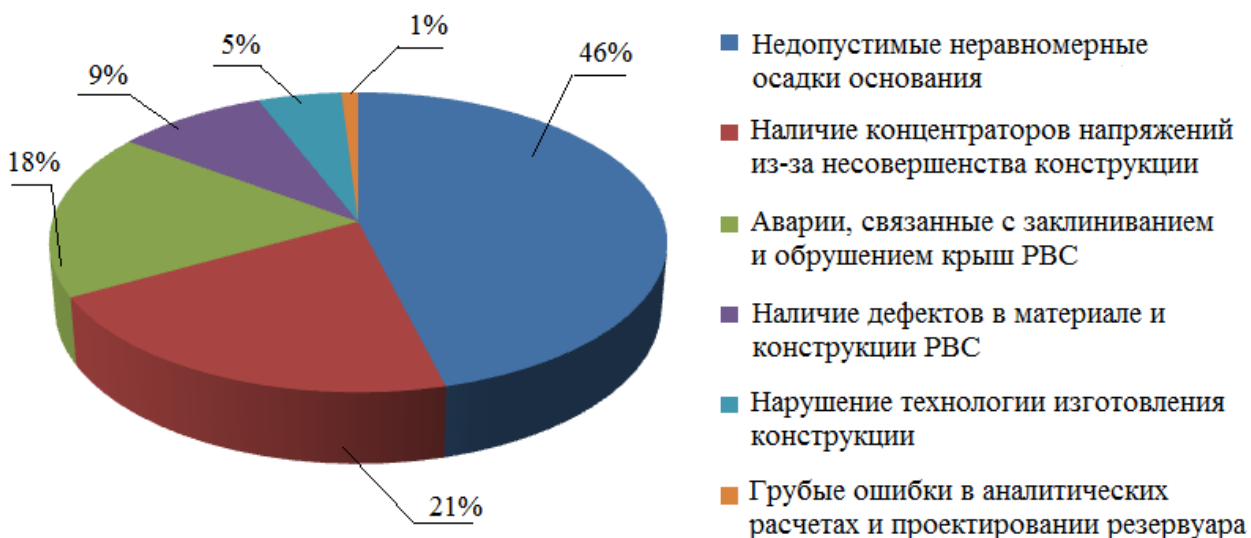


Рисунок 1.2 – Доминирующие причины разрушения крупногабаритных резервуаров по данным Г. Г. Васильева и А. П. Сальникова

Исследования Тарасенко А. А. [125], свидетельствуют, что осадка резервуара является одной из главных причин разрушения РВС (рисунок 1.3). Автор подвергнул анализу информацию о случившихся авариях 46 резервуаров.

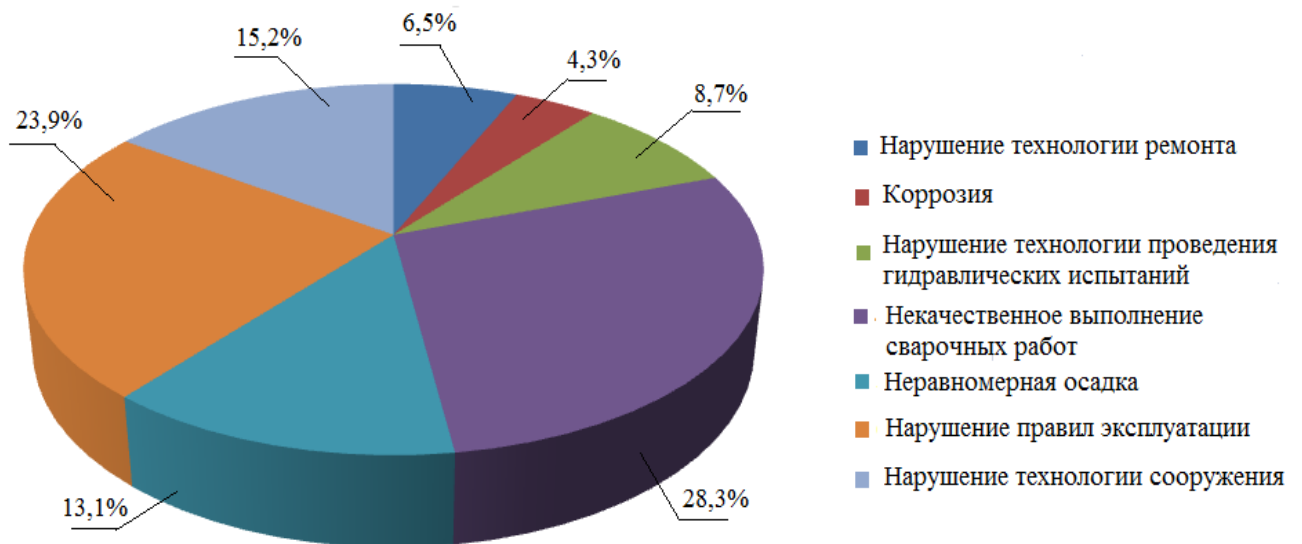


Рисунок 1.3 – Основные причины разрушения РВС по данным Тарасенко А. А.

Анализ причин 54 аварий, которые произошли в период с 2002 г. по 2010 г., проводился по исследованиям [80, 126] (рисунок 1.4).

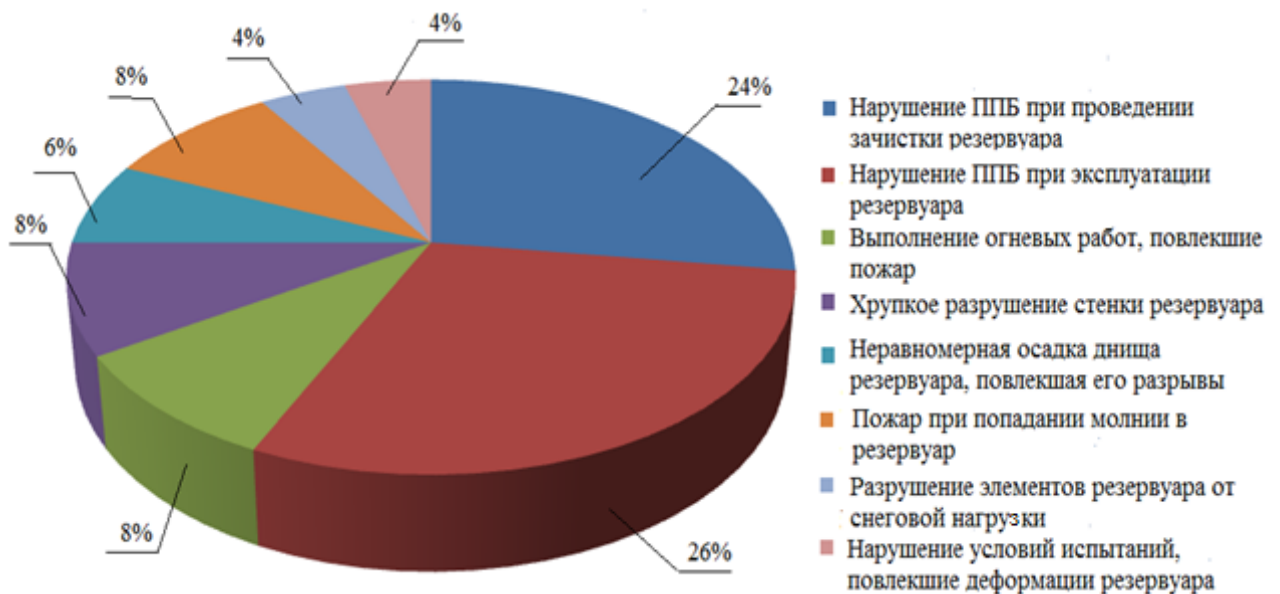


Рисунок 1.4 – Основные причины разрушения РВС

В исследовании И. М. Розенштейна [104] все причины аварий делятся на две группы: прямые и косвенные (рисунок 1.5).

Исходя из отечественных и зарубежных источников Галеевым В. Б. в 1987 году была предложена классификация причин аварий (рисунок 1.6).

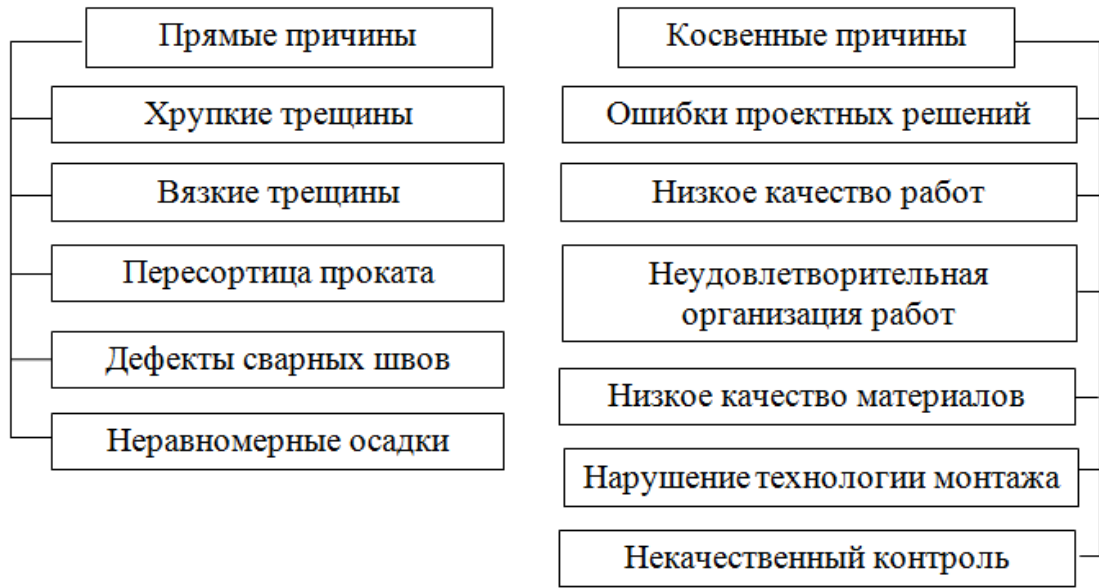


Рисунок 1.5 – Причины разрушения РВС по И. М. Розенштейну



Рисунок 1.6 – Причины разрушения РВС по В. Б. Галееву [33]

Анализ приведенных причин аварий отечественных и зарубежных исследований позволяет составить их уточненную классификацию (рисунок 1.7), где наибольшее распространение от общего числа аварий приходится на неравномерную осадку – 34,5%.

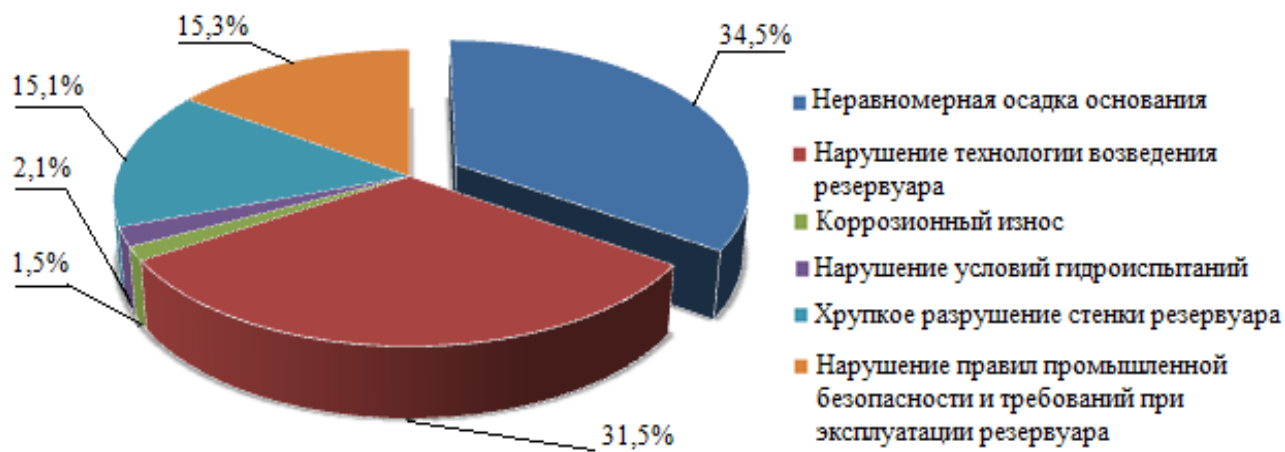


Рисунок 1.7 – Основные причины разрушения РВС, согласно проведенному анализу

Оценка выделенных причин разрушений РВС свидетельствует о необходимости экспериментально-теоретических исследований в области снижения осадок с целью повышения эксплуатационной надежности РВС.

Ряд зарубежных компаний Chevron, British Petroleum, ESSO неравномерную осадку основания выделяют как генеральную причину разрушений РВС.

Некоторые примеры аварий в практике эксплуатации резервуаров, вызванные неравномерной осадкой, представлены в таблице 1.4.

Рассмотренные примеры показывают, что для восстановления работоспособного состояния резервуара требуются большие затраты ресурсов и времени, даже несмотря, что среди примеров не было катастрофических аварий.

Аварии, связанные с локальными осадками основания и фундамента резервуара, чаще всего происходят из-за возникновения трещин днища, а в случае применения плитного фундамента, то трещин в самой плите.

Таблица 1.4 – Обобщение некоторых случаев аварий резервуаров

Тип и местоположение резервуара	Этап возникновения аварии	Причина и последствия аварии
Резервуар объёмом 50000 м <sup>3</sup> , Т-270, корпорация Mitsubishi (Япония, 1974 г.) [136]	При осуществлении гидравлических испытаний резервуара, вблизи устроен котлован под фундамент шахтной лестнице	Разрыв днища в результате неравномерной осадки грунтового основания, развитию которой послужили работы, связанные с разработкой котлована под лестницу
Резервуар объёмом 23800 м <sup>3</sup> , нефтехранилище Карипито (Венесуэла, 1961 г.) [54, 155]	На этапе гидравлических испытаний при полном наполнении резервуара	При гидравлических испытаниях произошло быстрое возрастание осадки в результате консолидации подстилающих слоев грунта
Резервуар объёмом 30000 м <sup>3</sup> , компания ESSO, г. Фоулей (Англия, 1970 г.) [127]	На этапе эксплуатации резервуара при полном заполнении нефтью	Разрушение днища резервуара, в результате локальной просадки основания.
Мокрый газгольдер объёмом 20000 м <sup>3</sup> , Уфимский завод синтетического спирта, (г. Уфа, 1969 г.) [71]	На этапе гидравлических испытаний в весенний период произошло оттаивание песчано-гравийной смеси основания резервуара, которая изначально не была качественно уплотнена	Разрыв днища и крен газгольдера, вследствие локальных просадок основания, вызванных оттаиванием некачественно уплотненного основания
Резервуар объёмом 24000 м <sup>3</sup> , (Япония, 1977 г.) [142]	После пяти лет эксплуатации произошла неравномерная осадка основания	Крен резервуара из-за неравномерной осадки основания, вызванной деформациями подстилающих грунтов
Резервуар объёмом 5000 м <sup>3</sup> , г. Эссекса (Англия, 1951 г.) [143]	В период первого заполнения резервуара обнаружен крен	Крен резервуара вследствие осадки основания, которое состояло из различной толщины слабонесущих грунтов
Резервуар объёмом 20000 [148]	В процессе эксплуатации резервуара кольцевая фундаментная плита прорезала верхний слой сильно-сжимаемого грунта, образовался значительный зазор между и фундаментом	Неравномерные осадки основания, вследствие устройства резервуара на площадке с двумя слоями сильно-сжимаемых грунтов.

Такие трещины являются концентраторами напряжений, приводящие к разрыву элементов конструкции, выносу продукта к основанию и последующему размыву грунта. При этом, разрыв днища резервуара происходит при относительной разнице осадки периферийной части и центра основания более 2,3 % диаметра резервуара.

В условиях слабонесущих грунтов осадка резервуара может длиться более 10 лет. Значение ее зависит от физико-механических свойств грунтов естественного сложения и от изменения их во времени.

Существующие виды осадок РВС представлены на рисунке 1.8 [64, 71, 90].



Рисунок 1.8 – Виды осадок оснований резервуаров

На основании вышеизложенных причин аварий можно выделить два основных направления, способствующих возникновению неравномерных осадок резервуара (рисунок 1.9).

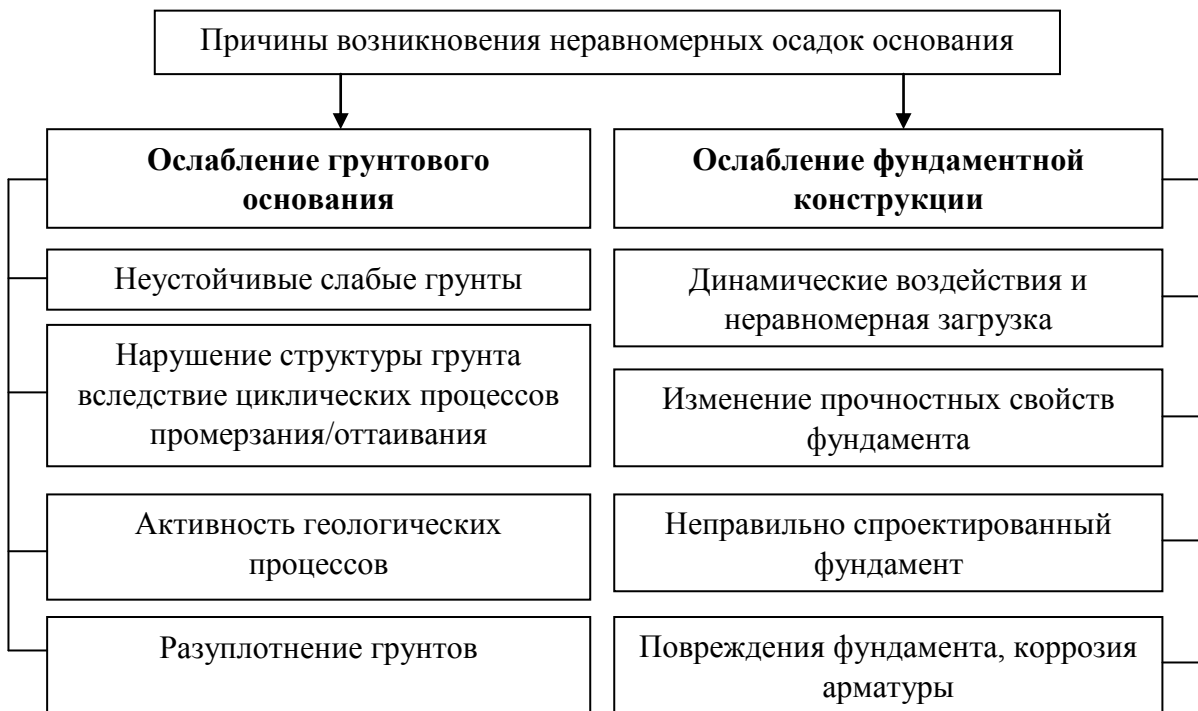


Рисунок 1.9 – Причины возникновения неравномерных осадок

Одно направление характеризуется ослаблением грунтового массива, вследствие разуплотнения грунтов, их неоднородности, неустойчивости и активном влиянии геологических процессов. Аварии, вызванные данными причинами, влекут за собой недопустимые неравномерные осадки основания резервуара совместно с деформацией металлоконструкций, оборудования и фундамента. При этом на территории сооружения возможны выпучины и впадины грунтового массива.

Другое направление связано с ослаблением фундамента резервуара совместно с его днищем, вызванное неравномерной загрузкой при сливо-наливных операциях, изменением прочностных свойств и нарушением технологии строительства фундамента.

При этом деформация фундамента и днища проявляется в виде эпюры с максимальным прогибом в центральной части, создающая растягивающие усилия этих элементов и их разрушение.

С целью предупреждения подобных аварий необходимо применять дополнительные мероприятия, способствующие снижению неравномерной осадки и деформации фундаментных конструкций.

Резервуары, находящиеся на грунтах со слабой несущей способностью, при аварийной ситуации влекут за собой колоссальные затраты средств и времени на их восстановление, однако общие затраты на устройство более сложных конструкций оснований и фундаментов могли бы их компенсировать.

### **1.3 Анализ существующих конструктивных решений оснований и фундаментов резервуаров**

В качестве опорной конструкции вертикальных стальных резервуаров, которое принимает на себя гидростатическое давление нефтепродукта, используются естественное или искусственное основание с установленным на нем фундаментом различной конфигурации. Тип и размеры фундамента определяются



в зависимости от геологических и гидрогеологических условий строительной площадки, размеров резервуара, свойств продукта, технологических требований.

Назначение оснований и фундаментов для РВС - обеспечение его устойчивости и долговечности, защита днища от агрессивного воздействия грунтовой воды и влаги, достижение надежных и безаварийных условий эксплуатации [127].

Площадки, пригодные для возведения резервуаров представляют собой массивы, сложенные скальными, глинистыми, суглинистыми грунтами различной степени влажности.

Учитывая тенденцию развития добычи нефтепродуктов в условиях Крайнего Севера и потребность увеличения объемов хранения, требуется строительство крупногабаритных резервуаров на площадках, представленных водонасыщенными илистыми, заторфованными, вечномёрзлыми, неоднородными и сильносжимаемыми грунтами. Эти условия ведут к разработке и усовершенствованию конструктивных решений в области фундаментных конструкций, способных безаварийно работать на грунтах, непригодных для строительства [90].

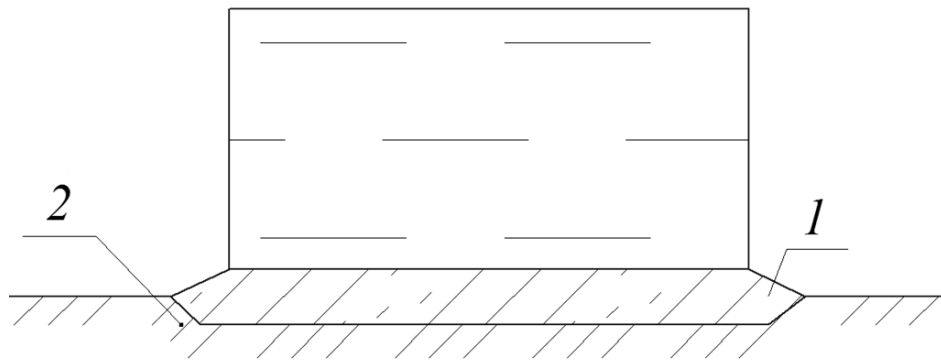
Вопросам проектирования, способам сооружения оснований и фундаментов под резервуары посвящены работы отечественных ученых: Афанасьева В. А. [8], Березина В. Л. [16, 17], Галеева В. Б. [34, 36], Зверевича Т. М. [55], Иванова Ю. К. [90], Землеруба Л. Е. [56], Землянский А. А. [57-58], Коновалова П. А. [64, 65, 127], Мангушева Р. А. [127], Сафаряна М. К. [106], Тарасенко А. А. [125], Хопёрского Г. Г. [133] а также зарубежных: Грина П. и Хаита Д. [154] и др.

В зависимости от конструктивных особенностей сооружения и слагаемых грунтов площадки строительства фундаменты резервуаров подразделяются на:

- кольцевые, расположенные по периметру сооружения;
- плитные, в виде фундаментной плиты под всей площадью сооружения;
- свайные (в виде отдельных опор) по периметру или под всей площадью сооружения.

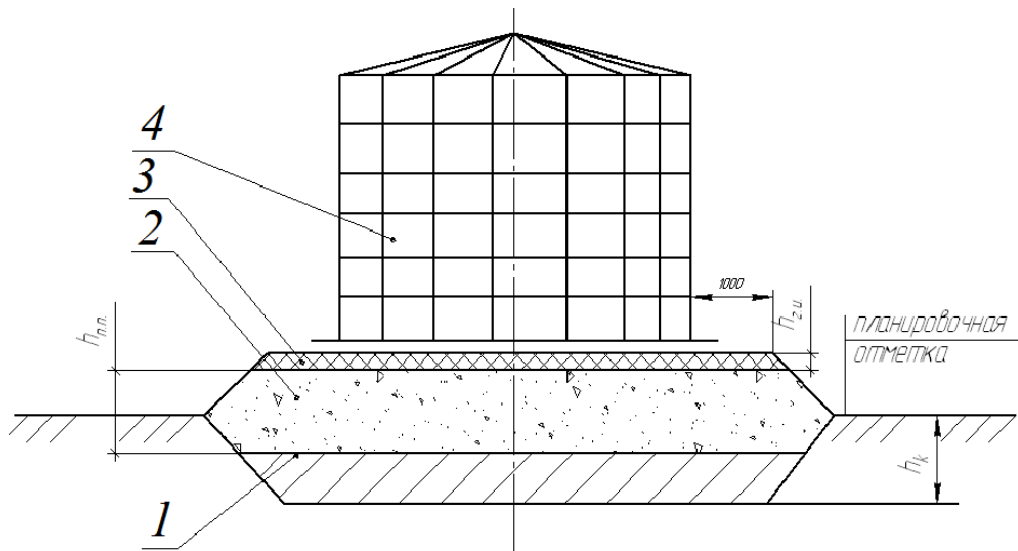
Факторами, которые обуславливают выбор конструкции фундамента, являются: характеристики грунта (состав, сжатие, пучинистость, глубина сезонного промерзания и пр.), объем резервуара, величина нагрузок [103].

В качестве грунтового основания под фундаменты резервуаров применяют: естественные (рисунок 1.10) и искусственные основания (рисунок 1.11).



1- щебеночная или песчаная насыпь; 2 – естественное основание

Рисунок 1.10 – Естественное основание резервуара



1 - грунтовая подготовка; 2 – песчаная подготовка; 3 – гидроизолирующий слой; 4 - резервуар

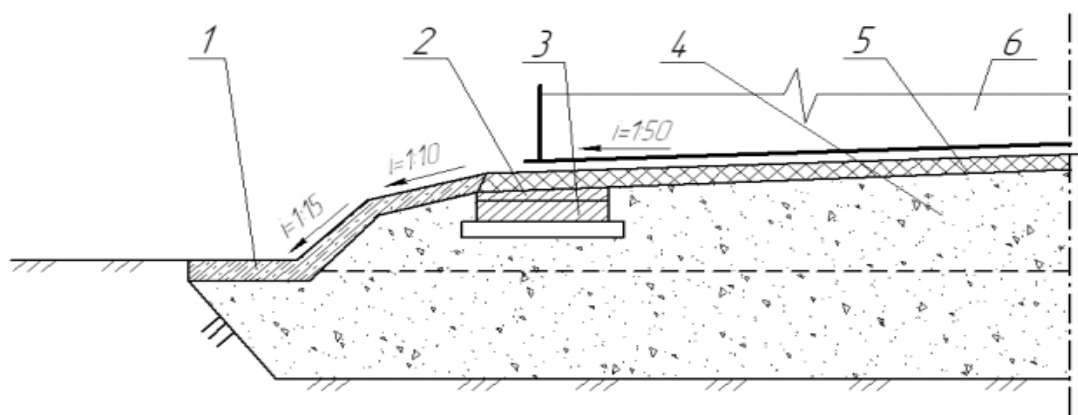
Рисунок 1.11 – Искусственное грунтовое основание резервуара

В отечественной и зарубежной практике наиболее экономичным вариантом является естественные основания под фундаменты резервуаров, получившие наибольшее распространение. Чаще всего они используются в комбинации с

песчаными или грунтовыми подушками, выполняются в виде подсыпки на основание с полным или частичным отказом от свай под резервуаром.

### 1.3.1 Кольцевой железобетонный фундамент

При наличии значительных контурных нагрузок по периметру стенки резервуара на естественном или искусственном основании используется кольцевой фундамент (рисунок 1.12).



1 – отмостка из бетона; 2 – цементная подливка; 3 – бетонное кольцо;  
4 – гравийно-песчаная подушка; 5 – гидроизолирующий слой; 6 – резервуар

Рисунок 1.12 – Фундамент резервуара кольцевого типа на искусственном основании

В зависимости от объема резервуара принимается ширина кольца: для резервуаров объемом до  $3000 \text{ м}^3$  – не менее 0,8 м, объемом более  $3000 \text{ м}^3$  – не менее 1 м. Толщина кольца принимается 0,3 м [34, 103].

Такая конструкция фундамента обеспечивает устойчивость фундаментного слоя (подсыпки), при этом, не увеличивая жесткости узла сопряжения днища со стенкой.

Помимо самого кольца, в практике использования кольцевого фундамента, дополнительно устраивают гравийно-щебеночную подсыпку. Такие фундаменты

изготавливаются из арматурного каркаса, расположенного по контуру стенки резервуара, залитого бетонной смесью и имеющего прямоугольное сечение.

В ряде случаев устройства резервуара на естественное основание, кроме железобетонного кольца, применяют щебеночное кольцо под стенку. Конструктивные размеры щебеночного кольца варьируют по ширине от 1-2 м, по высоте 60-90 см.

Данная конструкция фундамента способна прорезывать сжимаемые грунтовые слои основания и привести к неравномерной осадки резервуара, особенно для резервуаров объемом более 10000 м<sup>3</sup>.

Поэтому в сложных инженерно-геологических условиях для крупногабаритных резервуаров при использовании кольцевого фундамента применяется искусственное основание, а в большинстве случаев используются свайный или плитный фундамент.

Согласно [90, 100] фундаменты кольцевого типа на естественном основании получили широкое распространение в основном для резервуаров объемом от 1000 до 5000 м<sup>3</sup>.

Достоинства:

- низкие затраты на материалы;
- частичное снижение вертикальных перемещений РВС.

Недостатки:

- жесткость кольца приводит к увеличению краевых моментов стенки резервуара;
- образование зазора под днищем резервуара в районе окрайки и как следствие, возникновение критических напряжений в зоне узла сопряжения [127].

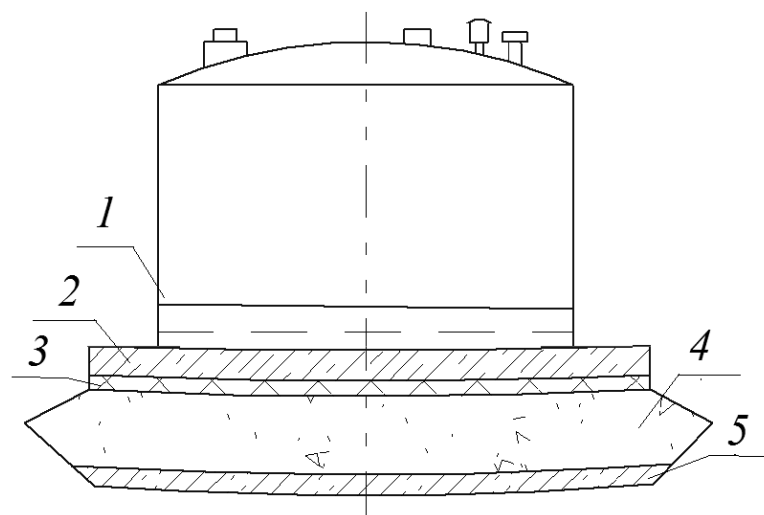
### **1.3.2 Фундамент в виде сплошной железобетонной плиты**

В последнее время возросла тенденция устройства фундаментов под вертикальные стальные резервуары в виде круглой монолитной железобетонной

плиты на естественном грунтовом основании, либо монолитным ростверком на искусственном свайном поле.

В компании ПАО «Транснефть» для снижения экономических показателей строительства резервуаров выбирают плитный фундамент, а трудоемкий свайный проектируют тогда, если расчетные деформации плиты превышают предельно допустимые значения, а мероприятия по упрочнению оснований не дают желаемых результатов [50, 51].

Плитные фундаменты рекомендуется устанавливать под резервуары объемом более  $10000 \text{ м}^3$ , на мерзлых и слабых неоднородных грунтах, а также для всех резервуаров при хранении в них различного рода углеводородов на естественном или искусственном основании (рисунок 1.13) в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства.



1 – резервуар; 2 – фундаментная плита; 3 – гидроизолирующий слой;  
5 – грунтовая подготовка

Рисунок 1.13 – Фундамент в виде сплошной железобетонной плиты на искусственном основании

Для обнаружения возможных протечек продукта железобетонная плита выполняют с уклоном 1 % от центра к периметру.

Фундаментные плиты чаще всего заглубляют ниже планировочной отметки основания резервуара, либо устраивают на его поверхности [127].

Железобетонная плита, расположенная в основание резервуара, является барьером от проникновения подземных вод, обладает сопротивляемостью неравномерным осадкам и значительной несущей способностью. В общем случае плитные фундаменты выполняются в виде сплошных железобетонных плит, иногда усиленных ребрами жесткости и арматурным каркасом, которые повышают жесткость конструкции и устойчивость к неравномерным осадкам в условиях значительных нагрузок и переменной загруженности, а также оснований неравномерной сжимаемости.

За счет своей универсальности плитные фундаменты получили самое широкое распространение в практике строительства резервуарных парков особенно в условиях Крайнего Севера, осложненных неустойчивыми ненадежными грунтами. Утепленная плита с проложенными в ней коммуникациями одновременно выполняет функции фундамента и радиатора отопления, препятствуя застыванию хранимых продуктов.

Согласно [103] плитные фундаменты применяются для резервуаров объемом 10000-20000 м<sup>3</sup> на естественном основании. При достаточной несущей способности основания и устройством свайного поля с монолитным плитным железобетонным ростверком такая конструкция фундамента применяется для резервуаров объемом свыше 20000 м<sup>3</sup>. Например, плитные фундаменты устроены на береговом РП «Варандей» для резервуарного парка под РВСП-50000 м<sup>3</sup>, а также такие фундаменты устроены под знаменитые «сталинские высотки» в Москве, Останкинская телебашня, здания «Тrianon» и «MainPlaza» во Франкфурте-на Майне.

Достоинства:

- увеличенная жесткость плиты способствует частичному снижению неравномерных осадок грунтового основания;
- увеличенная площадь передачи нагрузки от емкости на грунт влечет за собой некоторое уменьшение осадки.

Недостатки:

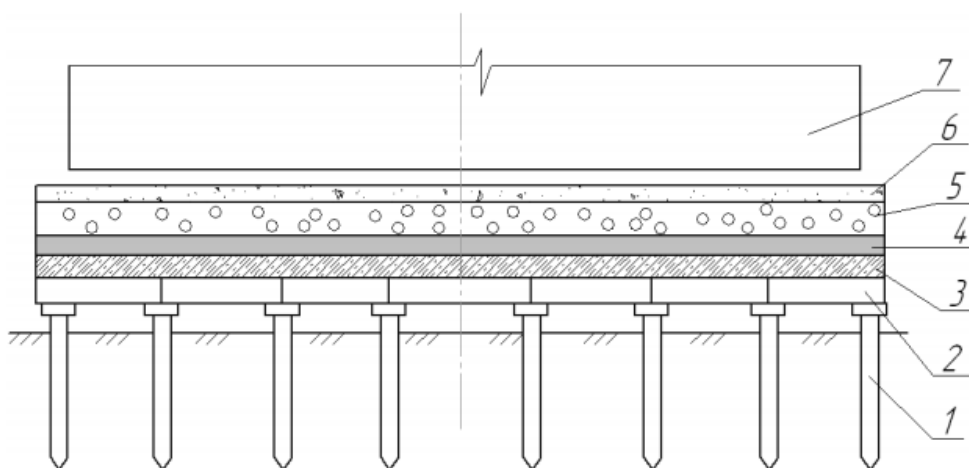
- высокая материалоемкость и стоимость сплошной железобетонной плиты;
- большие трудозатраты при возведении фундамента. [127]

### 1.3.3 Свайные фундаменты

Областью применения свайных фундаментов являются участки грунтов, сложенные заболоченными грунтами мощностью слабого слоя более 4 м и участки с вечномерзлыми грунтами.

Расходы на возведение свайного фундамента составляют 70% от общих затрат на материалы и сооружение самого резервуара, что говорит о его экономической нецелесообразности и узкой области применения.

До недавнего времени в нашей стране обычно для устройства фундаментов применяли призматические забивные сваи различной длины и сечения в сочетании с ростверками и плитами [23, 36]. На сегодняшний день в практику строительства вошли винтовые стальные сваи с круглым сечением. При этом сваи устраиваются по всей площади сооружения в виде сплошного свайного поля с расстоянием между сваями 1 м или по периметру в виде кольца (рисунок 1.14).



1 – сваи; 2 – железобетонные плиты, расположенные по периметру резервуара; 3 – цементная стяжка; 4 – слой рубероида; 5 – теплоизоляционный слой; 6 – слой песка; 7 - резервуар

Рисунок 1.14 – Свайный фундамент с кольцевым свайным полем

При строительстве резервуаров с устройством свайных фундаментов не всегда удается получить желаемый результат, при этом капиталовложения иногда приближаются к стоимости самих металлоконструкций.

В практике применения данных фундаментов для резервуаров были зафиксированы случаи, когда на этапе гидравлических испытаний осадка основания свайного фундамента превышала нормативную, и составляла до половины величины осадки, предусмотренной на весь срок службы резервуара.

При строительстве свайных фундаментов для крупногабаритных резервуаров, длину сваи назначают 0,25 диаметра резервуара. При такой глубине заложения сваи, как правило, оказываются в зоне действия наибольших вертикальных напряжений в основании резервуара и под действием данных усилий разрушаются [53].

Достоинства:

- если оголовки свай будут находиться в зоне несжимаемых грунтов, то осадка возводимого сооружения будет частично снижена;
- фундаментные сваи производят некоторое уплотнение грунта, что частично снижает осадку сооружения.

Недостатки:

- очень высокие затраты на монтаж и материалы;
- в случае устройства свай в условиях только слабых грунтов их применение не эффективно [127].

В результате анализа публикаций [34, 36, 53, 65, 73] по выбору типа оснований и фундаментов для резервуаров выделена их классификация (таблица 1.5), основанная на учете инженерно-геологических условий строительной площадки и объема резервуара.



Таблица 1.5 – Классификация оснований и фундаментов под резервуары

Инженерно-геологические условия строительной площадки	Объем резервуара	Тип основания	Конструкция основания	Основной несущий элемент основания
Надежные грунты	$V \leq 5000 \text{ м}^3$	естественное основание	насыпные грунты	грунтовая подготовка
	$V \geq 5000 \text{ м}^3$			железобетонное кольцо
Слабонесущие грунты (толщиной до 4х м)	$V \leq 5000 \text{ м}^3$	естественное основание	насыпные грунты	песчано-щебеночная подготовка
	$V \geq 5000 \text{ м}^3$	искусственное основание	кольцевое свайное поле/щебеночная подготовка	свая/железобетонная плита
Грунты всех видов	$V \leq 10000 \text{ м}^3$	естественное основание	насыпные грунты	железобетонная плита
	$V \geq 10000 \text{ м}^3$			железобетонная плита с элементами усиления
Слабонесущие грунты (толщиной свыше 4х м)	$V \leq 10000 \text{ м}^3$	искусственное основание	кольцевое свайное поле	железобетонный ростверк
	$V \geq 10000 \text{ м}^3$		сплошное свайное поле	металлический ростверк

#### 1.4 Деформированное состояние плитного фундамента резервуара и особенности его взаимодействия с грунтовым основанием

Исходя из классификации (таблица 1.5) видно, что для грунтов различных видов и сложных инженерно-геологических условий, для крупногабаритных резервуаров в качестве фундаментной конструкции наибольшее распространение получила железобетонная плита, устроенная на естественном или искусственном основании, в виду своей долговечности и надежности. Традиционно такой тип

фундамента состоит из круглой бетонной плиты, армированной сетчатым арматурным каркасом по всей площади (рисунок 1.15), установленной на подготовленное или естественное грунтовое основание.

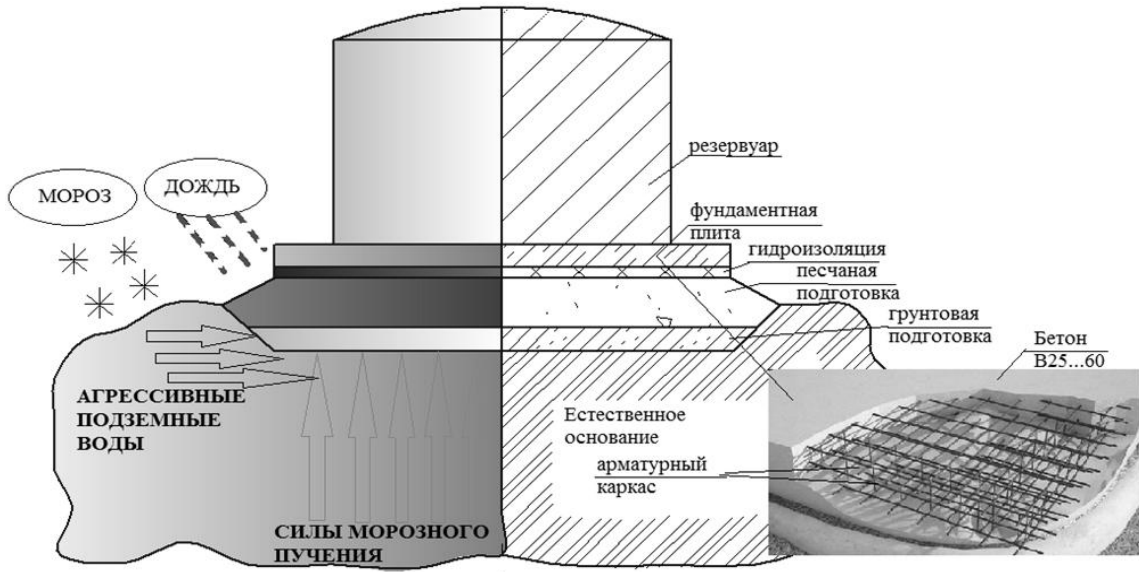


Рисунок 1.15 – Конструкция традиционного плитного фундамента резервуара

Однако опыт эксплуатации резервуаров на плитном фундаменте показывает несовершенство конструкции, чему свидетельствуют аварийные ситуации с нарушением проектного положения конструкции [11, 15, 23, 25, 35, 89] (рисунок 1.16-1.18).

