

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Ухта – 2019

Диссертация выполнена в
Ухтинском государственном техническом университете на кафедре
«Проектирование и эксплуатация магистральных газонефтепроводов»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор, почетный
работник высшего профессионального
образования РФ

Андронов Иван Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор,
заместитель генерального директора
по науке АО «Гипрогазцентр»,
Агиней Руслан Викторович

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой сооружения и ремонта
газонефтепроводов и хранилищ ФГАОУ ВО
«Российский государственный университет
нефти и газа (национальный исследовательский
университет) имени И.М. Губкина»,
Васильев Геннадий Германович

кандидат технических наук, доцент кафедры
прикладная механика ФГБОУ ВО «Тюменский
индустриальный университет»,
Чепур Петр Владимирович
Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Уфимский государственный
нефтяной технический университет», г. Уфа

Защита состоится 21 июня 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного
совета Д 212.291.02 в Ухтинском государственном техническом университете по
адресу: 169300, г. Ухта, Республика Коми, ул. Первомайская, д. 13.

С авторефератом и диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
ФГБОУ ВО «Ухтинский государственный технический университет», а также
на сайте вуза по адресу www.ugtu.net в разделе «Наука→Диссертации».

Автореферат разослан 13 мая 2019 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук



Д. А. Борейко

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Резервуары вертикальные стальные (далее - РВС) для хранения сырой нефти и нефтепродуктов являются одними из основных технологических объектов резервуарных парков и нефтебаз, каждый из которых представляет собой сооружение повышенной опасности для персонала предприятий и окружающей среды. Несмотря на развитую систему стандартизации и высокие требования к безопасности резервуаров, статистика аварий показывает несовершенство конструктивных особенностей и мер по обеспечению надежности этих объектов.

В исследованиях отечественных и зарубежных авторов – В. Б. Галеева, М. В. Саяпина, Г. Г. Хопёрского, К. Кавано, Р. Бэлла, Д. Гринвуда, Е. Де Бира показано, что до 60% эксплуатируемых резервуаров имеют неравномерную осадку основания, которую позиционируют как доминирующую причину разрушения резервуаров, приводящую к возникновению недопустимых напряжений в металлоконструкциях и последующей аварийной ситуации.

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.

Поэтому разработка оснований и фундаментов усиленного типа для резервуаров, отвечающих всем требованиям безопасной, безаварийной эксплуатации в сложных инженерно-геологических и климатических условиях, 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, Г. Г. Васильев, В. Б. Галеев, А. А. Землянский, П. А. Коновалов, Р. А. Магушев, С. Н. Сотников, А. А. Тарасенко 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.

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, B. Andrews, C. J. Daniel, S. R. Debbarma, N. Nakan, E. Choi, S. H. Parka и др. показывают высокую эффективность усиления железобетонных конструкций ответственного назначения путем их армирования материалами с эффектом памяти формы (далее - ЭПФ), 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 области 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 исследования:

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 вы-

бор 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, α – температурная деформация арматуры из сплава с ЭПФ в процессе армирования, ε_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».

Разработано техническое решение, защищенное патентом RU 2619578 C1 «Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной

бетонной конструкции», 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^3 , 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 «Севергеоэкотех» (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.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи исследования, раскрыты научная новизна и практическая ценность работы. Представлены положения, выносимые на защиту, сведения о публикациях по теме диссертации и краткое описание структуры работы.

В первой главе «Анализ причин разрушения резервуаров и методов обеспечения эффективности функционирования их фундаментов» произведен обзор вопроса современного состояния обеспечения надежности РВС в условиях динамики роста их строительства, представлен анализ основных причин разрушения и методов повышения эффективности функционирования резервуаров на слабонесущих грунтах, путем устройства их на фундаменты усиленного типа.

Анализом причин разрушений вертикальных стальных резервуаров, находящихся на слабонесущих грунтах занимались Г. Г. Васильев, В. Б. Галеев, А. А. Землянский, И. М. Розенштейн, А. А. Тарасенко и др. Сведения, собранные по данным исследованиям показывают, что неравномерная осадка составляет 34,5% от общего числа рассмотренных аварий резервуаров (рисунок 1) и является основной причиной разрушения РВС.

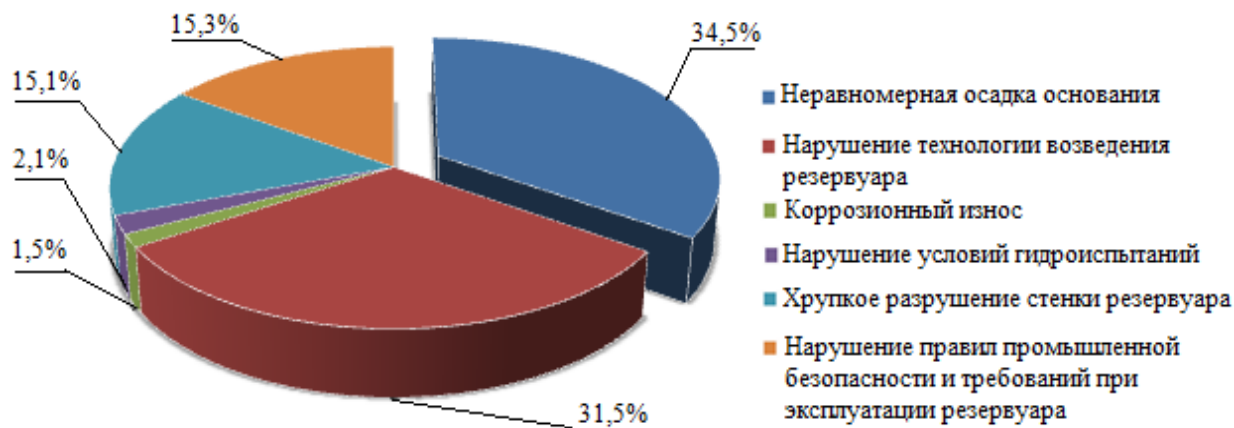


Рисунок 1 - Причины аварий и инцидентов резервуаров

Многочисленные исследования, направленные на установление причин возникновения осадок резервуаров, позволяют выделить два характерных направления их возникновения.

Первое из них связано с потерей устойчивости основания при быстром заполнении резервуара и развитием нестабилизированного состояния в грунтах. Вторым направлением является потеря несущей способности фундамента, вследствие неравномерной загрузки оперативного слива/налива продукта. Для

предотвращения неравномерных осадок резервуаров существует ряд технологических мероприятий по повышению устойчивости грунтов основания и несущей способности фундамента (рисунок 2).