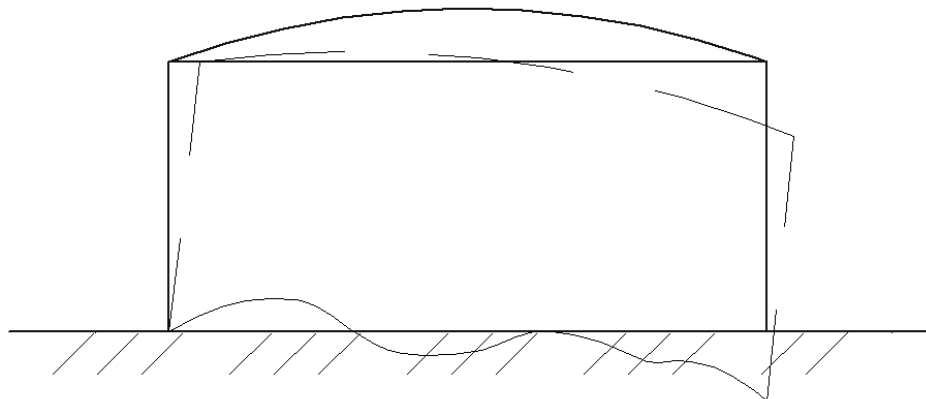


Рисунок 1.16 – Крен резервуара и локальные просадки фундаментной плиты



Рисунок 1.17 – Прогиб и растрескивание фундаментной плиты

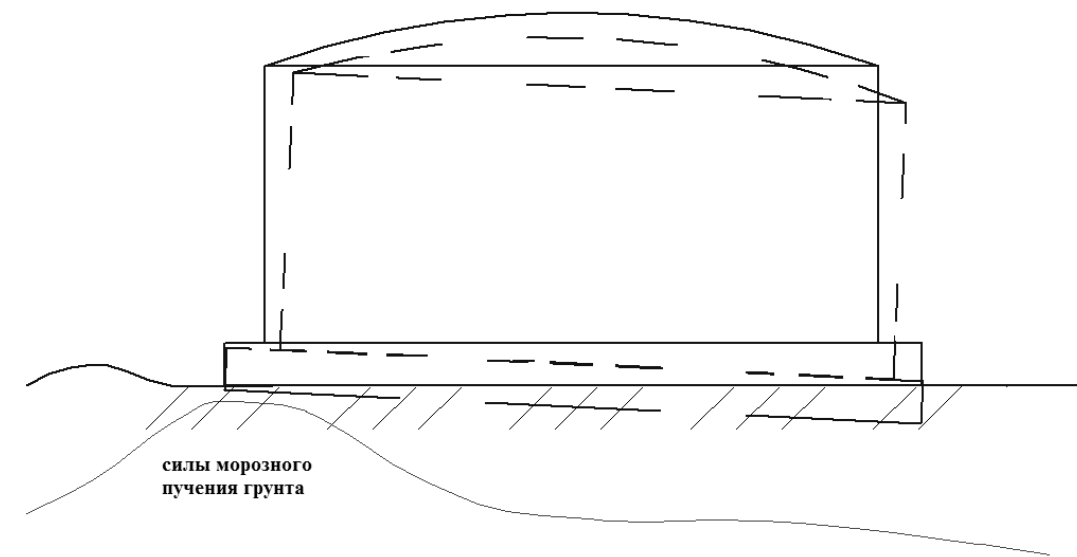
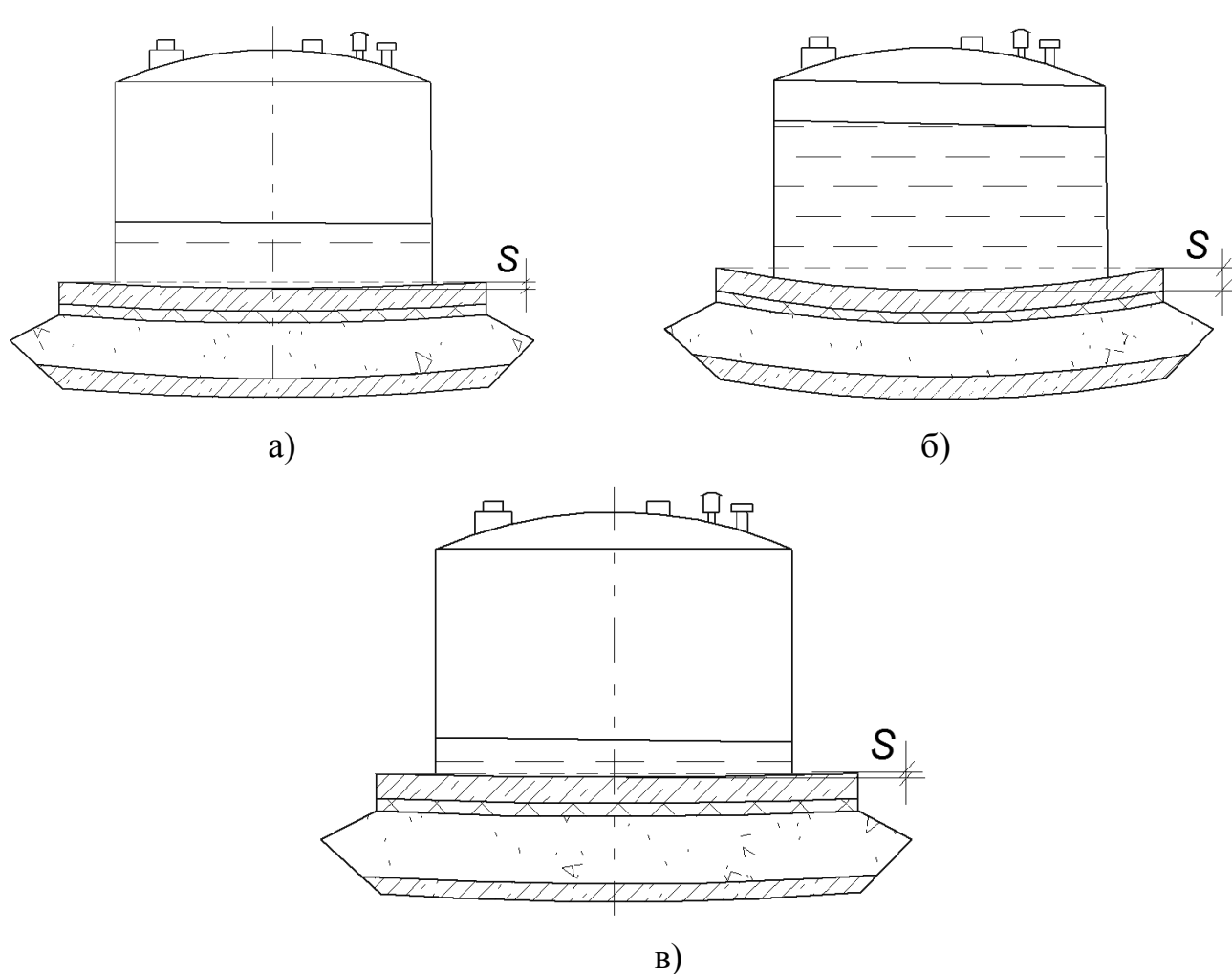


Рисунок 1.18 – Крен резервуара со смещением фундаментной плиты

По данным статистического анализа [9, 11, 15, 25, 33, 48, 104, 143] причин аварий резервуаров, проведенного в разделе 1.2, большая часть из них происходит из-за недопустимых неравномерных осадок, причинами которых является ослабление грунтового основания в виду активности геологических процессов или ослабление самой фундаментной конструкции, в виду неравномерной загрузки, изменении прочностных свойств фундамента, а в случае плитного фундамента – выхода из работы усиливающих элементов.

В условиях циклических процессов оттаивания/промерзания, действия сил морозного пучения, оперативного налива продукта в резервуар (рисунок 1.19), происходит постепенное разуплотнение грунтов и осадка сооружения, ведущая к прогибу фундаментной плиты, ее растрескиванию в зоне прогиба, потере устойчивости конструкции РВС и его крену.



а) процесс налива продукта – начало прогиба фундаментной плиты; б) полный налив продукта – полный прогиб фундаментной плиты; в) слив продукта – частичное восстановление исходного состояния

Рисунок 1.19 – Деформированное состояние плитного фундамента резервуара при оперативном наливе/сливе продукта

Поэтому еще на этапе проектирования необходимо предусмотреть мероприятия по предотвращению осадок сооружения и усилению фундаментной конструкции.

Существующие мероприятия по предотвращению неравномерных осадок можно разделить на 2 группы (рисунок 1.20).

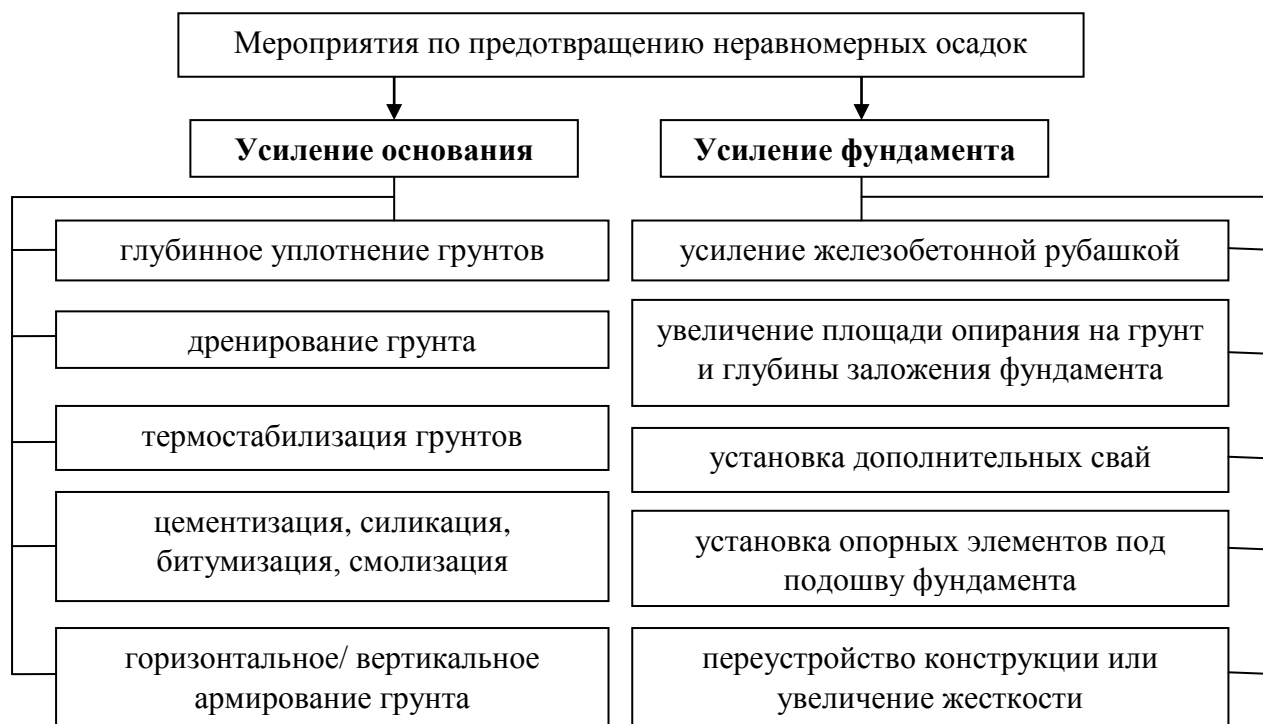


Рисунок 1.20 – Мероприятия по предотвращению неравномерных осадок

Данные мероприятия могут работать самостоятельно или в сочетании друг с другом в зависимости от грунтовых условий площадки строительства. Методы усиления основания требуют серьезных энергетических и экономических затрат, и как показывает практика их применения не всегда приводят к желаемым результатам [57, 71, 73].

При большой толщине грунтов со слабой несущей способностью для того, чтобы предупредить неравномерную осадку основания, помимо укрепления грунта, необходимо увеличить жесткость фундамента. Для этого используют массивный железобетонный фундамент, который обеспечивает достаточную жесткость конструкций по всей площади сооружения. [85, 86, 107, 108]

Одним из перспективных вариантов усиления плитной фундаментной конструкции является ее армирование, придание ей жесткости [54, 108, 111, 126].

Лучшим вариантом фундамента для резервуара является вариант абсолютно жесткой плиты, при котором прогибы плиты отсутствуют, а ее осадку можно определить, как для жесткого штампа [51].

Однако на практике такой вариант практически невозможен из-за большого расхода бетона. Например, для абсолютно жесткой плиты из бетона класса В40 (36 000 МПа) на однородном основании при  $E=10$  МПа (для глинистых грунтов) под резервуаром объемом 20000 м<sup>3</sup> значение толщины плиты должно быть не менее 4,7 м. Под этим же резервуаром при тех же условиях плита переходит в вариант абсолютно гибкой при толщине равной или меньше 1,7 м. Данные значения основаны на решении М. И. Горбунова-Посадова [37] для круглых плит на упругом основании.

Учитывая, что бетон плохо работает на растяжение и для уменьшения толщины плиты до разумных пределов используют армирование, а именно преднапряжение железобетона, которое уменьшает толщину плиты на 30%, исходя из условий расчета железобетонных плит по предельным состояниям, в первую очередь по прочности и раскрытию трещин. Учитывая армирование преднапряженной стальной арматурой плиты и расчета ее по предельным состояниям для РВС-20000 абсолютно жесткая плита имеет толщину не менее 3,3 м. Для абсолютно гибкой плиты при тех же условиях армированная плита принимает толщину равную или меньше 1,2 м.

Толщина плиты в идеальном случае – абсолютно жесткая плита, однако имеет значительную толщину 3,3 м, что на практике приведет к большой стоимости фундамента и возможной потере стойкости плиты в процессе эксплуатации. Этим и обосновывается выбор меньшей толщины, то есть вариант абсолютно гибкой плиты, армированной стальным каркасом.

Необходимо отметить, что гибкие фундаменты - это фундаменты, деформации изгиба которых имеют тот же порядок, что и осадки этого же фундамента [54].

$$\Delta S(\text{мм}) \approx f(\text{мм}), \quad (1.1)$$

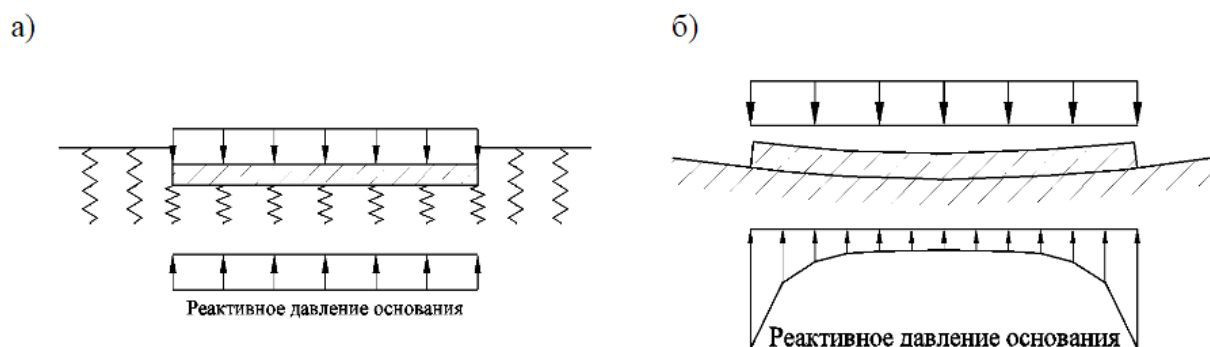
где  $\Delta S$  – осадка фундамента (деформация основания);

$f$  – деформация изгиба фундамента.

Таким образом, при расчёте гибких фундаментов необходимо одновременно учитывать деформацию фундамента и осадки грунта.

Современные теории взаимодействия «фундамент-грунт» [21, 49, 91, 119, 137] исходят из предположения о совместности деформации фундамента и грунта, т. е. считается, что перемещение фундамента в данной точке контакта равно осадке поверхности грунта. Поэтому обязательным условием при определении осадки фундаментной плиты необходимо определять ее прогиб.

В 1867 г. Е. Винклером была разработана гипотеза взаимодействия фундамента с основанием (рисунок 1.21а) [171].



а – модель Винклера; б – модель упругого полупространства

Рисунок 1.21 – Модели по теориям

Согласно [171] давление на грунт основания от сооружения определяется расчетом:

$$p = C \cdot z, \quad (1.2)$$

где  $C$  – коэффициент постели основания;

$z$  – осадка основания в точке приложения реакции  $p$ .

Однако вскоре после появления данной гипотезы многие ученые-исследователи (Г.Э. Проктор, К. Вихгарт, Д.Е. Польшин, В.А. Флорин, Н.А. Цытович, Б.Н. Жемочкин и др.) указали на существенные недостатки данной модели, и разработали модель взаимодействия фундамента с грунтовым основанием в виде упругого полупространства (рисунок 1.21б)

Разработкой теории расчета балок и плит на грунтовом основании занимались Г. Э. Проктор, К. Вихгарт, Н. П. Пузыревский, Л. С. Гильман, В. А. Флорин, Н. М. Герсеванов, Я. А. Мачерет, Г. Я. Попов и др. Серьезным вкладом в решение задачи о взаимодействии балок и плит с упругим основанием стали работы М. И. Горбунова-Посадова [37, 38], Р. Л. Мангушева [90], И. А. Симвулиди [107], Д. Н. Соболева [110], Б. Н. Жемочкина [54].

Исходя из теории о совместимости деформации «фундамент-грунт» возникает предположение о том, чтобы упрочнить фундаментную плиту и уменьшить ее прогиб, тем самым уменьшить осадку конструкции и основания.

### **1.5 Регулируемое взаимодействие фундаментов с грунтовым основанием**

Вне зависимости от состава, каждый тип грунта обладает распределительной способностью, а именно воспринимая нагрузку от сооружения, распределяет ее по площади основания и далее за его пределы. В результате этого происходят деформации грунтового основания и установленного на нем фундамента в виде седлообразной эпюры с максимальным значением в центральной ее части, неравномерной осадки сооружения и прогибу фундаментной плиты. Данные особенности ухудшают эксплуатационные качества плитных фундаментов:

- возрастают моменты в фундаментах;
- фундаменты резервуаров получают сверхнормативные прогибы. При этом осложняется эксплуатация сооружения: не обеспечивается полный слив нефтепродуктов, накапливаются подтоварные воды, что часто приводит к ускоренной коррозии металла и возможному разрыву днища [50, 51, 71, 90].
- неравномерная осадка приводит к наличию критических значений напряжений в стенках емкости и даже возможному разрушению несущих элементов конструкции.



Существует ряд методов, которые способны регулировать взаимодействие пары «сооружение-основание». Анализ работ в данном направлении по исследованиям Г. Г. Васильева, В. Б. Галеева, С. Г. Едигарова, В. К. Иноземцева, Л. А. Димова, Л.Е. Землеруба, А.А. Землянскогo, П. А. Коновалова, Р. А. Магушева, М. В. Саяпина, С. Н. Сотникова, А. А. Тарасенко, Г. Г. Хопёрского, А. Бургигноли, Р. Г. Кампанелла, Ж.К. Чай и др, позволяет выделить следующие методы:

- локальное уплотнение или ослабление грунта;
- установка в контактной зоне взаимодействия специальных амортизирующих устройств (промежуточные подготовки из пористых материалов);
- увеличение жесткости фундамента и изменение его геометрии.

Идея увеличения несущей способности основания путем уплотнения грунтов горизонтальным армированием подробно изложена в работах А.А. Землянскогo, Л.А. Землянскогo, К.А. Землянскогo [57] и заключается в предварительном напряжении грунтовой массы основания под фундаментной плитой горизонтальной кольцевой шпунтовой стенкой. Преднапряжение грунта, находящегося во внутренней кольцевой стенке, может осуществляться за счет давления воздуха, воды или саморасширяющегося раствора, нагнетаемого в рабочие полости отдельных элементов стенки (рисунок 1.22).

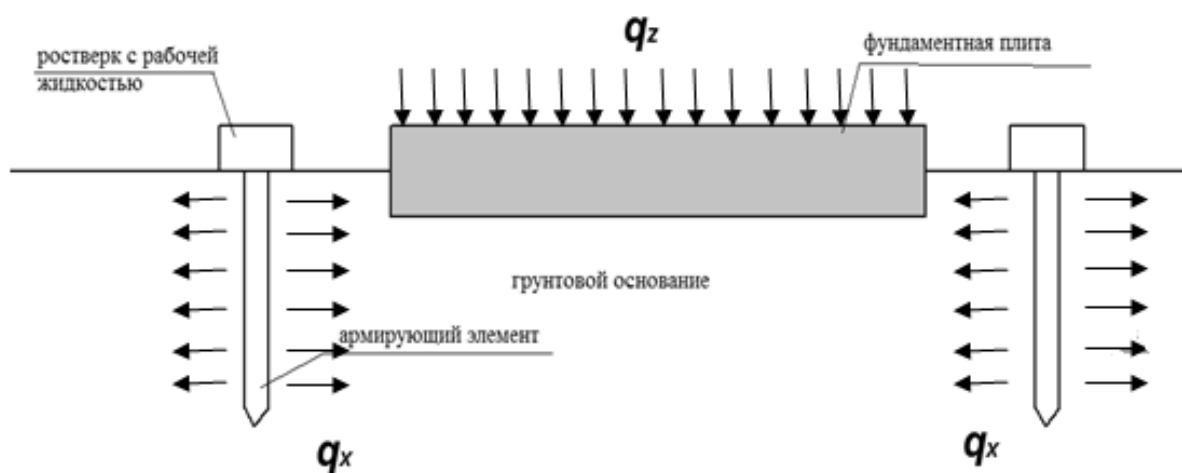
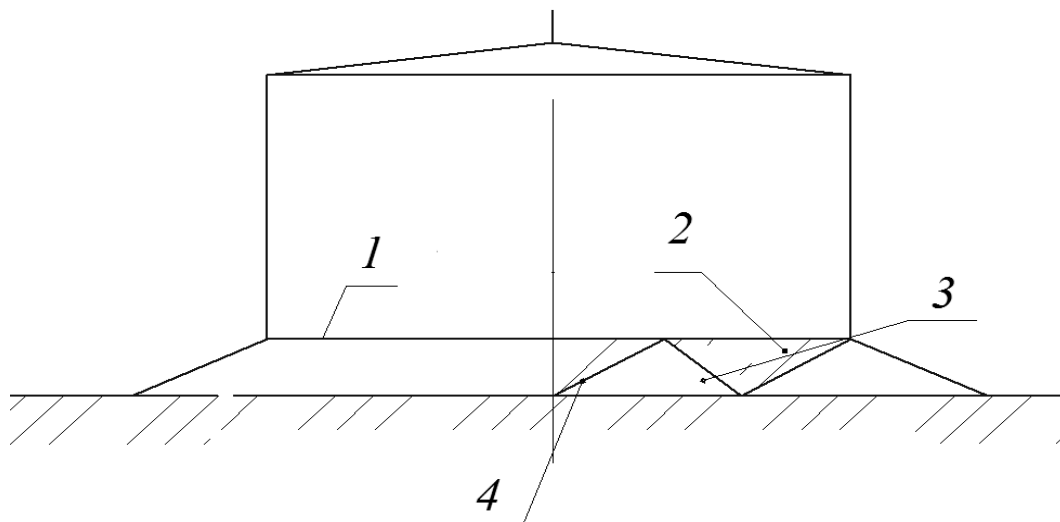


Рисунок 1.22 – Схема горизонтального армирования грунта

Такое нагружение грунта способствует снижению вертикальных садок фундаментной плиты на 18%. Однако на процент снижения осадок сооружения, все же зависит жесткость фундаментной плиты и отпор грунтового массива.

Экспериментальные исследования по взаимодействию железобетонных плит с песчаным основанием различной плотности, проведенные Г. Е. Лазебником [75], показали, что изменяя свойства грунта (увеличивая или уменьшая жесткость основания) можно регулировать осадки и усилия в фундаменте.

В работе В. М. Куприянова [71] теоретически и экспериментально доказана эффективность применения оснований РВС с использованием конусообразных опор из сыпучих материалов (рисунок 1.23).



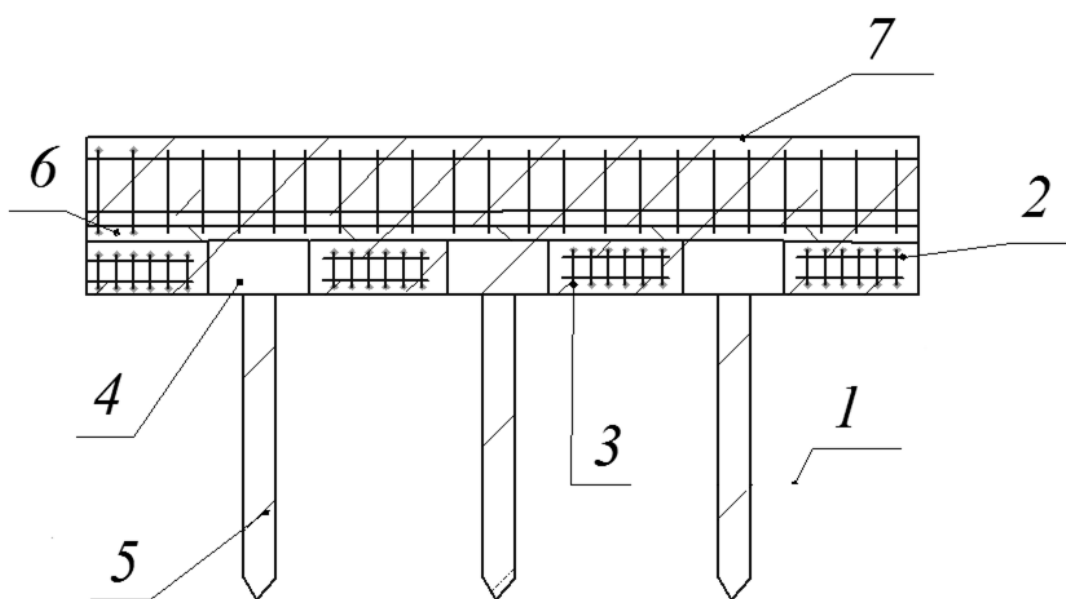
1 - круглая опорная плита; 2 - грунтовая подушка; 3 - опоры из сыпучего тела; 4 - конусная часть опоры

Рисунок 1.23 – Конструкция основания резервуара

В работе Л.Е. Землеруба, М.Р. Терегулова [56] предложена модель сегментно-сферического фундамента для резервуара с системой контроля и управления за пространственным положением. Данная конструкция совмещает достоинства свайных и монолитных плитных фундаментов, а система контроля и управления (СКУ) предотвращает нарушение горизонтального положения

фундамента или его части, препятствует появлению крена и нарушению геометрии фундамента резервуара.

Принципы зонального уплотнения грунта использованы в работе О. А. Шулятьева, А. И. Харичкина, В. С. Лесницкого, В. П. Петрухина [94] при проектировании плитно-свайных фундаментов резервуаров в сложных геотехнических условиях. Плиты являются основным распределяющим элементом, а сваи – вспомогательным, укрепляя плиту в зонах, где требуется повысить жесткость основания – в условиях неравномерно сжимаемых оснований, вблизи существующих зданий и т.д. (рисунок 1.24).



1 – грунтовое основание; 2 – арматурный каркас; 3 – плиты-ростверка;  
4 – сквозные отверстия; 5 – сваи; 6 – гидроизоляция; 7 – железобетонная плита

Рисунок 1.24 – Плитно-свайный фундамент

В работе [79] В. В. Лушниковым предлагается для плитно-свайных фундаментов, устанавливая прокладки из пенополистирола расчетной толщины между головой сваи и ростверком, чтобы избежать эффекта краевой сваи, уменьшить жесткость свай и включить в работу плитную часть.

В работе И. А. Симвулиди [107] изложен следующий принцип: «Значения реактивных давлений на балку со стороны упругого основания можно изменять в зависимости от жесткости балки  $EI$ , ее длины  $L$ , модуля деформации упругого

основания  $E_0$ , величины, характера и расположения нагрузки». Это дает возможность регулировать осадку грунта в нужных пределах путем соответствующего подбора жесткости и длины балки.

Использование этого принципа в области увеличения жесткости фундамента армированием дает возможность уменьшить значения неравномерных осадок. Исследованием в области усиления железобетонных конструкций арматурными стержнями занимались С. Н. Алексеев, В. И. Бабушкин, В. Г. Батраков, Е. А. Гузеев, В. С. Гуменюк, Ф. М. Иванов, В. Н. Москвин, С. А. Малатян, В. Б. Ратинов, А. Ф. Полака, В. И. Соломатов, И. Н. Тихонов, С. В. Шестоперов, а также Jambor J., Kalousek G., Modry S., Scott G., Schiessl P и др.

Однако, как показывает теоретическое исследование [12, 20, 21, 49, 85, 86, 88, 110, 125, 137] и опыт эксплуатации резервуаров на плитных фундаментах, традиционный вариант армирования плиты – напряженной стальной арматурой, допускает сверхнормативные прогибы в процессе эксплуатации, вследствие чего возникает неравномерная осадка резервуара, которая приводит к возникновению недопустимых напряжений в самой конструкции резервуара и последующей аварийной ситуации.

К тому же армирование напряженной стальной арматурой не решает проблемы трещиностойкости железобетонной плиты вследствие частичной потери растягивающих напряжений самой арматуры и сжимающих усилий бетона.

Традиционная стальная арматура активно поддается процессу коррозии, даже контактируя только с бетоном. Со временем железобетон покрывается микротрещинами, в которые проникает влага. После нескольких циклов промерзания и оттаивания надломы расширяются, вода доходит до арматуры, запуская процесс ее коррозии. Коррозия же занимает больше места, чем исходный металл, и в итоге бетон начинает трескаться и расслаиваться.

Поэтому замещение традиционной стальной арматуры в несущих железобетонных конструкциях на арматуру из современных материалов, не

подвергающуюся коррозии и, одновременно, имеющую высокую упрочняющую способность, является актуальной научно-исследовательской задачей [126, 129].

В ряде зарубежных работ [149-153, 158, 165] проводятся теоретические и экспериментальные исследования в области замещения традиционной стальной арматуры на арматуру из материалов с эффектом памяти формы (ЭПФ), где с большой точностью и достоверностью доказывается эффективность ее применения.

Одними из первых кто предложил идею предварительного напряжения бетонных конструкций усиленными арматурными элементами с эффектом памяти формы принадлежит зарубежным авторам Collins and Mitchell (рисунок 1.25), где применение свойств сверхпластичности и эффекта памяти формы металлов, используется для предварительного сжатия бетона, придания ему прочности и трещиностойкости.

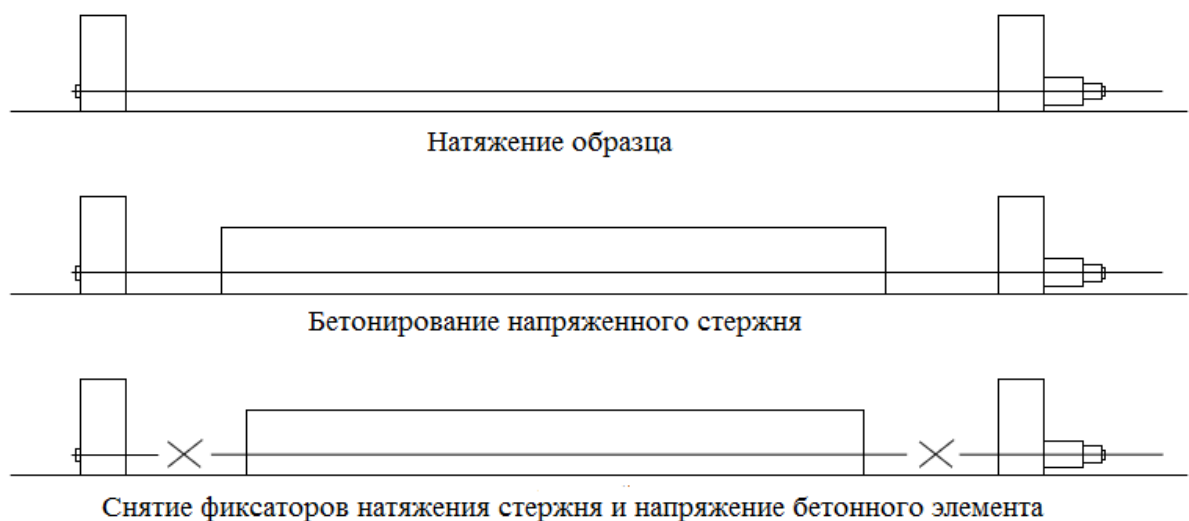


Рисунок 1.25 – Схема преднапряжения арматуры бетонного элемента в исследованиях Колинса и Митчела [160]

Суть современных экспериментальных исследований усиления железобетонных элементов сплавами с памятью в работах [153, 156-159, 162, 172] заключается в определении процента усиления, возникающих напряжений в бетонной конструкции, конструктивной схемы армирования, технологии задания деформации, определении оптимального процента армирования и предела

деформации памяти для железобетонных балок [151], колонн (рисунок 1.26) [156], плит перекрытия (рисунок 1.27) [149].

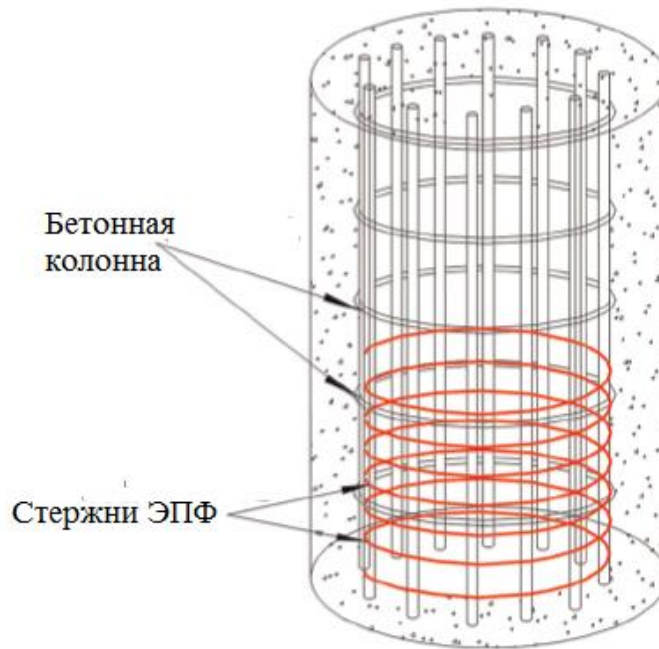


Рисунок 1.26 – Опытные испытания железобетонной колонны, армированной стержнями с памятью, Q. Чен и Б. Андравес, Университет Иллинойса в Урбана-Шампейн, США [156]

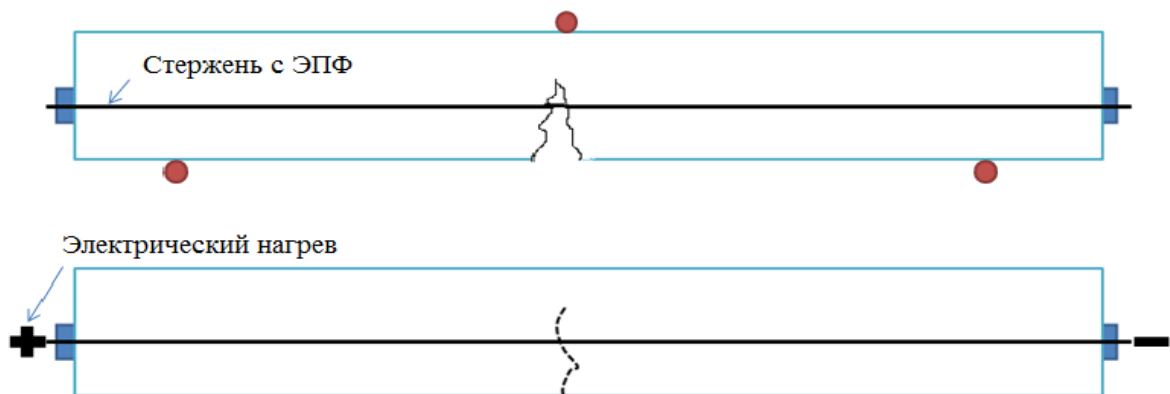


Рисунок 1.27 – Восстановление плиты перекрытия с применением арматуры из материалов с ЭПФ, Университет Хьюстона [149]

Все исследования основаны на принципе деформации восстановления формы стержневых элементов с ЭПФ, в результате термического воздействия. В связи с тем же эффектом, когда деформации ЭПФ происходит к возврату первоначальной формы, сплав производит напряжения упрочняющие бетонную

конструкцию. Отличием от традиционного армирования стальной арматурой является высокий процент деформации, которой обладают рассматриваемые сплавы, вызывающие сверхусилия обжатия бетонного изделия.

Имеются данные [160, 165] по практическому применению армирования материалами с памятью для усиления железобетонных конструкций.

Церковь С. Джорджо, расположенная в Триньяно, Италия, была поражена землетрясением магнитудой 4,8 по шкале Рихтера 15 октября 1996 года, повлекшее значительный ущерб церкви. После землетрясения церковь была восстановлена с помощью усиленных элементов с памятью формы, которые связали ее верхнюю и нижнюю части. Четыре вертикальных стальных стержня связанные предварительно напряженными элементами с памятью были размещены во внутренних углах колокольни, с целью увеличения сопротивления изгибу конструкции [165].

Аналогично, церковь Святого Франческо была восстановлена после сильного повреждения землетрясением 1997 года (Кастелано, Прага). Фронтон был полностью отсоединяется от крыши. В процессе ремонта его соединили с крышей с помощью легкосплавных устройств с памятью формы. Каждое устройство с памятью состояло из группы напряженных проводов, которые могут активно работать на растяжение и сжатие. Для уменьшения сейсмического воздействия, передаваемого на сооружение, соединение между ним и крышей была создана с помощью суперэластичных устройств с ЭПФ. При интенсивных горизонтальных нагрузках жесткость элементов с ЭПФ увеличивается, тем самым укрепляя сооружение и предотвращая разрушение [160].

DesRoches R., предложил усиление балок перекрытия мостов с применением напряженной арматуры с ЭПФ в районах, подверженных землетрясениям. Первая реализация данного предложения, использующая эффект памяти была представлена в исследовании [168].

Трещины в мостовой железобетонной Т-образной балки моста в Швеции имели среднюю ширину 0,55 мм. Для укрепления мостовой балки были

использованы стержни из сплава с ЭПФ и установлены в искусственные канавки ремонтируемой балки. Стержни ЭПФ имели диаметр 10,4 мм. Каждый стержень был предварительно напряжен и нагрет электрическим током 1000 ампер для достижения температуры 300° С. После восстановления формы, трещины в мостовой балке уменьшились на 40%.

В другом исследовании [172], использующем устройства с памятью в железобетонных пролетах мостов, применили пластину с памятью из никелида титана, рассчитанную на нагрузку только при изгибе, в качестве системы демпфирования при работе пластины с памятью при деформациях от сейсмических и грунтовых воздействий.

Однако наличие данных примеров исследований и практического применения материалов с ЭПФ в качестве элементов усиления сопровождается отсутствием стандартизированных и универсальных методик расчета, технологией их применения для железобетонных конструкций.

Изучение сплавов с ЭПФ и их свойств проведены в работах отечественных ученых В. Г. Курдюмова и Л. Г. Хандроса [74], И. И. Корнилова [68], В. А. Лихачева [76-78], С. Л. Кузьмина [69, 70], В. Н. Хачина [137-139], Ж. М. Бледнова [18, 19], Е. З. Винтайкина [29, 122], В. Э. Гюнтера [139], А. Е. Волкова [32], В. Г. Пушина [97, 121], С. Д. Прокошкина [30, 120], М. А. Хусаинова [134] и др., ряда зарубежных ученых С. М. Веймана [27], Л. Делэя [170], К. Ооцуки [163, 164], Т. В. Дьюрига [152] и др. Однако столь объемное и длительное исследование этих материалов не дает полную проработку вопроса использования их в качестве элементов усиления для железобетонных конструкций. Также этому свидетельствуют отсутствие стандартов, нормативных методик в области усиления железобетонной матрицы арматурой с памятью.

Учитывая актуальность проектов строительства резервуарных парков на слабонесущих грунтах, в случае использования плитных фундаментов под емкости потребуются их усиление. Основываясь на зарубежном опыте применения в области усиления железобетонных элементов материалами с памятью [153, 156-



159, 162, 172], автор адаптировал свойства материалов с ЭПФ для усиления плитных фундаментов крупногабаритных резервуаров.

### **1.6 Постановка цели и задачи исследования**

Перспективы освоения нефтегазовых регионов севера Тюменской области и Ямало-Ненецкого округа, острова Сахалин приведут к необходимости сооружения резервуаров и резервуарных парков на слабонесущих грунтах.

Анализ аварийных ситуаций разрушения вертикальных стальных резервуаров, находящихся на слабонесущих грунтах, за последние 60 лет показал, что в 21 случае из 28 выявлена неравномерная осадка основания, которая послужила причиной разрушения. Для ее предотвращения требуется проведение различных мероприятий по повышению несущей способности грунтов основания и фундамента на подготовительном этапе строительства сооружения.

Наибольшую область распространения для резервуаров получил плитный фундамент ввиду своей применимости для грунтов различных типов. Однако опыт эксплуатации показывает несовершенство плитных фундаментов, чему свидетельствует статистика аварий, связанных с изменением проектного положения РВС за счет просадки, прогиба и ослабления фундаментной плиты.

Традиционные способы усиления фундаментной плиты с использованием стальной арматуры не обеспечивают необходимую степень обжатия конструкции. Для решения данной проблемы автор предлагает технологию усиления плитного фундамента резервуара арматурными стержнями с эффектом памяти формы, основываясь на зарубежном опыте применения, экспериментальных и аналитических исследований.

Приведенный выше анализ применения усиливающих элементов с памятью для железобетонных конструкций показал отсутствие методик расчета усиления, отсутствие проработки вопроса по технологии их применения и монтажа, адаптированных для плитных фундаментов буферных емкостей хранения углеводородов, что представляет ряд перспективных направлений для

исследования. Результаты данного анализа помогают сформулировать цели и задачи диссертационного исследования.

Целью работы является совершенствование технологии сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с эффектом памяти формы, для вертикальных стальных резервуаров нефти и нефтепродуктов.

Задачи исследования:

1. Выполнение экспериментальных исследований с учетом теории планирования эксперимента по выбору сплава с ЭПФ, подходящего под эксплуатационные условия работы плитного фундамента резервуара и определение деформационных эффектов, генерируемых в исследуемом сплаве.

2. Разработка методики расчета усиления плитного фундамента, армированного стержнями из материалов с ЭПФ и определения рациональных параметров армирования.

3. Разработка численных моделей системы «резервуар-фундамент-основание» для сопоставительного анализа деформации фундамента, армированного по традиционной и предлагаемой технологии.

4. Разработка методики сооружения оснований РВС с использованием преднапряженного плитного фундамента, армированного стержнями с ЭПФ.

## **1.7 Выводы по главе 1**

1. Конструктивные решения оснований и фундаментов РВС не могут быть использованы в полном объеме в районах нашей страны, в частности в районах, где интенсивно развивается нефте- и газодобыча (север Тюменской области, остров Ямал и т.д), так как почти все конструкции описанные выше в процессе эксплуатации дают неравномерную осадку сооружения и приводят к аварийным ситуациям.

2. Опыт строительства резервуаров на свайных фундаментах показывает, что стоимость таких оснований в 1,5-2,5 раза превышает стоимость традиционных конструкций фундаментов мелкого заложения на естественном основании. При

повышении несущей способности свай уменьшается их число и возрастает расстояние между ними. Однако это ведет к увеличению сечения монолитного ростверка и расхода арматуры, а следовательно, уменьшается эффект, полученный при применении свай повышенной несущей способности.

3. Ввиду своей применимости для грунтов различных типов, наибольшее распространение в качестве оптимальной конструкции фундамента для резервуаров получил плитный. Однако плитный фундамент подвержен потере прочности, вследствие нарушения работы стальных арматурных стержней и их коррозии. Замещение стальной арматуры на арматуры из материалов с памятью позволит увеличить прочность фундаментной конструкции, предотвратить ее сверхнормативный прогиб и неравномерную осадку.

4. Анализ зарубежного опыта применения материалов с ЭПФ позволяет сделать вывод, что в строительном проектировании и производстве отсутствуют универсальные методики расчета и технология их применения в качестве элементов, воспринимающих нагрузки в сечениях конструкций.

## ГЛАВА 2 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННО-СИЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ЭЛЕМЕНТОВ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

### 2.1 Феноменология эффекта памяти формы

В настоящее время одной из ключевых задач развития высокотехнологичных секторов производственной деятельности является получение конструкционных и функциональных материалов, обеспечивающих большой запас прочности и надежности производственных процессов и объектов.

Исследования, проведенные за последние тридцать лет [7, 14, 19, 67, 81, 97, 99, 134] свидетельствуют о широких возможностях применения материалов с элементами «интеллектуальности», материалами с обратимыми изменениями формы, к таким материалам относятся сплавы с эффектом памяти формы.

Сплавы с ЭПФ имеют высокие механические свойства, повышенной демпфирующей способностью, а также нетривиальными функциональными свойствами, которые можно использовать для повышения эксплуатационных свойств и ресурса изделий, в том числе нефтегазового комплекса.

В 1949 г. советские металлурги в Г. В. Курдюмов и Л. Г. Хандорсон обнаружили сплав, способный к восстановлению исходной формы после значительных пластических деформаций при нагреве до определенного значения температуры. Такое явление признали открытием и обозначили как эффект Курдюмова (эффект памяти формы).

Экспериментально эффект памяти формы был обнаружен Л. Чангом и Т. Ридом в 1951 г. в сплаве Au-Cd. В 50-х - 60-х двадцатого века после выявления в сплавах Ti-Ni и Cu-Al эффекта памяти формы пришло понимание важности и практической ценности открытия.

С того времени явление ЭПФ выявили у следующих сплавов: Cu-Zn, Cu-Zn-Al, Cu-Zn-Si, Cu-Zn-Sn, Cu-Al, Cu-Al-Ni, Cu-Mn-Al, Mn-Cu, Fe-Mn-Si, In-Tl, Ni-Al, Fe-Pt и др.

В 1958 г. впервые был получен сплав с эффектом памяти формы – нитинол (TiNi–никелид титана), который проявляет значительную величину ЭПФ, обладая при этом высокой прочностью, пластичностью и коррозионной стойкостью.

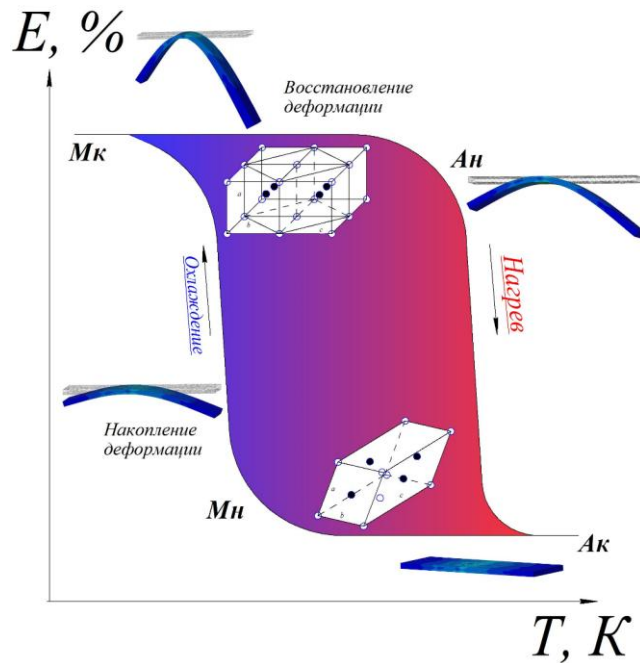
Нетривиальные свойства данного сплава обуславливаются термоупругой природой кристаллических превращений. Никелид титана способен осуществлять переходы из высокотемпературной кристаллической структуры в низкотемпературную при охлаждении и в противоположном порядке – при нагревании.

Процентное значение деформации восстановления формы TiNi зависит от компонентного состава сплава, однако максимальное значение составляет 8% деформации.

Эффект памяти формы основан на превращении двух различных кристаллических структур. Такое превращение называют термоупругим мартенситным превращением (ТУМП), или переходом мартенсит-аустенит и обратно.

Мартенситные превращения можно создавать механическим напряжением или изменением температуры. Превращение, которое происходит из высокотемпературного в низкотемпературное состояние (при охлаждении), называется прямым МП, а при нагреве – обратным МП. [2, 7, 14, 27, 97, 139, 140, 163, 164].