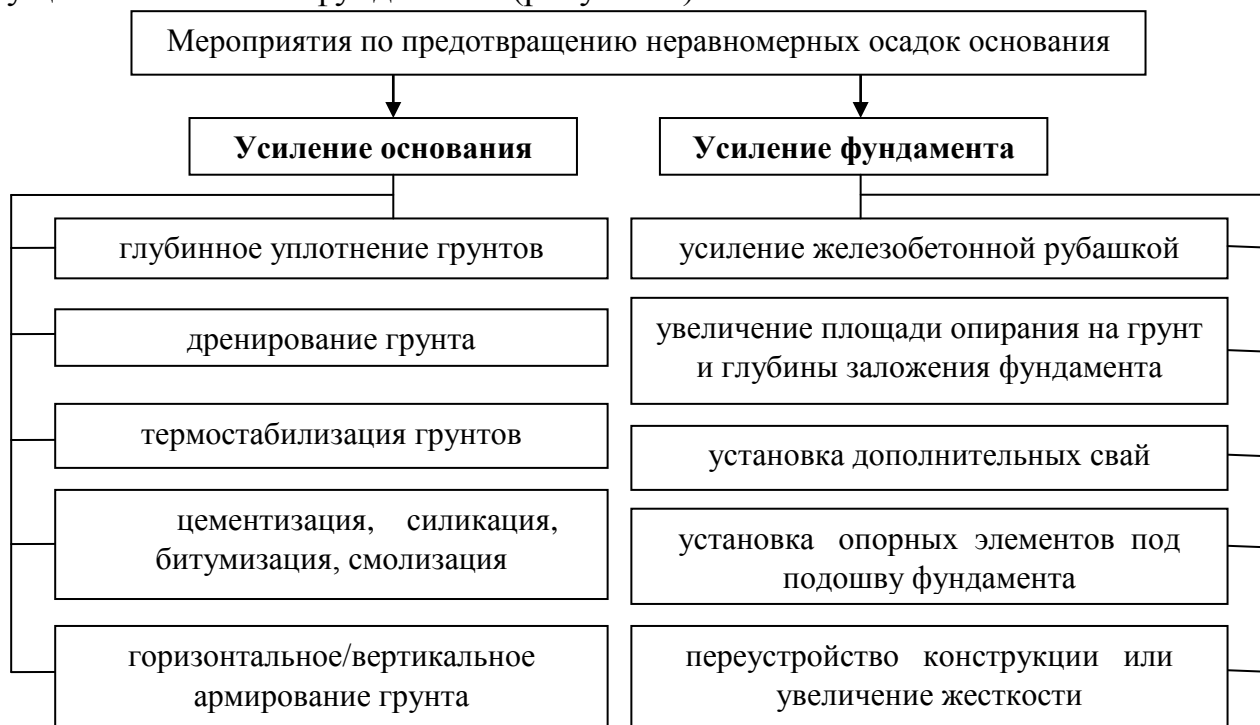


Рисунок 2 – Мероприятия по предотвращению неравномерных осадок

Способы усиления грунтов требуют серьезных энергетических и экономических затрат, и как показывает практика их применения не всегда приводят к желаемым результатам из-за нерегулируемого изменения грунтовых условий площадки. Поэтому необходимо использовать качественные фундаменты для резервуаров, способные удержать сооружение на этапе эксплуатации в случае непредсказуемого оседания грунтов.

С целью обеспечения технико-экономической эффективности для крупногабаритных резервуаров применяется плитный фундамент, но как показывает опыт эксплуатации такие фундаменты довольно уязвимы к неравномерной осадке основания и циклическим нагрузкам от оперативного хранения углеводородов, а в ряде случаев деформируются в виде седлообразной эпюры с максимальной точкой прогиба в центре (рисунок 3).

Такие деформации ухудшают эксплуатационные качества плитных фундаментов, а именно: возрастают моменты в фундаментах, происходит растрескивание железобетонной плиты; фундаменты получают сверхнормативные прогибы, что способствует не полному сливу нефтепродуктов, накоплению подтоварной воды и ускоренной коррозии металла с последующим разрывом днища; возникают критические значения напряжений в стенках емкости.

Одним из вариантов снижения деформации плитных фундаментов является увеличение его жесткости армированием.

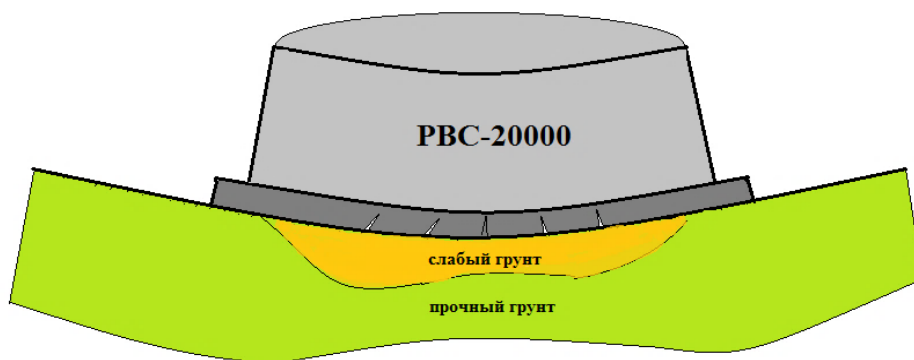


Рисунок 3 – Эскиз деформации плитного фундамента РВС

Однако, анализ результатов исследований и опыта эксплуатации резервуаров на плитных фундаментах показал, что традиционный вариант армирования плиты – стальной арматурой, допускает ненормативные прогибы в процессе эксплуатации.

В ряде зарубежных работ проводятся теоретические и экспериментальные исследования в области замещения традиционной стальной арматуры на арматуру из материалов с ЭПФ, где за счет нетривиальных свойств данного материала обеспечивается достаточный запас прочности железобетонных конструкций.