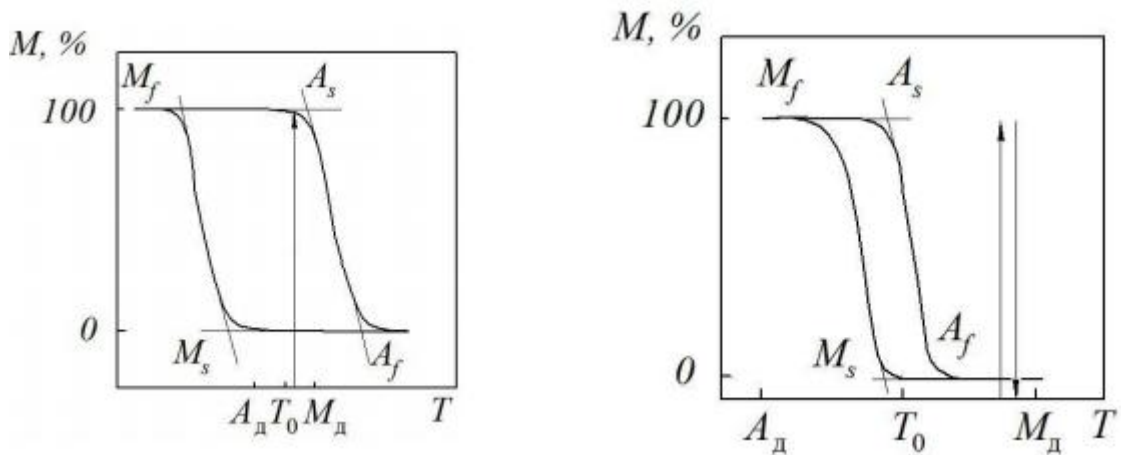
На рисунке 2.1 представлена схематизация ЭПФ: показано накопление деформации при охлаждении и ее восстановление при нагреве в сплаве с ЭПФ в ненагруженном состоянии после предварительного термоциклирования под нагрузкой через интервал температурных переходов  $M_k-A_k$ , также отображены кристаллические структуры мартенсита и аустенита.



$M_n, M_k$  – температуры начала и конца мартенситного превращения;  $A_n, A_k$  – температуры начала и конца аустенитного превращения

Рисунок 2.1 – Схематизация ЭПФ

Большая часть сплавов с ЭПФ проявляет ТУМП. Для таких материалов свойственна зависимость фазового состава от температуры (рисунок 2.2)



а) широкий гистерезис

б) узкий гистерезис

Рисунок 2.2 – Зависимость фазового состава сплава от температуры

При охлаждении (прямое превращение) в температурном интервале ( $M_n - M_k$ ) возникают и растут кристаллы мартенсита, при нагреве (обратное превращение) в

температурном интервале ( $A_n - A_k$ ) кристаллы мартенсита пропадают (превращаются в аустенит) в обратной последовательности.

Если охлаждение производят под нагрузкой (напряжением), то имеет место избирательное зарождение кристаллов мартенсита, когда преимущество получают те из них, которые способствуют деформированию в направлении приложенного усилия. При этом тело приобретает макроскопическую деформацию, связанную с мартенситной неупругостью. Данный эффект называют пластичностью прямого превращения (ППП). Если металл приобретает неупругую деформацию за счет изотермического нагружения мартенсита или пластичности превращения, то он возвращает ее при нагреве в интервале температур от  $A_H$  до  $A_K$  (эффект памяти формы) [60, 167].

## 2.2 Постановка задачи экспериментального исследования

В настоящее время использование в различных областях техники материалов, обладающих уникальными свойствами, связанными с МП довольно широк. Применение сплавов с ЭПФ развивается стремительно и требует дополнительных исследований. Более того, исследования в области многократной реализации ЭПФ в интервалах МП продолжают и вызывают большой научный и практический интерес.

В последние десятилетия с возникновением структурно-аналитической теории прочности Лихачева В. А. - Малинина В. Г. появилась возможность адекватно описывать поведение материалов с ЭПФ в терминах инженерной механики.

К настоящему времени выполнено большое количество работ, таких авторов как: Андронов И. Н. [2-7], Беляев С. П. [14], Бледнова Ж. М. [18, 19], Капуткина Л. М. [30], Малинин В. Г. [77, 81-83], Мовчан А. А. [84], Прокошкин С. Д. [30, 120], Пушин В. Г. [121, 139], Хмелевская И. Ю. [140], Разов А. И. [32, 99], Хусаинов М. А. [134], исследования которых посвящены материалам с ЭПФ и их использованию в промышленности.

Согласно [130] установлено, чтобы сообщить материалу эффект многообратимой памяти формы его необходимо подвергнуть специальным термическим циклам в нагруженном состоянии через интервалы фазовых переходов. После освобождения от нагрузки в охлажденном состоянии (мартенситном) металл будет проявлять многократное обратимое формоизменение. Таким образом, если образец с ЭПФ в мартенситном состоянии будет упруго защемлен и подвергнут нагреву, то в нем возникнут реактивные напряжения, обусловленные эффектом памяти формы, значения которых зависят от уровня предварительно заданной деформации жесткости противодействия системы «образец – защемление».

Хусаиновым М. А. [134] проведен анализ физических и механических свойств сплавов TiNi с памятью формы по результатам экспериментальных исследований гистерезисов мартенситных превращений. Установлено, что сплав TiNi является наиболее предпочтительным для изготовления рабочих элементов с памятью формы.

Прокошкиным С. Д. [30, 120] изучены структура и функциональные свойства сплавов на основе Ti-Ni-Nb с широким мартенситным гистерезисом, легированные цирконием.

В работах А. И. Разова [32, 99] экспериментально подтверждена надежность рабочих элементов из сплавов TiNi, которые рассчитаны на реализацию ЭПФ в напряженном состоянии в течении длительного время, ожидая рабочий цикл.

Исследования [2, 5-7, 14, 18, 19, 30, 67, 68, 74, 76-78, 97, 99, 170, 171] рассматривают физические и механические процессы материалов с ЭПФ через температуры фазовых переходов.

Изучение процессов циклического формоизменения сплавов с памятью подробно изложено в работах [2, 7, 27, 93, 134, 141, 151, 152, 161].

Практическая реализация эффекта памяти формы для конструкций ответственного назначения, где элементы с ЭПФ подвергаются циклическим



нагрузкам и температурам, исследована в работах [3, 4, 18, 31, 63, 82, 126, 132, 134, 139, 149, 150, 152, 160, 162, 167, 168, 172].

Исследования [5, 6, 7, 14, 19, 27, 30, 31, 32, 60, 63, 67, 151, 158, 163, 167] подтверждают факт наличия многократнообратимой деформации под нагрузкой для «интеллектуальных» сплавов.

В работах И. Н. Андропова [2, 5-7, 141] показано, что термоциклирование СПФ в нагруженном состоянии через интервалы мартенситных переходов сообщает материалу свойство обратимого формоизменения, которое проявляется при нагревании в виде ЭПФ и эффекта ППП при охлаждении. Это позволяет предположить, что «натренированные» путем термоциклирования стержни из СПФ могут быть применены в качестве армирующих элементов бетонных фундаментов резервуаров нефтяной промышленности, а также других ответственных конструкций, в т.ч. эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Анализируя труды отечественных и зарубежных работ [93, 149-153, 158, 165], существует теоретическая идея использования материалов с ЭПФ в качестве армирующих элементов для бетонных конструкций, однако отсутствуют экспериментальные данные по определению их деформационных параметров (деформация памяти, генерируемые напряжения, характеристические температуры).

Теоретических данных не достаточно, чтобы с точностью установить стабильные деформационные характеристики при переходных процессах.

Поэтому для обеспечения стабильной работы элементов с ЭПФ и реализации армирования данными материалами, необходимо проводить экспериментальные исследования деформационных откликов при переходных процессах под нагрузкой, имитирующих работу стержней в железобетонной матрице.

В связи с вышесказанным основные задачи экспериментальной части работы:

1. Исследовать деформационные характеристики цилиндрических образцов из сплава с памятью при переходных процессах (для данной диссертационной работы в качестве преднапряженных арматурных стержней для плитных фундаментов резервуаров), выбрать сплав с ЭПФ, способный работать в грунтовых условиях площадки строительства резервуара и установить реальные значения деформации памяти, генерируемых напряжений в исследуемом сплаве.

2. На основе полученных экспериментальных данных определить реактивные напряжения и деформацию памяти, генерируемые в рассматриваемой системе, функционирующих при обратимых мартенситных переходах, состоящих из рабочих элементов с ЭПФ и упругого контртела.

3. Обосновать переход на качественно оптимальное решение в области преднапряжения фундаментов крупногабаритных конструкций элементами с ЭПФ (в данном случае как альтернатива традиционной стальной арматуры), в связи с низкой надежностью плитных фундаментов РВС, армированных стальной арматурой, допускающей сверхнормативные прогибы плиты, неравномерности распределения реактивных давлений от сооружения на основание и вызывающей недопустимые неравномерные осадки конструкции.

### **2.3 Выбор материала с ЭПФ для экспериментального исследования**

Материалы с ЭПФ обладают значительными эксплуатационными свойствами, при работе в условиях механической усталости, износа, коррозии и эрозии.

Материалом для исследования был выбран сплав, обладающим ЭПФ, ТН-1К - легированный никилид титана. Обоснованием выбора данного материала служит предпочтительный широкий диапазон температурных переходов, необходимый для эксплуатационных условий плитных фундаментов РВС (широкая петля гистерезиса - рисунок 2.2а), а также комплекс свойств, делающих его пригодным для практического применения – прочность, пластичность, коррозионная стойкость, стойкость к коррозионному растрескиванию под

напряжением [5, 7, 19, 27, 32, 60, 67, 151, 158, 163, 166], что позволяет использовать данные материалы в качестве арматурных стержней для плитного фундамента вертикальных стальных резервуаров, используемых в нефтяной промышленности.

Общие механические характеристики сплава ТН-1К приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные характеристики TiNi (сплав ТН-1К) [98]

Параметры	TiNi (сплав ТН-1К)
Плотность, г/см <sup>3</sup>	6,45 – 6,50
Температура плавления, С°	1250 – 1310
Коэффициент температурного расширения, 10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	12 – 14
Удельное электросопротивление, 10 <sup>-8</sup> , Ом·м	70 – 80
Коэффициент Пуассона	0,33
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), МПа	800 – 1200
Предел текучести, МПа	400 – 700
Относительное удлинение, %	20 – 40
Модуль упругости, ГПа	70

Экспериментальная часть работы проводилась в два этапа:

1. Определение деформационных откликов и характеристических температур экспериментируемых сплавов в условиях растяжения при постоянной нагрузке, с целью выбора подходящего сплава под условия эксплуатации арматуры плитного фундамента РВС.

2. Определение деформационно-силовых характеристик образцов выбранного сплава в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление-контртело», моделирующих эксплуатационные условия противодействия растяжению/сжатию стержня за счет ползучести бетона.

## 2.4 Характеристики образцов и методика их подготовки

Сплавы с памятью, а именно никелид титана способен в узко-температурном диапазоне порядка от  $+5^{\circ}$  до  $+40^{\circ}$  С проявлять однократные и многократные предварительно заданные деформации. При заземлении образцов из данного материала в условиях мартенситного перехода под воздействием температур, они способны развивать реактивные напряжения до 700 МПа, что значительно превосходит значения напряжений, генерируемых обычными материалами в том же температурном диапазоне.

В экспериментальной части работы исследованию были подвергнуты сплошные цилиндрические образцы из сплава ТН-1К, разной концентрации (легированный никелид титана), принятых по ТУ 18.4270-005-13152881-05. Параметры образцов и химический состав представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Материал и параметры образцов

Состав сплава ТН-1К образцов	Образец №1: Ti42,5-Ni-46,5-Zr3,0	Образец №2: Ti51,0-Ni49,0	Образец №3: Ti50,6-Ni49,4	Образец №4: Ti50,9-Ni49,1	Образец №5: Ti45,0-Ni45,0-Nb10,0
Характеристики образцов					
Температуры фазовых переходов, $^{\circ}$ С	$M_H=-54$ $M_K=-98$ $A_H=-30$ $A_K=+20$	$M_H=-55$ $M_K=-90$ $A_H=-50$ $A_K=-25$	$M_H=-32$ $M_K=-38$ $A_H=-21$ $A_K=-17$	$M_H=-19$ $M_K=-30$ $A_H=-10$ $A_K=-5$	$M_H=-40$ $M_K=-63$ $A_H=-15$ $A_K=+17$
Отжиг	1 час при $550-700^{\circ}$ С				
Вид образца	Сплошной цилиндр				
Диаметр, мм	4				
Длина рабочей части, мм	33				
Полная длина, мм	65				

Испытаниям были подвергнуты 5 различных сплавов, с целью выявления подходящего по характеристическим температурам для его применения в

качестве арматурных стержней плитных фундаментов РВС, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера (работа стержней находится в диапазоне среднегодовой температуры грунта в зоне укладки фундамента от минус  $7,5^{\circ}$  до  $+5,5^{\circ}$  С).

Образцы в количестве 50 штук (10 шт. каждого сплава) были изготовлены из партий стержней ТН-1К по каждому сплаву. С целью снятия остаточных микронапряжений, образцы были подвергнуты отжигу посредством укладки и термической обработки до  $550^{\circ}$ - $700^{\circ}$  С в течении 30 минут в муфельной печи.

Для получения стабилизированных диаграмм, согласно которым устанавливалось восстановление исходных характеристик материала, образцы подвергались «тренировки» путем нагрева и охлаждения без нагружения через интервал мартенситных переходов по 5 циклов с каждым сплавом.

С применением графиков зависимости деформации от температуры наблюдалось отсутствие винтовой анизотропии  $\gamma = \gamma(T)$  (рисунок 2.3).

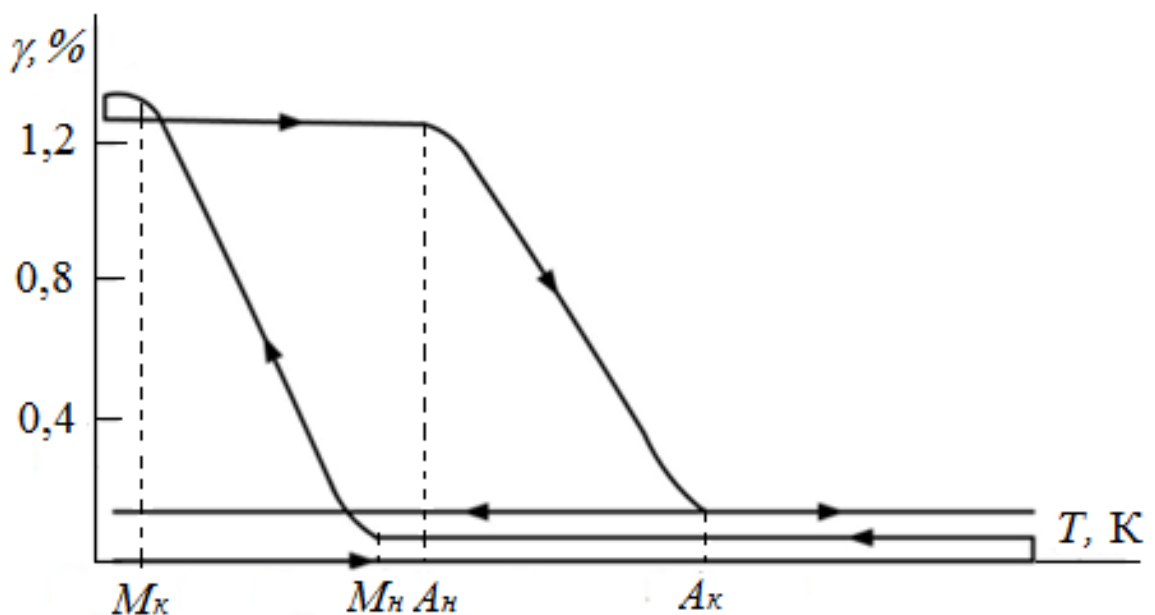
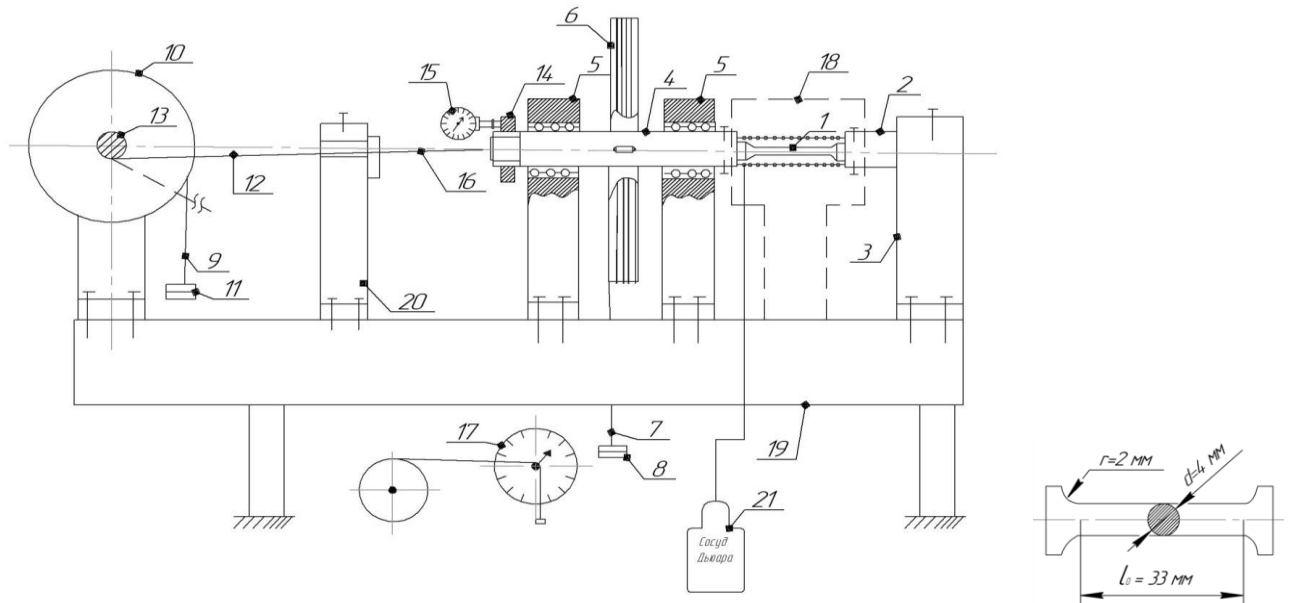


Рисунок 2.3 – Накопление и возврат сдвиговой деформации при воздействии термоциклов для выбранного сплава

Значение температур мартенситных переходов определялось графически методом касательных при значении напряжений  $\tau=10$  МПа в условиях кручения.

## 2.5 Методика экспериментальных исследований (1 этап)

Исследование проводилось на специальной установке, спроектированной в лаборатории кафедры механики ФГБОУ ВО «УГТУ», которая позволяет передавать образцу крутящий момент до значения 5 Н·м. Схема установки и образца представлена на рисунке 2.4 [67].



1 – образец; 2 – захват; 3, 5 – опора; 4 – вал; 6 – шкив; 7, 9 – нить; 8, 11 – груз; 10 – колесо; 12 – трос; 13 – ось; 14 – гайка; 15 – измерительное устройство ; 16 – трос; 17 – измерительное устройство; 18 – электропечь; 19 – рама установки; 20 – стойка; 21 – сосуд Дьюара

Рисунок 2.4 – Схема экспериментальной установки и образца

Образец 1 зафиксирован в установке между опорами 3 и 5 путем закрепления в захвате 2. Левый конец образца взаимодействует с валом 4 через подшипник, ход которого регулируется шкивом 6. Шкив 6 создает крутящий момент посредством ручного вращения, а также на него намотана высокопрочная нить с грузом 8 на конце. При вращении шкива 6 происходит закручивание/раскручивание образца (передача угловой деформации) и намотка/размотка нити 7, что приводит к вращению стрелки измерительного

устройства часового типа 15 – 1 ИГМ (цена деления 1мкм). Показания измерительного устройства позволяют определить деформацию образца.

Для определения деформационного отклика образцов выбранного сплава необходимо произвести их нагрев и охлаждение. Нагрев образцов производится электропечью 18, которая устроена в составе установки в области защемленного образца.

Чтобы контролировать однородность нагрева образца, в различных точках рабочей части образца установлены две термопары, подключенные к милливольтметру М 2038 ГОСТ 12252-86. Время одного цикла нагрева до характеристических температур составило 20 минут.

Для охлаждения в сторону низких температур использовался криогенный сосуд с жидким азотом 21 (сосуд Дьюара). В сосуд Дьюара опускается испаритель – трубка, на которую намотана электрическая спираль. При пропускании тока по спирали (порядка 3-5 Вольт) азот испаряется и движется по трубке. Другой конец трубки перфорирован по длине, соответствующей длине цилиндрического образца и одет на образец 1. Время цикла охлаждения образца – 30 минут. Касательные напряжения находили в приближении линейно-упругого тела:

$$\tau = \frac{16PR}{\pi d^3}, \quad (2.1)$$

где  $P$  – вес груза, создающего крутящий момент, Н;

$R$  – радиус шкива, м;

$d$  – диаметр рабочей части образца, м.

Сдвиговую деформацию относили к наружной поверхности образца и определяли по формуле:

$$\gamma = \frac{d \cdot \varphi}{2l} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

где  $l$  – длина рабочей части, м;

$\varphi$  – угол закручивания образца. Погрешность в определении сдвиговой деформации не превышала 0,02%.

Заметим, что  $\gamma$  не является компонентой тензора сдвиговой деформации и превышает её вдвое, так как формулой (2.2) определяется полный угол сдвига.

Осевую деформацию находили из соотношения:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\% \quad , \quad (2.3)$$

где  $\Delta l$  – изменение длины образца.

В экспериментальных исследованиях, представленных в данной работе, интенсивность касательных напряжений  $S$  и интенсивность сдвиговой деформации  $\Gamma$  определялись по формулам:

$$S = \sqrt{\frac{\sigma^2}{3} + \tau^2} \quad , \quad (2.4)$$

$$\Gamma = \sqrt{\gamma^2 + 3\varepsilon^2} \quad , \quad (2.5)$$

Многочисленные результаты пересчитывали согласно методике, подробно описанной в [68, 85, 89, 175], по которой касательное напряжение находили по формуле (2.6), используя численное дифференцирование:

$$\tau = \frac{4}{\pi d^3} \left( 3m + \gamma \frac{dm}{d\gamma} \right) \quad , \quad (2.6)$$

где  $m$  – крутящий момент.

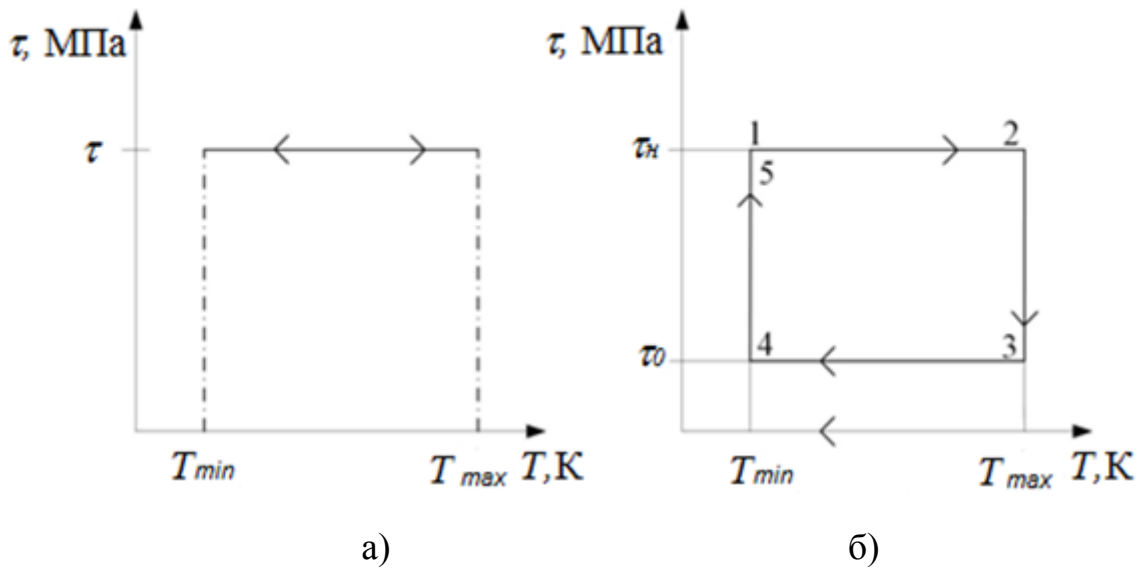
При определении осевой деформации учитывали также «инструментальную» погрешность, связанную с тепловым эффектом установки.

Эксперимент проводили следующим образом: в мартенситном состоянии образцы нагружали постоянным крутящим моментом и термоциклировали под постоянной нагрузкой в условиях неизотермической ползучести. Применяли два режима испытаний (рисунок 2.5 а, б):

а) термоциклирование под постоянной нагрузкой на этапах нагрева и охлаждения (рисунок 2.5а).

б) термоциклирование под различными напряжениями на этапах нагрева и охлаждения (рисунок 2.5б);





а – первый режим испытаний; б – второй режим испытаний

Рисунок 2.5 - Схема режима испытаний

В первом режиме материал нагружали в мартенситном состоянии до постоянных значений касательных напряжений (рисунок 2.5а) и термоциклировали через интервалы температурных переходов. При этом наблюдали (рисунок 2.6) восстановление деформаций на величину равную  $\gamma_n$ ,  $\varepsilon_n$  при нагревании и пластичность прямого превращения  $\gamma_{nn}$ ,  $\varepsilon_{nn}$  при охлаждении.

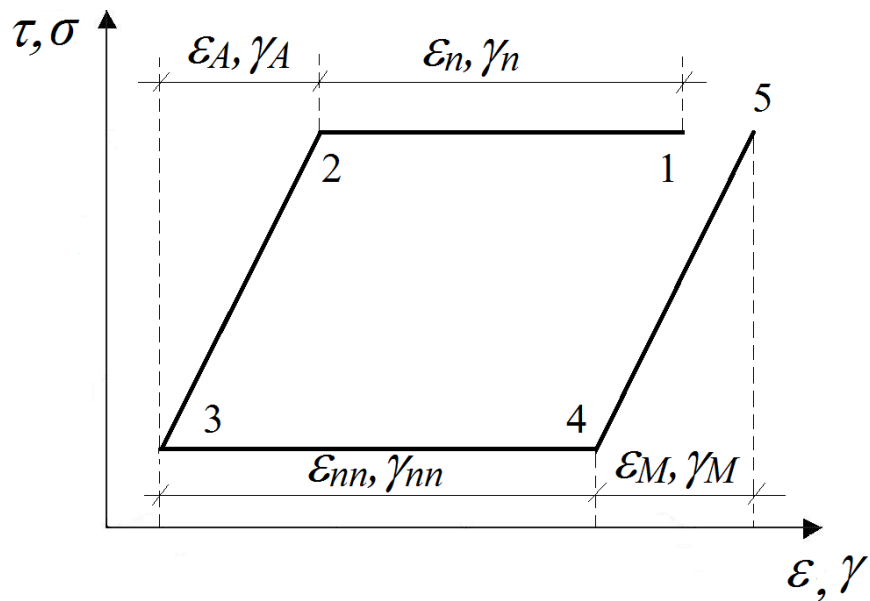


Рисунок 2.6 – Схема деформирования образцов

Во втором режиме (рисунок 2.5б) материал нагружали до состояния, характеризуемого напряжением нагрева  $\tau_n$  (точка 1 на рисунке 2.5б). Нагревали через интервал обратного мартенситного перехода (ОМП) до аустенитного состояния (точка 2 рисунок 2.5б), где его разгружали до  $\tau_o$  (точка 3 на рисунке 2.5б) и охлаждали до исходной температуры (точка 4 на рисунке 2.5б), затем термоцикл, с соответствующими догрузками в мартенситном и разгрузками в аустенитном состояниях, повторяли.

Общая минимальная и максимальная температуры термоциклирования соответственно составили:  $T_{min}=175$  К;  $T_{max}=293$  К. Во всех случаях термоциклирование начиналось в мартенситном состоянии. Описанные выше виды образцов и режимы нагружения использовались далее при экспериментальных исследованиях, при выборе сплава образцов, имеющих деформационные характеристики и стабильные деформационные отклики при переходных процессах в сплавах ЭПФ.

Результаты эксперимента показали, что выбранные сплавы полностью проявляют эффекты ЭПФ и ППП при соответствующих теплосменах и деформациях образцов в процессе кручения под нагрузкой [6, 30, 31, 32, 121, 122], что подтверждает правильность выбора данных сплавов.

После определения угловой деформации для каждой серии образцов пяти сплавов, расчетным путем была найдена линейная деформация в зависимости от характеристических температур.

По полученным экспериментальным данным представлены графики деформационных откликов пяти испытываемых сплавов после пяти термических тренировок (рисунок 2.7-2.11).

Анализ кривых термомеханического гистерезиса после термоциклической тренировки сплавов под постоянной нагрузкой  $\tau_n = \tau_o = 10$  МПа и переменной  $\tau_n = \tau_o = 10-200$  МПа показал, что кривые оказались во всех случаях монотонно возрастающими, тем самым наблюдая явление ЭПФ при нагреве и ППП при охлаждении.

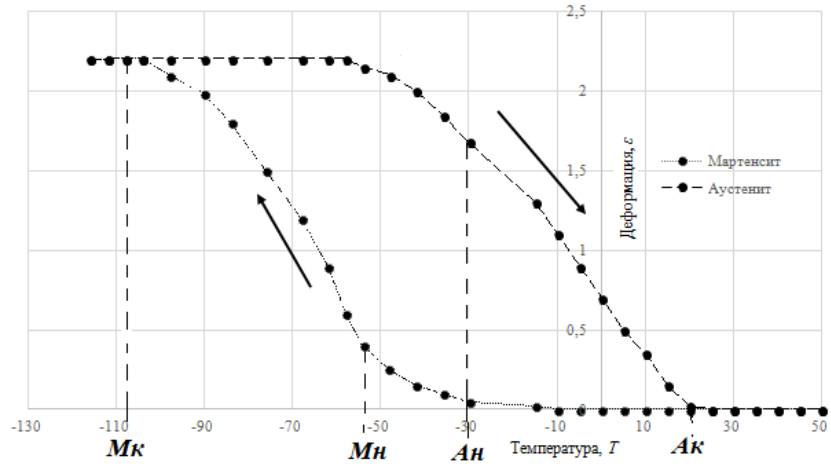


Рисунок 2.7 – Зависимость деформации от температуры сплава Ti42,5-Ni-46,5-Zr3,0 после 5ого термоцикла

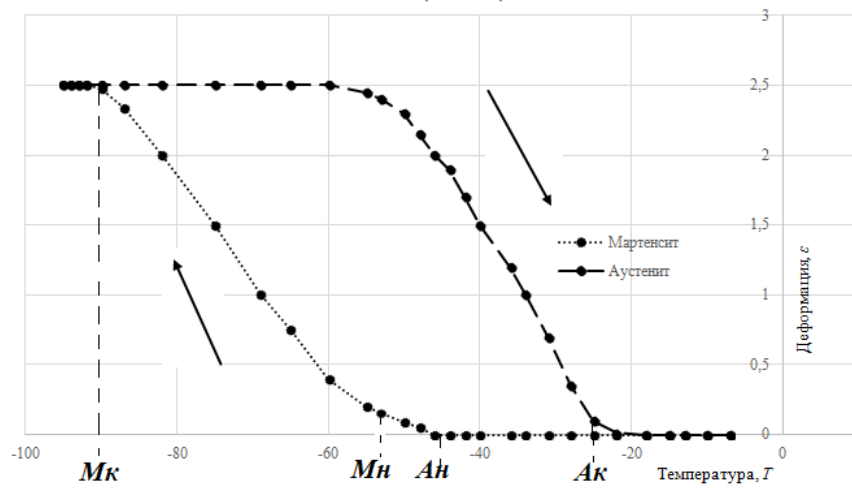


Рисунок 2.8 – Зависимость деформации от температуры сплава Ti51,0-Ni-49,0 после 5ого термоцикла

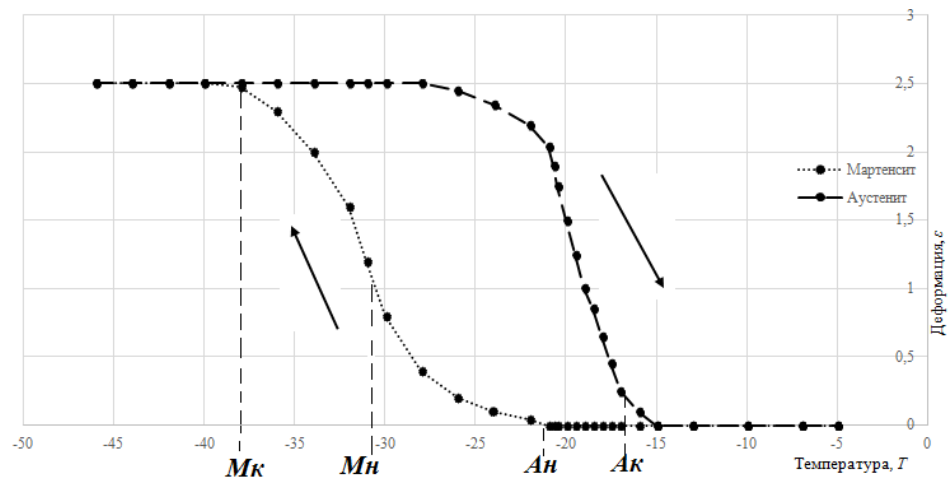


Рисунок 2.9 – Зависимость деформации от температуры сплава Ti50,6-Ni-49,4 после 5ого термоцикла

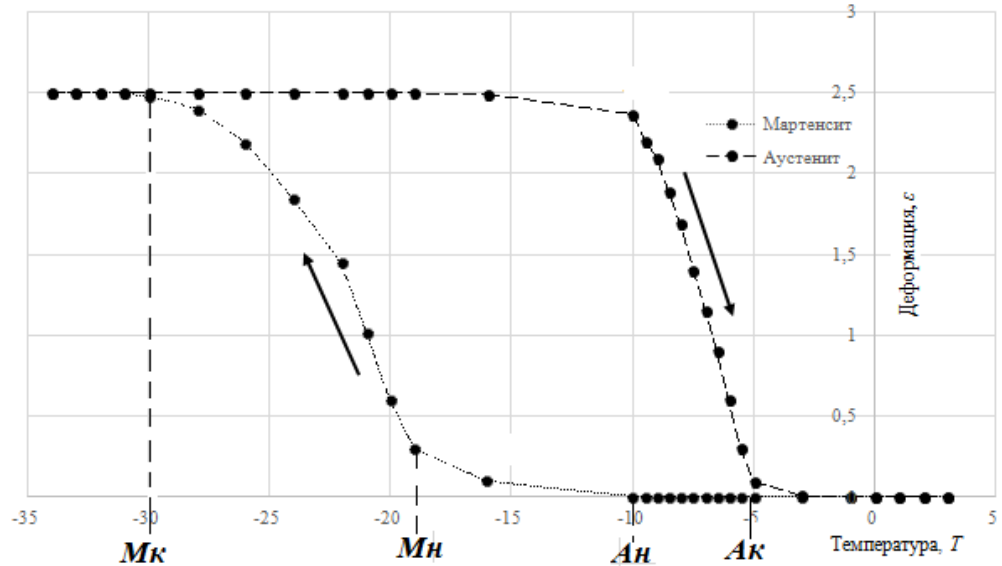


Рисунок 2.10 – Зависимость деформации от температуры сплава Ti50,9-Ni49,1 после 5ого термоцикла

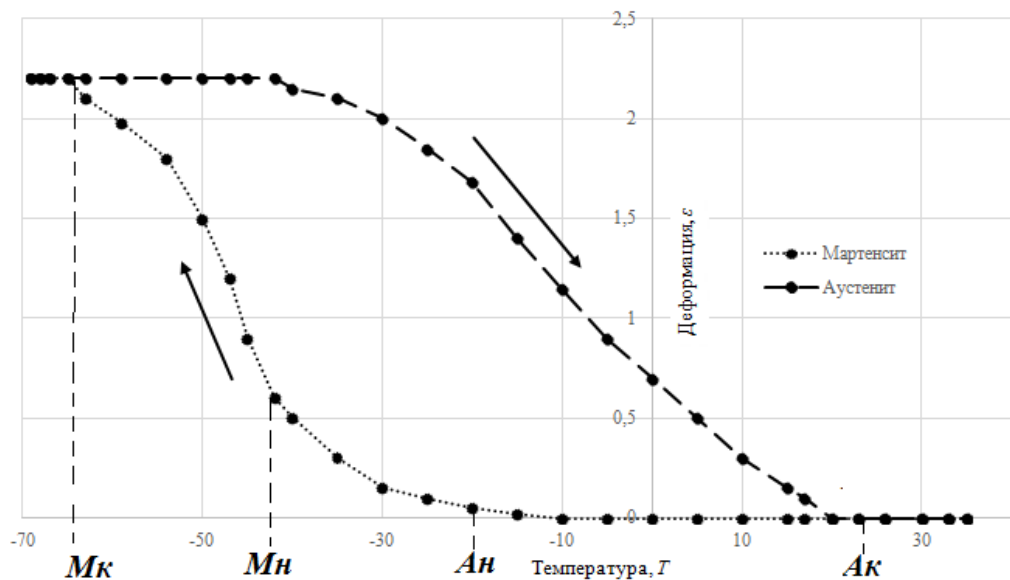
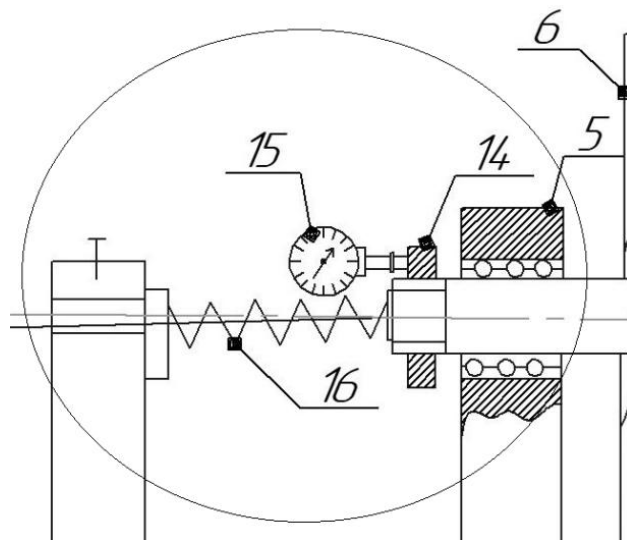


Рисунок 2.11 – Зависимость деформации от температуры сплава Ti45,0-Ni45,0-Nb10,0 после 5ого термоцикла

Кроме того, из пяти испытуемых сплавов был выбран один сплав Ti45-Ni45-Nb10, который по своим температурным переходам способен работать в качестве арматурных стержней для плитных фундаментов РВС при реальных условиях эксплуатации фундамента (от минус 7,5<sup>0</sup> до +5,5<sup>0</sup> С).

## 2.6 Методика экспериментальных исследований (2 этап)

Для осуществления второго этапа экспериментальной части работы используем предыдущую установку, в состав которой добавляем упругое контртело, создающее жесткость противодействия работе образца, с целью имитации сопротивлений бетона при растяжении арматуры [149, 151]. Фрагмент установки с пружиной представлен на рисунке 2.12.



5 – опора; 6 – шкив; 14 – гайка; 15 – измерительное устройство;  
16 – пружина

Рисунок 2.12 – Фрагмент экспериментальной установки

В данном случае испытания образца происходили в условиях растяжения. При нагревании образца, в то время когда происходит восстановление деформации, регистрируется угол сдвига стрелки измерительного устройства 15, что означает начало аустенитного перехода (визуальное укорочение образца). Определяя угол сдвига стрелки, регистрируем изменения длины образца, то есть деформацию, обусловленная эффектом памяти формы.

Зная угол отклонения при деформации образца и радиус шкива, воспользуемся формулой преобразования изменения длины образца в деформацию ЭПФ.

Осевая деформация находится по отношению (2.7):

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_{\vartheta}}{L_{\vartheta}} \cdot 100, \quad (2.7)$$

где  $\Delta L_{\vartheta} = r \cdot \varphi$  – изменение длины образца, м;

$r$  – радиус оси 0,25, м;

$\varphi$  – угол отклонения стрелки 15 при нагреве образца.

Через определенное время при продолжении нагревания образца визуальные изменения длины прекращаются, движение стрелки также останавливается. В этот момент наступает конец аустенитного перехода.

Нагрев отключают, производится первоначальное охлаждение образца за счёт окружающей температуры (комнатная температура  $\sim +18^{\circ}\text{C}$ ).

Для охлаждения до более низких температур использовался сосуд Дьюара, позволяющий производить охлаждение проволоки до температур  $M_n$ - $M_k$ .

Во время охлаждения, при обратном движении стрелки регистрировалось увеличение длины образца, фиксировалось начало мартенситного перехода, в то время, когда стрелка переставала двигаться и останавливалась на месте длина образца не изменялась – фиксировался конец мартенсита.

В качестве образцов были использованы: цилиндрические образцы эквиаомный сплав никелида титана, легированный ниобием Ti45-Ni45-Nb10, характеристики которого приведены в таблице 2.2.

В качестве упругого контртела использовали витые пружины сжатия, заранее протарированные с помощью динамометра (5 пружин с различными геометрическими параметрами). Жесткость пружин указана в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Параметры жесткости упругого-контртела

Параметры исследуемой системы	№ упругого контртела				
	1	2	3	4	5
Жесткость упругого контртела $K$ , Н/м	740,74	1582,03	2857,14	7901,23	10521,89
Жесткость противодействия $K_I$ , ГПа	1,89	4,03	7,3	20,1	26,8

При обработке экспериментальных результатов использовали метод наименьших квадратов. Температуру измеряли с точностью  $\pm 1\text{K}$ .

Жесткость противодействия системы «образец – защемление»  $K_1$  определяются по уравнению (2.8) и результаты сведены в таблицу 2.3 (для 5 пружин) [149]:

$$K_1 = \frac{K \cdot L_{\text{э}}}{s}, \quad (2.8)$$

где  $K$  – жесткость упругого элемента, Н/м;

$L_{\text{э}}$  – длина рабочей части образца, м;

$s$  – площадь поперечного сечения образца,  $\text{м}^2$ .

Если пренебречь обычной пластической деформацией, то для реактивных напряжений  $\sigma_p$  получаем:

$$\sigma_p = K_1 \cdot \varepsilon, \quad (2.9)$$

где  $\varepsilon$  – осевые деформации, способные к возврату.

Анализ результатов работ [6, 31, 69, 70, 76, 141] и проведенных эксперимент свидетельствуют о прямой зависимости числа циклов формоизменения от значения жесткости противодействия упругого контртела. Таким образом, если  $K_1 \rightarrow \infty$ , то напряжений в образце  $\sigma \rightarrow \sigma_{\text{max}}$ , деформация памяти образца  $\varepsilon = 0$ . Если  $K_1 = 0$ , то  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_{\text{max}}$ ,  $\sigma = 0$ . При условии  $0 \leq K_1 \leq \infty$ , деформационный отклик принимает следующие значения: от  $\varepsilon_{\text{max}} \rightarrow \varepsilon \rightarrow 0$ , а напряжение  $0 \leq \sigma \leq \sigma_{\text{max}}$  (рисунок 2.13).

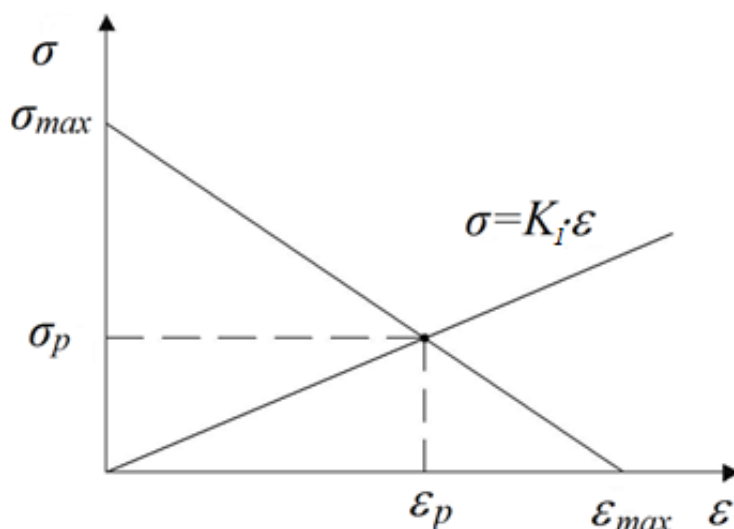


Рисунок 2.13 – Схема расчета рабочих напряжений  $\sigma_p$  деформаций  $\varepsilon_p$

Согласно проведенному эксперименту, изменению значений  $K_1$  в вышеуказанных пределах отвечает геометрическое место точек в пространстве  $\sigma - \varepsilon$ , в первом приближении аппроксимируемое нисходящей прямой. Величина  $\sigma_{max}$  показывает максимально возможный уровень генерируемых напряжений, отвечающих бесконечной жесткости противодействия упругого контртела,  $\varepsilon_{max}$  – величина деформации, обусловленной ЭПФ в свободном состоянии после термоциклирования под нагрузкой.

Величины  $\sigma_{max}$  и  $\varepsilon_{max}$  определяются экспериментально и являются базовыми механическими параметрами задачи. Прямая  $\sigma = K_1 \varepsilon$  является линией постоянной жесткости противодействия. Величины рабочих напряжений и деформаций  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$  образца ЭПФ находятся как координаты точки пересечения нисходящей прямой  $\sigma_{max} \rightarrow \varepsilon_{max}$  и прямой постоянной жесткости противодействия  $\sigma = K_1 \varepsilon$ , т.е. из геометрических соображений согласно (2.10), (2.11).

По оси абсцисс отложена амплитуда обратимой деформации, а по оси ординат – соответствующий уровень реактивных напряжений.

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{max}}{1 + \frac{\sigma_{max}}{K_1 \varepsilon_{max}}}, \quad (2.10)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{max}}{K_1 + \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}}}. \quad (2.11)$$

Исходя из диаграммы растяжения сплава ТН-1К (рисунок 2.14) и экспериментальных значений деформации памяти, для расчета используем  $\sigma_m=220$  МПа,  $\sigma_\varepsilon=1000$  МПа;  $E_A=8 \cdot 10^{10}$  Па,  $\varepsilon_0=0,275\%$ ,  $\varepsilon_n=2,2\%$ ,  $\varepsilon_{max}=8\%$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – соответствующее напряжение, выведенное из подобия треугольников диаграммы растяжения сплава ТН-1К (эквивалентного состава Ti45-Ni45-Nb10).

$$\frac{\sigma_\varepsilon - \sigma_m}{\sigma_\varepsilon - \sigma_m} = \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}, \quad (2.12)$$

Откуда получаем:



$$\sigma_s = \sigma_m + (\sigma_s - \sigma_m) \cdot \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}, \quad (2.13)$$

$$\sigma_s = 220 + (1000 - 220) \cdot \frac{2,2 - 0,275}{10 - 0,275} = 197,9 \text{ МПа.}$$

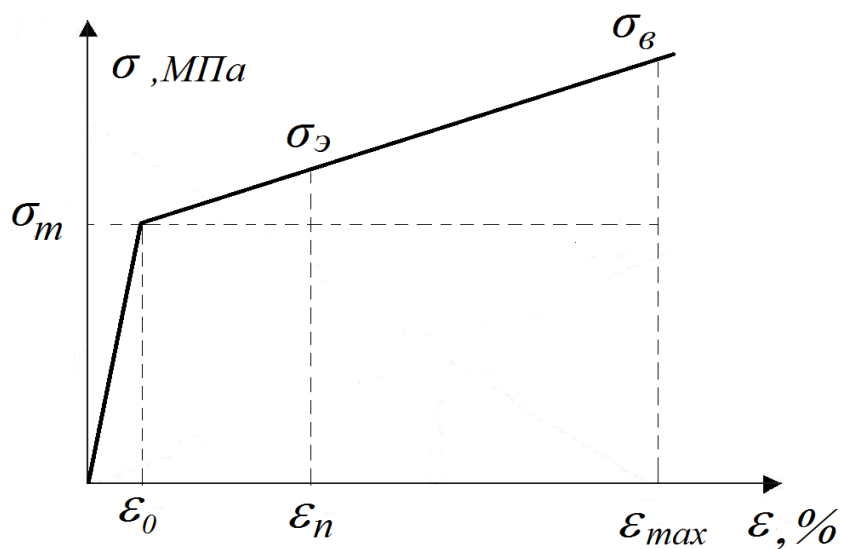


Рисунок 2.14 – Диаграмма растяжения сплава ТН-1К

На рисунке 2.15 показаны деформационно – силовые кривые для пятого термоцикла, показывающие связь между реактивными напряжениями  $\sigma_p$  и осевой определенной деформацией  $\varepsilon$ .

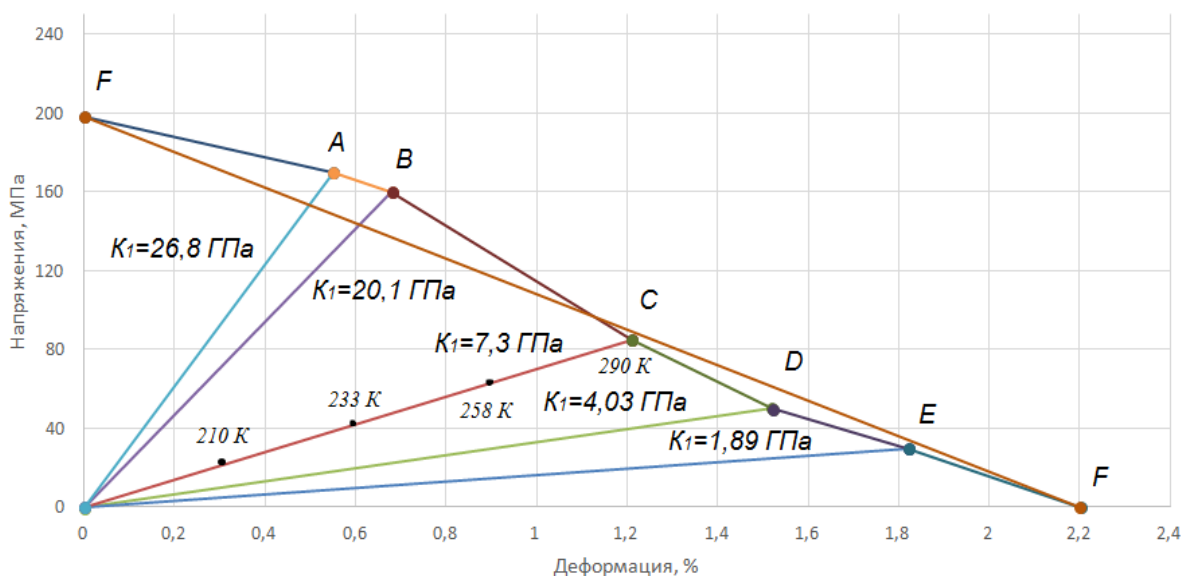


Рисунок 2.15 – Деформационно-силовые характеристики исследуемого сплава при разном значении жесткости противодействия

Ломаная FABCDEF определяет значения реактивных напряжений  $\sigma_p$  и осевой деформаций  $\varepsilon_p$ , реализуемых при нагреве через интервал обратного мартенситного перехода в сплаве ТН-1К. Для точек ABCDE значения  $\sigma_p$  и  $\varepsilon_p$  найдены экспериментально, а точка F отвечает фактическому пределу прочности исследованной проволоки из сплава с ЭПФ при максимальном значении деформации  $\varepsilon_n$ .

В ходе работы выполнено экспериментальное исследование сплава с ЭПФ ТН-1К (Ni45-Ti45-Nb10) в качестве рабочего тела при его заземлении упругим контртелом.

В результате эксперимента получены зависимости величин реактивных напряжений и деформаций, изменяющихся в пределах  $0\% \leq \varepsilon_n \leq 2,2\%$ , реализуемых за счет ЭПФ, от жесткости противодействия упругого контртела.

## 2.7 Математическое планирование эксперимента

Планирование эксперимента является процедурой выбора числа и условий проведения опытов, которых будет в полной мере достаточно для решения поставленной задачи с требуемой точностью и достоверностью. Таким образом, в работе выполним математическое планирование эксперимента, а конкретно для 2ого этапа проведения опытов [1, 109, 123].

Для нахождения параметра оптимизации (деформация памяти,  $\varepsilon$ ) при математическом планировании эксперимента принимается во внимание: эксперимент - полный факторный активный и значения трех значимых факторов: характеристические температуры переходов материала  $T$ ,  $K$ , предел прочности материала образцов  $\sigma_{np}$ , МПа, жесткость упругого контртела  $K$ , МН/м.

Кодирование факторов, оказывающих влияние на деформацию памяти материала с ЭПФ, искомую в эксперименте, приведены в таблице 2.4 [1, 22, 109, 123].

Таблица 2.4 – Кодирование значений факторов

Наименование фактора	Параметр	Единицы измерения	Обозначение
Характеристические температуры переходов материала	$T$	К	$x_1$
Предел прочности материала образцов	$\sigma_{np}$	МПа	$x_2$
Жесткость упругого контртела	$K$	Н/м	$x_3$

Значения функции отклика математической модели распределяются в плане ортогональном центрально-композиционном второго порядка (ОЦКП) [1, 22, 109, 123]. Для планирования эксперимента значения факторов и иных параметров безразмерные.

Для определения количества опытов  $N$ , необходимых для ОЦКП, использовали формулу [1, 22, 109, 123]

$$N = 2^{k_{\phi}} + 2 \cdot k_{\phi} + 1, \quad (2.14)$$

где  $k_{\phi}$  – число факторов.

Из расчета по формуле (2.12) получили:

$$N = 2^3 + 2 \cdot 3 + 1 = 15.$$

Таким образом, при  $k_{\phi} = 3$  искомое количество опытов для ОЦКП второго порядка составляет 15.

Для получения математической модели в ОЦКП число уровней независимых переменных должно быть на единицу больше степени интерполяционного многочлена.

Ядром ОЦКП являются ортогональные планы и некоторое число дополнительных «звездных» точек, которые лежат на сфере диаметром  $2\alpha$ . Построение сводится к определению расстояния звездного плеча  $\alpha$  от центра до «звездных» точек [1, 22, 109, 123].

На рисунке 2.16 приведен общий вид трехфакторного ОЦКП второго порядка.

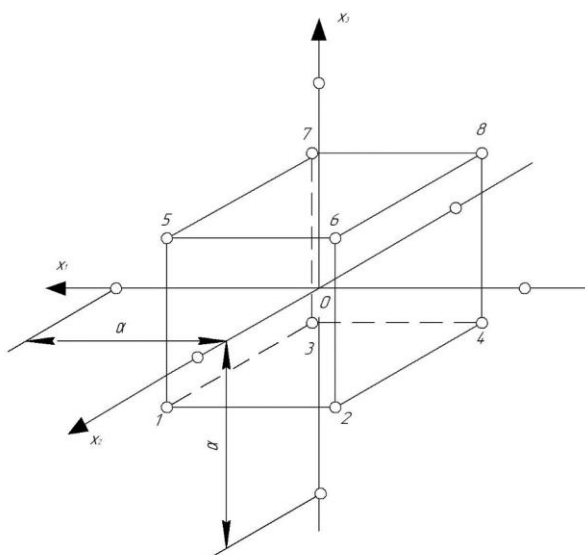


Рисунок 2.16 – Схема трехфакторного ОЦКП второго порядка

Основное свойство планирования эксперимента является ортогональность матрицы, определяющееся из условия [3, 17, 18, 20]

$$\sum_{u=1}^n x_{0i} x_{iu}^2 = 0 \text{ и } \sum_{u=1}^n x_{iu}^2 x_{ji}^2 = 0. \quad (2.15)$$

Свойство ортогональности позволяет упростить вычисления и получить независимые коэффициенты регрессии.

Условие (2.15) определяется путем преобразования квадратичных переменных:

$$(x'_i)^2 = x_i^2 - \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}{n} = x_i^2 - \bar{x}_i^{-2}. \quad (2.16)$$

где  $n$  – число параллельных опытов.

Величина  $\bar{x}_i^{-2}$  зависит от числа факторов  $k$  и плеча  $\alpha$  [1]:

$$\bar{x}_i^{-2} = \frac{2^k + 2\alpha^2}{2^k + 2k + 1}. \quad (2.17)$$

Величину  $\bar{x}_i^{-2}$  обозначают через плечо  $\varphi$ , таким образом уравнение (2.17) будет иметь следующий вид:

$$\bar{x}_i^{-2} = \varphi = \frac{2^k + 2\alpha^2}{2^k + 2k + 1} = \frac{2^k + 2\alpha^2}{n}. \quad (2.18)$$

Тогда условие (2.17) запишем как:

$$2^k(1-\varphi)^2 - 4\varphi(\alpha^2 - \varphi) + 2(k-\varphi)\varphi^2 + \varphi^2 = 0. \quad (2.19)$$

Таким образом, получаем:

$$\varphi = \sqrt{\frac{2^k}{n}}, \quad (2.20)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{n\varphi - 2^k}{2}}, \quad (2.21)$$

Расчет по формулам (2.20) и (2.21) дает значения параметров ОЦКП (таблица 2.5).

Таблица 2.5 – Значения параметров ОЦКП

Ядро плана	Общее количество опытов	$\varphi$	$\alpha$
$2^3$	15	0,7303	1,2154

При условии ортогонального планирования эксперимента и получив экспериментальные данные рассчитываются значения коэффициентов регрессии:

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^n y_u}{n}, \quad (2.22)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \overline{y_u}}{\sum_{u=1}^n x_{iu}^2}, \quad (2.23)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n x_{iu} \overline{y_u} x_{ju}}{\sum_{u=1}^n (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad (2.24)$$

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2 \overline{y_u}}{\sum_{u=1}^n (x'_{iu})^2}, \quad (2.25)$$

где  $i, j$  – номера столбцов матрицы планирования эксперимента;

$x_{iu}$  – элементы  $i$ -го столбца.

При анализе эксперимента усреднение результатов повторных опытов определяется по формуле:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} y_i}{n}, \quad (2.26)$$

где  $i$  – номер параллельного опыта;

$y_i$  – значение функции отклика.

Оценка дисперсий коэффициентов уравнения регрессии рассчитывается по следующим формулам:

$$S_{b0}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{n}, \quad (2.27)$$

$$S_{bi}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n x_{iu}^2}, \quad (2.28)$$

$$S_{bij}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n (x_{iu} x_{ju})^2}, \quad (2.29)$$

$$S_{bii}^2 = \frac{S_{\text{воспр}}^2}{\sum_{n=1}^n (x'_{iu})^2}, \quad (2.30)$$

где  $S_{\text{воспр}}^2$  – оценка дисперсии воспроизводимости результатов измерений.

Кодирование величин значимых факторов выполняется по формуле:

$$x_i = \frac{\tilde{x}_i - \tilde{x}_{i0}}{I}, \quad (2.31)$$

где  $x_i$  – нормированное значение фактора;

$\tilde{x}_i$  – натуральное значение фактора;

$\tilde{x}_{i0}$  – основной уровень фактора;

$I$  – интервал варьирования факторов.

Область проводимого эксперимента, принятые натуральные и кодированные значения рассматриваемых факторов приведены в таблице 2.6.

Интервал варьирования рассматриваемых факторов  $I$  составил для:

– характеристической температуры мартенситных переходов образцов  $T - I = 40$  К;

Таблица 2.6 – Матрица трехфакторного ОЦКП

Уровни варьирования	Область эксперимента			
	$x_1=T$ , К	$x_2=\sigma_6$ , МПа	$x_3=K$ , кН/м	Кодированное значение
Нижний	210	800	0,74	-1
Основной	250	900	5,63	0
Верхний	290	1000	10,52	+1

– предела прочности материала образцов  $\sigma_6 - I=100$  МПа;

– жесткости упругого контртела  $K - I=4,89$  кН/м.

Согласно формуле (2.29), учитывая интервал варьирования и натурные значения факторов, кодированные значения имеют вид:

$$x_1 = \frac{T - 250}{40}, \quad (2.32)$$

$$x_2 = \frac{\sigma_6 - 900}{100}, \quad (2.33)$$

$$x_3 = \frac{K - 5,63}{4,89}. \quad (2.34)$$

Функцию отклика математической модели аппроксимируют в виде полного квадратичного полинома, получая выражение:

$$y = b'_0 + \sum_{1 \leq i \leq k} b_i x_i + \sum_{\substack{1 \leq i \leq k \\ 1 \leq j \leq k \\ i \neq j}} b_{ij} x_i x_j + \sum_{1 \leq i \leq k} b_{ii} x_i^2. \quad (2.35)$$

Учитывая кодирование значений значимых факторов, выражение (2.35) принимает вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2 + b_{33} x_3^2. \quad (2.36)$$

Подставив параметры кодированных факторов в уравнение (2.36) получается промежуточная математическая модель:

$$y = b_0 + b_1 T + b_2 \sigma_6 + b_3 K + b_{12} T \sigma_6 + b_{13} T K + b_{23} \sigma_6 K + b_{11} T^2 + b_{22} \sigma_6^2 + b_{33} K^2. \quad (2.37)$$

Учитывая натурные значения и кодирование факторов согласно формул (2.32-2.34), подставив их в математическую модель (2.37), получаем:

$$\begin{aligned}
y = & b_0 + b_1 \left( \frac{T - 250}{40} \right) + b_2 \left( \frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) + b_3 \left( \frac{K - 5,63}{4,89} \right) + \\
& + b_{12} \left( \frac{T - 250}{40} \right) \left( \frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) + b_{13} \left( \frac{T - 250}{40} \right) \left( \frac{K - 5,63}{4,89} \right) + \\
& + b_{23} \left( \frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right) \left( \frac{K - 5,63}{4,89} \right) + b_{11} \left( \frac{T - 250}{40} \right)^2 + \\
& + b_{22} \left( \frac{\sigma_\epsilon - 900}{100} \right)^2 + b_{33} \left( \frac{K - 5,63}{4,89} \right)^2.
\end{aligned} \tag{2.38}$$

Общий вид исходной матрицы планирования ОЦКП второго порядка представлен в таблице 2.7.

Критерий выявления грубых ошибок определен по формуле (2.39):

$$\beta' = \frac{(x_{max} - x_{cp})}{S \sqrt{\frac{(u-1)}{u}}}. \tag{2.39}$$

Для определения ошибок повторных опытов эксперимента определяют среднеквадратичное отклонение по формуле:

$$S_i^2 = \frac{\sum_1^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1}, \tag{2.40}$$

Для определения брака используем критерий Стьюдента:

$$\frac{y - \bar{y}}{S} \geq t \text{ или } t_{расч} \geq t_{табл}, \tag{2.41}$$

где  $t$  – критерий Стьюдента, его значение для 5-ти повторных опытов (5 термоциклов) и доверительной вероятности 0,95 равно 2,78 [123].

Данные расчетов среднеквадратического отклонения приведены в таблице 2.8. Рабочая матрица ОЦКП второго порядка с учетом экспериментальных данных и результатов расчетов представлена в таблице 2.9.

Используя критерий Стьюдента определим вероятность брака (например, для 5-го опыта):



Таблица 2.7 – Общий вид исходной матрицы планирования ОЦКП второго порядка

№ опыта	Матрица планирования эксперимента										Результаты повторных измерений	Среднее $\bar{y}$
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_1x_3$	$x_2x_3$	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$		
1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	2,231	2,179
											2,215	
											2,123	
											2,099	
											2,225	
2	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	2,224	2,167
											2,091	
											2,239	
											2,213	
											2,067	
3	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	2,211	2,123
											2,199	
											2,142	
											2,095	
											2,067	
4	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	2,212	2,247
											2,199	
											2,234	
											2,244	
											2,345	
5	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	2,131	2,236
											2,289	
											2,225	
											2,269	
											2,267	
6	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	2,211	2,207
											2,208	
											2,205	
											2,209	
											2,204	

Продолжение таблицы 2.7

7	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	2,206	2,215
											2,213	
											2,215	
											2,220	
											2,223	
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	2,222	2,213
											2,225	
											2,206	
											2,205	
											2,207	
9	+1	-1,22	0	0	0	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	2,211	2,223
											2,223	
											2,214	
											2,265	
											2,203	
10	+1	+1,22	0	0	0	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	2,205	2,203
											2,201	
											2,203	
											2,202	
											2,205	
11	+1	0	-1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,76	-0,73	2,211	2,223
											2,212	
											2,244	
											2,233	
											2,216	
12	+1	0	+1,22	0	0	0	0	-0,73	+0,76	-0,73	2,233	2,234
											2,226	
											2,234	
											2,278	
											2,197	

Окончание таблицы 2.7

13	+1	0	0	-1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,76	2,196	2,239
											2,245	
											2,234	
											2,256	
											2,267	
14	+1	0	0	+1,22	0	0	0	-0,73	-0,73	+0,76	2,213	2,196
											2,107	
											2,210	
											2,234	
15	+1	0	0	0	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	2,111	2,173
											2,189	
											2,178	
											2,199	
											2,189	
<i>N</i>	15	10,44	10,44	10,44	8	8	8	4,377	4,377	4,377		

$$\frac{2,236 - 2,131}{0,0632} = 1,66,$$

$$\frac{2,289 - 2,236}{0,0632} = 0,8386.$$

Условие  $t_{расч} \geq t_{табл}$  не выполняется, следовательно, результаты повторных опытов не можем считать ошибочными.

## 2.8 Математический и регрессионный анализ экспериментальных данных

Для того, чтобы получить математическую модель, необходимо рассчитать соответствующие коэффициенты регрессии.

Используя формулы (2.22-2.25) определим значения коэффициентов уравнения регрессии.

$$b_0 = \frac{2,179 + 2,167 + 2,123 + 2,247 + 2,236 + 2,207 + 2,215 + 2,213 + 2,223 +}{15} +$$

$$+ \frac{2,203 + 2,223 + 2,234 + 2,239 + 2,196 + 2,173}{15} = 2,21,$$

$$b_1 = \frac{-2,179 + 2,167 - 2,123 + 2,247 - 2,236 + 2,207 - 2,215 +}{10,44} +$$

$$\frac{+ 2,213 - 2,712 + 2,688}{10,44} = 0,0055,$$

$$b_{11} = \frac{0,588 + 0,585 + 0,573 + 0,607 + 0,604 + 0,596 + 0,598 +}{4,377} +$$

$$\frac{+ 0,598 + 1,689 + 1,674 - 1,623 - 1,631 - 1,635 - 1,603 - 1,586}{4,377} = 0,0078,$$

$$b_{12} = \frac{2,179 - 2,167 - 2,123 + 2,247 + 2,236 - 2,207 - 2,215}{8} = 0,0204.$$

Для подтверждения значимости коэффициентов регрессии необходимо выполнение условия:

$$|b_i| \geq S_{b_i} t, \quad (2.42)$$

Таблица 2.8 – Данные расчетов среднеквадратического отклонения

№ опыта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
$S_i^2$	0,0039	0,0066	0,0045	0,0033	0,0039	0,0038	0,0043	0,0035	0,0061	0,0032	0,0021	0,0054	0,0056	0,0026	0,0013
$S_i$	0,0625	0,0811	0,0668	0,0576	0,0632	0,0616	0,0656	0,0592	0,0781	0,0565	0,0458	0,0735	0,0748	0,0509	0,0354

Таблица 2.9 – Рабочая матрица ОЦКП второго порядка с учетом экспериментальных данных и результатов расчетов

$j$	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2 - \beta$	$x_2^2 - \beta$	$x_3^2 - \beta$	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$\bar{y}$	$S_y^2(y)$	$\beta'$
1.	+1	-1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	+1	+1	2,179	0,0039	1,06
2.	+1	+1	-1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	-1	+1	2,167	0,0066	0,98
3.	+1	-1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	+1	-1	2,123	0,0045	1,48
4.	+1	+1	+1	-1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	-1	-1	2,247	0,0033	1,9
5.	+1	-1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	-1	-1	2,236	0,0039	0,94
6.	+1	+1	-1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	+1	-1	2,207	0,0038	1,54
7.	+1	-1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	-1	-1	+1	2,215	0,0043	1,38
8.	+1	+1	+1	+1	+0,27	+0,27	+0,27	+1	+1	+1	2,213	0,0035	1,38
9.	+1	-1,22	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	0	0	0	2,223	0,0061	1,91
10.	+1	+1,22	0	0	+0,76	-0,73	-0,73	0	0	0	2,203	0,0032	1,24
11.	+1	0	-1,22	0	-0,73	+0,76	-0,73	0	0	0	2,223	0,0021	1,61

Окончание таблицы 2.9

12.	+1	0	+1,22	0	-0,73	+0,76	-0,73	0	0	0	2,234	0,0054	2,11
13.	+1	0	0	-1,22	-0,73	-0,73	+0,76	0	0	0	2,239	0,0056	1,14
14.	+1	0	0	+1,22	-0,73	-0,73	+0,76	0	0	0	2,196	0,0026	0,84
15.	+1	0	0	0	-0,73	-0,73	-0,73	0	0	0	2,173	0,0013	0,83
$\sum_{j=1}^n x_j y_j$	Коэффициенты уравнения регрессии										u=5		
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{33}$	$b_{12}$	$b_{13}$	$b_{23}$	$\alpha=0,95$		
	2,21	0,0055	0,0022	0,102	0,0078	0,0185	-0,0112	0,0204	0,0179	-0,0049	$\beta < 3,06$		
$y = 2,21 + 0,0055x_1 + 0,0022x_2 + 0,102x_3 + 0,0204x_1x_2 + 0,0179x_1x_3 - 0,0049x_2x_3 + 0,0078x_1^2 + 0,0185x_2^2 + 0,0112x_3^2.$													

где  $S_{bi}$  – среднеквадратическая ошибка в определении соответствующих коэффициентов регрессии.

Проведенные расчеты показали, что все значения коэффициентов регрессии значимы. С учетом определенных коэффициентов регрессии, уравнение (2.38) принимает вид:

$$y = 2,21 + 0,0055x_1 + 0,0022x_2 + 0,102x_3 + 0,0204x_1x_2 + 0,0179x_1x_3 - 0,0049x_2x_3 + 0,0078x_1^2 + 0,0185x_2^2 + 0,0112x_3^2. \quad (2.43)$$

Раскодируем значения значимых факторов согласно формулам (2.32-2.34) уравнение (2.43) будет иметь следующий вид:

$$y = 2,21 + 0,0055\left(\frac{T - 250}{40}\right) + 0,0022\left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100}\right) + 0,102\left(\frac{K - 5,63}{4,89}\right) + 0,0204\left(\frac{T - 250}{40}\right)\left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100}\right) + 0,0179\left(\frac{T - 250}{40}\right)\left(\frac{K - 5,63}{4,89}\right) - 0,0049\left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100}\right)\left(\frac{K - 5,63}{4,89}\right) + 0,0078\left(\frac{T - 250}{40}\right)^2 + 0,0185\left(\frac{\sigma_\epsilon - 900}{100}\right)^2 + 0,0112\left(\frac{K - 5,63}{4,89}\right)^2. \quad (2.44)$$

Произведем математическое упрощение полученного уравнения (2.44):

$$\begin{aligned} \varepsilon = & 3,874 - 0,0024T - 0,0033\sigma_\epsilon + 0,0152K + 0,102 \cdot 10^{-6} T\sigma_\epsilon + \\ & + 1,63 \cdot 10^{-6} TK - 0,049 \cdot 10^{-6} \sigma_\epsilon K + 4,88 \cdot 10^{-6} T^2 + \\ & + 1,85 \cdot 10^{-6} \sigma_\epsilon^2 + 468 \cdot 10^{-6} K^2. \end{aligned} \quad (2.45)$$

Воспроизводимость эксперимента оценим по критерию Кохрена, используя условие (2.46):

$$K_{расч} \leq K_{табл}, \quad (2.46)$$

где  $K_{расч}$  – расчетное значение критерия Кохрена;

$K_{табл}$  – табличное значение критерия Кохрена. Табличное значение критерия Кохрена принимаем по [123] в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = n_1 - 1 = 5 - 1 = 4$  и  $f_2 = N = 15 \Rightarrow K_{табл} = 0,242$ .

$$K_{расч} = \frac{S_{max}^2}{\sum_1^m S_i^2}, \quad (2.47)$$

$$K_{расч} = \frac{0,0066}{0,0284} = 0,232.$$

$0,232 \leq 0,242 \Rightarrow$  условие выполняется.

Следовательно, опыты можно считать воспроизводимыми.

Адекватность математической модели проверим по критерию Фишера, сравнив расчетное его значение с табличным [123].

$$F_{расч} \leq F_{табл}, \quad (2.48)$$

где  $F_{расч}$  – расчетное значение критерия Фишера;

$F_{табл}$  – табличное значение критерия Фишера. Табличное значение критерия Фишера принимаем по [123] в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = n_1 - 1 = 5 - 1 = 4$ ,  $F_{табл} = 5,84$ .

$$F_{расч} = \frac{S_{max}^2}{S_{min}^2}, \quad (2.49)$$

$$F_{расч} = \frac{S_2^2}{S_{15}^2} = \frac{0,0066}{0,0013} = 5,08.$$

$5,08 \leq 5,84 \Rightarrow$  условие выполняется, дисперсии однородны.

Следовательно, предположение об адекватности модели подтверждается.

Для проверки сходимости результатов математической модели с данными эксперимента проведем дополнительную серию опытов, используя заданные интервалы варьирования значимых факторов.

Натурные значения закодированных факторов определяли согласно уравнениям (2.32-2.34).

Опыт 1.

$T=210$  К;  $\sigma_\epsilon=800$  МПа;  $K=0,74$  кН/м,  $\epsilon=2,179\%$ .



$$\begin{aligned}\varepsilon = & 3,874 - 0,0024 \cdot 210 - 0,0033 \cdot 800 + 0,0152 \cdot 0,74 + 0,102 \cdot 10^{-6} \cdot 210 \cdot 800 + \\ & + 1,63 \cdot 10^{-6} \cdot 210 \cdot 0,74 - 0,049 \cdot 10^{-6} \cdot 800 \cdot 0,74 + 4,88 \cdot 10^{-6} \cdot 210^2 + \\ & + 1,85 \cdot 10^{-6} \cdot 800^2 + 468 \cdot 10^{-6} \cdot 0,74^2 = 2,161 \%\end{aligned}$$

Погрешность составит:

$$\frac{2,161 - 2,179}{2,161} = 0,0083 \approx 0,83\%$$

Опыт 2.  $T=250$  К;  $\sigma_e=900$  МПа;  $K=5,63$  кН/м,  $\varepsilon=2,213\%$ .

$$\begin{aligned}\varepsilon = & 3,874 - 0,0024 \cdot 250 - 0,0033 \cdot 900 + 0,0152 \cdot 5,63 + 0,102 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \cdot 900 + \\ & + 1,63 \cdot 10^{-6} \cdot 250 \cdot 5,63 - 0,049 \cdot 10^{-6} \cdot 900 \cdot 5,63 + 4,88 \cdot 10^{-6} \cdot 250^2 + \\ & + 1,85 \cdot 10^{-6} \cdot 900^2 + 468 \cdot 10^{-6} \cdot 5,63^2 = 2,236 \%\end{aligned}$$

Погрешность составит:

$$\frac{2,236 - 2,213}{2,236} = 0,0102 \approx 1,02\%$$

Опыт 3.  $T=290$  К;  $\sigma_e=1000$  МПа;  $K=10,52$  кН/м,  $\varepsilon=2,239\%$ .

$$\begin{aligned}\varepsilon = & 3,874 - 0,0024 \cdot 290 - 0,0033 \cdot 1000 + 0,0152 \cdot 10,52 + \\ & + 0,102 \cdot 10^{-6} \cdot 290 \cdot 1000 + 1,63 \cdot 10^{-6} \cdot 290 \cdot 10,52 - 0,049 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 10,52 + \\ & + 4,88 \cdot 10^{-6} \cdot 290^2 + 1,85 \cdot 10^{-6} \cdot 1000^2 + 468 \cdot 10^{-6} \cdot 10,52^2 = 2,282 \%\end{aligned}$$

Погрешность составит:

$$\frac{2,282 - 2,239}{2,282} = 0,0188 \approx 1,88\%$$

## 2.9 Выводы по главе 2

1. Исследованы деформационные характеристики материалов с памятью формы (цилиндрический образцы из сплава никелида титана) при реализации ЭПФ. Определен состав сплава – Ni45-Ti45-Nb10, подходящий под эксплуатационные условия работы арматурных стержней для усиления фундамента резервуара, эксплуатируемого в условиях слабых и неоднородных грунтов.

2. На основании экспериментальных исследований, построены термомеханические диаграммы образцов из сплава ТН-1К, определены напряжения, возникающие в образцах из никелида титана и установлен предел изменения параметра деформации, варьирующегося в пределах  $0\% \leq \varepsilon_n \leq 2,2\%$ .

3. Установлено, что для рассматриваемого режима термоциклической тренировки величины деформационно-силовых характеристик напряжений и деформаций, реализуемых в исследуемом образце за счет ЭПФ, зависят от величины жесткости противодействия контртела. Полученные значения реактивных напряжений не превышают предела текучести и прочности материала, что говорит о возможности его применения на практике.

4. В результате проведенного математического планирования эксперимента, разработано уравнение математической модели для определения параметра оптимизации, которое показало, что определенное в результате эксперимента значение деформации, вызванной ЭПФ, является экспериментально верно установленным. Сходимость результатов математической модели с данными эксперимента была подтверждена итоговой проверкой, используя заданные интервалы варьирования значимых факторов.

Полученные экспериментальные данные позволяют разработать теоретические методы расчета реактивных напряжений, деформаций и осевых усилий, генерируемых в элементе с ЭПФ и упругом контртеле, функционирующих при обратимых мартенситных переходах, имитирующие реальные условия работы арматурных стержней в бетонной матрице плитного фундамента нефтяного резервуара.

### **ГЛАВА 3 АНАЛИТИЧЕСКИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА УСИЛЕНИЯ ПЛИТНОГО ФУНДАМЕНТА РЕЗЕРВУАРА, АРМИРОВАННОГО СТЕРЖНЯМИ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ**

Главным фактором, определяющим работу напрягаемого железобетонного элемента является достоверный расчет напряжений, возникающих как в самом элементе, так и в арматуре в нем установленной. Расчет железобетонных конструкций с предварительным напряжением производят на действие изгибающих моментов и поперечных сил от внешних нагрузок, а также на действие усилий от предварительного натяжения арматуры и усилий от внешних нагрузок, действующих на стадии обжатия. Стандартно расчет производят по предельным состояниям 1-ой и 2-ой группы согласно СП 63.13330.2012 [117].

Учитывая, что в работе предлагается замена традиционной арматуры на арматуру с памятью для плитного фундамента резервуара, то необходимо разработать методику расчета, определяющую напряжения, развиваемые в напрягаемом элементе и арматуре ЭПФ, схему армирования, коэффициент армирования бетона, необходимое удлинение арматуры и ряд других технологических параметров.

В данной главе разработана методика расчета усиления плитного фундамента резервуара РВС путем армирования стержнями из материалов с ЭПФ в терминах технической механики и современных представлений о свойствах ЭПФ.

#### **3.1. Методика расчета армирования бетонной матрицы стержнями с памятью**

Учитывая актуальность проектов строительства РВС на площадках с преобладанием слабых грунтов предлагается для плитных фундаментов данных конструкций в качестве армирующих усиливающих элементов, применить

стержни из материалов с ЭПФ, а именно легированный сплав никелид титана ТН-1К.

В последние десятилетия во всех отраслях промышленности широкое применение нашли сплавы, обладающие эффектом памяти формы. В настоящее время известно 200 видов таких сплавов. Наиболее часто используемым и изученным является TiNi - никелид титана. Никелид титана обладает исключительными физико-механическими характеристиками (таблица 3.1, сравнение приведено со стальной арматурой). Также данный материал обладает высокой коррозионной стойкостью [139], стойкостью к коррозионному растрескиванию под напряжением [14]. Сплавы на основе никелида титана незаменимы для изделий ответственного назначения. [18, 63, 82, 93, 126, 132, 138, 150, 152, 160, 167, 168, 172].

Таблица 3.1 – Физико-механические свойства материалов с ЭПФ и арматурной стали

Параметры	ТН-1К	Арматурная сталь класса А400-А600 ГОСТ 5781-82
Плотность, г/см <sup>3</sup>	6,45 – 6,50	7,85
Температура плавления, С°	1250 – 1310	1450 – 1520
Коэффициент температурного расширения, 10 <sup>-6</sup> , К <sup>-1</sup>	12 – 14	11,9
Удельное электросопротивление, 10 <sup>-8</sup> , Ом·м	70 – 80	17,1
Коэффициент Пуассона	0,33	0,24 – 0,28
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), МПа	800 – 1200	590
Предел текучести, МПа	400 – 700	390
Относительное удлинение, %	20 – 40	14
Модуль упругости, ГПа	70	200

Целью настоящего исследования является обоснование повышения эффективности функционирования резервуаров путем внедрения новых решений

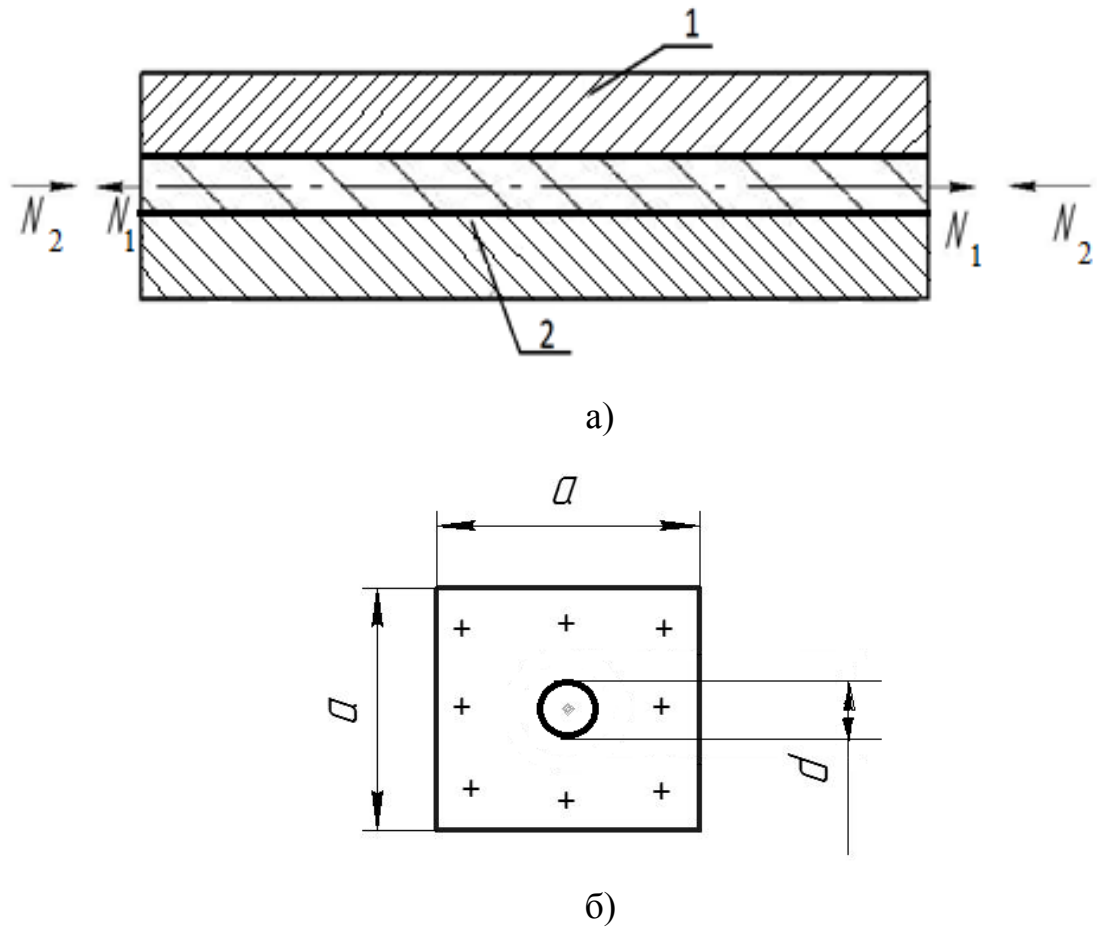
по созданию преднапряжения железобетонных фундаментов арматурой с ЭПФ. В качестве арматурных стержней с ЭПФ рассмотрен сплав ТН-1К никелида титана, легированный необием Ni45-Ti45-Nb10. Обоснование выбора данного сплава служит температурный режим работы, который пригоден для эксплуатации плитного фундамента в условиях Крайнего Севера.

Анализ ряда работ [150, 152, 160, 167, 168, 172] по идеи создания предварительного напряжения железобетонных конструкций элементами с ЭПФ, воспринимающими нагрузки в сечениях изделий, показал отсутствие единых методик расчета по определению напряжений ( $\sigma$ ), возникающих в них в процессе преднапряжений, необходимых деформаций усиливающих элементов ( $\varepsilon$ ), процента армирования бетона ( $\mu$ ) данными элементами и др.

Используя основы инженерной механики, в работе произведен расчет усиления плитных фундаментов резервуаров с применением арматуры из материалов с ЭПФ, который позволит использовать данные материалы в качестве преднапряженных усиливающих элементов в данных конструкциях, которые в процессе эксплуатации испытывают интенсивные нагрузки, способные привести к разрушению крупногабаритных емкостей и повлечь за собой аварийные ситуации.

Термоциклирование металлов с ЭПФ в нагруженном состоянии через интервалы мартенситных переходов сообщает материалу свойство обратимого формоизменения, которое проявляется при нагревании в виде эффекта памяти формы (ЭПФ) и эффекта пластичности прямого превращения (ППП) при охлаждении. Это позволяет предположить, что «натренированные» путем термоциклирования стержни из СПФ могут быть применены в качестве армирующих элементов бетонных фундаментов резервуаров нефтяной промышленности, а также других ответственных конструкций, в т.ч. эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных сред.

Рассмотрим расчетную схему модельного структурного элемента, представляющего собой призму бетонной матрицы с центрально симметрично расположенным стержнем из СПФ (рисунке 3.1).



а) линейная модель б) профиль поперечного сечения структурного элемента бетон - никелида титана; 1 – бетонная матрица; 2 – пруток из никелида титана

Рисунок 3.1 – Модельный структурный элемент

Равнодействующая растягивающих  $N_1$  – равнодействующая растягивающих сил, действующих на арматуру из никелида титана,  $N_2$  – равнодействующая сжимающих сил, действующих на бетонную матрицу. Условие равновесия  $N_1 = N_2$ . На рисунке 3.1б дан соответствующий профиль поперечного сечения структурного элемента бетон - никелида титана.

Предполагается, что бетонная матрица подчиняется закону Гука. В процессе реализации эффекта памяти формы стержень будет укорачиваться, и в нем будут генерироваться реактивные растягивающие усилия  $N_1$  и соответственно напряжения –  $\sigma_1$ , величина которых будет зависеть от величины сформированной ранее деформации ЭПФ и величины жесткости противодействия

упругого контртела (в данном случае бетонной матрицы). Бетонная матрица будет подвергаться сжатию силой –  $N_2$  и в ней будут возникать сжимающие напряжения –  $\sigma_2$ .

Из условия равновесия для элемента конструкции на рисунке 3.1 получим:

$$\sigma_1 F_1 = \sigma_2 F_2, \quad (3.1)$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{F_2}{F_1}, \quad (3.2)$$

где  $F_1, F_2$  – площадь поперечного стержня из никелида титана и поперечного сечения структурного элемента бетонной матрицы соответственно.

Во всех случаях стержень подвергали предварительному термоциклированию под действием растягивающих напряжений –  $\sigma_{mp}$ , сообщая ему способность к обратимому формоизменению. После термоциклической тренировки стержень при нагревании укорачивался, а при охлаждении удлинялся.

Отметим, что деформация, обусловленная эффектом памяти формы –  $\varepsilon_n$  могла быть сформирована как путем термоциклирования через интервалы мартенситных переходов под нагрузкой, так и активным растяжением в мартенситном состоянии. С достаточной степенью точности можно полагать, что генерируемые напряжения в стержне будут определяться:  $\sigma(\varepsilon_A) = \frac{\sigma_e}{n}$ , где  $n$  – коэффициент запаса прочности,  $\sigma_e$  – предел прочности материала. Кривая зависимости максимальных генерируемых напряжений от величины деформации памяти –  $\varepsilon_n$  сформированной путем предварительной тренировки повторяет диаграмму изотермической нагрузки в аустенитном состоянии. Названная диаграмма представлена на диаграмме – рисунок 2.14 (глава 2).

При этом  $\sigma(\varepsilon_A)$  – отвечает пределу пропорциональности в никелиде титана. Условие совместности деформации в перемещениях для системы «арматура с ЭПФ – бетонная матрица» дает следующие выражение:

$$l_1 + l_2 = \Delta l \quad (3.3)$$

где  $l_1, l_2$  – удлинение стержня и бетонной матрицы соответственно.

Или (3.3) в деформациях запишется как:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_n, \quad (3.4)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2$  – деформация стержня и бетонной матрицы соответственно;

$\varepsilon_n$  – деформация, обусловленная памятью формы.

Согласно теории упругого приближения:

$$\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} = \varepsilon_n, \quad (3.5)$$

Из (3.2) и (3.5) получаем расчетные формулы генерируемых напряжений в стержне и бетонной матрице:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_n \cdot E_1}{1 + \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{F_1}{F_2}}, \quad (3.6)$$

$$\sigma_2 = \frac{\varepsilon_n \cdot E_2}{1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{F_2}{F_1}}. \quad (3.7)$$

где  $E_1, E_2$  – модули Юнга для никелида титана и бетона соответственно.

Формулы (3.6-3.7) позволяют находить напряжения в стержне из материала с ЭПФ и бетонной матрице.

По закону Гука находим значения деформации в стержне и матрице:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E_1} = \frac{\varepsilon_n}{1 + \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{F_1}{F_2}}, \quad (3.8)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\varepsilon_n}{1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{F_2}{F_1}}. \quad (3.9)$$

В том случае, если напряжение –  $\sigma_1$  в выражении (3.6) превысит предел текучести материалов –  $\sigma_m$ , тогда для аналитического описания напряжения необходимо использовать следующие соотношение (3.10), выведенное из диаграммы согласно рисунку 3.2:



$$\sigma_1 = \sigma_m + (\sigma_s - \sigma_m) \cdot \frac{\varepsilon_n - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}, \quad (3.10)$$

где  $\sigma_m$  – предел текучести никелида титана;

$\sigma_s$  – предел прочности никелида титана;

$\varepsilon_0$  – минимальное значение деформации в выбранном сплаве никелида титана;

$\varepsilon_{max}$  – максимальное значение деформации в выбранном сплаве никелида титана;

$\varepsilon_l$  – оптимальное значение деформации стержня из никелида титана, вызванное эффектом памяти.