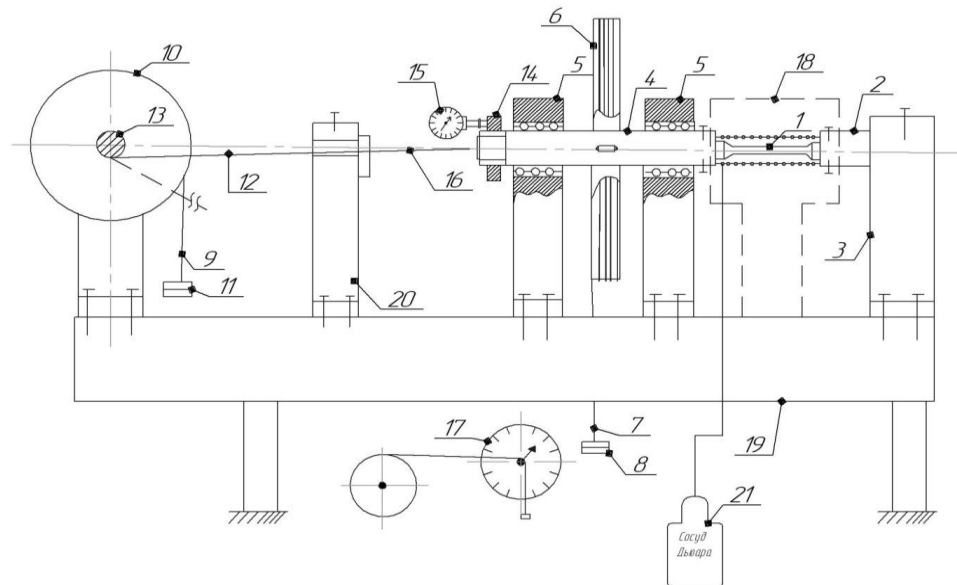
Основываясь на зарубежном опыте, сформулирована идея усиления фундаментных конструкций путем внедрения преднапряженных арматурных стержней из сплавов с ЭПФ взамен традиционной технологии, с целью снижения неравномерной осадки и прогибов фундаментных плит нефтяных резервуаров, работающих в сложных инженерно-геологических условиях. Анализ зарубежных исследований показал, что существующие методики расчета армирования железобетонных конструкций материалами с ЭПФ не являются универсальными и не подходят для плитных фундаментов резервуаров, в виду различия эксплуатационных условий работы арматуры, габаритов и назначения конструкций.

Во второй главе «**Экспериментальные исследования деформационно-силовых характеристик образцов материалов с памятью формы для разработки элементов усиления железобетонных конструкций**» разработана методика экспериментальных исследований, которая проводилась в три этапа.

На первом этапе проведено исследование деформационных параметров (деформация памяти и характеристические температуры) экспериментируемых образцов в условиях кручения при постоянной нагрузке, с целью выбора подходящего сплава, способного работать в качестве арматурных стержней плитного фундамента резервуара. Исследование проводилось на специальной установке, спроектированной в лаборатории кафедры механики ФГБОУ ВО «УГТУ», представленной на рисунке 4.

Материалом для исследования выбран сплав, обладающий ЭПФ – ТН-1К (согласно ТУ 18.4270-005-13152881-05) с разным процентным содержанием титана и никеля (параметры образцов и химический состав представлены в таблице 1). Обоснованием выбора данного материала служит широкий диапазон

температурных переходов, необходимый для эксплуатационных условий работы арматуры в зоне укладки фундамента резервуаров (среднегодовая температура грунта в зоне укладки фундамента от минус 7,5⁰ до +5,5⁰ С), эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера.



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 4 – Схема экспериментальной установки

Таблица 1 – Материал и параметры образцов

№ образца	1	2	3	4	5
Состав, % (ат)	Ti42,5-Ni-46,5-Zr3,0	Ti51,0-Ni49,0	Ti50,6-Ni49,4	Ti50,9-Ni49,1	Ti45,0-Ni45,0-Nb10,0
Температуры фазовых переходов, °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
Характеристика образцов					
Вид образца	Сплошной цилиндр				
Диаметр, мм	4				
Длина рабочей части, мм	33				
Полная длина, мм	65				

Эксперимент выполняли следующим образом: в мартенситном состоянии образцы нагружали постоянным крутящим моментом и термоциклировали под постоянной нагрузкой. С помощью измерительных устройств регистрировали деформацию стержней и температуру, при которой образец удлинялся/укорачивался. По полученным экспериментальным данным для всех испытуемых образцов были построены графики зависимости деформации, обусловленной ЭПФ, от задаваемой температуры.

Для исследуемой температурной области применения материала с ЭПФ подходящим является образец из сплава Ti45-Ni45-Nb10, график деформационного отклика которого представлен на рисунке 5.