Уравнение совместности деформаций с учетом нелинейности диаграммы 3.2 примет вид:

$$\frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{\sigma_l - \sigma_m}{\sigma_s - \sigma_m} \cdot \left( \varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1} \right) + \frac{\sigma_2}{E_2} = \varepsilon_n. \quad (3.11)$$

В этом случае решение уравнений (3.2, 3.11) дает:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_n - \frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{\sigma_m}{\sigma_s - \sigma_m} \cdot \left( \varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1} \right)}{\frac{\varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1}}{\sigma_s - \sigma_m} + \frac{\mu_n}{E_2}}, \quad (3.12)$$

При этом,  $\sigma_2$  находится из уравнения равновесия, где вместо отношения поперечного сечения площадей стержня и бетона вводим коэффициент армирования бетонной матрицы  $\mu_n = \frac{F_1}{F_2}$ ,

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot \frac{F_1}{F_2}, \quad (3.13)$$

Проанализируем преднапряженное состояние модельного структурного элемента. В качестве примера зададимся усредненными параметрами бетонно-нитинолового композита. С целью проверки границ эффективности, установим

стандартное минимальное отношение площади арматуры к площади бетонной матрицы неравенством (3.14).

$$\frac{F_1}{F_2} \geq 0,005 \%, \quad (3.14)$$

Максимальное значение отношения площадей определим из следующего условия. Общепринятым считалось, что экономически эффективное насыщение 1 м<sup>2</sup> бетона стальной арматурой не должно превышать  $m_{cm}^{y\delta} = 100$  кг [117]. Учитывая отношение плотностей никелида титана и стали, находим условную максимальную массу арматуры с ЭПФ для армирования 1 м<sup>2</sup> бетона:

$$m_{TiNi}^{y\delta} = \frac{\rho_{NiTi}}{\rho_{cm}} \cdot m_{cm}^{y\delta} = 83 \text{ кг}.$$

где  $\rho_{TiNi}$  – плотность никелида титана,  $\rho_{TiNi} = 6,45 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ;

$\rho_{cm}$  – плотность стали,  $\rho_{cm} = 7,80 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

Из этих условий определяем максимальное значение  $F_1$  на 1 м<sup>2</sup> бетонной матрицы. Очевидно, что масса никелида титана на 1 м<sup>2</sup> бетона будет  $m_{TiNi}^{y\delta} = \rho_{TiNi} \cdot F_1 \cdot 1$ , откуда:

$$F_1 = \frac{m_{TiNi}^{y\delta}}{\rho_{TiNi}} = 0,013, \quad (3.15)$$

Из (3.14) определяем:

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{F_1}{1 - F_1} = 0,013, \quad (3.16)$$

Данный параметр соответствует усредненным показателям коэффициента армирования плит [116].

Объединяя (3.14) и (3.16) получаем минимальную и максимальную границы армирования модельного структурного элемента:

$$0,005 \leq \frac{F_1}{F_2} \leq 0,013, \quad (3.17)$$

При этом соотношение (3.17) для дальнейшего использования в вычислениях удобней записать в виде:

$$77 \leq \frac{F_2}{F_1} \leq 200. \quad (3.18)$$

Зададимся уровнем предварительного напряжения бетона в пределах (0,4-0,6) от величины его расчетного сопротивления сжатию [116]. Тогда эксплуатационные условия для железобетонной матрицы:

$$0,4 \leq \frac{\sigma_2}{R_2} \leq 0,6, \quad (3.19)$$

В качестве характеристик бетонной матрицы примем расчетный модуль упругости для бетона выбранного класса В40  $E_2 = 3,6 \cdot 10^{10}$  Па [116], а расчетное сопротивление бетона  $R_2 = 22$  МПа согласно СП 63.13330.2012.

Для сплава никелида титана ТН-1К принимаем  $\sigma_s = 1100$  МПа. С учетом возможных коэффициентов запаса, расчетное сопротивление сплава с ЭПФ будет  $R_1 = 915$  МПа, при этом модуль Юнга  $E_1 = 7,0 \cdot 10^{10}$  Па. В целях упрощения расчетов потери напряжения не учитываем. Температуры характеристических переходов модельного материала составляли  $M_k < M_n \leq -20^\circ\text{C}$ ,  $A_n \geq 0^\circ\text{C}$ ,  $A_k > A_n$ . Предполагали, что процесс бетонирования и твердения осуществляется при температуре  $t = +18^\circ\text{C}$ . Передача предварительного напряжения на бетон после набора необходимой прочности достигается путем нагрева модельного структурного элемента до температуры выше  $A_k$ .

Записывая неравенства (3.20) с учетом равенства (3.7), учитывая конкретные значения модулей упругости  $E_1, E_2$  получаем:

$$0,4 \leq \frac{\varepsilon_n \cdot 3,6 \cdot 10^{10}}{\left(1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right) \cdot R} \leq 0,6, \quad (3.20)$$

Выражая из (3.20)  $\varepsilon_n$  находим:

$$\frac{0,4 \left[1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right] \cdot R_2}{3,6 \cdot 10^{10}} \leq \varepsilon_n \leq \frac{0,6 \left[1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right] \cdot R_2}{3,6 \cdot 10^{10}}, \quad (3.21)$$

Формула (3.21) дает область изменения  $\varepsilon_n$  для заданного значения  $\frac{F_2}{F_1}$ , или

в численных выражениях:

$$0,0244 \cdot \left(1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right) \cdot \% \leq \varepsilon_n \leq 0,0367 \cdot \left(1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right) \cdot \% , \quad (3.22)$$

Подставляя в левое неравенство  $\frac{F_2}{F_1} = 77$  находим, что

$$\varepsilon_n \geq 0,98\% , \quad (3.23)$$

Наряду с этими соотношениями рассмотрим условие прочности для арматуры:

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_n \cdot E_1}{1 + \frac{E_1}{E_2} \cdot \frac{F_1}{F_2}} \leq R_1, \quad (3.24)$$

Откуда:

$$\varepsilon_n \leq \frac{100 \cdot \left(1 + 1,94 \cdot \frac{F_1}{F_2}\right) \cdot R_1 \%}{E_1} = 1,31 \cdot \left(1 + 1,94 \cdot \frac{F_1}{F_2}\right) \% , \quad (3.25)$$

Подставляя в (3.21) значение  $\frac{F_1}{F_2} = 0,013$  находим, что

$$\varepsilon_n \leq 1,34\% . \quad (3.26)$$

Таким образом, объединяя (3.20) и (3.23) получаем:

$$0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34. \quad (3.27)$$

Следовательно, для создания предварительно напряжение бетона с указанными выше параметрами согласно требованиям [116] путем армирования никелидом титана, необходимо, чтобы деформация обусловленная памятью лежала в пределах от 0,98 до 1,34%. Варьируя двумя параметрами:  $\varepsilon_n$  и  $\frac{F_2}{F_1}$

соответственно в пределах (0,98-1,34%) и (77-200) можно выполнить оценочные расчеты для конкретного элемента с ЭПФ для обеспечения требуемого уровня

преднапряжения бетона в сечении с центрально расположенным армированным элементом.

Например, подбор параметров армирования осуществляется следующим образом: для заданной деформации -  $\varepsilon_n$  и значения  $\sigma_2$  определяем величину  $\frac{F_2}{F_1}$  согласно (3.7):

$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{E_1 \cdot \varepsilon_n}{\sigma_2} - \frac{E_1}{E_2}, \quad (3.28)$$

Примем для бетонной матрицы  $\sigma_2 = 10$  МПа, параметр памяти  $\varepsilon_n = 1,2\%$  .

Расчет по формуле (3.28) дает  $\frac{F_2}{F_1} = 200$ . Получаем арматуры ЭПФ для 1 м<sup>3</sup> бетона потребуется  $m_{TiNi}^{yo} = \rho_{TiNi} \cdot F_1 = 20$  кг.

Оценим диапазон изменения коэффициента армирования  $\mu_n$  :

$$\mu_n^{\min} \leq \mu_n \leq \mu_n^{\max} \quad (3.29)$$

Оценка параметра  $\mu_n$  для никелида титана выполнена в работе [95], из которой следует, что оптимальный диапазон изменения параметра  $\mu_n$  в пределах  $\mu_n^{\min} = 0,028$ ;  $\mu_n^{\max} = 0,056$ , с запасом обеспечения прочности железобетонной матрицы согласно выражениям (3.12) и (3.13).

Понятно, что предложенный выше вариант армирования бетона никелидом титана является не единственно возможным. Тот факт, что для успешного армирования бетона требуются достаточно небольшие обратимые деформации  $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34\%$  позволяет говорить о том, что в качестве армирующего материала можно использовать ТН-1К, что дает, при наличии требуемых характеристических температур мартенситных переходов, названный материал весьма перспективным.

Решив неравенства (3.21) и (3.22) получены диапазоны изменения деформации  $\varepsilon_n$  при варьировании коэффициентом армирования  $\mu_n$  от 0,02 до 0,04 (таблица 3.2).

Таблица 3.2 – Диапазоны изменения деформации, обусловленной эффектом памяти

$\mu_n$	Диапазон изменения $\varepsilon_n$ из решения неравенства (3.20)	Диапазон изменения $\varepsilon_n$ из решения неравенства (3.21)	Диапазон изменения $\varepsilon_n$ из решения системы неравенства (3.20) и (3.21)
0,020	$0,951 \leq \varepsilon_n \leq 1,3 \%$	$0,52 \leq \varepsilon_n \leq 2,2 \%$	$0,951 \leq \varepsilon_n \leq 1,3 \%$
0,025	$0,949 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$	$0,536 \leq \varepsilon_n \leq 2,3 \%$	$0,949 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$
0,030	$0,95 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$	$0,548 \leq \varepsilon_n \leq 2,3 \%$	$0,95 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$
0,035	$0,946 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$	$0,561 \leq \varepsilon_n \leq 2,4 \%$	$0,946 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$
0,040	$0,945 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$	$0,574 \leq \varepsilon_n \leq 2,4 \%$	$0,945 \leq \varepsilon_n \leq 1,2 \%$

Графическое изображение зависимостей аналитических выражений (3.6), (3.7) приведены на рисунке 3.2 (а, б).

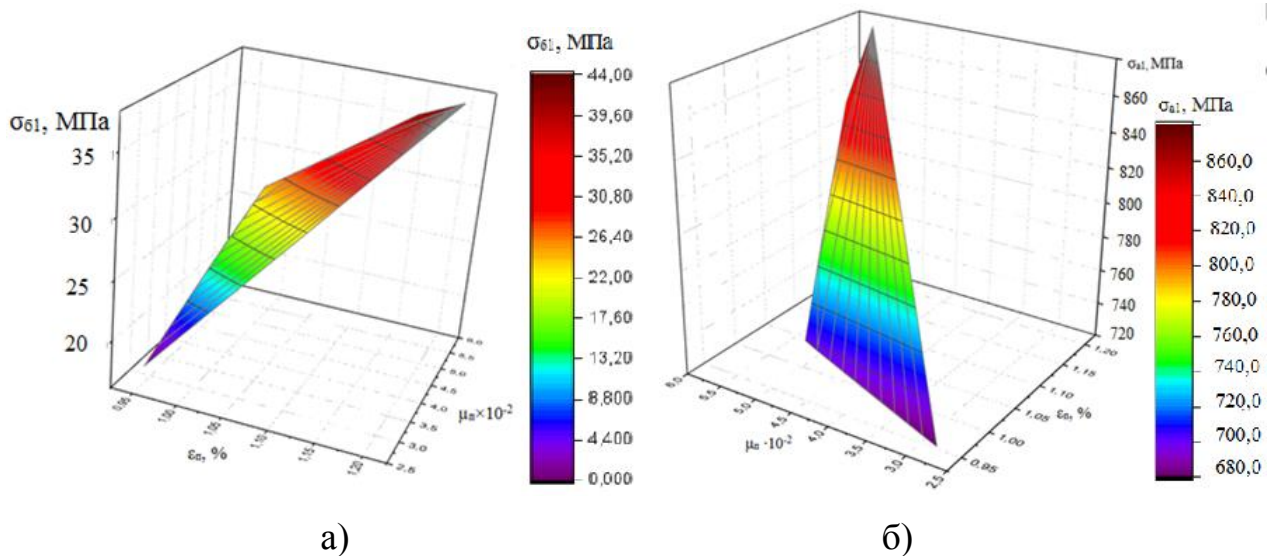


Рисунок 3.2– Графическая зависимость напряжений ( $\sigma_{б1}$ ) в бетоне (а) и арматуре ( $\sigma_{а1}$ ) (б) от коэффициента армирования ( $\mu_n$ ) и деформации, вызванной ЭПФ ( $\varepsilon_n$ )

Анализ изменения величин  $\sigma_{а1}$  и  $\sigma_{б1}$  показывает, что приведенные значения достаточно сильно зависят от значений определяющих параметров  $\varepsilon_n$  и  $\mu_n$ .

Анализ результатов, приведенных в таблицы 3.2 показывает, что варьирование коэффициента армирования практически не влияет на диапазон допустимых деформаций  $\varepsilon_n$ . В целом для плитного фундамента оптимальным являются диапазоны изменения параметров  $0,02 \leq \mu_n \leq 0,04$ ;  $0,95\% \leq \varepsilon_n \leq 1,2\%$ .

### 3.2 Методика расчета армирования плитного фундамента резервуара стержнями с памятью

Исходя из аналитического решения задачи армирования железобетонной матрицы стержнями с ЭПФ, определим значения генерируемых напряжений в элементах плитного фундамента резервуара: в арматурных стержнях и бетоне с учетом реальной диаграммы растяжения принимаемого сплава ТН-1К – Ni45-Ti45-Nb10 в аустенитном состоянии (рисунок 2.14, глава 2), экспериментального графика зависимости деформации от температуры (рисунок 2.11, глава 2), рассчитанных пределов деформации  $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,2\%$  и коэффициента армирования железобетонной матрицы  $0,02 \leq \mu_n \leq 0,04$ .

Исходные данные рассматриваемого структурного элемента (рисунок 3.3), армированного стержнями с памятью приняты аналогично данным железобетонной матрицы согласно пункту 3.1.

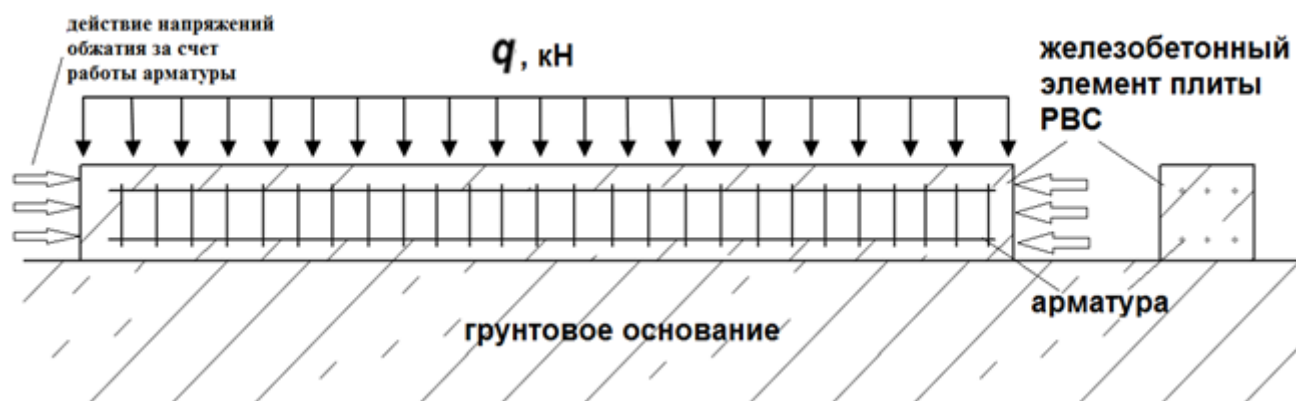


Рисунок 3.3 – Структурный элемент в виде железобетонной балки, выделенный из плитного фундамента резервуара

Согласно уравнениям (3.12) и (3.13) определим возникающие напряжения структурного элемента из условия равенства внешней нагрузки и реактивного давления грунтового основания, учитывая значения параметра деформации и коэффициента армирования для каждого значения из установленных пределов, и подставляя эти значения в названные уравнения. Результаты расчета представлены в таблице 3.3.

Рассмотрим пример практического расчета структурного элемента – в виде железобетонной балки (рисунок 3.3), выделенного из плитного фундамента резервуара. Железобетонная балка, имеющая длину 11,0 м и толщину 0,9 м, покоится на упругом основании с модулем деформации грунта  $E_{0cp}=10$  МПа и коэффициентом Пуассона  $\mu_0=0,33$ . Модуль упругости бетона балки  $E_1=36000$  МПа, коэффициент Пуассона  $\mu_1=0,2$ . Физико-механические свойства арматуры приняты согласно таблицы 3.1. Балка загружена равномерно распределенной нагрузкой  $q=35,8$  кН/м, которую в действительности она испытывает при эксплуатации плитного фундамента РВС.

Сравним работу железобетонной балки для случая ее армирования преднапряженной стальной арматурой и арматурой из сплава ТН-1К составом Ni45-Ti45-Nb10. Для определения эпюры моментов и прогибов балки произведем расчет данных параметров и отобразим их графически [110].

В балке установлен арматурный каркас с шагом сетки 300x300 м. Равномерно распределенную нагрузку приведем к сосредоточенным силам в середине участка, умножив ее значение на ширину расчетного участка. На конец балки установим связь, закрепляющую ее в горизонтальном направлении. Исходные данные и эпюры для двух вариантов армирования балки представлены на рисунках 3.4 и 3.5.

На представленных эпюрах максимально допустимый прогиб балки отображается пунктирной оранжевой линией. Расчетный прогиб показан оранжевой линией. В случае если прогиб превышает допустимый, то он отображается красным цветом, как это представлено на рисунке 3.4 – для балки со стальным арматурным каркасом.



Таблице 3.3 – Результаты расчета генерируемых напряжений в бетоне  $\sigma_b$  и стержне  $\sigma_a$  согласно уравнениям (3.12) и (3.13) с учетом реальной диаграммы растяжения сплава ТН-1К

Параметр	Значения														
$\varepsilon_n, \%$	0,95	0,955	0,96	0,965	0,97	0,975	0,98	0,985	0,99	0,995	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2
$\mu_n, \%$	2,8	3,015	3,23	3,445	3,66	3,875	4,09	4,3	4,52	4,74	4,95	5,17	5,38	5,59	5,6
$\sigma_a, \text{МПа}$	702,6	703,0	703,0	703,0	703,2	703,3	703,4	703,6	703,6	703,8	703,9	710,0	716,3	722,5	729,1
$\sigma_b, \text{МПа}$	19,7	21,1	22,5	24,1	25,7	27,3	28,8	30,25	31,8	33,4	34,8	36,7	38,5	40,3	40,8

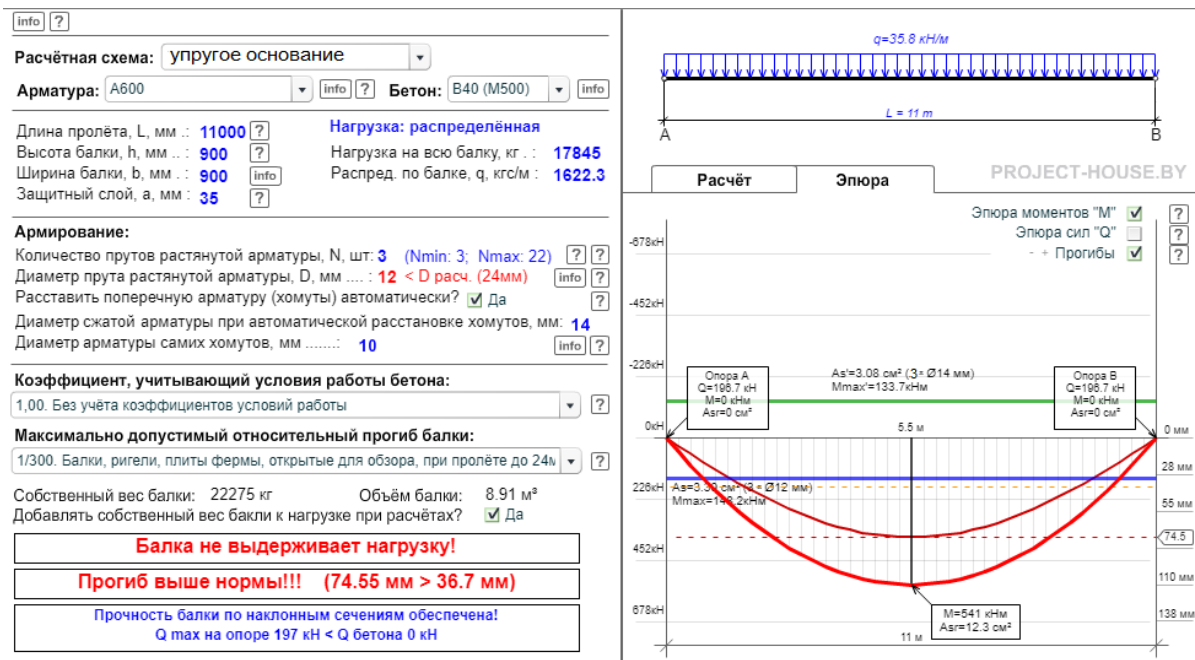


Рисунок 3.4 – Эпюра моментов и прогибов для железобетонной балки с арматурным каркасом из стали

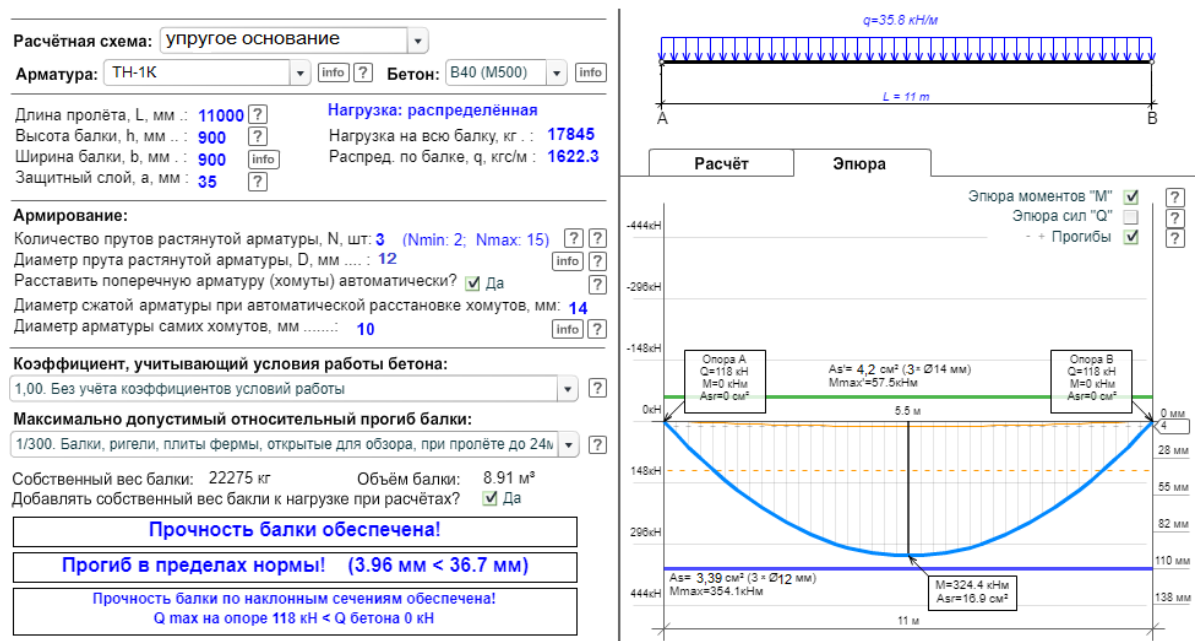


Рисунок 3.5 – Эпюра моментов и прогибов для железобетонной балки с арматурным каркасом из сплава с ЭПФ

Эпюра моментов показывает изменение величины изгибающего момента в теле балки. Отображается на эпюре параболой вниз и показывает, что растягивающие силы, которые необходимо компенсировать арматурой действуют

в нижней зоне балки. Цвет эпюры моментов (синий/красный) показывает обеспечена/не обеспечена прочность балки с учетом ее исходных данных.

Зеленая и синяя линий на рисунках – это эпюра материалов. Зеленая линия – это величина момента, которую компенсирует сжатая арматура.

Синяя линия – величина момента, которую компенсирует растянутая арматура. Если эпюра выходит за синюю линию – это говорит о том, что балка может разрушиться под нагрузкой, как это отражено на рисунке 3.4 – в случае армирования стальным каркасом балки.

Как видно из приведенных эпюр при варианте армирования балки стальным арматурным каркасом при распределенной нагрузке, которую испытывает фундаментная плита резервуара, возникают недопустимые прогибы и высокие значения изгибающих моментов, которые не обеспечат прочность балки и приведут к ее разрушению.

При варианте армирования балки стержнями из материала с ЭПФ возникает незначительный прогиб, который не превышает допустимых значений [94].

Очевидно, что деформация пары «железобетонная балка – грунтовое основание» зависит от жесткости балки и основания (грунта), на котором размещена конструкция. Поэтому задача повышения надежности подобных конструкций может быть эффективно решена совместно упрочнением основания и созданием достаточной жесткости конструкции железобетонных элементов. Одним из таких решений и является предложенная модель армирования материалами с эффектом памяти, имеющими более высокие прочностные характеристики по сравнению со стальными арматурными стержнями.

### **3.3 Методика расчет армирования плитного фундамента резервуара стержнями с памятью с учетом упругого приближения жесткости противодействия бетона**

Процессу удлинения и сжатия преднапряженных арматурных стержней в железобетонной конструкции препятствуют усилия противодействия за счет

усадки и ползучести бетона. В зависимости от механических характеристик бетона и арматурных стержней величина деформации арматуры может изменяться с некоторой погрешностью.

Оценим значения генерируемых напряжений в арматуре с памятью структурного элемента (рисунок 3.3), выделенного из плитного фундамента резервуара, исходя из упругого приближения жесткости противодействия бетона.

По результатам экспериментальных исследований и по анализу работ [95, 171] установлено, что в условиях упругого защемления сплавов с ЭПФ проявляются многократные обратимые формоизменения.

Если пренебречь пластической деформацией, то для реактивных напряжений  $\sigma_a$ , генерируемых в арматуре получаем:

$$\sigma_a = K_1 \cdot \varepsilon_2 = K_1 \cdot \frac{\sigma_2}{E_2}, \quad (3.30)$$

где  $K_1$  – жесткость противодействия бетона.

Таким образом, жесткость противодействия бетона определяется:

$$K_1 = \frac{\sigma_a}{\varepsilon_2}, \quad (3.31)$$

Согласно выведенных формул (3.6) и (3.9) подставляем их в (3.31) и получаем формулу определения жесткости противодействия упругого контртела (бетонной матрицы):

$$K_1 = E_1 \cdot \frac{1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{1}{\mu_n}}{1 + \frac{\mu_n E_1}{E_2}}, \quad (3.32)$$

Определяем значения жесткости противодействия по приведенным выше исходным данным модуля упругости для бетона и арматуры, для каждого значения из предела коэффициента армирования  $\mu_n$ . Далее находим значения генерируемых напряжений в арматуре согласно формуле (3.30), варьируя найденными значениями жесткости противодействия.

Результаты расчетов определенных генерируемых напряжений в элементах «бетон-арматурный стержень» по трем методикам: линейное упрочнение (пункт 3.1), расчет с учетом реальной диаграммы растяжения сплава с ЭПФ в аустенитом состоянии (пункт 3.2) и расчет с учетом жесткости противодействия (пункт 3.3) представлены в таблице 3.4.

Анализ результатов расчетов генерируемых напряжений в бетоне  $\sigma_b$  и стержне  $\sigma_a$  по трем предложенным методикам показывает сходимость значений напряжений с погрешностью не более 10 %, что говорит о возможности использования каждой методики независимо друг от друга.

Значения генерируемых напряжений в арматуре с памятью для бетонного элемента на 20% превышают этих же напряжений в случае использования стальной арматуры, это дает предположение о высокой потенциальной эффективности применения технологии преднапряжения арматурой с ЭПФ для реализации усиления плитных фундаментной РВС.

В разработанной методике усиления бетонной конструкции напряженными элементами с ЭПФ определяются такие параметры: реактивные напряжения  $\sigma_a$ ,  $\sigma_b$ , значения параметра деформации  $\varepsilon_n$ , также введен коэффициент армирования железобетонной матрицы  $\mu_n$ . Определение перечисленных параметров необходимо для обеспечения усиления железобетонной матрицы.

По найденным значениям параметров деформации стержней с ЭПФ и коэффициента армирования можно назначить параметры арматурного каркаса для натурального конструирования плитного фундамента резервуара.

### **3.4 Численное моделирование системы «резервуар-фундамент-основание»**

Вертикальные стальные резервуары – это буферные конструкции, имеющие определенный набор функциональных элементов, работающие в сложном напряженно-деформированном состоянии.

Таблице 3.4 – Результаты расчета генерируемых напряжений в бетоне  $\sigma_b$  и стержне  $\sigma_a$

Параметр	Значения														
$\varepsilon_n, \%$	0,95	0,955	0,96	0,965	0,97	0,975	0,98	0,985	0,99	0,995	1,0	1,05	1,1	1,15	1,2
$\mu_n, \%$	2,8	3,015	3,23	3,445	3,66	3,875	4,09	4,3	4,52	4,74	4,95	5,17	5,38	5,59	5,6
линейное упрочнение															
$\sigma_b, \text{МПа}$	17,47	18,66	19,83	20,98	22,11	23,23	24,33	25,39	26,49	27,57	28,59	30,97	33,38	35,84	37,45
$\sigma_a, \text{МПа}$	721,2	722,5	723,9	725,4	726,9	728,4	729,9	731,6	733,1	734,7	736,5	771,2	805,8	840,3	876,8
с учетом реальной диаграммы растяжения сплава с ЭПФ в аустенитом состоянии															
$\sigma_b, \text{МПа}$	19,7	21,1	22,5	24,1	25,7	27,3	28,8	30,25	31,8	33,4	34,8	36,7	38,5	40,3	40,8
$\sigma_a, \text{МПа}$	702,6	703,0	703,0	703,0	703,2	703,3	703,4	703,6	703,6	703,8	703,9	710,0	716,3	722,5	729,1
с учетом жесткости противодействия															
$\sigma_b, \text{МПа}$	17,47	18,66	19,83	20,98	22,11	23,23	24,33	25,39	26,49	27,57	28,59	30,97	33,38	35,84	37,45
$\sigma_a, \text{МПа}$	687,0	703,0	705,0	708,0	697,0	698,0	704,0	706,0	707,0	712	697	706	712	702	711

Совокупность ряда факторов обуславливает наличие НДС резервуара и его оборудования: динамическими знакопеременными нагрузками эксплуатации емкости, вертикальными и горизонтальными перемещениями грунтового массива и фундамента, перепадом температур и коррозионным разрушением, строительно-монтажными дефектами.

Расчет резервуаров на прочность и надежность подробно исследован в работах В. Л. Березина [16, 17], В. Б. Галева [34-36], В. В. Сафаряна [106], А. А. Тарасенко [124, 125, 127], В. Е. Шутова [138] и др.

Дефицит строительных площадок с устойчивыми грунтами ведет к возведению крупногабаритных резервуаров на массивах, представленных слабыми грунтами. Использование таких площадок в качестве основания резервуара в процессе эксплуатации емкости приводит к неравномерным деформациям основания и фундамента, вызывая увеличение напряжений в стенках конструкции [57, 71, 72].

Как правило, при строительстве плитного фундамента резервуара на таких площадках, возникает неточность инженерно-геологических изысканий грунтового массива в виду непредсказуемого поведения грунтов и закладывается недостаточная величина толщины плиты или объем ее армирования, которые впоследствии приводят к небольшому запасу прочности фундамента и его деформациям [50, 51].

Согласно [114] деформации основания всех резервуаров за период их эксплуатации не должны превышать трех предельных значений:

- средняя осадка основания фундамента  $S$  устанавливается правилами технологической эксплуатации оборудования и не должна превышать, как правило, 200 мм;

- разность осадок под центральной частью днища и стенкой резервуара не должна превышать  $0,003R$  ( $R$  – радиус резервуара);

- крен резервуара не должна превышать 0,002 – для резервуаров с понтоном и плавающей крышей, 0,003 – для резервуаров без понтона и плавающей крышей.

Согласно [114] расчет плит следует выполнять преимущественно численными методами. Однако для большей ясности и визуализации в результатах численных вычислений, целесообразно рассмотреть основные моменты конструирования и расчета плит на основе аналитических исследований.

Существует большое количество программ для расчета плит и все они дают различные результаты. Критерием достоверности расчета являются соответствие расчетных и опытных данных. При совершенствовании и разработки методов проектирования конструкций плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов важно совершенствовать аналитические и численные методы их расчета.

Для оценки НДС и наступления предельных состояний конструкции при развитии неравномерных осадок существующие аналитические зависимости [20, 37, 38, 114, 126, 171] с достаточной степенью точности этого не позволяют сделать. Также для этого не могут быть использованы зарубежные методики согласно требованиям нормативных документов API, British Standard, Eurocode [144, 145] из-за конструктивных отличий отечественных и зарубежных резервуарных конструкций.

При появлении зон неравномерной осадки, деформации металлоконструкций имеют конечные значения и зависят от жесткости плиты резервуара, однако определить эти величины можно лишь создав численную модель объекта выполнив соответствующие вычисления.

Для учета всех реальных факторов, влияющих на эксплуатацию резервуара на площадках с «ненадежными грунтами», порой недостаточно аналитических методик расчета взаимодействия пары «основание-сооружение», поэтому необходимо применение компьютерного моделирования с применением метода конечных элементов (МКЭ) [13, 23, 136].

Использование программных комплексов типа ANSYS на основе метода конечных элементов позволяет разработать модель плитного фундамента для резервуара. При учете особенностей геометрии плиты, контактных взаимодействий элементов (арматура-бетон), граничных условий для нагрузок,



влияющих на точность расчета НДС плиты резервуара при осесимметричном нагружении. А также определить изменения НДС плиты резервуара, при возникновении недопустимых напряжений вследствие развития неравномерных осадок основания. И разработать методы упрочнения фундаментной плиты, предотвращающие критический прогиб плиты, недопустимую осадку основания и крен резервуара.

По результатам расчета с помощью программ конечно - элементного анализа становится возможным определить фактическое распределение напряжений и деформаций в каждой точке объекта, однако правильная оценка полученных результатов требует определенных знаний и опыта.

### 3.4.1 Аналитические методы расчета деформации плитного фундамента резервуара

При аналитических методах определения прогиба и осадки фундаментной плиты рассмотрен резервуар РВС-20000, основываемся на решении М. И. Горбунова-Посадова [37] для круглых плит на упругом основании, для применения которого необходимо вычислить показатель гибкости круглой плиты  $ПГ$  согласно [37] по формуле (3.33):

$$ПГ = 3 \cdot \frac{(1 - \nu_1^2) \cdot E_{расч} \cdot R^3}{(1 - \nu_0^2) \cdot E_0 \cdot h^3}, \quad (3.33)$$

где  $\nu_0$  и  $\nu_1$  - коэффициент Пуассона грунта и бетона соответственно;

$E_{расч}$  и  $E_0$  - расчетный модуль деформации грунта и модуль упругости бетона, соответственно, МПа;

$R$  – радиус плиты резервуара, м;

$h$  – толщины плиты резервуара, м.

Плиты, в зависимости от показателя гибкости, подразделяются на следующие категории:

– при  $ПГ \leq 0,5$  плита считается абсолютной жесткой;

- при  $0,5 \leq III \leq 10$  плита имеет конечную жесткость;
- при  $III \geq 10$  плита считается абсолютно гибкой.

Учитывая большие размеры резервуаров модуль деформации  $E_{расч}$  определяется по следующей формуле:

$$E_{расч} = \frac{0,85 \cdot E}{\omega_{ср}}, \quad (3.34)$$

где  $E$  - модуль деформации грунта, определенный из испытаний штампами, статическим зондированием, МПа;

$\omega_{ср}$  - коэффициент, зависящий от сжимаемой толщи грунта под фундаментом  $H$ , м.

Глубину  $H$  следует определять, рассматривая грунтовое основание в виде линейно деформируемого полупространства по СП 22.13330.2016 [114].

Диаметральное сечение плиты радиусом  $R$  и толщиной  $h$  (рисунок 3.6) имеет кольцо утолщения под стенкой РВС высотой 0,3–0,7 м и шириной 0,8–1,5 м (принимаются конструктивно).

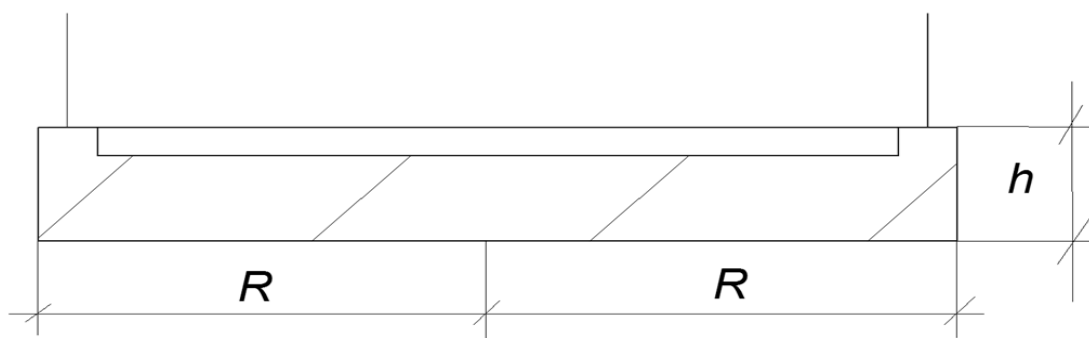


Рисунок 3.6 – Общий вид фундаментной плиты РВС-20000

Необходимо, чтобы прогибы плиты были минимальными из условия целостности конструкций [50]. Здесь важно так же учесть, что чрезмерное увеличение толщины плиты  $h$  приводит к повышению стоимости фундамента и стоимости конструкции в целом, что экономически невыгодно [2].

В работах Л. А. Димова, И. Л. Димова [50, 51] рассмотрено деформированное состояние фундамента резервуара для абсолютно гибких

круглых плит. Прогиб в центре  $w_{ц}$ , на краю  $w_{к}$  и средний  $w_{ср}$  абсолютно гибкой круглой плиты можно вычислить по формулам Буссинеска для давления  $P$ , приложенного непосредственно к поверхности грунта и равномерно распределенного по площади круга:

$$w_{ц} = \frac{2 \cdot (1 - \nu_0^2) \cdot P \cdot R}{E_{расч}}, \quad (3.35)$$

$$w_{к} = \frac{4 \cdot (1 - \nu_0^2) \cdot P \cdot R}{\pi \cdot E_{расч}}, \quad (3.36)$$

$$w_{ср} = \frac{16 \cdot (1 - \nu_0^2) \cdot P \cdot R}{3 \cdot \pi \cdot E_{расч}}, \quad (3.37)$$

$$w_{ц} - w_{к} = \frac{(2\pi - 4) \cdot (1 - \nu_0^2) \cdot P \cdot R}{\pi \cdot E_{расч}}, \quad (3.38)$$

Данная схема применяется для расчета осадки круглого плитного фундамента с учетом однородного основания. Однако, на практике площадка строительства резервуара чаще всего сложена неоднородными грунтами.

Поэтому для расчета осадки основания резервуара на неоднородных грунтах применяется схема основания в виде линейно-деформируемого слоя (рисунок 3.7) согласно СП 22.13330.2016 [114], где осадка определяется методом послойного суммирования по формуле:

$$S = \frac{p \cdot b \cdot k_c}{k_m} \sum_{i=1}^n \frac{k_i - k_{i-1}}{E_i}, \quad (3.39)$$

где  $p$  - среднее давление под подошвой фундамента;

$b$  - ширина прямоугольного или диаметр круглого фундамента;

$k_c$  и  $k_m$  - коэффициенты, принимаемые по таблицам Г.1 и Г.2 [114];

$n$  - число слоев, различающихся по сжимаемости в пределах расчетной толщи слоя  $H$ ;

$k_c$  и  $k_m$  - коэффициенты, определяемые в зависимости от формы фундамента;

$E_i$  - модуль деформации  $i$ -го слоя грунта.

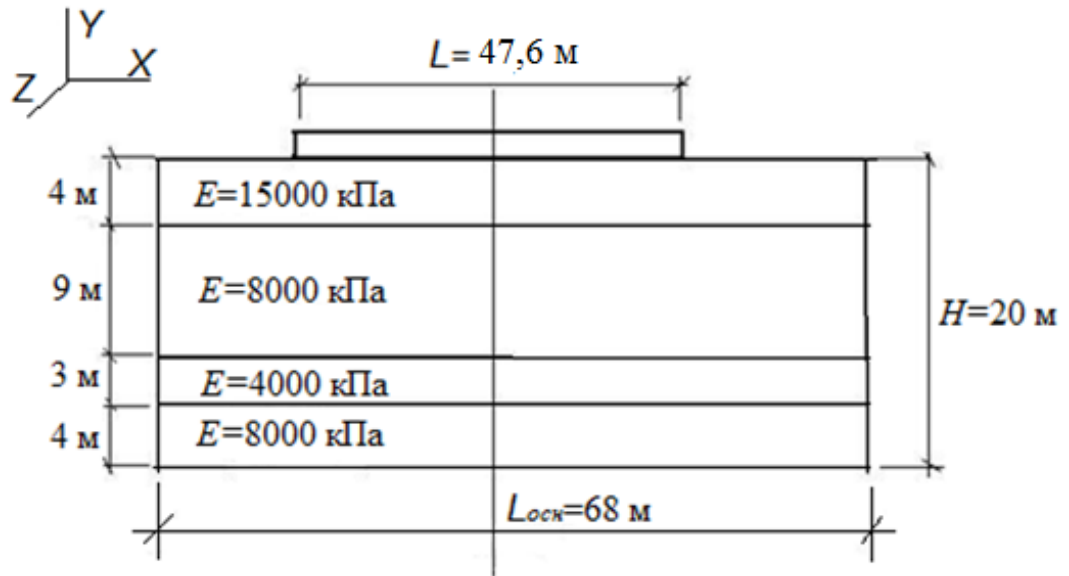


Рисунок 3.7 – Расчетная схема основания для РВС-20000

В рассмотренных методиках осадка основания определяется независимо от гибкости/жесткости фундамента, моделируя при этом грунтовое основание упругим полупространством, при этом учитывая только характеристики подстилающего грунта.

Однако, именно от жесткости фундамента зависит величина его прогиба и дальнейшей осадки конструкции. В этом случае аналитические методы не позволяют получить результаты реального состояния фундаментной конструкций РВС с достаточной точностью. В этом случае предлагается использовать численный метод расчета деформаций плитного фундамента резервуара, основанный на конечно-элементной реализации в программном комплексе ANSYS.

### 3.4.2 Численный метод расчета деформации плитного фундамента резервуара с использованием программы ANSYS

Работа проводилась с использованием программного комплекса ANSYS методом конечных элементов для осесимметричной задачи в линейно-упругом приближении [13].

Метод конечных элементов является численным методом, который позволяет решать обширный спектр физических задач, с помощью систем математических дифференциальных уравнений. Данный метод применим для полного анализа напряженно-деформированного состояния различных конструкций.

Для создания модели резервуара рассматриваемой системы «резервуар-фундамент-основание» методом конечных элементов в работе выбрана реализация в программе ANSYS версия 15. Для построения конечно-элементной модели, задания граничных условия и расчета напряженно-деформированного состояния в программе ANSYS был выбран раздел WORKBENCH и расчётный модуль статического конструкционного анализа Static Structural, используемый для трехмерного моделирования осесимметричных конструкций для решения задач механики деформируемого твердого тела в статической постановке.

В программе ANSYS создается компьютерная модель изделия или его составной части, прикладываются действующие нагрузки или другие проектные воздействия, изучаются ответы системы в виде распределений температур, напряжений.

Структура сопоставительного анализа методом КЭ в ANSYS состояла из трех основных этапов:

1. Построение геометрической 3D модели с необходимыми начальными условиями, границами разбиения и сгущения сетки конечных элементов;
2. Задание граничных условий в зависимости от постановки решения;
3. Обработка и визуализация полученных результатов [59, 136].

### **3.4.3 Геометрическое моделирование системы «резервуар-фундамент-основание»**

Для создания конечно-элементной модели «резервуар-фундамент-основание» в программном комплексе ANSYS, производим построение его основных элементов в соответствии с реальными техническими и

геометрическими характеристиками согласно типовому проекту ТП 704-1-60, который является наиболее распространенным при сооружении РВС-20000 на плитном фундаменте (рисунок 3.8).

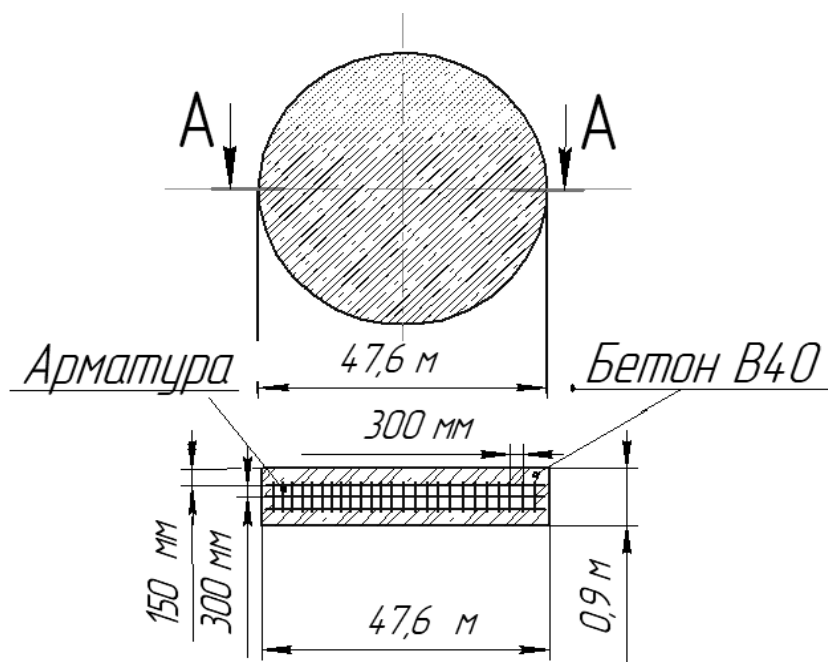


Рисунок 3.8 - Модель фундаментной плиты резервуара РВС-20000

В работе предлагается модель армированного фундамента резервуара РВС-20000 для нефти в сложных инженерно-геологических условиях. Для данной конструкции в качестве армирующих элементов монолитной фундаментной плиты, выполненной из железобетона применяются стержни из материалов с ЭПФ, а именно никелид титана.

Выполнены две модели РВС-20000 на плитном фундаменте: 1) монолитная железобетонная фундаментная плита армированная преднапряженными стальными стержнями класса АIII диаметром 14 мм; 2) монолитная железобетонная фундаментная плита армированная преднапряженными стержнями из сплава с ЭПФ – никелид титана диаметром 14 мм.

В таблице 3.5 и 3.6 приведены основные характеристики резервуара и фундаментной плиты.

Таблица 3.5 – Основные характеристики резервуара РВС-20000

Параметры	Значение
Внутренний диаметр резервуара, м	45,6
Высота стенки, м	11,94
Объём по строительному номиналу, м <sup>3</sup>	19500
Предельный уровень взлива воды при гидроиспытании, м	11,009
Верхний аварийный уровень взлива, м	11,009
Высота стационарного покрытия, м	4,0
Ширина окрайки, м	1,2
Толщина 1-го пояса стенки, мм	13
Толщина 2-8-го поясов стенки, мм	11
Толщины листов центральной части днища, мм	9
Толщина листов настила кровли, мм	6
Величина выступа окрайки, мм	60
Плотность продукта в резервуаре, кг/м <sup>3</sup>	860
Снеговая нагрузка, кг/м <sup>2</sup>	150
Вакуумметрическое / избыточное давление в газовом пространстве РВС, кПа	0,27/2,2
Высота 1-8 поясов стенки, м	1,49
Предел текучести для используемой стали марки 09Г2С (для кровли, стенки, окрайки, днища), МПа	325
Тип стационарной крыши	сферическая
Тип лестницы	Кольцевая

Таблица 3.6 – Характеристика фундаментной плиты

Параметры	Значение	
Диаметр плиты, м	47,6	
Толщина, м	0,9	
Бетон		
Класс бетон	В40	
Модуль упругости, МПа	36000	
коэффициент Пуассона	0,42	
Расчетное сопротивление сжатию бетона, МПа	22	
Арматура ТН-1К/Сталь		
Диаметр, мм	14	
Шаг арматурной сетки, мм	300x300	
Предел прочности (временное сопротивление разрыву), МПа	800 – 1200	590
Предел текучести, МПа	400 – 700	390
Относительное удлинение, %	20 – 40	14
Модуль упругости, ГПа	70	200

В качестве предлагаемого материала для усиленной арматуры использовали сплав, содержащий Ni45-Ti45-Nb10, удовлетворяющий следующим требованиям: низкое значение характеристической температуры начала прямого мартенситного перехода -  $M_n$ , высокий предел текучести при положительной температуре (не менее 450 МПа), достаточно высокое значение деформации памяти формы и пластичности прямого превращения в интервале возможных теплосмен, в которых функционирует арматура. Интервал эксплуатации арматуры составляет от минус 20 до  $+20^0$  С – грунтовые условия северных площадок с «ненадежными грунтами».

Предполагали, что в арматуре, находящейся под действием растягивающих усилий заданной интенсивности  $P=Q/F$ , путем термоциклического воздействия создавали некоторый деформационный эффект памяти формы в горизонтальном направлении –  $\varepsilon_n$ . Согласно [3] – считали, что величина деформации -  $\varepsilon_n$  может задаваться путем варьирования величины интенсивности –  $P$  внутренней силы при термоциклировании. Таким образом, применительно к арматуре использовали два деформационных параметра проектирования – величина деформации  $\varepsilon_n$  и коэффициент армирования бетонной матрицы  $\mu_n$ . Пределы варьирования данных параметров определены в п. 3.1.

Основание принято как линейно-деформируемое полупространство с глубиной сжимаемой толщи  $H_c=20$  м (рисунок 3.7).

При моделировании приняты следующие условия:

1. Основание резервуара – это упруго пластическая модель Друкера-Прагера, характеризующаяся модулем упругости и коэффициентом Пуассона для каждого слоя грунта с учетом мощности слоев согласно рисунку 3.7.

2. Массив грунта имеет следующие геометрические параметры: длина 68 м, ширина – 52 м, глубина – 20 м. Данные размеры для основания приняты исходя из геометрической модели плитного фундамента резервуара, увеличенные на 10 м с каждой стороны плиты.



3. Используется гипотеза отсутствия касательных напряжений, поэтому контакт системы «резервуар-фундамент-арматура-основание» принят из условия их совместности – «слипания».

4. Нагружение плитного фундамента представлено гидростатическим давлением продукта в виде равномерной распределенной нагрузки.

Построение эскиза модели «резервуар-фундамент-основание» для РВС-20000 в программе ANSYS осуществлено в модуле Design Modeller, где производим двухмерное моделирование грунтового основания, затем построение фундаментной плиты с арматурной сеткой и устройством резервуара, далее превращаем эскизы в объемные 3D модели. Построение эскиза выполняется в главной плоскости и привязывается система координат XYZ.

Свойства материалов модели задаются в соответствии с таблицами 3.5-3.6 и прописываются в Engineering Data – интерфейсе для управления базой данных физических и механических свойств материалов, а также входных параметров математических моделей.

Построение геометрии резервуар, плитный фундамент, основание проводилось на базе Geometry при использовании подраздела Sketch. Арматурная сетка плитного фундамента резервуара строится как отдельное геометрическое тело с параметрами деформации и температур характеристических переходов на основе полученных данных в 2 главе.

Для построения цилиндрических тел: резервуар, фундаментная плита, арматурный каркас, грунтовое основание применялись элементарные геометрические тела Circle с заданными размерами, которым впоследствии придавалась трёхмерная цилиндрическая форма необходимой толщины при помощи команды Extrude. В конечном итоге получаем 4 твердых тела: резервуар - Solid 1, фундаментная плита - Solid 2, арматурная сетка - Solid 3, грунтовое основание - Solid 4.

Далее каждое (из четырех) геометрических тел соединялось в общую конструкцию «резервуар-фундамент-основание».

После создания данной конструкции ей придаётся объём командой Revolve с указанием оси, вокруг которой будет выстраиваться объект и расстояния до него. В итоге получаем пространственный объект, состоящий из четырех элементов, изображённый на рисунке 3.9.

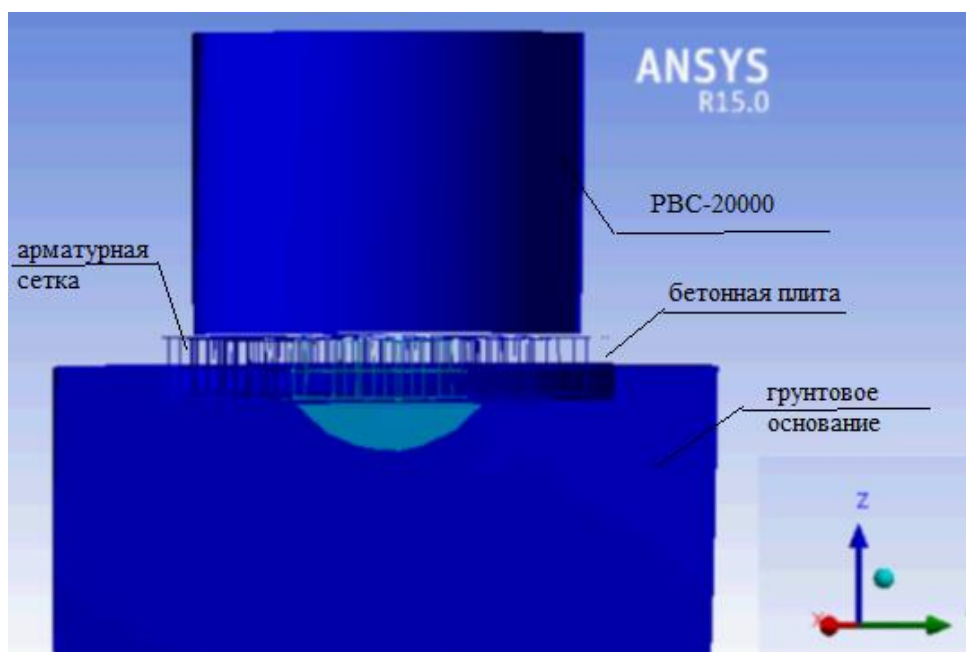


Рисунок 3.9 – Модель «резервуар-фундамент-основание» для PBC-20000

Грунтовое основание реализовывалось при помощи дилатансионной модели Друкера-Прагера [13, 59]. Грунт принят следующий: суглинок тугопластичный, песчаная и щебневая подсыпки.

Для арматуры из материала с ЭПФ деформация памяти и коэффициент армирования задавались в соответствии с расчётами предыдущих разделов.

В работе используется модуль Static Structural, с целью создания адекватной геометрической модели при различных параметрах оболочечных и балочных элементов конструкции: толщин, материалов и их свойств, параметров нелинейности и др. В данном модуле выполняется создание конечно-элементной сетки, настройка параметров контактного взаимодействия, задание граничных условий, приложение нагрузок, а также постпроцессинг.

### 3.4.4 Создание конечно-элементной сетки

Для получения численной модели «резервуар-фундамент-основание» необходимо осуществить разбиение всех элементов конечно-элементной сеткой. Сетка генерируется непосредственно на каждом элементе геометрической модели, и является основой для автоматического создания матрицы уравнений.

Для каждого конструкционного элемента модели «резервуар-фундамент-основание» определяется функция формы и назначается вид конечного элемента.

Используя сеточный препроцессор MESH, генерируем сетку конечных элементов. Следует отметить, что для всех элементов модели «резервуар-фундамент-основание» используется гексаэдрическая сетка.

Стенка, днище резервуара разбивались на изопараметрические четырехузловые оболочковые конечные элементы типа SHELL 181 с шестью степенями свободы в каждом узле.

Сетка для оболочечных конструкций (стенка, окрайка, центральная часть днища, кольцо жесткости) создается с помощью оболочечных элементов «SURFACE BODY». Сетка на линейных объектах (балочные конструкции стационарной кровли), создается с помощью линейных балочных элементов «BEAM».

Аппроксимация грунтов основания выполнена с использованием конечных элементов SOLID45, а фундамента, арматурной сетки и резервуара – конечными элементами SHELL43. Конечные элементы приняты размером 0,5x0,5x0,5 м для SOLID45 и размером 0,5x0,5 м для элементов SHELL43.

Общая конечно-элементная модель «резервуар-фундамент-основание» имеет 1660680 конечных элементов (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Количество конечных элементов каждого элемента модели

Количество конечных элементов			
Грунтовое основание	Фундаментная плита	Арматурная сетка	Резервуар
25590	13730	1110490	510870

После построения конечно-элементной сетки модели «резервуар-фундамент-основание» выполнено назначение контактных пар взаимодействия, определение областей и видов контакта для различных элементов рассматриваемой конструкции.

### **3.4.5 Задание граничных условий и контактных пар**

Задание граничных условий является важнейшим этапом при построении конечно-элементной модели. Достаточность граничных условия является главным условием, позволяющим определить все необходимые неизвестные величины после запуска расчетного модуля с заданной точностью.

В данном исследовании представлена разработка конечно-элементной модели «резервуар-фундамент-основание», максимально точно отражающей его геометрические, физико-технические и эксплуатационные характеристики.

Постановка граничных условий производится в модуле Mechanical в автоматическом режиме. Взаимодействие тел осуществлялось режимом Bonded - целевая и контактная поверхности сцепляются по всем направлениям.

Ограничение перемещений конструкции выполнено по всем возможным направлениям с помощью команды Fixed support. Поверхности, к которым применили жёсткие закрепления, являются боковые части резервуара, фундаментной плиты и торцевые части арматурного каркаса.

Нагружение резервуара принято в виде гидростатического давления Hydrostatic Pressure, имитирующее реальное гидростатическое давление в РВС-20000.

Граничные условия модели задавались в виде ограничений перемещений и поворотов выбранных узлов с учетом симметрии.

Резервуар, испытывающий различные эксплуатационные нагрузки, передает их суммарный вес на фундаментную плиту и основание под центральной частью дна. Моделирование основания РВС-20000 выполняется путем принятия

различных соответствующих району строительства объекта коэффициентов постели.

Граничное условие взаимодействия фундаментной плиты и центральной части днища в контакте с грунтовым основанием задавались командой «elastic support», определяющей упругое закрепление, путем назначения коэффициента постели основания резервуара, который принимается равным  $20 \text{ МН/м}^3$ .

Для моделирования эффекта памяти формы арматуры используется среда Engineering Data, в которой задается команда Shape memory effect и Superelasticity.

Материал создается со свойством сверхупругости с константами, взятыми из экспериментальных данных. Начальные и граничные условия задачи определены исходя из реальных условий проведения эксперимента.

В итоге реализуется эффект памяти формы для выбранного сплава никелида титана – происходит процесс накопления деформации, а затем её освобождение: при нагреве происходит деформация арматуры на величину  $\Delta \varepsilon$  с последующим сжатием бетонной матрицы и генерацией реактивных напряжений в месте контакта.

Для моделирования контактного взаимодействия элементов металлоконструкций РВС применен расширенный метод Лагранжа, являющийся основным алгоритмом при решении задач с контактами элементов смешанного типа.

Для моделирования зон осадки использовалась функция Displacement с применением расчетной схемы заполненного резервуара. При этом учитываются все нагрузки, действующие в процессе эксплуатации резервуара.

Для моделирования контактных взаимодействий на соответствующих контактирующих поверхностях были созданы группы контактных элементов типа TARGET 170, CONTACT 174 с заданием соответствующих коэффициентов контактной жесткости и трения.

Упругоподатливое закрепление фундамента и центральной части днища резервуара в области контакта моделируется с помощью конечного элемента COMBIN14.

Условия нагружения и защемления резервуара заданы с помощью модуля конструкционного анализа ANSYS Analysis Settings.

### 3.4.6 Нагружение и воздействия на конструкцию

Согласно [113] нагрузки, действующие на основание и фундамент рассматриваемого заполненного резервуара состоят из:

- постоянных (вес сооружения, продукта, крыши, стационарного оборудования);
- длительных (избыточное давление газового пространства в емкости);
- кратковременных (вес снежного покрова, давление ветра).

Значения снеговой нагрузки и ветрового давления принимается согласно [113]. Величина избыточного давления газового пространства в емкости определена в соответствии с РД-23.020.00-КТН-296-07.

Значения учитываемых нагрузок, которые используем в расчетной схеме исследуемой модели «резервуар-фундамент-основание» для РВС-20000 приведены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Значения учитываемых нагрузок

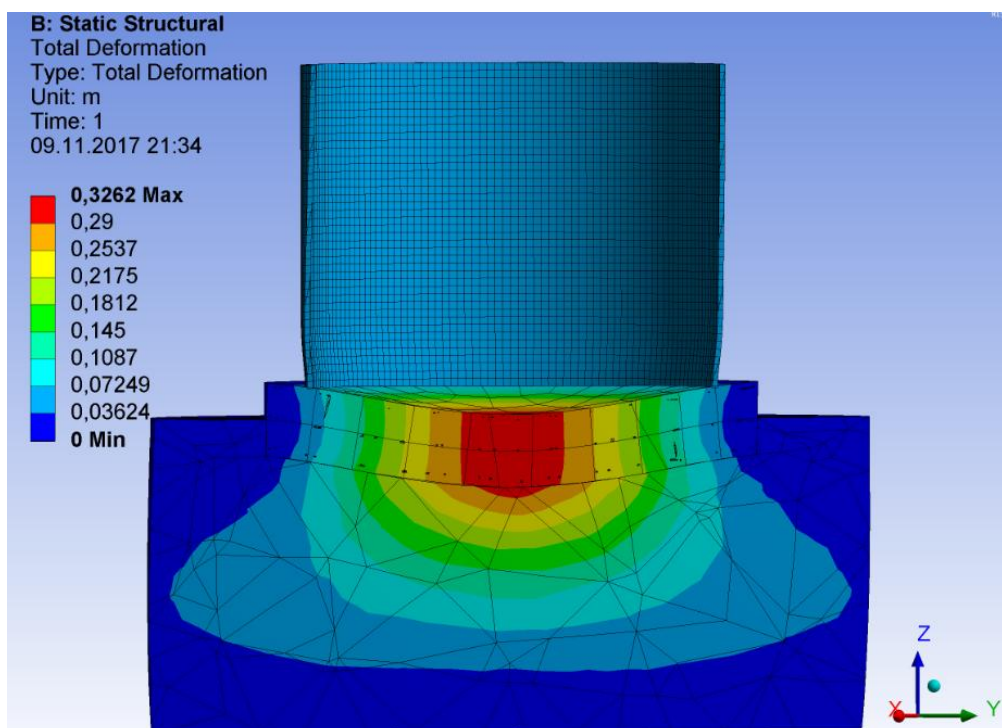
Параметры	Значение
Гидростатическая нагрузка, Па	0 – 119800
Снеговая нагрузка, Па	3200
Ветровое давление, Па	220
Вес стационарного оборудования на кровле, кН	55,2
Давление вакуума, Па	200
Избыточное давление, Па	1800
Давление грунтового основания, Па	120000
Вес теплоизоляции, Па	0

После задания граничных условий, сил (Fixed Support), связей, элементов нагружения (Force), производится решение системы уравнений (Deformation Total), полученной МКЭ, в результате чего формируется файл результатов, подвергающийся постпроцессинговой обработке.

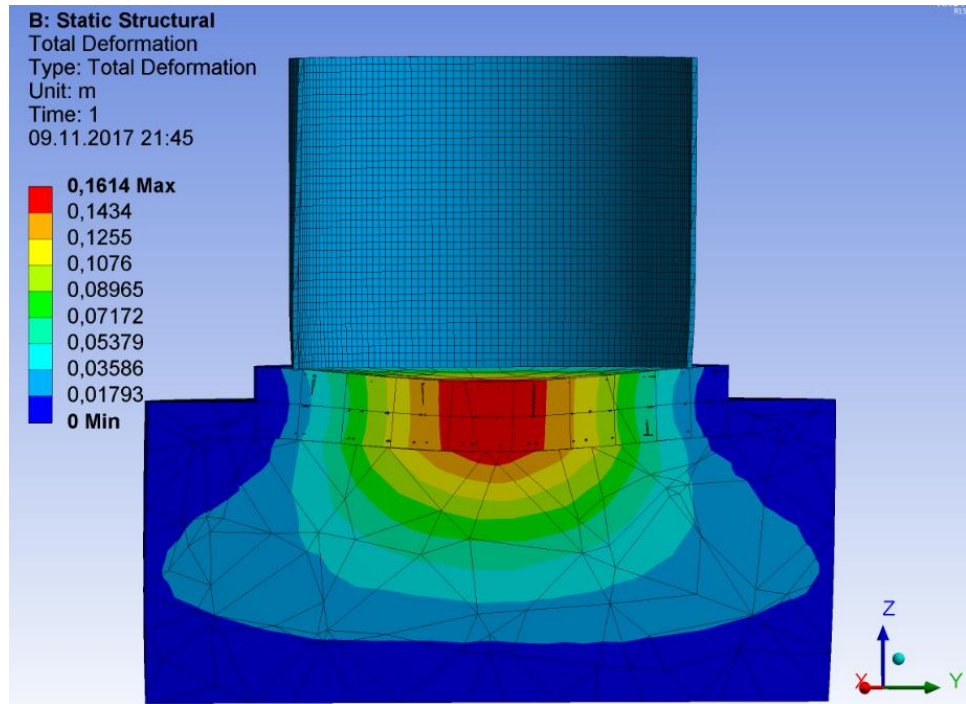
Анализ результатов расчёта позволяет определить физические величины (перемещения, деформации, напряжения), рассчитанные МКЭ и их визуализацию в графическом окне ANSYS в виде картинок и анимацией.

### 3.4.7 Обработка результатов численного моделирования

В результате моделирования РВС-20000 «резервуар-фундамент-основание» в программном комплексе ANSYS на двух типах плитного фундамента (плита с преднапряженной стальной арматурой и плита с преднапряженной арматурой с ЭПФ), нагруженного эксплуатационными нагрузками, получены значения деформации плиты, приведенные на рисунках 3.10-3.13.



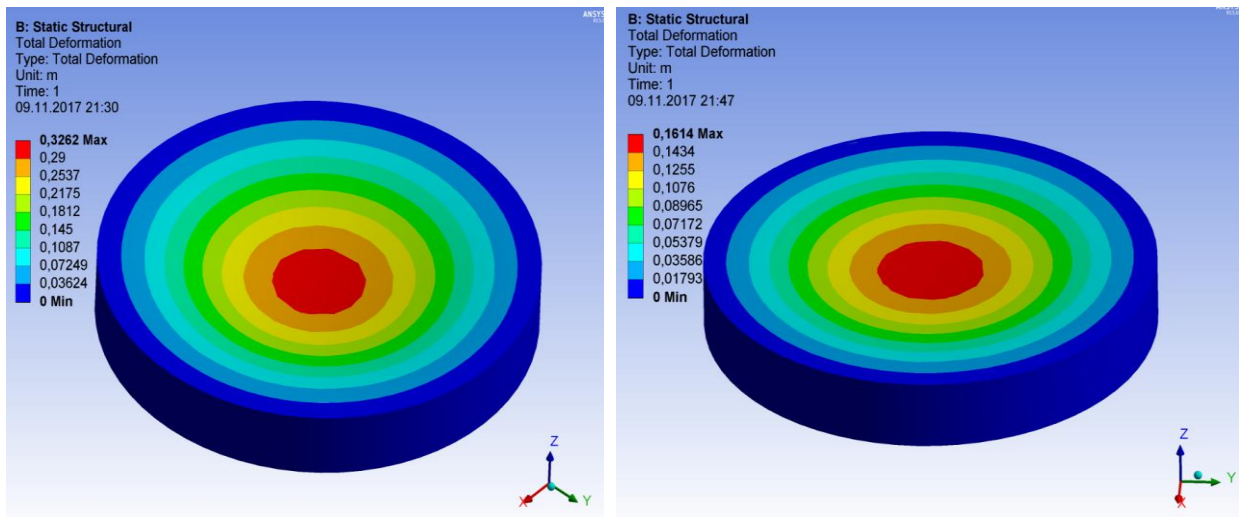
a)



б)

а) РВС-20000 на плите с преднапряженной стальной арматурой; б) РВС-20000 на плите с преднапряженной арматурой из СПФ

Рисунок 3.10 – Деформации «фундамент-основание»



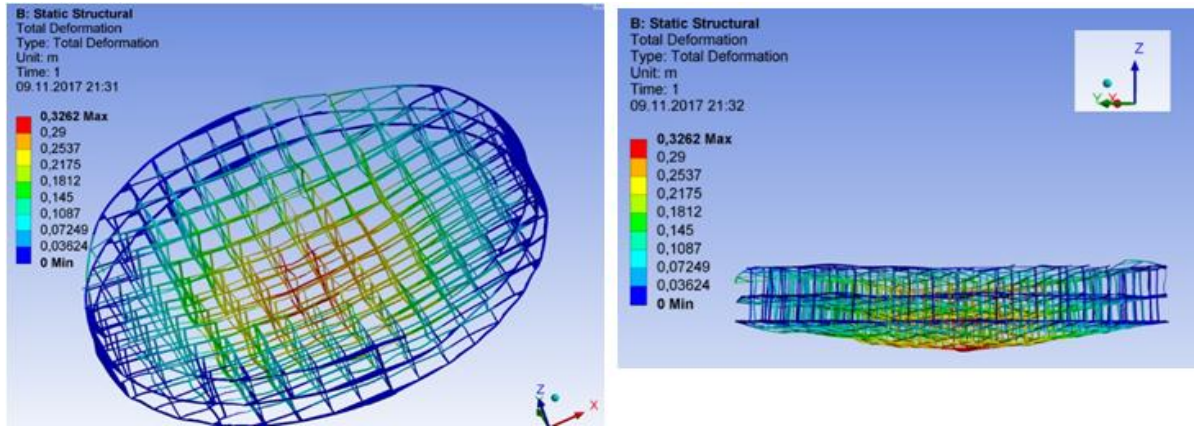
а)

б)

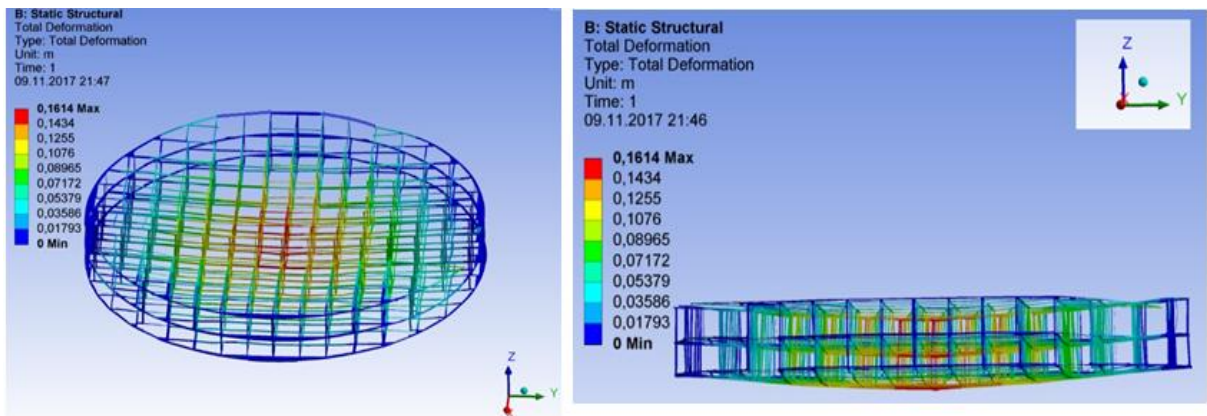
а) плита с преднапряженной стальной арматурой; б) плита с преднапряженной арматурой из СПФ

Рисунок 3.11 – Прогиб/осадка фундаментной плиты для РВС-20000





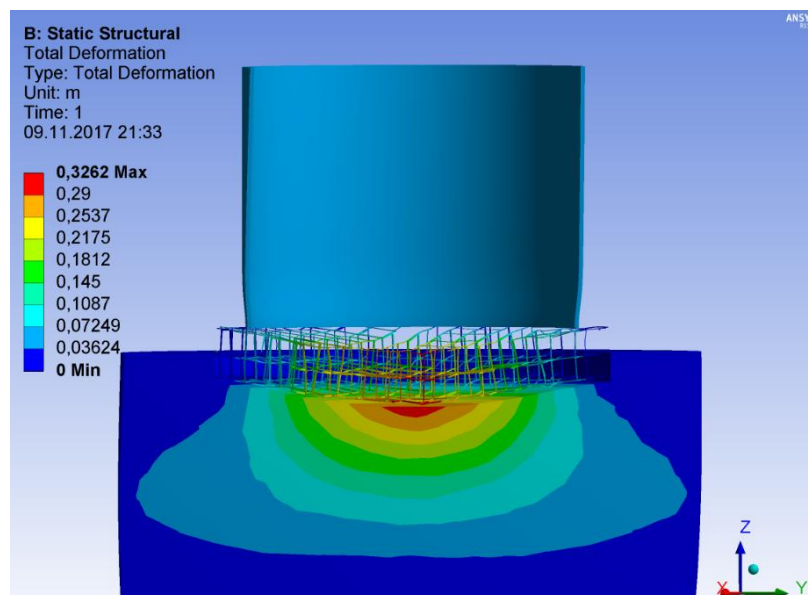
а)



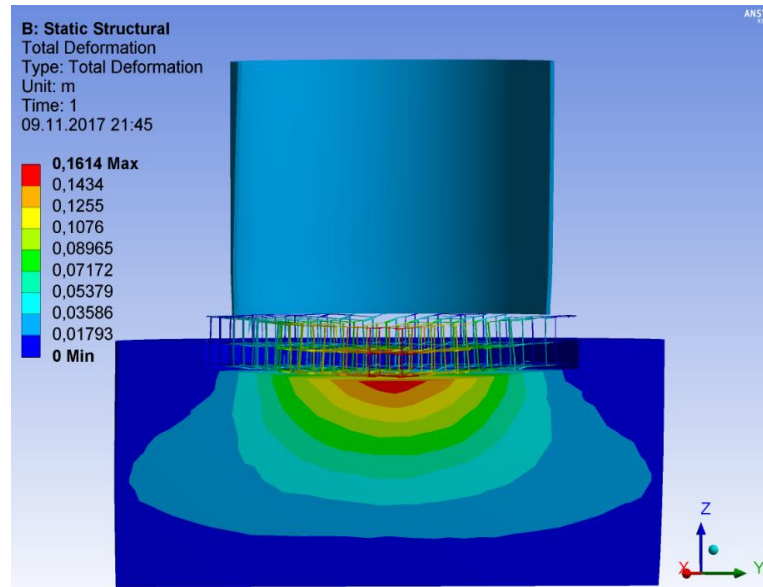
б)

а) плита с преднапряженной стальной арматурой; б) плита с преднапряженной арматурой из СПФ

Рисунок 3.12 - Прогиб/осадка арматурного каркаса фундаментной плиты для РВС-20000



а)



б)

а) плита с преднапряженной стальной арматурой; б) плита с преднапряженной арматурой из СПФ

Рисунок 3.13 – Деформации арматурного каркаса плитного фундамента РВС-20000

Неоднородность значений деформации плиты вызвана циклической нагрузкой наполнения и опорожнения емкости, что и вызывает прогибы плиты и возможные ее разрушения. Как видно из анимаций, деформации плиты, усиленной арматурой с ЭПФ, значительно ниже по сравнению деформациями при традиционном армировании.

Сравнение расчетных, нормативных значений деформации и осадки плиты и результатов методом КЭ с применением программы ANSYS приведено в таблице 3.9.

Из таблицы 3.9 видно, что применение арматуры с ЭПФ обеспечивает уменьшение прогибов, а следовательно увеличение жесткости конструкции по сравнению с конструкцией, армированной стальной арматурой.

Таблица 3.9 – Результаты расчетов, выполненных для стальной арматуры и арматуры из материалов с ЭПФ

Показатели	PBC-20000	
	Плита с преднапряженной стальной арматурой	Плита с преднапряженной арматурой с ЭПФ
1. Расчет осадки плиты на линейно деформируемом основании согласно М. И. Горбунов-Посадов [38], однородное суглинистое основание, $\gamma=20$ кН/м <sup>3</sup> , $E=10$ МПа, $\nu=0,35$		
<i>ПГ</i> (показатель гибкости плиты)	$69 \geq 10$ , плита считается абсолютно гибкая	$36 \geq 10$ , плита считается абсолютно гибкая
Осадка в центре плиты, $w_{ц}$ , мм	145	145
Осадка по краям плиты, $w_{к}$ , мм	92	92
Разность осадок между центром и краем плиты, $w_{ц} - w_{к}$ , мм	53	53
Средняя осадка плиты, $w_{ср}$ , мм	123	123
2. Расчет осадки плиты методом послойного суммирования согласно [114]		
Осадка в центре плиты, $S_{ц}$ , мм	250	250
3. Справочные значения согласно [114]		
Осадка в центре плиты, $S_{ц}$ , мм	200	
Осадка по краям плиты, $S_{к}$ , мм	50	
Средняя осадка плиты, $S_{ср}$ , мм	150	
Прогиб плиты, $f$	0,0045	
4. Расчет осадки плиты с помощью программного комплекса ANSYS методом МКЭ		
Осадка в центре плиты, $S_{ц}$ , мм	326	161
Осадка по краям плиты, $S_{к}$ , мм	36	17
Средняя осадка плиты, $S_{ср}$ , мм	204	100,1
Прогиб плиты, $f$	0,0065	0,004

Графические изображения результатов осадки плиты резервуара от нагружения и распределения прогиба по радиусу плиты для двух вариантов армирования по данным ПК ANSYS приведены на рисунках 3.14-3.15.

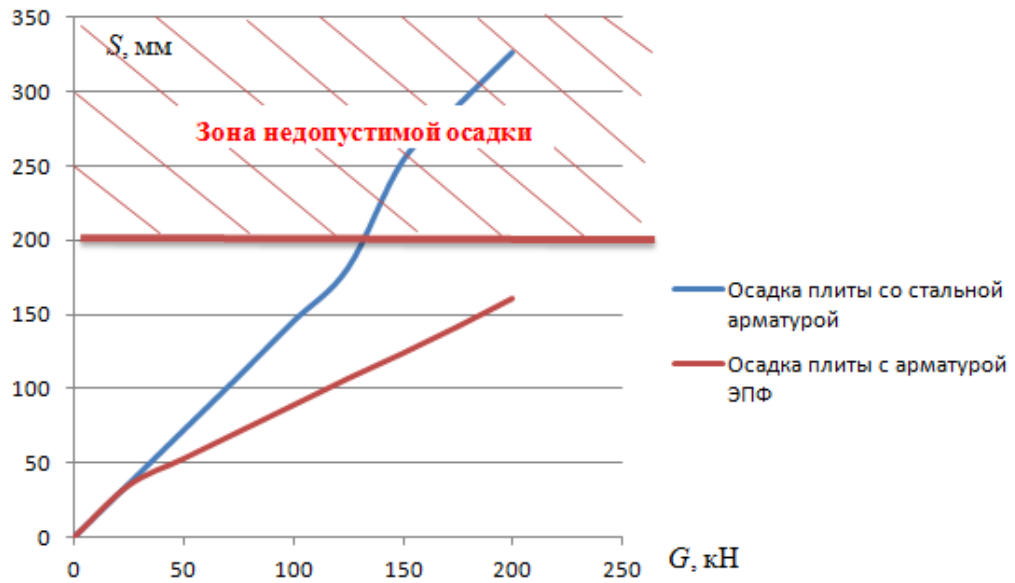


Рисунок 3.14 – График осадки плиты от нагружения

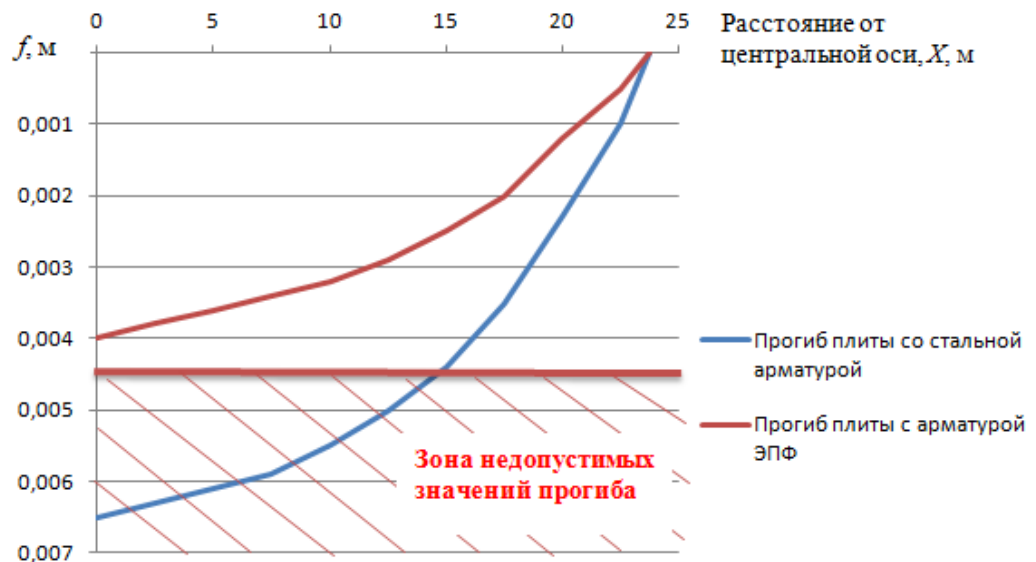


Рисунок 3.15 – Распределение прогибов по радиусу фундаментной плиты резервуара в зависимости от вариантов армирования

Исходя из результатов численного моделирования статического состояния модели «резервуара - фундамент – основание» для РВС-20000, можно сделать следующие выводы.

При варианте армирования плиты стержнями с ЭПФ возникают неравномерные осадки  $S_{\text{ц}}=161$  мм,  $S_{\text{к}} = 17$  мм,  $S_{\text{ср}}=100,1$  мм, не превышающие с запасом недопустимые осадки для конструкции фундаментной плиты резервуара согласно [114] (таблица 3.9).

Таким образом, получаем, что осадка центра фундамента, армированного стержнями из материала с ЭПФ получается меньше нормативного по [114] и меньше осадки центра фундамента, армированного сталью, то есть  $161 < 200 < 326$  мм.

Осадка краев фундаментной плиты, армированной материалом с ЭПФ получается меньше нормативного по [114] и меньше осадки краев фундамента, армированного сталью, то есть  $50 > 17 < 36$  мм. Средняя осадка фундамента, армированного материалом с ЭПФ получается меньше нормативного и меньше осадки центра фундамента, армированного сталью, то есть  $150 > 101,1 < 204$  мм.

Прогиб фундаментной плиты, армированной стержнями с ЭПФ получается меньше нормативного по [114] и меньше прогиба плиты, армированной сталью  $0,0045 \geq 0,004 < 0,006$ .

Полученные деформации модели «резервуар - фундамент - основание» по двум вариантам армирования характеризуют жесткость самой плиты резервуара и основания (грунта), на котором размещена конструкция.

Исходя из этих положений можно сделать вывод о необходимости усиления не только основания (грунта) резервуара, но и создать достаточную жесткость конструкции плиты. Одним из таких решений и является предложенная модель армирования материалами с эффектом памяти, имеющими более высокие прочностные характеристики по сравнению со стальной арматурой.

Учитывая одинаковый диаметр арматурных стержней в рассматриваемой плите, шаг их установки и площадь расположения на  $1 \text{ м}^2$ , существует возможность в варианте армирования стержнями с ЭПФ уменьшить их объем в плите и толщину самой плиты таким образом, чтобы уложиться в норматив по осадке плиты, вследствие чего уменьшится вес рассматриваемого плитного фундамента и материалоемкость конструкции.

В результате проведенного исследования, аналитических и компьютерных расчетов был предложен параметр эффективности армирования ( $K$ ) плитного фундамента резервуара, который свидетельствует о целесообразности применения арматуры с памятью.

$$K = \frac{E_A}{E_{cm}} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\alpha \cdot (A_k - A_n)}, \quad (3.40)$$

где  $E_A$  – модуль Юнга арматуры с ЭПФ в аустенитном состоянии;

$E_{cm}$  – модуль Юнга стальной арматуры;

$\varepsilon_n$  – параметр памяти арматуры с ЭПФ;

$\alpha$  – коэффициент линейного расширения арматуры из материалов с ЭПФ;

$A_k$  и  $A_n$  – температура конца и начала аустенитного перехода арматуры с ЭПФ.

Имея данные о свойствах принимаемого материала в качестве арматурных стержней для бетонной конструкции можно оценить их работу в сравнении со стальной арматурой.

Принимая характеристики исследуемого материала Ni45-Ti45-Nb10 и технологический параметр памяти  $\varepsilon_n$  оценим его работу в качестве арматурных стержней в виде графической зависимости (рисунок 3.16).

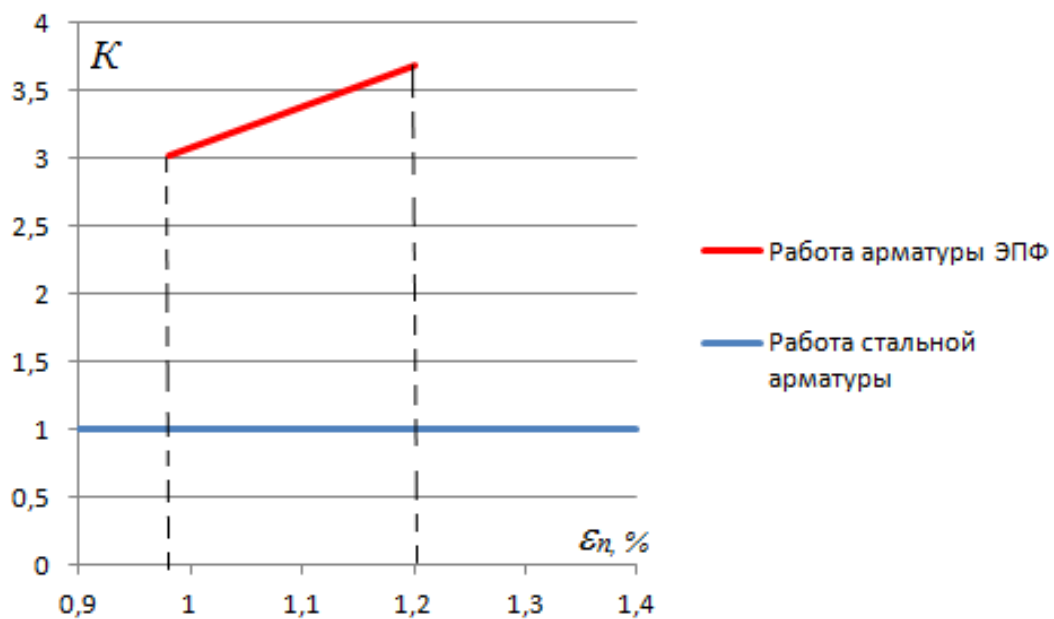


Рисунок 3.16 – График изменения параметра эффективности армирования от деформации памяти стержней с ЭПФ,  $K=f(\varepsilon_n)$

По построенному графику зависимости параметра эффективности армирования от деформации памяти стержней с ЭПФ видно, что, изменяя

значения деформации памяти, введенный критерий для арматуры с ЭПФ в несколько раз превышает работу стальной арматуры, что говорит об ее эффективности применения.

Для оценки работы арматуры из материалов с ЭПФ, при найденном значении параметра эффективности армирования согласно формуле (3.40) разработаны следующие условия:

- $K < 1$  – сжатие арматуры с ЭПФ происходит в меньшей степени, чем стальной арматурой, усиление бетонной конструкции не выполняется;
- $K = 1$  – сжатие арматуры с ЭПФ равнозначно сжатию стальной арматуры, передача сжимающих усилий стержней с ЭПФ на бетон равнозначно работе стальной арматуры;
- $K > 1$  – сжатие арматуры с ЭПФ происходит, передача сжимающих усилий на бетонную конструкцию превышает работу стальной арматуры, происходит усиление конструкции.

### 3.5 Выводы по главе 3

1. В результате разработанной методики расчета усиления плитного фундамента резервуара путем армирования стержнями из материалов с памятью формы определены оптимальные параметры армирования плиты  $2,8\% \leq \mu_n \leq 5,6\%$ , деформация памяти стержней  $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34\%$ , расчетные напряжения ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_a$ ) усиленной бетонной матрицы плитного фундамента стального вертикального резервуара и арматурных стержней с ЭПФ.

2. Численное моделирование с применением ПК ANSYS статического состояния заполненного резервуара типа РВС-20000 показало, что при устройстве резервуара на плитный фундамент с использованием арматурного каркаса с памятью возникают прогибы и осадка плиты, которые ниже на 38,5% и 49% соответственно, относительно данных величин при традиционном армировании стальными стержнями, при этом в процессе преднапряжения фундамента

происходит передача повышенных значений сжимающих усилий бетонной конструкции, благодаря высокому проценту относительной деформации арматурных стержней с ЭПФ.

3. Предложен коэффициент эффективности армирования с применением стержневых систем из материала ЭПФ, равный отношению произведения модуля Юнга материала с ЭПФ в аустенитном состоянии на величину деформации памяти, предварительно сообщенной материалу к произведению модуля Юнга стали на величину температурной деформации арматуры из материалов с памятью в процессе армирования, который позволяет оценить степень усиления бетонной конструкции для плитных фундаментов резервуаров.



## **ГЛАВА 4 ТЕХНОЛОГИЯ СООРУЖЕНИЯ ПЛИТНЫХ ФУНДАМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛАМИ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ**

Технология сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с памятью формы для РВС мало отличается от технологии устройства обычных фундаментных плит со стальным арматурным каркасом.

Отличительной особенностью является технология создания предварительного напряжения стержней и применение автоматических нагревательных установок высокой мощности для обеспечения необходимой деформации арматуры.

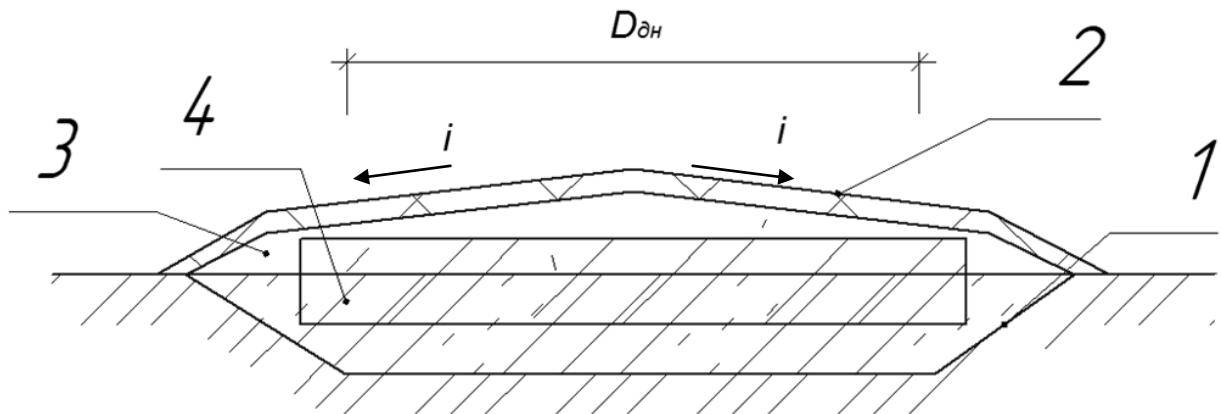
Предварительное напряжение арматурных элементов с памятью формы в данном случае используется для: повышения трещиностойкости железобетонной плиты; повышение ее жесткости и уменьшения деформаций; повышения выносливости конструкции фундамента, работающего под воздействием циклических нагрузок; снижения расхода материалов для армирования и бетона, и как следствие снижение массы конструкции.