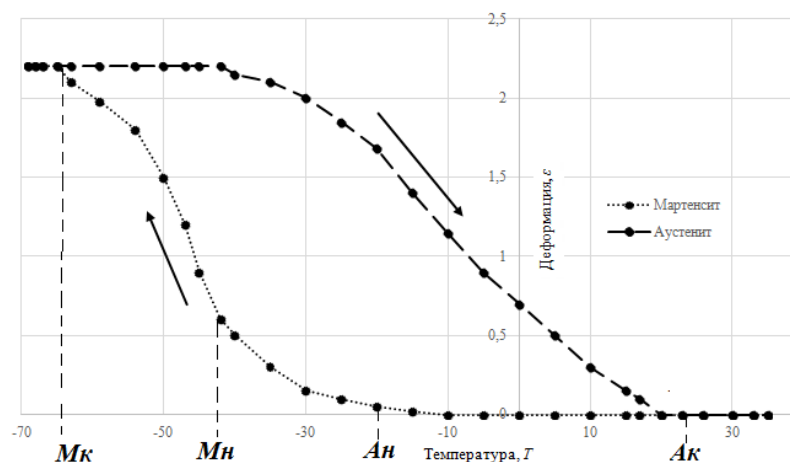


Рисунок 5 - График деформационного отклика сплава Ti45-Ni45-Nb10

Выбранный сплав демонстрирует изменение значений деформации памяти в пределах $0\% \leq \varepsilon_n \leq 2,2\%$ при температурах фазовых переходов, соответствующих работе стержневой арматуры фундаментов РВС.

На втором этапе проводилось исследование генерируемых напряжений в образцах выбранного сплава Ti45-Ni45-Nb10 в процессе растяжения от изменения значений параметра деформации в пределах $0\% \leq \varepsilon_n \leq 2,2\%$, в условиях жесткости противодействия системы «образец – заземление – контртело» моделирующих эксплуатационные условия противодействия растяжению/сжатию стержня за счет ползучести бетона.

Состав экспериментальной установки дополнен витой пружиной, которая представляет «контртело», имитирующее условия взаимодействия пары «арматура-бетон». На каждом этапе измерений использовали витые пружины сжатия в количестве 5 штук с различным коэффициентом жесткости, которые последовательно меняли, с целью определения генерируемых напряжений в элементе от противодействия «контртела» с учетом установленной деформации памяти ε_n . Жесткость противодействия системы «образец – заземление» K_1 определяется по формуле (1):

$$K_1 = \frac{K \cdot L_э}{s}, \quad (1)$$

где K – жесткость упругого элемента, Н/м; $L_э$ – длина рабочей части образца, м; s – площадь поперечного сечения образца, m^2 .

Пренебрегая пластической деформацией, для напряжений σ генерируемых в образцах, получаем:

$$\sigma = K_1 \cdot \varepsilon, \quad (2)$$

где ε – осевые деформации, способные к возврату.

Согласно проведенному эксперименту, изменению значений K_1 в выбранных пределах отвечает геометрическое место точек в пространстве $\sigma - \varepsilon$, аппроксимируемое нисходящей прямой (рисунок 6).

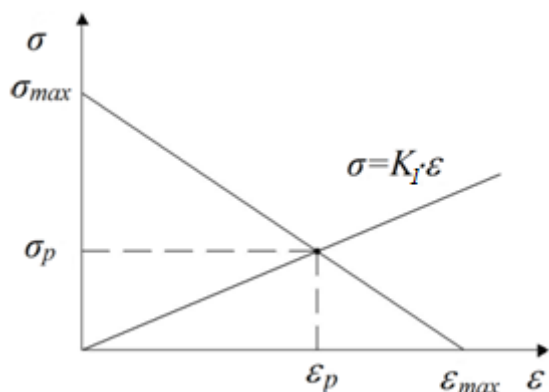


Рисунок 6 – Схема расчета рабочих напряжений σ_p и деформации ε_p образца

Учитывая линейную зависимость прямой постоянной жесткости противодействия – $\sigma = K_1\varepsilon$, определены расчетные значения обратимой деформации и соответствующий уровень реактивных напряжений согласно формулам (3) и (4).

$$\sigma_p = \frac{\sigma_{max}}{1 + \frac{\sigma_{max}}{K_1\varepsilon_{max}}} \quad (3)$$

$$\varepsilon_p = \frac{\sigma_{max}}{K_1 + \frac{\sigma_{max}}{\varepsilon_{max}}}, \quad (4)$$

где σ_{max} – максимально возможный уровень генерируемых напряжений, отвечающих бесконечной жесткости противодействия упругого контртела; ε_{max} – величина деформации, обусловленная ЭПФ в свободном состоянии после термодублирования образца под нагрузкой.