Рассмотрим комплекс работ по устройству основания и плитного фундамента резервуара типа РВС-20000 м<sup>3</sup> в условиях Крайнего Севера на слабонесущем неоднородном основании, состоящем из глинистых и суглинистых грунтов.

На основе теоретических и экспериментальных результатов исследования, разработаем методику сооружения усиленного фундамента резервуара с использованием арматурного каркаса из материала с ЭПФ для снижения прогиба фундаментной плиты и недопустимых неравномерных осадок сооружения, применимого в качестве монолитной фундаментной конструкции для нефтяных резервуарах, работающих в сложных инженерно-геологических условиях.

#### 4.1 Конструкция основания и плитного фундамента, армированного стержнями с памятью для РВС-20000

В работе предусматривается устройство основания в виде грунтовой двухъярусной подушки с плитным железобетонным фундаментом под всей площадью резервуара (рисунок 4.1).



1 – насыпной уплотнённый грунт; 2 – гидроизолирующий слой; 3 – песчаная подушка с уклоном от центра; 4 – железобетонная плита

Рисунок 4.1 – Конструкция основания и плитного фундамента резервуара

Основанием резервуара служит песчано - гравийная подушка, послойно (200 мм) уплотненная до  $E=15$  МПа, ниже залегают пески крупные средней степени насыщения с включением гальки и гравия до 15 %, с физико-механическими характеристиками:  $\rho=1,8$  г/см<sup>3</sup>;  $t_{cp}=33^\circ$ ;  $e=33,7\%$ ;  $E=28$  МПа с несущей способностью грунта  $4,38$  кг/см<sup>2</sup>=430 кПа [3].

Раскрытие подушки под грунтовую производится только в теплый период. При устройстве основания и фундамента под резервуар соблюдают требования согласно [118].

Ярус 1 (снизу верх):

- отсыпка послойно (через 200 мм) песчано-гравийная смесь по ГОСТ 23735-2014 (коэффициент уплотнения не менее 0,95), с устройством уклона к центру резервуара. Уплотнение производить катками массой до 10 т через 200 мм

толщины. При устройстве данного слоя основания необходимо учесть конструкцию системы обнаружения утечек нефти под резервуаром.

Ярус 2 (снизу вверх):

- под бетонной подготовкой плитного фундамента резервуара выполнить подсыпку из послойно (через 200 мм) уплотненного песка средней крупности по [43];

- под центральной частью днища резервуара выполнить защитный слой из песка средней крупности по [43], толщиной слоя 100 мм, с обязательной планировкой к центру резервуара и уплотнением;

- выполнить противofильтрационный экран из однослойной полиэтиленовой пленки высокой плотности, толщиной 1,0 мм, по уклону к центру резервуара. При устройстве противofильтрационного экрана учесть конструкции системы обнаружения утечек нефти под резервуаром;

- устроить защитный слой из песка средней крупности по [43], толщиной слоя 100 мм, с обязательной планировкой к центру резервуара и уплотнением;

- выполнить подсыпку послойно (через 200 мм) из уплотненного песка средней крупности по [43] с устройством уклона от центра к окрайке днища резервуара. При устройстве данного слоя основания учесть конструкции электрохимзащиты резервуара.

После отсыпки грунтовой подушки непосредственно под днищем резервуара выполняется гидрофобный слой для защиты днища резервуара от коррозии.

Гидрофобный слой выполняют из высокоплотного асфальтобетона марки 1 по ГОСТ 9128-2009, с остаточной пористостью от 1,0 до 2,5%, песчаного, с размером зерен до 5 мм.

В соответствии нормативных документов [116, 117], принимаем плитный фундамент для РВС-20000, который выполняется из бетона В40, класс морозостойкости F150, W6. Для такого резервуара конструкция фундамента выполненного в виде монолитного железобетонного диска.

Армирование диска производится преднапряженной арматурой из сплава ТН-1К эквиатомного состава Ni45-Ti45-Nb10, уложенного на подушку основания из непучинистого материала.

Размеры железобетонной плиты: диаметр 47,6 м, высота  $h=0,9$  м; бетон тяжелый с модулем упругости  $E_f=3,6 \times 10^{10}$  кПа. Нагрузка на фундамент составляет  $q_i=175,5$  кН. Высота песчаной подушки 0,5 м. Глубина заложения фундамента 0,3 м от планировочной отметки [100, 101].

В качестве продольной и поперечной арматуры используется преднапряженная арматура периодического профиля диаметром 14 мм, покрытая песочным напылением для лучшего сцепления с бетоном, в виде отдельных стержней из сплава Ni45-Ti45-Nb10 длиной 11 м, сваренных между собой по длине железобетонного диска. Схема арматурного каркаса принята в виде сетки с шагом ячейки 300x300 мм при двухрядном армировании.

В качестве вертикальных стержней арматуры, соединяющий арматурный каркас из материала с ЭПФ, используется стальная ненапряженная арматура периодического профиля класса АIII диаметром 8 мм согласно [45].

Арматурные каркасы изготавливают в соответствии с требованиями ГОСТ Р 57997-2017. Стыковку рабочей арматуры выполняем внахлест ручной дуговой сваркой электродами типа Э42А на строительной площадке [46].

Выполняется армирование плитного фундамента в следующей последовательности:

- установить пластиковые фиксаторы, однократного применения, обеспечивающие необходимый защитный слой нижней рабочей арматуры;
- уложить нижнюю поперечную арматуру на фиксаторы с шагом 300 мм;
- уложить нижнюю продольную арматуру и прикрепить к нижней поперечной арматуре при помощи вязальной проволоки в каждом месте пересечения стержней.

– установить на нижнюю поперечную арматуру каркасы. Скрепить их при помощи стержней. Стержни крепить к каркасу и нижней арматуре при помощи вязальной проволоки.

– на каркасы уложить верхнюю поперечную арматуру и закрепить при помощи вязальной проволоки в каждом месте пересечения стержней;

– уложить верхнюю продольную арматуру на верхние поперечные стержни и закрепить при помощи вязальной проволоки в каждом месте пересечения стержней.

Далее установить закладные детали и сварить арматуру в местах контакта друг с другом.

После устройства основания под фундамент выполняется подготовка из бетона класса В40 с выходом за габариты фундамента резервуара на 100 мм. Состав бетона выполняется согласно [44], в который входит: цемент, песок, щебень в пропорции 1:2:3, вода и пластифицирующие добавки (мылонафта, хлорид кальция).

Для создания плиты перед ее бетонированием необходимо устроить пластиковую опалубку толщиной 20 мм в виде кольца по периметру строящегося фундамента согласно [47].

## **4.2 Технология устройства основания и плитного фундамента под РВС-20000**

Краткая технология устройства основания и фундамента под резервуар выглядит следующим образом:

- вертикальная планировка площадки строительства;
- земляные работы;
- устройство основания резервуара (грунтовая и песчаная подготовка);
- установка гидрофобного слоя;

– установка сплошного плитного фундамента резервуара с устройством арматурного каркаса и его предварительное напряжения [90, 103].

Комплекс работ по сооружению основания и плитного фундамента, армированного материалами с ЭПФ, нефтяного резервуара состоит из подготовительного и основного периода [40, 41].

До начала выполнения основных работ предшествует комплекс подготовительных, которые включают в себя следующие виды работ [101, 102]:

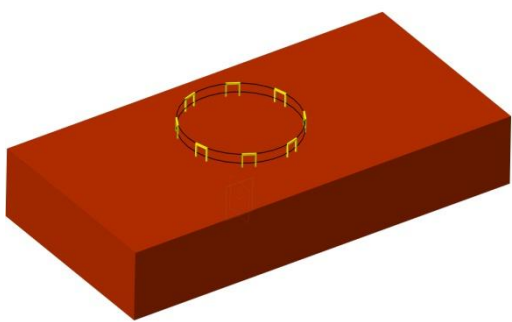
- планировку площадки строительства с обозначением мест коммуникаций и передача участка подрядной организации;
- оформление разрешительной документации на производство работ;
- доставка материально-технических ресурсов, техники, оборудования;
- организация системы связи;
- обустройство временных подъездных путей и переездов [71].

Последовательность основных работ по сооружению основания и плитного фундамента РВС следующая:

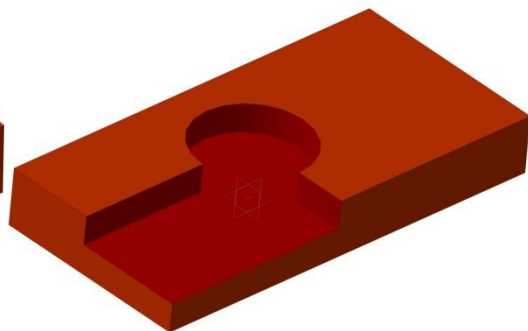
- определяется месторасположение сооружаемого объекта, с обозначением площадки строительства на местности, а также места складирования грунта (отвалов) (выполняет заказчик согласно разработанного ППР);
- снимается слой плодородного грунта и размещается в обозначенные места отвалов в пределах строительной площадки;
- сооружение основания:
  - соорудить кольцевой котлован основания резервуара под грунтовую подготовку (песчано-гравийная смесь);
  - геодезическая проверка габаритов котлована;
  - произвести засыпку котлована песчано-гравийной смесью;
  - произвести отсыпку основания песчаной подготовкой;
  - провести отсыпку песчаной подушки поверх плиты с уклоном от центра к краям 1:1,5 и последующем мощением;
  - произвести устройство гидроизоляции;

- провести контроль качества отсыпки основания;
  - установить дренажные трубы;
- сооружение плитного фундамента:
- устройство опалубки и арматурного каркаса из материала с памятью формы;
  - заневоливание арматурного каркаса на упоры, бетонирование плиты с последующим электротермическим нагревом арматуры;
  - демонтаж опалубки и освобождение от фиксирующих устройств арматурный каркас;
  - выполнить рекультивацию.

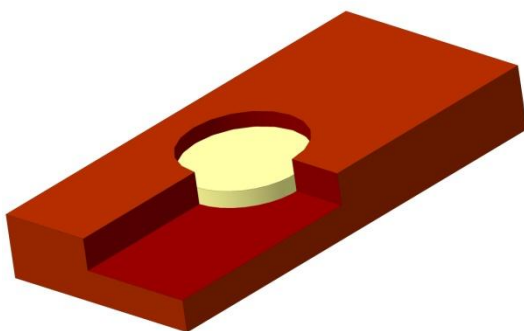
Последовательность указанных работ приведена на рисунке 4.2.



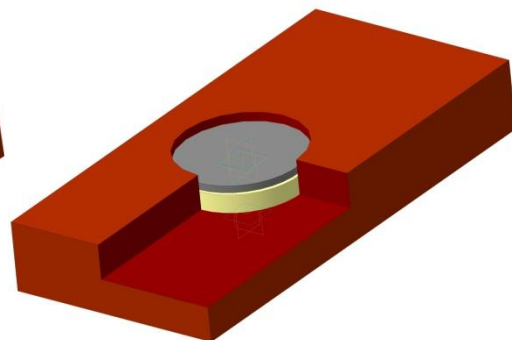
1) обозначение местоположения  
сооружаемого объекта



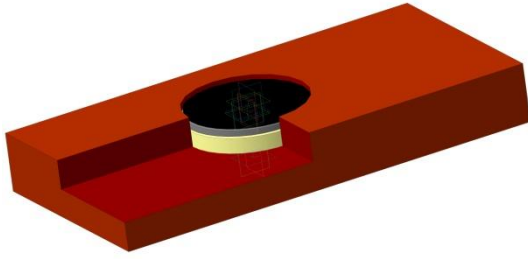
2) разработка котлована



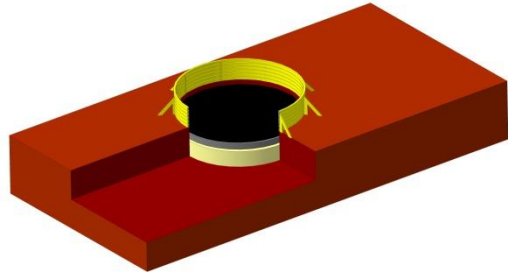
3) устройство грунтового  
основания



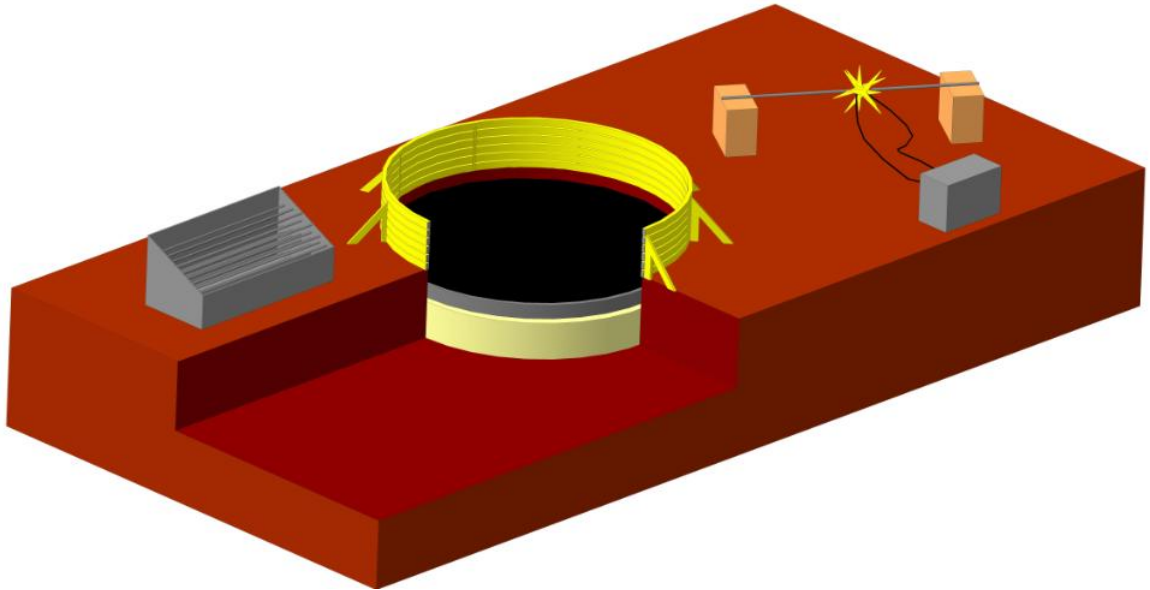
4) устройство песчаной подушки



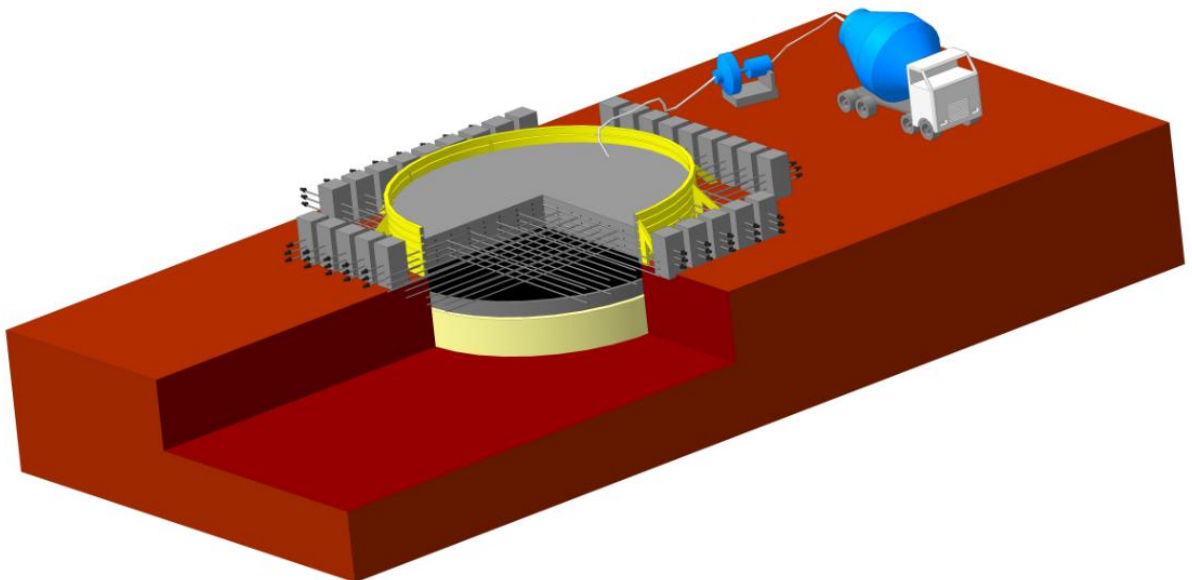
5) устройство гидроизоляции



6) установка опалубки для фундамента

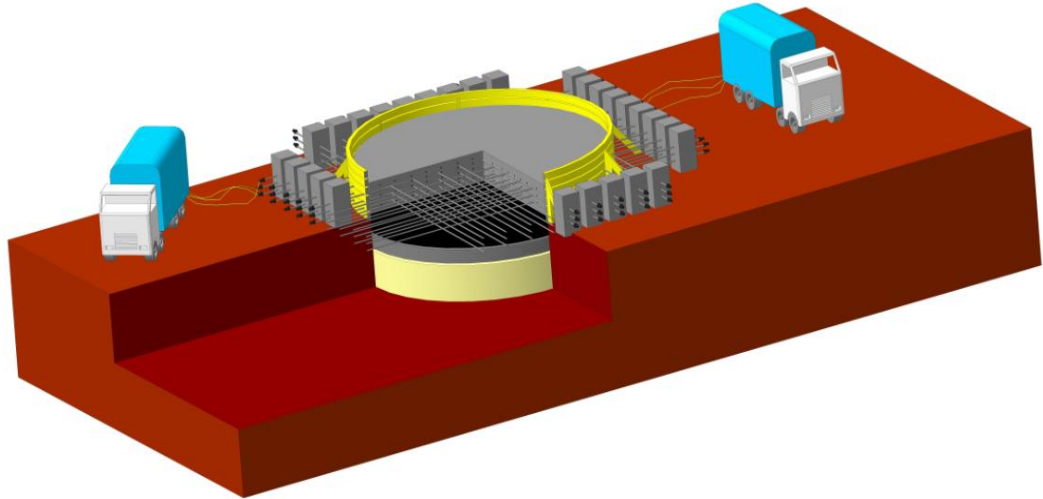


7) Монтаж и сварка арматурного каркаса

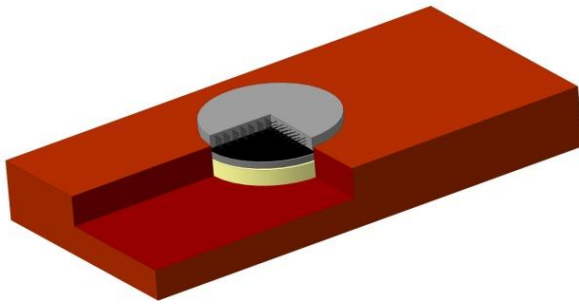


8) Заневоливание арматурного каркаса и бетонирований фундамента

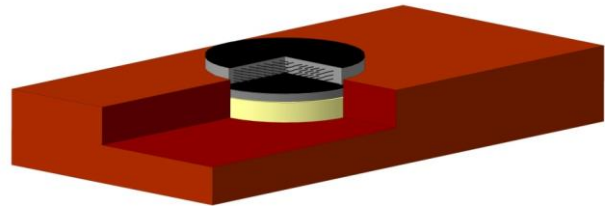




9) Электротермический нагрев арматуры



10) демонтаж опалубки и освобождение от фиксирующих устройств арматурный каркас



11) готовая конструкция фундамента

Рисунок 4.2 – Последовательность работ при сооружении основания и фундамента резервуара

Определение местоположения сооружаемого основания и фундамента для резервуара выполняется в следующей последовательности:

- определяется центральная точка основания, устанавливается вешка;
- от вешки отмеряется расстояние до окружности основания;
- определяется расстояние от центральной вешки до временной дороги.

Земляные работы по устройству котлована осуществляются комплексным методом с применением экскаватора и бульдозера.

Котлован под основание и фундамент резервуара сооружается с откосами крутизной не менее величин, приведенных в таблице 4.1 для различных типов грунтов.

Таблица 4.1 – Допустимая величина откосов в зависимости от состава грунта

Грунт	Глубина выемки, м					
	до 1,5		1,5 – 3,0		3,0 – 5,0	
	угол между направлением откоса и горизонтом, град.	отношение высоты откоса к его заложению	угол между направлением откоса и горизонтом, град.	отношение высоты откоса к его заложению	угол между направлением откоса и горизонтом, град.	отношение высоты откоса к его заложению
Насыпной естественной влажности	56	1:0,67	45	1:1,00	38	1:1,25
Песчаный и гравийный влажный, но ненасыщенный	63	1:0,50	45	1:1,00	45	1:1,00
Супесь	76	1:0,25	56	1:0,67	50	1:0,85
Суглинок	90	1:0,00	63	1:0,50	53	1:0,75
Глина	90	1:0,00	76	1:0,25	63	1:0,50
Лессовидный сухой	90	1:0,00	63	1:0,50	63	1:0,50

При разработке котлована его устраивают на глубину согласно проекту, после отрывки котлована техникой его дорабатывают вручную с контролем крутизны откосов и геометрических параметров. Отвал грунта котлована размещается на расстояние 1,5 м от бровки котлована по периметру.

Котлован оснащается двумя лестницами на каждую сторону для возможности спуска и выхода рабочих.

После устройства основания резервуара производят его засыпку с применением экскаватора и ручным способом, планируют засыпанную поверхность и производят рекультивацию нарушенного слоя.

После устройства основания выполняется сооружение фундаментной плиты.

Первым этапом устанавливается арматурный каркас согласно схеме (рисунок 4.2 п.7) после чего бетонируется и подвергается предварительному напряжению.

Бетонные работы необходимо выполняются в строгом соответствии с рабочей документацией, проектом производства работ [115, 118].

Доставка бетонной смеси с производственной базы до места производства работ осуществляется автобетоносмесителями.

Подача бетона для устройства крупных фундаментов (монолитная плита) производится через автобетононасос, непрерывно работающий на строительной площадке при производстве бетонных работ (рисунок 4.2 п.7). Подача бетона производится автобетоносмесителем с использованием инвентарного лотка-желоба. Для перемешивания бетонной смеси между порционной выдачей бетона автобетоносмесителями необходимо их постоянная работа на строительной площадке.

Бетонную смесь укладывают на подготовленное и расчищенное основание, выверенное по проектной отметке с помощью растворонасоса.

После монтажа опалубки бетонирование ведется послойно, слоями не более 15 см с тщательным уплотнением глубинными вибраторами.

При изготовлении бетонной смеси для ее лучшего качества и скорого твердения используют следующие добавки: суперпластификаторы, ускорители твердения, минеральные микронаполнители, ингибиторы коррозии, гидрофобизирующие, и противоморозные добавки.

Бетонные смеси готовим на строительной площадке из отдельных компонентов сухих смесей, изготовленных по специальной рецептуре на фракционированном песке с заданным модулем крупности.

Сухие смеси поставляются в мешках по 50 кг. Все добавки, которые назначены, вводятся в процессе приготовления бетонной смеси на строительной площадке.

Дозирование компонентов бетонных смесей следует производить по массе. Точность дозирования для цемента, воды, добавок -  $\pm 1\%$ , для заполнителей -  $\pm 2\%$ .

Время доставки готовой бетонной смеси на строительный объект в автобетоносмесителях не должно превышать 1,5 ч. Бетонная смесь вырабатывается в течение 3-3,5 ч, при хранении бетонная смесь постоянно перемешивается.

Непосредственно перед бетонированием опалубку очищают от мусора и грязи, а арматуру от отслаивающейся ржавчины.

По окончанию бетонирования фундамента для поддержания нормальных условия твердения бетона его необходимо увлажнять. Первый раз поливают бетон через 24 часа после укладки. В первые 2 дня бетон поливают 4-5 раз в день, затем 3 раза в день в течении 7 суток.

#### **4.3 Технологии создания предварительного напряжения в армированных бетонных конструкциях с помощью стержней с ЭПФ**

Для реализации варианта упрочнения бетонной матрицы разработан патент на изобретение RU 2619578 C1 «Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции» (приложение Б) [95].

Сущность изобретения заключается в следующем: арматуру, изготовленную из сплава, обладающего эффектом памяти формы, нагревают до температуры, большей температуры конца обратного мартенситного превращения -  $A_k$ , после чего нагружают путем изотермического растяжения и охлаждают под действием механического напряжения до температуры ниже температуры конца прямого мартенситного превращения -  $M_k$ , затем разгружают и заневоливают в жестких упорах с последующим нагревом до температуры, большей  $A_k$  и отвечающей технологической температуре твердения бетона, подвергают изотермическому твердению бетона в жесткой форме в течение времени, необходимого для набора

бетоном передаточной прочности, после достижения бетоном передаточной прочности снимают фиксаторы на упорах и дают остыть полученному изделию из напряженного армированного бетона до технологической (эксплуатационной) температуры. Схематизация процесса создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции при деформационном отклике выбранного сплава Ni45-Ti45-Nb10 показана на рисунке 4.3



Рисунок 4.3 – Схематизация процесса создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции

Используем способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции согласно патенту RU 2619578 С1 для преднапряженного плитного фундамента, армированного стержнями с ЭПФ для вертикального стального резервуара с применением электротермического способа натяжения арматуры на фиксирующие упоры.

Сущность электротермического способа натяжения арматуры из материала с памятью формы в данном случае будет заключаться в следующем: предварительно растянутые стержни заданной длины в мартенситном состоянии фиксируют на упорах, вследствие последующего электрического нагрева арматуры до температуры конца аустенитного перехода (в нашем случае температура  $A_k = 290$  К), происходит укорочение стержней и передача их сжимающих усилий на бетонную конструкцию.

### 4.3.1 Заготовка арматуры

Заготовку напрягаемой арматуры производят на строительной площадке вблизи с местом производства работ. Учитывая габариты фундаментной плиты резервуара РВС-20000, для устройства арматурного каркаса стержни с ЭПФ необходимо будет удлинять и укорачивать для создания плети заданной длины.

Резать стержневую арматуру из материалов с памятью формы следует в холодном состоянии с помощью механических и гидравлических ножниц.

Соединения арматурного каркаса (плети продольных и поперечных стержней) будет выполняться ручной дуговой сваркой внахлест электродами типа Э42А диаметром 4 мм при силе тока 220 А сварочным агрегатом АС-81 на строительной площадке (рисунок 4.2 п.7).

Заготовка арматурного каркаса осуществляется посредством укладки стержней в котлован фундамента и закрепления их краев в упорах с применением инвентарных зажимов или концевых анкеров. Инвентарные зажимы или концевые анкера служат для закрепления натянутой арматуры на упорах форм до приобретения бетоном изделия прочности, достаточной для восприятия обжатия.

Крепление напрягаемой арматуры осуществляется с применением любого рода креплений: высаженных головок, инвентарных зажимов, шайб, гайки или контргайки.

Расчет необходимых материалов для сооружения плитного фундамента, армированного каркасом из материалов с ЭПФ представлен в таблице 4.2.

### 4.3.2 Технология натяжения арматуры

Арматурные стержни из материалов с памятью рассматриваемого сплава Ni45-Ti45-Nb10 поставляется на строительную площадку автотранспортом в специальных контейнерах с хладагентом, обеспечивающих мартенситное состояние арматуры (температуры 210-233 К).

Таблица 4.2 – Расчет необходимых материалов для сооружения плитного фундамента, армированного каркасом из материалов с ЭПФ

Параметр	Значение
РВС-20000, плита диаметром 47,6 м	
Периметр плиты, м	149,5
Площадь плиты, м <sup>2</sup>	1779,5
Площадь боковой поверхности, м <sup>2</sup>	144
Объем бетона, м <sup>3</sup>	1440
Вес бетона, кг	3384000
Нагрузка на почву от фундамента, кгс/м <sup>2</sup>	0,212
Арматура	
Длина стержней арматурной сетки, м	11
Длина стержней вертикальной арматуры, м	1
Минимальный диаметр стержней арматурной сетки, мм	14
Минимальный диаметр вертикальных стержней арматуры, мм	8
Размер ячейки сетки, мм	300x300
Величина нахлеста арматуры, мм	500
Общая длина продольной арматуры, м	31999,2
Общая длина поперечной арматуры, м	34098,4
Общий вес продольной арматуры, кг	31756
Общий вес поперечной арматуры, кг	33049

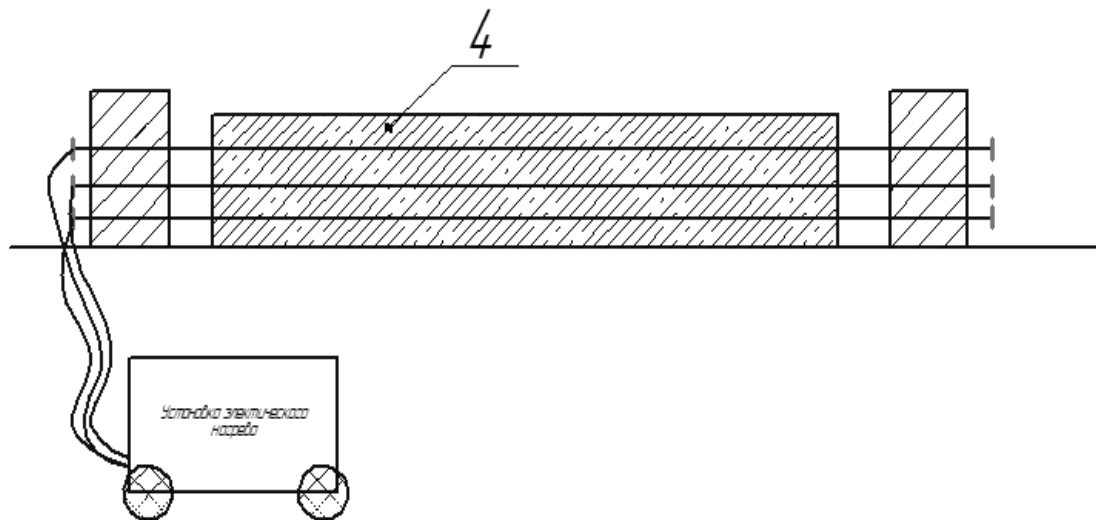
Создание арматурного каркаса фундамента происходит путем сварки одиночных стержней между собой в плети необходимой длины, одновременной укладкой на предварительно подготовленное основание и фиксации в упорах с применением анкерных креплений. Выход арматурных стержней за упоры должен составлять не менее 0,5 м.

После укладки арматурного каркаса происходит бетонирование плиты и создание предварительного напряжения конструкции путем нагрева арматуры электротермическим способом.

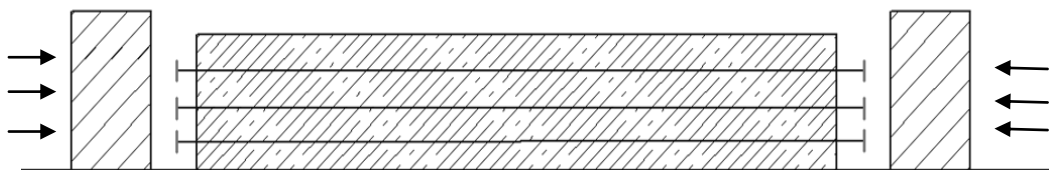
Схематизация электротермического способа натяжения арматуры приведена на рисунке 4.4.



Этап 1: Натяжение и технологическое закрепление арматуры на упоры



Этап 2: Бетонирование элемента с последующим нагреванием арматуры электромеханическим способом до характеристических температур



Этап 3: Освобождение технологических закреплений и срезка арматуры с упоров, передача сжимающих усилий обжатия бетону

1 – арматурные стержни; 2 – анкерные закрепления; 3 – упоры; 4 бетонная конструкция

Рисунок 4.4 – Схематизация электротермического способа натяжения арматуры



Технология натяжения стержней электротермическим нагревом включает в себя следующее:

- крайние стержни арматурного каркаса с помощью токопроводящих прижимных контактов, соединенных проводами с нагревательной установкой, подключают в электрическую цепь;
- включают в работу нагревательную установку и нагревают арматуру до заданной температуры (для рассматриваемого сплава до 290 К) в течении 1-5 минут в зависимости от длины плети;
- выдерживают заданную температуру в течении 2-7 минут с целью обеспечения полного прогрева плети и ее необходимой деформации;
- выключают ток в нагревательной установке, освобождают нагреваемую плеть от зажимов и переходят к следующей плети, далее цикл повторяют.

Прижимные токопроводящие контакты состоят из токопроводящих проводов, выполненных из меди или латуни, и прижимной части, которая выполнена из обычной стали.

Плотность прижима контактов к арматуре обеспечивают нагревательные установки, и для стержней диаметром до 14 мм усилие прижима составляет 100 кг, для стержней большего диаметра – 200 кг.

Величину деформации и напряжений арматуры определяют по силе тока, протекающего по стержню, используя зависимость между деформацией при заданной температуре и омическим сопротивлением стержня.

Операции при контроле напряжений в арматуре по силе тока выполняют в такой последовательности:

- в цепи нагреваемого стержня устанавливают трансформатор тока, подключенный к образцовому амперметру;
- производят тарировку стержней (минимум трех шт.), аналогичных заложенным в бетон, устанавливая величину коэффициента  $K_1$ :

$$K_1 = \frac{I_0}{I_t}, \quad (4.1)$$

где  $I_o$  - сила тока в цепи в начале нагрева стержня;

$I_t$  - сила тока в цепи при удлинении стержня, соответствующем заданному напряжению в арматуре  $\sigma_a$ .

– стержни, заложенные в бетон, нагревают до тех пор, пока сила тока в цепи не достигнет величины  $I_{ti}$ , определенной из зависимости  $I_{ti} = K_I \cdot I_{oi}$ ;

– при выдержке заданной температуры нагрева периодически включают в цепь нагреваемого стержня реактивную катушку (дроссель), следя за постоянством силы тока в цепи  $I_{ti}$ .

Деформацию арматуры измеряют штангенциркулем между бетоном конструкции и риску, нанесенной на каждом из контактов. Точность измерения  $\pm 0,1$  мм. Эти данные необходимы для контроля, особенно на первых этапах работы с арматурой из материалов с памятью.

Контроль режима нагрева арматуры осуществляют с помощью термоэлектрических термометров и фиксируют за счет укорочения стержней.

Контроль температуры осуществляют с целью нагрева арматуры до заданных параметров и недопущения ее перегрева. Одновременный нагрев стержней различного диаметра не допускается в случае последовательной схемы их включения в цепь.

### 4.3.3 Выбор сварочного трансформатора для нагрева арматуры

Для осуществления процесса электротермического нагрева арматурных стержней используются специальные установки с трансформаторами электрического тока, которые применяются в одиночном или групповом исполнении, для параллельного или последовательного соединения. Количество трансформаторов и тип их подключения зависит от необходимых параметров нагрева арматуры (температура, величина силы тока и напряжений).

В процессе электротермического нагрева арматуры посредством трансформаторов необходимо соблюдать требования техники безопасности.

Для выбора типов, количества и схемы соединения преобразователей тока для электронагрева арматуры необходимо определить требуемые ток, напряжение и мощность.

Требуемая величина тока определяется по формуле, А:

$$I = \sqrt{\frac{70 \cdot Q_{\text{полн}} \cdot \kappa}{\bar{R} \cdot \tau}}, \quad (4.2)$$

где  $Q_{\text{полн}}$  - полное количество тепла, расходуемое на нагрев 1 м стержня до расчетной температуры, в ккал;

$\kappa$  - коэффициент, учитывающий схему включения стержней в цепь питания. При последовательном включении  $\kappa$  равно 1, при параллельном - числу одновременно нагреваемых стержней;

$\bar{R}$  - активное сопротивление 1 м стержня при расчетной температуре нагрева, в ккал;

$\tau$  - время нагрева в мин.

Полное количество тепла  $Q_{\text{полн}}$  определяется по формуле

$$Q_{\text{полн}} = Q_n + Q_p \cdot \tau, \quad (4.3)$$

где  $Q_n$  - количество тепла, расходуемого на нагрев 1 м стержня до расчетной температуры без учета потерь, ккал;

$Q_p$  - потери тепла с 1 м стержня теплоизлучением и конвекцией в течение 1 мин, ккал;

Требуемое напряжение определяется по формуле, В:

$$U = \frac{I \cdot \bar{Z} \cdot l_n \cdot m}{k}, \quad (4.4)$$

где  $\bar{Z}$  - полное сопротивление 1 м стержня при нагреве до расчетной температуры;

$l_n$  - длина нагреваемого участка стержня, м;

$m$  - коэффициент, который при последовательном включении стержней в цепь питания равен их числу, а при параллельном соединении – 1.

Требуемую мощность преобразователя тока определяют по формуле, кВт:

$$P = \frac{I \cdot U}{1000}, \quad (4.5)$$

Учитывая характеристики материалов с памятью произведем расчет данных параметров с целью подбора возможных вариантов установок нагрева. Вычисленные параметры представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Расчет требуемых параметров нагревательных установок

Длина стержней арматуры, $l$ , м	Время нагрева, $\tau$ , мин	Сила тока, $I$ , А	Напряжение, $U$ , В	Мощность, $P$ , кВт
1-5	1	1183,216	8,9-66,2	10,6-110,5
5-10	2	1673,32	66,2-155,4	110,5-319,2
10-15	3	2049,39	155,4-235,2	319,2-481,9
15-20	3	2049,39	235,2-314,6	481,9-885,2
20-25	4	2366,432	314,6-449,6	885,2-1064
25-30	4	2366,432	449,6-541,4	1064-1281,1
30-35	5	2645,751	541,4-707,8	1281,1-1872,6
35-40	6	2645,751	707,8-804,2	1872,6-2128
40-47,6	7	2898,275	804,2-1130,1	2128-3537,8

Учитывая требуемые параметра для нагрева предложенного арматурного каркаса из материала с памятью, принимаем последовательную схему включения в электрическую цепь трех стержней плитного фундамента резервуара.

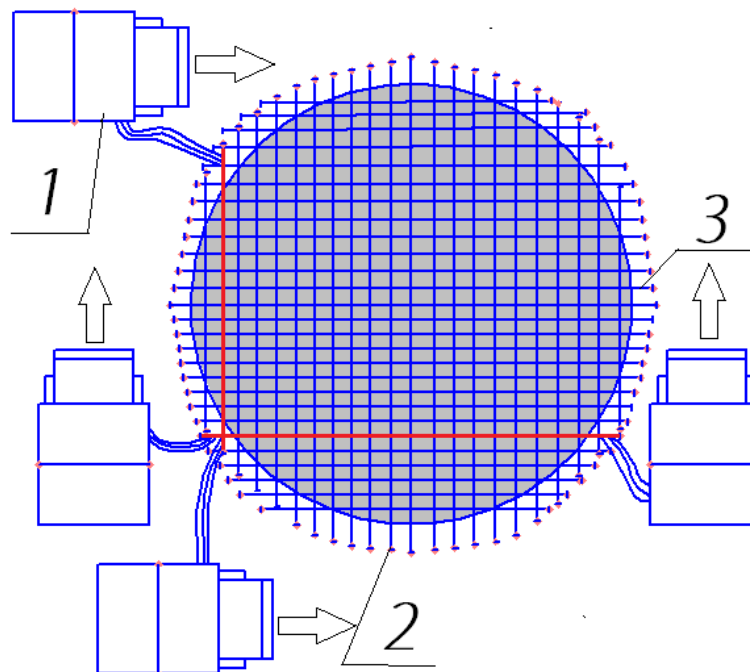
На этапе нагрева стандартная установка за 1-2 минут способна нагреть стержень длиной до 10 м, поэтому в нашем случае время прогрева плети арматуры будет варьировать в зависимости от ее длины по площади устроенного каркаса.

Для нагрева указанного количества арматуры для таких габаритов фундаментной плиты РВС-20000 принимаем четыре трансформаторные установки (варианты применяемых установок для нагрева приведены в таблице 4.4), расположенные по секторам фундамента с каждой стороны, нагревающие длину плети до 25 м.

Таблица 4.4 – Технические характеристики трансформаторов для нагрева арматуры

Тип, трансформатора, климатическое исполнение	Номинальное напряжение трансформатора кВ	Номинальный ток, $I$ , А	Мощность, $P$ , кВт	Габаритные размеры трансформатора мм			Масса трансформатора кг
				$L$	$B$	$H$	
ТЗ-800, трансформатор закалочный (Новозыбковский МЗ)	0,8	2000	1600	1720	1135	1860	2750
ТМГ21-1600/6 У1 (ХЛ1), трансформатор масляный герметичный (Минский ЭТЗ)	6	2000	1600	2160	1260	1935	3860
ТМГ21-1600/10 У1 (ХЛ1), трансформатор масляный герметичный (Минский ЭТЗ)	10	2000	1600	2160	1260	1935	3860

Трансформаторы за определенное время прогревают постепенно по 3 плети и передвигаются к следующей партии для дальнейшего нагрева (рисунок 4.5).



1 – трансформатор нагрева; 2 – продольная арматура; 3 – поперечная арматура

Рисунок 4.5 – Схематизация процесса нагрева арматурного каркаса

#### **4.3.4 Отпуск натяжения арматуры**

Отпуск натяжения арматуры должен производиться при достижении бетоном прочности.

Передача предварительного напряжения арматуры на бетон производится после удаления упоров и анкерных закреплений, препятствующих деформации и смещению изделия при его обжатии.

Отпуск натяжения арматуры производится путем поочередной обрезки стержней газокислородным пламенем портативными устройствами для резки типа ESAB COMBIREX DX, ESAB SGX, P1 «ДОНМЕТ» 150П и др. Перерезать стержни необходимо после их прогрева, ближе к торцу изделия с таким расчетом, чтобы длина выступающего из изделия стержня не превышала  $1d$ .

После проведения данных работ получаем усиленную конструкцию плитного фундамента резервуара.

#### **4.4 Рекомендации по выбору типа фундамента при строительстве вертикальных стальных резервуаров**

Изучение материалов наблюдений за деформациями грунтов в основании резервуаров, указывает о значительном влиянии перемещений грунтов на осадку резервуаров и деформацию фундаментов.

Применительно к строительству резервуаров на слабонесущих грунтах для предотвращения неравномерных осадок разработаны ряд технологических мероприятий по усилению грунтов. Однако, данные мероприятия материалоемки и трудозатратны, а в ряде случаев не эффективны, в виду невозможности прогнозирования поведения грунтовых условий на весь срок эксплуатации буферных емкостей. Поэтому необходимо использовать качественные фундаменты для резервуаров, способные удержать сооружение в процессе эксплуатации при непредсказуемом поведении грунтов.

Существующие отечественные конструкции фундаментов в процессе эксплуатации довольно уязвимы к неравномерной осадке основания и циклическим нагрузкам от оперативного хранения углеводородов в емкости, а в ряде случаев деформируются в виде седлообразной эпюры с максимальной точкой прогиба в центре.

Выбор конкретного типа фундамента зависит от геологических условий строительства, нагрузок и объемов емкости. Для обеспечения технико-экономической эффективности чаще всего для крупногабаритных резервуаров применяется плитный фундамент, который как показал анализ аварийности резервуаров, имеет конструктивные несовершенства, и в результате эксплуатации подвергается разрушению.

Зарубежный опыт теоретических исследований показал высокую эффективность усиления железобетонных изделий ответственного назначения путем их армирования материалами с эффектом памяти. Данные элементы усиления способствуют увеличению несущей способности железобетонных конструкций и увеличению трещиностойкости конструкции, в виду использования технологии предварительного напряжения. Кроме того, имеется опыт практического применения армирования материалами с ЭПФ для усиления пролетов мостов, железобетонных колонн старинных церквей и фронтонов зданий.

Проведенные исследования подтверждают эффективность усиления железобетонных фундаментов арматурой с памятью, ограничивающих возможность проявления вертикальных перемещений в виде седлообразной эпюры, с целью снижения общей и неравномерных осадок резервуара.

На наш взгляд перспективным направлением решения проблемы повышения несущей способности резервуаров, являются методы устройства армированных плитных фундаментов с арматурных каркасом из сплавов с ЭПФ. Использование армирующих элементов для повышения прочности плитного фундамента резервуара и уменьшения их неравномерных осадок может оказаться

весьма эффективным на площадках, сложенных толщей слабых грунтов, чем и представлены современные площадки строительства резервуарных парков.

К тому же такое армирование ведет к уменьшению материалоемкости самой плиты, поскольку напряжения, которые передаются бетону значительно выше значений при традиционного армирования.

В связи с вышеизложенным, предложена инструкция по технологии сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с памятью для вертикальных стальных резервуаров, где армирующие элементы выполняют функцию упрочнения бетонной конструкции, предотвращая ее прогибы от перемещения грунта и сливо-наливных операций резервуара.

В зависимости от конкретных инженерно-геологических условий строительства и объема резервуара, на основе многочисленных публикаций научно-технической литературы области применения фундаментов и полученных результатов исследований в данной работе, предложен алгоритм выбора типа основания и фундамента для вертикальных стальных резервуаров (рисунок 4.6).

Разработанный алгоритм позволяет осуществить выбор типа основания и основного несущего элемента резервуара – фундамента для существующих различных типов грунтовых условий и вместимости резервуара, что является основной задачей при проектировании и строительстве объекта повышенной опасности.