На рисунке 7 показаны деформационно-силовые кривые, связанные ломанной FABCDEF, которые определяют значения реактивных напряжений σ_p и осевых деформаций ε для установленного предела, возникающих в испытываемых образцах при нагревании и охлаждении через интервал мартенситного перехода испытываемого сплава при различных значениях жесткости противодействия.

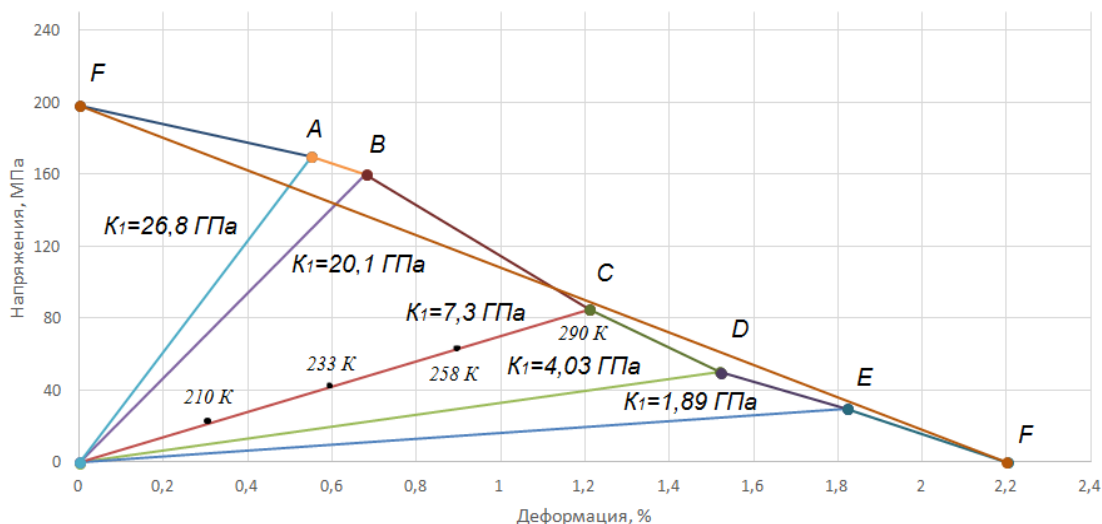


Рисунок 7 – Деформационно-силовые характеристики исследуемого сплава

На основе экспериментальных данных (уточненный предел деформации памяти, напряжения образца при противодействии) разработаны теоретические методы расчета напряжений, деформаций и осевых усилий, генерируемых в

экспериментальном образце с ЭПФ и упругом контртеле, функционирующих при температурных переходах железобетонной матрицы, армированной стержнем из сплава с ЭПФ.

При разработке методики *третьего этапа* проведено математическое планирование эксперимента. Для математической модели, описывающей влияние значимых факторов (характеристическая температура сплава ТН-1К, предел прочности сплава ТН-1К, жесткость упругого контртела) на изменение функции отклика (ε – деформация памяти) исследуемого процесса, выбран ортогональный центрально-композиционный план второго порядка (далее – ОЦКП).

При условии ортогональности планирования эксперимента значения параметров ОЦКП имеют следующий вид (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры ОЦКП

Ядро плана	Общее количество опытов	φ	α
2^3	15	0,7303	1,2154

Кодирование факторов, оказывающих влияние на деформацию памяти материала с ЭПФ, искомую в эксперименте, приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Кодирование факторов матрицы ОЦКП

Уровни варьирования	Область эксперимента			
	$x_1=T, K$	$x_2=\sigma_s, MPa$	$x_3=K, kH/m$	Кодированное значение
Нижний	210	800	0,74	-1
Основной	250	900	5,63	0
Верхний	290	1000	10,52	+1

Принимая во внимание натуральные значения кодированных факторов произведен регрессионный анализ полученных экспериментальных данных, который позволил аппроксимировать искомую математическую модель полным квадратичным полиномом:

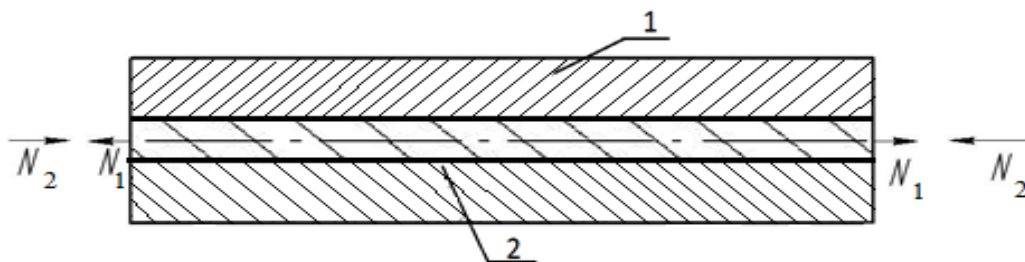
$$\begin{aligned} \varepsilon = & 3,874 - 0,0024T - 0,0033\sigma_s + 0,0152K + 0,102 \cdot 10^{-6} T\sigma_s + \\ & + 1,63 \cdot 10^{-6} TK - 0,049 \cdot 10^{-6} \sigma_s K + 4,88 \cdot 10^{-6} T^2 + \\ & + 1,85 \cdot 10^{-6} \sigma_s^2 + 468 \cdot 10^{-6} K^2. \end{aligned} \quad (5)$$

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 подтверждена проверкой, используя заданные интервалы варьирования значимых факторов.

В третьей главе «Аналитические и численные методики расчета усиления плитного фундамента резервуара, армированного стержнями с памятью» разработана методика расчета усиления плитного фундамента, армированного стержнями с ЭПФ для нефтяных резервуаров с целью определения напряжений, развиваемых в нагружаемом элементе и арматуре с ЭПФ, коэффициента армирования бетона, необходимой деформации арматуры. А также про-

изведено численное моделирование системы «резервуар-фундамент-основание» для оценки поведения предлагаемой армированной конструкции фундамента стержнями с ЭПФ при воздействии возможных нагрузок, возникающих в процессе эксплуатации. На основе результатов экспериментальных исследований в качестве арматурных стержней с ЭПФ выбран сплав Ni45-Ti45-Nb10.

Для разработки расчета усиления плитного фундамента резервуара принята схема модельного структурного элемента плиты, представляющего собой призму бетонной матрицы с центрально расположенным стержнем с ЭПФ (рисунок 8).



1 – бетонная матрица; 2 – стержень с ЭПФ; N_1, N_2 – равнодействующая растягивающих сил, действующих на арматуру и на бетонную матрицу

Рисунок 8 – Модельный структурный элемент

В процессе реализации эффекта памяти формы стержень будет укорачиваться, в нем будут генерироваться реактивные растягивающие усилия N_1 и напряжения σ_1 , величина которых зависит от величины деформации памяти и жесткости противодействия упругого контртела (в данном случае бетонной матрицы). Бетонная матрица будет подвергаться сжатию силой N_2 и, в ней будут возникать сжимающие напряжения σ_2 . Из условия равновесия для элемента конструкции получим значения генерируемых напряжений:

$$\sigma_1 F_1 = \sigma_2 F_2, \quad (6) \quad \sigma_1 = \sigma_2 \cdot \frac{F_2}{F_1}, \quad (7)$$

где F_1, F_2 – площадь поперечного стержня с ЭПФ и структурного элемента матрицы соответственно.

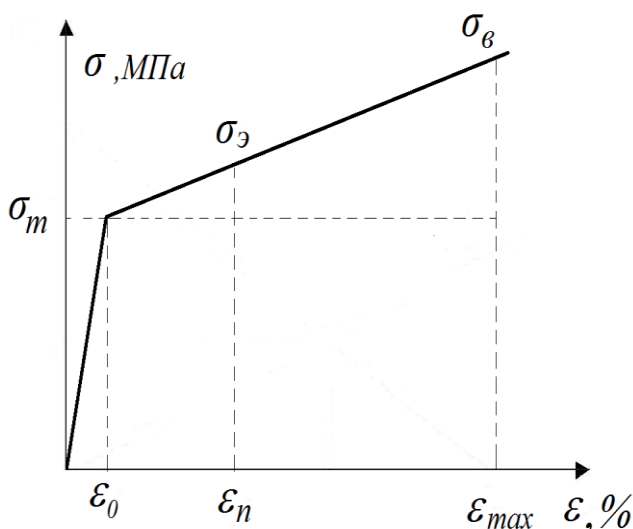


Рисунок 9 - Диаграмма растяжения сплава ТН-1К

Стержень обладает величиной деформации ε_n , сформированной термоциклированием под действием растягивающих напряжений σ_{mp} , сообщая ему способность к обратному формоизменению. После такой термоциклической тренировки стержень при нагревании укорачивается, а при охлаждении удлиняется.