#### **4.5 Выводы по главе 4**

1. Разработана методика сооружения бетонного армированного фундамента резервуара с использованием стержней из материала с ЭПФ, с целью повышения несущей способности РВС, способствующих снижению прогиба фундаментной плиты и недопустимых неравномерных осадок сооружения, применимых в качестве монолитной фундаментной конструкции для нефтяных резервуаров, работающих в сложных инженерно-геологических условиях.



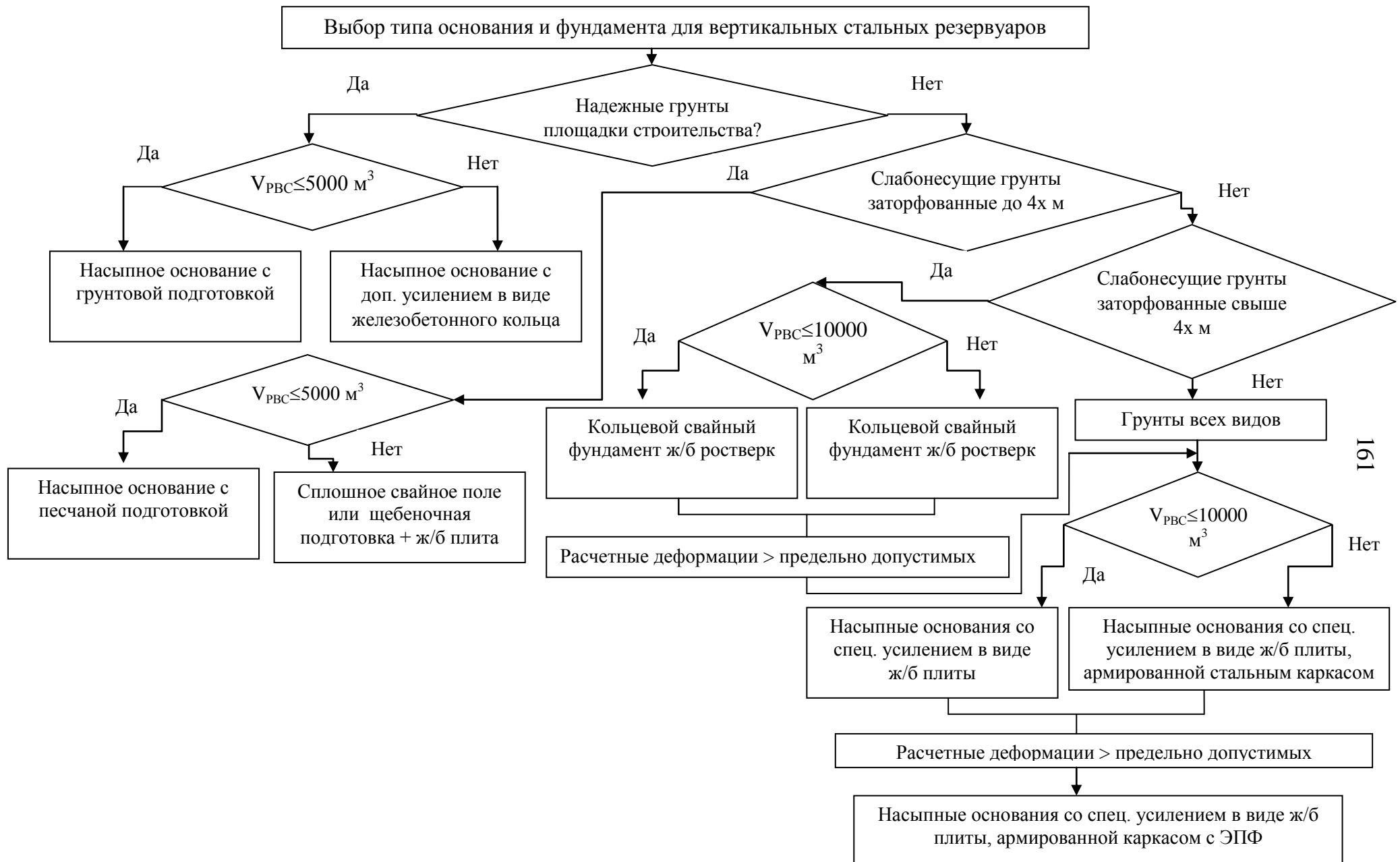


Рисунок 4.6 – Алгоритм выбора типа основания и фундамента для вертикальных стальных резервуаров

2. Предложена конструкция плитного фундамента стального вертикального резервуара с использованием преднапряженных арматурных стержней из материалов с ЭПФ, которая позволяет:

- снизить местные неравномерные осадки под стенкой резервуара в 2,1-2,3 раза по сравнению с традиционными фундаментными плитами;
- уменьшить прогиб плиты, за счет установки преднапряженных стержней ЭПФ.

3. Разработан алгоритм выбора типа основания и фундамента для вертикальных стальных резервуаров, позволяющий подобрать данные несущие элементы в зависимости от конкретных инженерно-геологических условий строительства и объема резервуара, с целью предотвращения неравномерной осадки конструкции и надежной эксплуатации технологических емкостей.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате проведенных экспериментальных исследований определен состав сплава с ЭПФ – Ni45-Ti45-Nb10, подходящий под эксплуатационные условия работы арматурных стержней плитного фундамента резервуара и установлена функциональная зависимость напряжений, возникающих в выбранном сплаве от параметра деформации, варьируемого в пределах  $0\% \leq \varepsilon_n \leq 2,2\%$  в интервале рабочих температур фазовых переходов.

2. Разработана методика расчета усиления плитного фундамента, армированного стержнями из материалов с ЭПФ, при помощи которой определены рациональные параметры армирования плиты: коэффициент армирования в пределах  $2,8\% \leq \mu \leq 5,6\%$ , деформация стержней, обусловленная эффектом памяти в пределах  $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34\%$ , генерируемые напряжения ( $\sigma_b, \sigma_a$ ), для усиленной конструкции фундамента и арматурных стержней из материала с ЭПФ РВС, работающего в сложных инженерно-геологических условиях.

3. Проведено численное моделирование системы «резервуар-фундамент-основание» для двух вариантов армирования плиты, на основе полученных данных проведена оценка и сопоставительный анализ деформаций плитного фундамента при устройстве сравниваемых арматурных каркасов, в результате установлено, что при использовании арматурного каркаса из материала с ЭПФ присутствует снижение прогибов фундаментной плиты в 1,6 раза по сравнению с традиционной технологией армирования.

4. Разработана методика сооружения бетонного фундамента, армированного каркасом из материала с ЭПФ, включая алгоритм выбора типа основания и фундамента для РВС, реализация которой позволяет снизить неравномерную осадку сооружения в 2,1-2,3 раза и предотвратить сверхнормативные прогибы плитного фундамента от перемещений грунтового массива и сливо-наливных операций резервуаров, работающих в условиях слабых и неоднородных грунтов.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

АС	–	агрегат сварочный;
МКЭ	–	метод конечных элементов;
МН	–	мартенситная неупругость;
МП	–	мартенситные превращения;
НДС	–	напряженно-деформированное состояние;
ОМП	–	обратные мартенситные превращения;
ОЦКП	–	ортогональный центрально-композиционный план;
ПАО	–	Публичное акционерное общество;
ПК	–	программный комплекс;
ППБ	–	правила промышленной безопасности;
ППП	–	пластичность прямого превращения;
ППР	–	проект производства работ;
РВС	–	резервуар вертикальный стальной;
РВСП	–	резервуар вертикальный стальной с понтоном;
РП	–	резервуарный парк;
СКУ	–	система контроля и управления;
СПФ	–	сплавы с эффектом памяти формы;
ТБ	–	техника безопасности;
ТН	–	никелид титана;
ТУ	–	технические условия;
ТУМП	–	термоупругие мартенситные превращения;
ТЭК	–	топливно-энергетический комплекс;
ЭПФ	–	эффект памяти формы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – Москва : Наука, 1976. – 279 с.
2. Андронов, И. Н. Влияние термомеханической тренировки на поведение сплава ТН-1 в условиях проявления циклической памяти формы / И. Н. Андронов, С. В. Крючков, С. К. Овчинников // Вестник Самарского гос. ун-та. Физ-мат. – Самара : Изд-во СамГУ, 2004. – С. 97-100.
3. Андронов, И. Н. Компьютерное моделирование конструкции плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов с использованием арматуры из материалов с памятью / И. Н. Андронов, М. В. Терентьева // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 3. – С. 46-54.
4. Андронов, И. Н. Проектировочный расчет упрочнения резервуаров сжиженного природного газа путем армирования стержнями из материалов с памятью / И. Н. Андронов, М. В. Терентьева // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2017. – № 6. – С.32-37.
5. Андронов, И. Н. Поведение никелида титана в условиях термоциклирования под нагрузкой / И. Н. Андронов, Д. Н. Фастовец, С. К. Овчинников // Сборник научных трудов : Материалы научно-технической конференции (15-16 апреля 2002). – Ухта : Изд-во УГТУ, 2003. – С. 415-418.
6. Андронов, И. Н. Сравнительный анализ работоспособности никелида титана в условиях кручения и растяжения / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, В. А. Лихачев [и др.] // Физика прочности и пластичности материалов: тезисы докладов XIV Международная конференция (27-30 июня 1995 г.). – Самара : Изд-во СГТУ, 1995. – С. 308.
7. Андронов, И. Н. Эффекты обратимого формоизменения никелида титана при термоциклировании / И. Н. Андронов, С. К. Овчинников // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – № 5.– С. 28-30.

8. Афанасьев, В. А. Сооружение газохранилищ и нефтебаз / В. А. Афанасьев, В. А. Березин. – Москва : Недра, 1986.- 334 с.
9. Афонская, Г. П. Влияние дефектов на несущую способность резервуаров, эксплуатируемых в условиях Севера: диссертация на соискание степени кандидата технических наук : 01.02.06 / Г. П. Афонская. – Якутск, 2000. – 141 с.
10. Байхельт, Ф. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход / Ф. Байхельт, Н. Франкен. – Москва : Радио и связь, 1988. - 92 с.
11. Барская, Г. Б. Анализ причин неравномерных осадок резервуаров в Западной Сибири / Г. Б. Барская // Известия вузов. Нефть и газ. - 2004. - № 23. - С. 36-38.
12. Бартоломей, Л. А. Прогноз осадок сооружений с учетом совместной работы основания, фундамента и надземных конструкций: автореферат диссертаций на соискание степени доктора технических наук: 05.23.02 / Л. А. Бартоломей. – Пермь, 2004. – 32 с.
13. Белобородов, А. В. Оценка качества построения конечно-элементной модели в ANSYS / А. В. Белобородов // Материалы II Российской межвузовской научно-технической конференции "Компьютерный инженерный анализ". – Екатеринбург : Изд-во УГТУ-УПИ, 2005. - С. 78-81.
14. Беляев, С. П. Обратимый эффект памяти формы после термоциклической обработки под напряжением / С. П. Беляев, В. А. Ермолаев, С. Л. Кузьмин [и др.]; ред. журн. «Вестн. ЛГУ» (мат., мех., астроном.). – Ленинград, 1985. – 37 с. – Деп. в ВИНТИ, № 1344.
15. Беляев, Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б. И. Беляев, В. И. Корниенко. – Москва : Стройиздат, 1968. – 205 с.
16. Березин, В. Л. Вопросы эксплуатационной надежности резервуаров на нефтеперерабатывающих заводах / В. Л. Березин, А. А. Мацкин, А. Г. Гумеров, Э. М. Ясин. – Москва : ЦНИИТЭнефтехим, 1971. – 67 с.

17. Березин, В. Л. Прочность и устойчивость резервуаров и трубопроводов / В. Л. Березин, В. Е. Шутов. – Москва : Недра, 1973. – 223 с.

18. Бледнова, Ж. М. Повышение прочности и циклической долговечности изделий комбинированными методами обработки : Автореферат диссертации на соискание степени доктора технических наук / Ж. М. Бледнова. – Киев, 1989. – 35 с.

19. Бледнова, Ж. М. Прогнозирование циклической долговечности бинарных сплавов и материалов с покрытиями / Ж. М. Бледнова // Заводская лаборатория. – 1988. – № 7. – С. 76-81.

20. Богомолов, А. Н. Исследование несущей способности и осадок основания системы пяти параллельных незаглубленных фундаментов на мелкогабаритных моделях / А. Н. Богомолов // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – № 20 (39). – С. 21–27.

21. Болдырев, Г. Г. Управление деформациями гибких фундаментов / Г. Г. Болдырев, С. А. Болдырев // НИИ «Геотек». Системы и приборы для испытаний. – Режим доступа: <http://nppgeotek.ru/upload/iblock/a7a/a7acde044c7eef2bf2406d7b67df1e8a.pdf>.

22. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – Москва : Наука, 1983. - 416 с.

23. Буренин, В. А. Исследование влияния неравномерных осадок на напряженно-деформированное состояние стального вертикального цилиндрического резервуара : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. А. Буренин. – Уфа, 1981. - 157 с.

24. Буслаева, И. И. Оценка несущей способности резервуаров при неравномерных осадках основания в условиях Севера: диссертация на соискание ученой степени кандидат технических наук / И. И. Буслаева. - Якутск, 2004. - 134 с.

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

26. Васильев, Г.Г. Нгуен Ф.А. Обеспечение устойчивости нефтегазовых сооружений в инженерно-геологических и гидрогеологических условиях территории Вьетнама / Г. Г. Васильев, Ф. А. Нгуен // Трубопроводный транспорт (теория и практика). – 2016. – № 5. – С. 41-43.

27. Вейман, С. М. Деформация, механизм явления и другие характеристики сплавов с ЭЗФ / С. М. Вейман // Эффект памяти формы в сплавах. – Москва : Металлургия. 1979. - С. 8-35.

28. Веревкин, Р. И. Повышение надежности резервуаров, газгольдеров и их оборудования / Р. И. Веревкин, Е. Л. Ржавский. – Москва : Недра, 1980. - 284 с.

29. Винтайкин, Е. З. Эффект памяти формы в сплавах марганец-никель / Е.З. Винтайкин, В.А. Удовенко, Л. Д. Гогуга // Доклады АН СССР, 1977. – Т. 234. – № 6. – С. 1309-1312.

30. Влияние ВТМО на структуру и свойства сплава титан – никель / С. Д. Прокошкин, Л. М. Капуткина, И. Ю. Хмелевская, Л. П. Фаткулина, С. В. Олейникова // Материалы с эффектом памяти и их применение : материалы семинара. – Новгород : НПИ, 1989. – С. 48-50.

31. Влияние осевого деформирования и осевых нагрузок на работоспособность никелида титана в условиях кручения / И. Н. Андронов, Н. П. Богданов, В. А. Лихачев и др. // Физика прочности и пластичности материалов: тез. докл. XIV Международная конференция (27 – 30 июня 1995 г.). – Самара : Изд-во СГТУ, 1995. – С. 306-307.

32. Волков, А. Е. Механика пластичности материалов с фазовыми превращениями / А. Е. Волков, В. А. Лихачёв, А. И. Разов // Вестник ЛГУ. – 1984. – № 19. – Вып. 4. – С. 30-37.

33. Галеев, В. Б. Аварии резервуаров и способы их предупреждения / В. Б. Галеев, Д. Ю. Гарин, Ю. А. Фролов. - Уфа, 2004. - 164 с.



34. Галеев, В. Б. Устройство оснований резервуаров, сооружаемых на слабонесущих грунтах / В. Б. Галеев, В. В. Любушкин, Н. И. Коновалов. – Москва : ВНИИОЭНГ, 1989. - 45 с.

35. Галеев, В. Б. Напряженно-деформированное состояние резервуаров, построенных на слабых переувлажненных грунтах: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук: 05.15.13 / Галеев Виль Бареевич. – Тюмень, 1987. – 668 с.

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

37. Горбунов-Посадов, М. И. Расчет конструкций на упругом основании / М. И. Горбунов-Посадов. – Москва : Стройиздат, 1973. - 134с.

38. Горбунов-Посадов, М. И. Узловые вопросы расчета оснований и опирающихся на них конструкций в свете современного состояния механики грунтов / М. И. Горбунов-Посадов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1982. – № 4. – С. 25-27.

39. ГОСТ 23735-2014. Смеси песчано-гравийные для строительных работ. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015.

40. ГОСТ 31385-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2010.

41. ГОСТ Р 52910-2008. Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2008.

42. ГОСТ 54257-2010. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2011.

43. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2015.

44. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2016.

45. ГОСТ 5781-82. Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия. – Москва : Стандартинформ, 1982.

46. ГОСТ Р 57997-2017. Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2018.

47. ГОСТ 34329-2017. Опалубка. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2018.

48. Гумеров А. Г. К оценке несущей способности резервуарных конструкций / А. Г. Гумеров, Э. М. Ясин // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 1970. - № 7. - С. 3-5.

49. Давыдов, С. С. Расчет фундаментальных плит на смешанном основании / С. С. Давыдов // Основания, фундаменты и механика грунтов. - 1970. - № 4. - С. 5-8.

50. Димов, Л. А. Деформированное состояние плитных фундаментов резервуаров для нефти и нефтепродуктов / Л. А. Димов // Геотехника. – 2015. – №1. – С. 4-8.

51. Димов, Л. А. Проектирование плитных фундаментов резервуаров для жидких углеводородов // Газовая промышленность. - 2016. - № 1. - С. 114-117.

52. Егоров, Е. А. Особенности работы и инженерный расчет вертикальных цилиндрических резервуаров / Е. А. Егоров // Нефтяное хозяйство. - 1977. - № 12. - С. 48-59.

53. Жданов, Р. А. Основания и фундаменты резервуаров: конструкции, расчеты, строительство / Р. А. Жданов, В. В. Любушкин. – Уфа : Изд-во УНИ, 1991. - 78 с.

54. Жемочкин, В. Н. Практические методы расчета фундаментных балок и плит на упругом основании / В. Н. Жемочкин, А. П. Сеницын. – Москва : Стройиздат, 1972. - 165с.

55. Зверевич, Т. М., К методу натуральных измерений вертикальных перемещений нефтяных резервуаров большой емкости, возводимых на слабых грунтах / Т. М. Зверевич, Р. А. Мангушев // Нефтепромысловое строительство. - 1977. - № 5 - С. 42.

56. Землеруб, М. Л. Сегментно-сферический фундамент для РВС, оборудованный системой контроля и управления пространственным положением / М. Л. Землеруб, М. Р. Терегулов // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. – 2017. - № 2. - С. 32-34.

57. Землянский, А.А., Инновационный способ энергоэффективного кольцевого армирования слабого грунта под экологически опасные и ядерные объекты / А. А. Землянский, Л. А. Землянский, К. А. Землянский // Молодой ученый. - 2015. - № 23 (103). - С. 46-50.

58. Землянский, А. А. Принципы конструирования и экспериментально-теоретические исследования крупногабаритных резервуаров : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.23.01, 05.23.02 / Землянский Анатолий Андреевич. – Балаково, 2006. – 417 с.

59. Инженерный анализ в ANSYS Workbench : учебное пособие / В. А. Бруйка [и др.] – Самара : Изд-во СамГТУ, 2010. - 271 с.

60. Кауфман, Л. Термодинамика и кинетика мартенситных превращений / Л. Кауфман, М. Коэн // Успехи физики металлов. – 1961. – Т. 4. – С. 192-289.

61. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. – Москва : Физматлит, 2006. - 816 с.

62. Кондрашева, О. Г. Причинно - следственный анализ аварий вертикальных стальных резервуаров / О. Г. Кондрашева, М. Н. Назарова // Нефтегазовое дело. – 2004. – №2. – С. 36-43.

63. Коновалов, М. Н. Повышение эффективности силового привода лесозаготовительного оборудования применением материалов с эффектом памяти формы: диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук: 05.21.01 / Коновалов Максим Николаевич. – Ухта, 2006. – 135 с.

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

65. Коновалов, П. А. Устройство фундаментов на заторфованных грунтах / П. А. Коновалов. – Москва : Стройиздат, 1980. – 160 с.

66. Концепция анализа риска резервуарных конструкций / С. Г. Иванцова, А. И. Рахманин, М. А. Тарасенко, П. Ф. Сильницкий // Управление качеством в нефтегазовом комплексе. - 2011. - Т. 3. - С. 31-35.

67. Корепанова, В. С. Расчётно-экспериментальный метод определения деформационных характеристик при переходных процессах в сплавах с памятью формы : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. С. Корепанова. – Ухта, 2011. – 147 с.

68. Корнилов, И. И. Исследование системы TiNi-TiCo / И.И. Корнилов, Е.В. Качур, О.К. Белоусов // Известия АН СССР. Металлы. – 1975. – № 2. – С. 209-210.

69. Кузьмин, С. Л. Влияние режимов термоциклирования на эффект обратной памяти формы / С. Л. Кузьмин, В. А. Лихачёв, О. А. Образцова // Проблемы прочности. – 1986. – № 2. – С. 30-32.

70. Кузьмин, С. Л. Температурно-силовые критерии псевдоупругости / С. Л. Кузьмин, В. А. Лихачёв // Физика металлов и металловедение. – 1982. – Т. 53. – Вып. 5. – С. 886-891.

71. Куприянов, В. М. Повышение эффективности эксплуатации вертикальных стальных резервуаров путем внедрения новых конструктивных решений в основания фундаментов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: 25.00.19 / Куприянов Василий Михайлович. – Уфа, 2007. – 131 с.

72. Куприянов, В. М. Современное состояние вопроса проектирования и строительства оснований резервуаров на слабонесущих грунтах // Трубопроводный транспорт – 2006 : тез. доклады Международной учебно-научно-практической конференции. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2006. - С. 109-110.

73. Куприянов, В. М. Классификация оснований и фундаментов под резервуары типа РВС / В. М. Куприянов, Ю. А. Фролов // Проблемы строительного комплекса России : материалы IX Международной научно-практической конференции. – Уфа : Изд-во УГНТУ, 2005. - С. 79-80.

74. Курдюмов, Г. В. О термоупругом равновесии при мартенситных превращениях / Г. В. Курдюмов, Л. Г. Хандорс // Доклады АН СССР. – 1949. – Т. 66, № 2. – С. 211–215.

75. Лазебник, Г. Е. Местное уплотнение грунта с целью улучшения работы фундамента / Г. Е. Лазебник // Материалы международной научно-практической конференции "ГЕОТЕХНИКА-99". – Пенза, 1999.

76. Лихачев, В. А. Влияние напряжений и деформаций на характеристические температуры мартенситных превращений материалов с эффектом памяти формы / В. А. Лихачев, Ю. И. Патрикеев; ред. журн. «Вестн. ЛГУ» (мат., мех., астроном.). – Ленинград, 1984. – 45 с. – Деп. в ВИНТИ 12.07.84, № 5033.

77. Лихачёв, В. А. Структурно-аналитическая теория прочности / В. А. Лихачёв, В. Г. Малинин. – Санкт-Петербург : Наука, 1993. – 471 с.

78. Лихачёв, В. А. Эффект памяти формы / В. А. Лихачёв, С. Л. Кузьмин, З. П. Каменцева. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1987. – 216 с.

79. Лушников, В. В. Использование мирового опыта при проектировании и строительстве фундаментов высотных зданий с учетом геологических условий Екатеринбурга / В. В. Лушников // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2009. – № 1. – С. 74-80.

80. Мазур, И. И. Безопасность трубопроводных систем / И. И. Мазур, О. М. Иванцов. – Москва : ЕЛИМА, 2004. - 1104 с.

81. Малинин, В. Г. Моделирование процессов создания термомеханических соединений с помощью муфт из материалов с памятью формы методами структурно-аналитической мезомеханики / В. Г. Малинин, Ю. Ю. Муссауи //

Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – 2015. – №3 (311) –С. 36-47.

82. Малинин, Г. В. Деформация мартенситной неупругости при сложных траекториях изотермического нагружения в материалах с эффектом памяти формы / Г. В. Малинин // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 6 (44). – С. 88-96.

83. Малинин, Г.В. Применение метода конечных элементов для расчета статически неопределимой стержневой системы, выполненной из материала с эффектом памяти формы / Г. В. Малинин // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2015. - № 4 (312). - С. 3-10.

84. Мовчан, А.А. Микромеханический подход к описанию деформации мартенситных превращений в сплавах с памятью формы / А.А. Мовчан // Известия АН. Механика твёрдого тела. – 1995. - № 1. – С. 197-205.

85. Мурзенко, Ю. Н. Несущая способность железобетонных фундаментных плит с учетом перераспределения усилий / Ю. Н. Мурзенко, А. А. Цесарский // Бетон и железобетон. – 1972. – № 9. – С. 35-37.

86. Мурзенко, Ю. Н. Результаты экспериментальных исследований характера распределения нормальных контактных напряжений по подошве жестких фундаментов на песчаном основании / Ю. Н. Мурзенко // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1965. – №2. – С. 1-4.

87. Мустафаев, А. А. Расчет оснований и фундаментов на просадочных грунтах : учеб. пособие для вузов / А.А. Мустафаев. – Москва : Высшая школа, 1979. – 368 с.

88. Обеспечение равномерной осадки основания составного плитного фундамента / И. Л. Бартоломей, О. А. Богомолова, А. Н. Богомолов, А. В. Соловьев // Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении : материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Новочеркасск : Изд-во ЮРГПУ(НПИ) имени М. И. Платова, 2012. – С. 128-133.

89. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию / Г. Г. Хоперский, З. Н. Овчар, А. А. Тарасенко, Н. В. Николаев // Известия вузов. Нефть и газ. - 1997. - № 5. - С. 80-85.

90. Основания и фундаменты резервуаров / Ю. К. Иванов, П. А. Коновалов, Р. А. Мангушев, С. Н. Сотников. – Москва : Стройиздат, 1989. – 95 с.

91. Основы совместных расчетов зданий и оснований / В. М. Улицкий, А. Г. Шашкин, К. Г. Шашкин, В. А. Шашкин. – Санкт-Петербург : Георекострукция, 2014. – 328 с.

92. Особенности напряженно-деформированного состояния грунтового основания составного плитного фундамента / О. А. Богомоллова, И. Л. Бартоломей, Б. С. Бабаханов, Р. С. Нестеров, А. В. Соловьев // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – 2012. – № 28. – С. 36-46.

93. Пат. 2020233 Российская Федерация, МПК Е 04 G 21/12. Способ создания предварительного напряжения в железобетонной конструкции / Ю. С. Саркисов, О. Г. Кумпяк, Г. Д. Семенова, В. Э. Гюнтер, В. И. Итин, Л. А. Монасевич. - Оpubл. 30.09.1994.

94. Пат. 2328576 Российская Федерация, МПК Е 02 D 27/12. Способ возведения плитно-свайного фундамента / О. А. Шулятьев, А. И. Харичкин, В. С. Лесницкий, В. П. Петрухин. - заявл. 09.05.2006; опубл. 03.10.2008 ; Бюл. № 05.

95. Пат. 2619578 Российская Федерация. Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции / И. Н. Андронов, С. Н. Беляев, Н. С. Майорова, Е. В. Семиткина, М. В. Терентьева. - заявл. 29.10.15, опубл. 16.05.17, Бюл. № 14.

96. Правила устройства вертикальных цилиндрических стальных резервуаров для нефти и нефтепродуктов (ПБ 03-381-00). – Москва : Госгортехнадзор России, 2001.

97. Пушин, В. Г. Предпереходные явления и мартенситные превращения / В. Г. Пушин, В. В. Кондратьев, В. Н. Хачин. – Екатеринбург : Изд-во УрО РАН, 1998. – 368 с.

98. Разработка надежной преднапряженной конструкции фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов в сложных инженерно – геологических условиях / И. Н. Андронов, Н. С. Беляев, А. В. Сальников, Н. С. Майорова, М. В. Терентьева [и др.] // Нефтегазовое дело. – 2016. – Т. 14, № 1. – С. 123-129.

99. Разов, А. И. Реверсивная обратимая память формы в никелиде титана / А. И. Разов, А. С. Моторин, Г. Г. Нахатова // Вестник Нижегородского университета имени Н. И. Лобачевского. - 2011. - № 4 (часть 4). - С. 1733–1735.

100. РД-16.01-60.30.00-КТН-026-1-04. Нормы проектирования стальных вертикальных резервуаров для хранения нефти объемом 1000-50000 м<sup>3</sup>. – ОАО АК «Транснефть», 2004.

101. РД-23.020.00-КТН-018-14. Магистральный трубопроводный транспорт нефти и нефтепродуктов. Резервуары стальные вертикальные для хранения нефти и нефтепродуктов объемом 1000-50000 куб. м. Нормы проектирования. – ОАО АК «Транснефть», 2014.

102. РД-23.020.00-КТН-170-13. Требования к монтажу металлических конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов на объектах нового строительства, технического перевооружения и реконструкции. – ОАО АК «Транснефть», 2013.

103. РД-91.200.00-КТН-180-14. Методика по выбору типов фундаментов зданий и сооружений объектов магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в зависимости от инженерно-геологических условий площадки строительства. – ОАО АК «Транснефть», 2014.

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

105. СА-03-002-09. Правила проектирования, изготовления и монтажа РВС для нефти и нефтепродуктов / Российская ассоциация экспертных организаций



техногенных объектов повышенной опасности; ассоциация «Ростехэкспертиза». – Москва, 2008. – 216 с.

106. Сафарян, М. К. Металлические резервуары и газгольдеры / М. К. Сафарян. – Москва : Недра, 1987. - 200с.

107. Симвулиди, И. А. Расчет инженерных конструкций на упругом основании / И.А. Симвулиди. – Москва : Госстройиздат, 1978. – 475 с.

108. Скибин, Г.М. Исследование взаимодействия грунтового основания и ленточных фундаментов и оптимизация проектных решений: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.23.02 / Скибин Геннадий Михайлович. – Новочеркасск, 1998. – 24 с.

109. Современный эксперимент : подготовка, проведение, анализ результатов / В. Г. Блохин, О. П. Глудкин, А. И. Гуров, М. А. Ханин. – Москва : Радио и связь, 1997. – 232 с.

110. Соболев, Д. Н. Изгиб балки на нелинейном статическом неоднородном основании / Д. Н. Соболев, А. К. Юсупов // Строительная механика и расчет сооружений. - 1975. - № 5. - С. 29-33.

111. Сорочан, Е. А. Исследование работы железобетонных фундаментных блоков / Е. А. Сорочан // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1981. – № 2. – С. 8-11.

112. Сотников С. Н., Измерение вертикальных перемещений поверхности основания цилиндрического резервуара / С. Н. Сотников, Р. Л. Мангушев // Труды ЛИСИ. – Ленинград : ЛИСИ, 1978. - С. 31-36.

113. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* . – Москва : ФГУП Стандартинформ, 1990. - 80 с.

114. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* - Москва : ОАО «ЦПП», 2011. – 161 с.

115. СП 49.13330.2010. Безопасность труда в строительстве. Часть 1. Общие требования. Актуализированная редакция СНиП 12-03-2001 – Москва : Стандартинформ, 2018. – 146 с.

116. СП 52-102-2004. Предварительно напряженные железобетонные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 – Москва : ФГУП ЦПП, 2005. – 43 с.

117. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003 – Москва : ОАО «ЦПП», 2012. – 147 с.

118. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3-03.01-1987 – Москва : ОАО «ЦПП», 2012. – 150 с.

119. Строкова, Л. А. Научно-методические основы численного прогноза деформирования грунтовых оснований : диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Строкова Людмила Александровна. – Иркутск, 2011. – 161 с.

120. Структура и свойства сплавов TiNi после термомеханической обработки / С. Д. Прокошкин, Л. М. Капуткина, И. Ю. Хмелевская, А. А. Кадников, С. А. Бондарева // Функционально-механические свойства сплавов с мартенситным каналом неупругости: XXVII межреспубликанский семинар «Актуальные проблемы прочности» (15-20 сентября 1992). – Ухта, 1992. – С. 151-154.

121. Структурные фазовые превращения и свойства NiTi и NiTiFe / В.Г. Пушин, В.Н. Хачин, А.С. Савинов и др. // ДАН СССР. Физика. – 1987. – Т. 277. – № 6. – С. 84-87.

122. Структурный механизм эффекта памяти формы в сплавах MnCu / Е. З. Винтайкин, Д. Ф. Литвин, С. Ю. Макушев [и др.] // Доклады АН СССР, 1976. – Т. 229. – № 3. – С. 597-600.

123. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справочное пособие / В. В. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова [и др.] ; под. общ. ред. В. В. Налимова. – Москва : Metallurgiya, 1982. – 752 с.

124. Тарасенко, А. А., Численное моделирование процесса деформирования резервуара при развитии неравномерных осадок / А. А. Тарасенко, П. В. Чепур, Д. А. Тарасенко // Нефтяное хозяйство. - 2015. - № 4. - С. 88-91.

125. Тарасенко, А. А. Напряженно-деформированное состояние крупногабаритных резервуаров при ремонтных работах: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 05.15.13 / Тарасенко Александр Алексеевич. – Тюмень, 1991. – 253 с.

126. Тетиор, А. Н. Прогрессивные конструкции фундаментов для условий Урала и Тюменской области / А. Н. Тетиор. - Свердловск: Средне-Уральское изд-во, 1971. – 91 с.

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

128. Ханухов, Х. М. Нормативно - техническое и организационное обеспечение безопасной эксплуатации резервуарных конструкций / Х. М. Ханухов, А. В. Алипов // Предотвращение аварий зданий и сооружений : электронный журнал. – <http://www.pamag.ru/prensa/nobezis>.

129. Хачин, В. Н. Мартенситная неупругость В2 соединений титана : диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / В. Н. Хачин. – Томск, 1987. – 278 с.

130. Хачин, В. Н. Неупругая деформация никелида титана, претерпевающая термоупругое мартенситное превращение / В. Н. Хачин, В. Э. Гюнтер, Л. А. Соловьев // ФММ. – 1975. – Т. 39. – № 3. – С. 605-610.

131. Хачин, В. Н. Никелид титана : структура и свойства / В. Н. Хачин, В. Г. Пушкин, В. В. Кондратьев. – Москва : Наука, 1992. – 160 с.

132. Хмелевская, И. Ю. Новые физические и механические принципы в компьютерном конструировании материалов с эффектом памяти формы / И. Ю. Хмелевская, Т. В. Морозова, М. И. Лагунова // Актуальные проблемы прочности : материалы российско-американского семинара, 13-17 ноября 1995 г.; Ч. II. – Санкт-Петербург, 1995. – С. 42-49.

133. Хоперский, Г. Г. Исследование напряженно-деформированного состояния стенки резервуара при неравномерных осадках основания : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г. Г. Хоперский. – Тюмень : ТюмГНГУ, 1998. – 197 с.

134. Хусаинов, М. А. Исследование функциональных свойств спирали с памятью формы при наличии пружины смещения / М. А. Хусаинов, С. В. Ефремов // Научные труды IV Международного семинара "Современные проблемы прочности" имени В. А. Лихачева (18-22 сентября 2000 г., Старая Русса). Т. 2. - Великий Новгород : НГУ им. Ярослава Мудрого, 2001. - С. 249–251.

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

136. Чепур, П. В. Напряженно-деформированное состояние резервуара при развитии неравномерных осадок его основания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук : 25.00.19 / Чепур Петр Владимирович. – Москва, 2015. – 181 с.

137. Шулятьев, С. О. Влияние несущего каркаса здания на напряженно-деформированное состояние фундаментной плиты: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук: 05.23.02 / Шулятьев Станислав Олегович. - Москва, 2013. – 24 с.

138. Шутов, В. Е. Оптимизация резервуарных конструкций для хранения нефтепродуктов : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / В. Е. Шутов. – Москва, 1983. - 22 с.

139. Эффекты памяти формы и их применение в медицине / Э. В. Гюнтер [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1992. - 741 с.
140. Эффект памяти формы и тонкая структура мартенсита в сплаве CuAlMn / В. А. Лободюк, В. В. Мартынов, В. К Ткачук [и др.]. – Металлофизика. – 1976. – № 63. – С. 55-60.
141. Явление многократно-обратимой памяти формы и реактивные напряжения в сплаве ТН-1 / Андронов И.Н., Гуревич А.С., Лихачев В.А., Недбаев П.И. // Актуальные проблемы прочности: Материалы XXIV Всесоюзного семинара. – Днепропетровск: ДХТИ, 1990. С. 147-148.
142. Ямамото, С. Напряжения и деформации, образующиеся в цилиндрических резервуарах вследствие неравномерного оседания основания / С. Ямамото, К. Кавано // Перевод с японского языка статьи из журнала “Нихои Кикай Гаккайси”, 1977, т.80, №703. С. 534-539.
143. Ямамото, С. Расследование причины аварии нефтехранилища / С. Ямамото, К. Кавано. - Сан-Диего, Калифорния, 1976.
144. API 650 Сварные стальные резервуары для хранения нефти. – США, Вашингтон: Издательская служба API, 2005.
145. API 653 Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction, Fourth Edition. – USA, Washington, 2009.
146. Balaam, M.P. Grownsettlement analysis of soft clay reinforced with granular piles / M. P. Balaam // Proc. 5 – the Southeast Asian Conference On Soil Engineering. – Thailand, 1977. – P. 81-90.
147. Behavior of oil tanks on soft cohesive ground improved by vertical drains / U. Hegg, M. B. Jamilkowski, R. Lancellotta, E Parvis // Proc. 8th ECSMFE. - 1983. – P. 627-632.
148. Bell, R. A. Settlement Comparison Used in Tank-Failure Study / R. A. Bell, J. Iwakiri // Journal of the Geotechnical Division. – 1980. - Vol. 106. - P. 153-169.

149. Chen, Q. 3D Finite Element Modeling to Study the Behavior of Shape Memory Alloy Confined Concrete / Q. Chen, B. Andrews // University of Illinois at Urbana-Champaign. – USA, 2010. – P. 1-10.

150. Daniel, C. J. Prestressing Concrete with Shape Memory Alloy Fibers : thesis presented to the Faculty of California Polytechnic State University / C. J. Daniel. - San Luis Obispo, 2009. - 103 p.

151. Debbarma, S. R. Review of Shape Memory Alloys applications in civil structures, and analysis for its potential as reinforcement in concrete flexural members / S. R. Debbarma, S. Saha // International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2013. - Volume 4, Issue 1. – P. 924-942.

152. Duerig, T. W. Engineering aspects of shape memory alloys. – London: Butterworth-Heinemann, 1990. – 394 p.

153. Feasibility of Concrete Prestressed by Shape Memory Alloy Short Fibers / K. Moser, A. Bergamini, R. Christen, C. Czaderski // Materials and Structures. - 2005. - Vol. 38. – P. 593-600.

154. Green, P. A. The failure of two storage tanks caused by differential settlement / P. A. Green, D. W. Hight // Proc. Conference on settlement of structures. - London, Pentech Press, 1975. – P. 353-360.

155. Greenwood, D. A. Differential settlement tolerances of cylindrical steel tanks for bulk liquid atorage / D. A. Greenwood // Proc. Conference on settlement of structures. - London, 1975. – P. 67-76.

156. Hakan, N. Strengthening structures withexternally prestressed tendons / N. Hakan // Technical report. – 2004. – 84 p.

157. Harrison, J. D. Use of TiNi in mechanical and electrical connectors / J. D. Harrison, D. E. Hodgson // Proc. Int. Symposium «Shape Memory Effects in Alloys». London, 1975. – P. 517-523.

158. Lateral reinforcement of welded SMA rings for reinforced concrete columns / E. Choi, S. H. Parka, B. S. Cho, D. Hui, A. J. Zak // Journal of Alloys and Compounds. - 2012. – P. 756-759.

159. Li, S. Analysis on Factors Affecting the Self-Repair Capability of SMA Wire Concrete Beam / S. Li, L. Dezhi, G. Qianqian, Z. Jianhong // Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume 2013. – P. 1-6.

160. Melton, K. N. General applications of shape memory alloys and smart materials / K. N. Melton // Shape memory materials. - Cambridge : Cambridge University Press, 1998. – P. 220–239.

161. Model of the evolution of deformation defects and irreversible strain at thermal cycling of stressed TiNi alloy specimen / A. E. Volkov, F. S. Belyaev, M. E. Evard, N. A. Volkova // MATEC Web of Conferences. - 2015. - Volume 33. – Art. № 03013. - P. 1-5.

162. Naaman, A. E. Prestressed Concrete Analysis and Design: Fundamentals / A. E. Naaman. - 2nd Edition. - Ann Arbor : Techno Press 3000, 2004. – 1072 p.

163. Otsuka, K. Mechanism of shape memory effect and superelasticity / K. Otsuka, C.M. Wayman // Shape memory materials. – Cambridge: Cambridge University PRESS, 1998. – P. 27-47.

164. Otsuka, K. Shape memory materials / K. Otsuka, C.M. Wayman. – Cambridge: Cambridge University PRESS, 1998. – 284 p.

165. Paul, N. K. Shape memory alloy as retrofitting application in historical buildings and monuments – a review in indian perspectiv / N. K. Paul, R. P. Nanda // International Journal of Civil Engineering and Technology. -2013. - Volume 4, Issue 1. – P. 117-125.

166. Salzbrenner, R.J., On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformations / R. J. Salzbrenner, M. Cohen // Acta Metallurgica. - 1979. - V. 27, Issue 5. - P. 739-748.

167. Salzbrenner, R.J. On the thermodynamics of thermoelastic martensitic transformation [Text] / R. J. Salzbrenner, M. Cohen // Acta Met. – 1971. – Vol. 2. – № 10. – P. 739-748.

168. Song, G. Increasing concrete structural survivability using smart materials / G. Song, Y. L. Mo // A proposal submitted to Grants to Enhance and Advance Research (GEAR), University of Houston. - Houston, 2003. – P. 1-35.

169. Tamai, H. Pseudoelastic Behavior of Shape Memory Alloy Wire and its Application to Seismic Resistance Member for Building / H. Tamai, Y. Kitagawa // IWCMM10, August 2000. – P. 55-87.

170. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations / L. Delay, R.V. Krishnan, H. Tas, H. Warlimont // J. Mat. Sci. - 1974. - Vol. 9. - P. 1521- 1555.

171. Winkler, E. Die Lerne von der Elasticitat und Festigkeit / E. Winkler. - Praha, 1967. – 338 p.

172. Zak, A. J. One Dimensional Shape Memory Alloy Models for use with Reinforced Composite Structures / A. J. Zak, M. P. Caremell, W. M. Ostachowicz, M. Wiercigroch // Smart Materials and Structures. – 2003. –Volume 12. - P. 338-346.



**ПРИЛОЖЕНИЕ А****АКТ**

**о внедрении в учебный процесс  
результатов диссертационного исследования, выполненного  
Терентьевой Мариной Владимировной на тему  
«СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СООРУЖЕНИЯ ПЛИТНЫХ  
ФУНДАМЕНТОВ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТАЛЬНЫХ РЕЗЕРВУАРОВ»**

Настоящим актом подтверждается факт ведения с 11.02.2019 результатов, полученных в ходе выполнения диссертационного исследования, в образовательный процесс, реализуемый в ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет» по направлению подготовки 21.03.01 «Нефтегазовое дело» (уровень бакалавриата) в рамках дисциплины «Основания и фундаменты» и «Сопротивление материалов».

В рамках лекционных занятий решаются задачи по выбору надежной конструкции основания и фундамента вертикальных стальных резервуаров, находящихся на слабых и неоднородных грунтах. В рамках практических занятий решаются задачи по оценки осадки и прогиба плитных фундаментов, армированных материалами с памятью, для нефтяных резервуаров, работающих в сложных инженерно-геологических условиях.

Методика проведения экспериментальных лабораторных исследований используется при проведении лабораторных работ: «Определение напряжений стержневых элементов из материалов с эффектом памяти при термоциклировании».

Директор ИГНиТТ

Н. П. Демченко

Начальник учебного отдела

А. Б. Мяндина

Начальник учебно-методического  
управления

Д. В. Евстифеев

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 619 578**<sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
E04G 21/12 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2015146788, 29.10.2015

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
29.10.2015Дата регистрации:  
16.05.2017Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 29.10.2015

(45) Опубликовано: 16.05.2017 Бюл. № 14

Адрес для переписки:  
169300, Респ. Коми, г. Ухта, ул. Первомайская,  
13, ЦИ и ПЛД

(72) Автор(ы):

Андронов Иван Николаевич (RU),  
Беляев Сергей Николаевич (RU),  
Семякина Екатерина Владимировна (RU),  
Майорова Наталья Сергеевна (RU),  
Терентьева Марина Владимировна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
профессионального образования "Ухтинский  
государственный технический университет"  
(RU)(56) Список документов, цитированных в отчете  
о поиске: RU 2020233 C1, 30.09.1994. WO  
2014026299 A1, 20.02.2014. GB 2358880 A,  
08.08.2001. WO 2014/166003 A4, 16.10.2014.(54) Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции  
(57) Реферат:

Изобретение относится к области изготовления предварительно напряженных строительных конструкций, в частности к способам создания предварительного напряжения в армированных бетонных конструкциях и изделиях. Сущность изобретения: арматуру, изготовленную из сплава, обладающего эффектом памяти формы, нагревают до температуры, большей температуры конца обратного мартенситного превращения -  $A_K$ , после чего нагружают путем изотермического растяжения и охлаждают под действием механического напряжения до температуры ниже температуры конца прямого мартенситного превращения -  $M_K$ ,

затем разгружают и заневоливают в жестких упорах с последующим нагревом до температуры, большей  $A_K$  и отвечающей технологической температуре твердения бетона, подвергают изотермическому твердению бетона в жесткой форме в течение времени, необходимого для набора бетоном передаточной прочности, после достижения бетоном передаточной прочности снимают фиксаторы на упорах и дают остыть полученному изделию из напряженного армированного бетона до технологической (эксплуатационной) температуры. 1 з.п. ф-лы. 2 табл.

RU 2 619 578 C 1

RU 2 619 578 C 1