Принято, что кривая зависимости максимальных генерируемых напряжений от величины деформации памяти ε_n повторяет диаграмму изотермической нагрузки в аустенитном состоянии (рисунок 9).

Условие совместности деформации в перемещениях для системы «арматура с ЭПФ – бетонная матрица» дает следующее выражение:

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = \varepsilon_n, \quad (8)$$

где ε_1 , ε_2 – деформация стержня и бетонной матрицы соответственно, ε_n – деформация, обусловленная эффектом памяти формы.

Исходя из упругого приближения для линейной части диаграммы деформация памяти определяется:

$$\frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{\sigma_2}{E_2} = \varepsilon_n, \quad (9)$$

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

Исходя из условия равновесия системы «арматура с ЭПФ – бетонная матрица» и учитывая деформацию памяти ε_n , получаем значения генерируемых напряжений в стержне (σ_1) и бетоне (σ_2):

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_n \cdot E_1}{1 + \frac{E_1 \cdot F_1}{E_2 \cdot F_2}}, \quad (10) \quad \sigma_2 = \frac{\varepsilon_n \cdot E_2}{1 + \frac{E_2 \cdot F_2}{E_1 \cdot F_1}}. \quad (11)$$

С учетом нелинейности диаграммы (рисунок 9) для аналитического описания напряжений в стержне (σ_1), установлено следующее выражение (12):

$$\sigma_1 = \sigma_m + (\sigma_s - \sigma_m) \cdot \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_{max} - \varepsilon_0}, \quad (12)$$

Для этого случая деформация, обусловленная ЭПФ, определяется:

$$\frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_m}{\sigma_s - \sigma_m} \cdot \left(\varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1} \right) + \frac{\sigma_2}{E_2} = \varepsilon_n. \quad (13)$$

Решение (6, 13), с учетом нелинейности диаграммы растяжения сплава, дает выражение для определения генерируемых напряжений в стержне (σ_1):

$$\sigma_1 = \frac{\varepsilon_n - \frac{\sigma_m}{E_1} + \frac{\sigma_m}{\sigma_s - \sigma_m} \cdot \left(\varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1} \right)}{\frac{\varepsilon_{max} - \frac{\sigma_m}{E_1}}{\sigma_s - \sigma_m} + \frac{\mu_n}{E_2}}, \quad (14)$$

При этом, σ_2 находится из уравнения (7), где $\mu_n = \frac{F_1}{F_2}$ – коэффициент армирования железобетонной матрицы.

Для нахождения границ эффективности армирования материалами с ЭПФ, определено минимальное и максимальное значение коэффициента армирования из условия экономически эффективного насыщения 1 м² бетона:

$$0,028 \leq \mu_n \leq 0,056, \quad (15)$$

Уровень предварительного напряжения бетона принят в пределах (0,4-0,6) от величины его расчетного сопротивления сжатию:

$$0,4 \leq \frac{\sigma_2}{R_2} \leq 0,6, \quad (16)$$

С учетом конкретных значений параметров бетона и стержня с ЭПФ, и диапазона изменения коэффициента армирования $0,028 \leq \mu_n \leq 0,056$, получен диапазон необходимой деформации памяти стержня для усиления бетонной матрицы:

$$0,4 \leq \frac{\varepsilon_n \cdot 3,6 \cdot 10^{10}}{\left(1 + 0,51 \cdot \frac{F_2}{F_1}\right) \cdot R} \leq 0,6, \quad (17) \quad 0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34. \quad (18)$$

В результате аналитического решения задачи армирования железобетонной матрицы стержнями с ЭПФ, получены выражения для определения генерируемых напряжений в элементах плитного фундамента резервуара: в арматурных стержнях и бетоне с учетом реальной диаграммы растяжения выбранного сплава ТН-1К, характеристик напрягаемого бетона, экспериментального графика зависимости деформации от температуры, рассчитанных пределов деформации $0,98\% \leq \varepsilon_n \leq 1,34\%$ и коэффициента армирования $0,02 \leq \mu_n \leq 0,04$.

Графические изображения зависимостей генерируемых напряжений от коэффициента армирования и деформации, обусловленной памятью формы, представлены на рисунке 10.

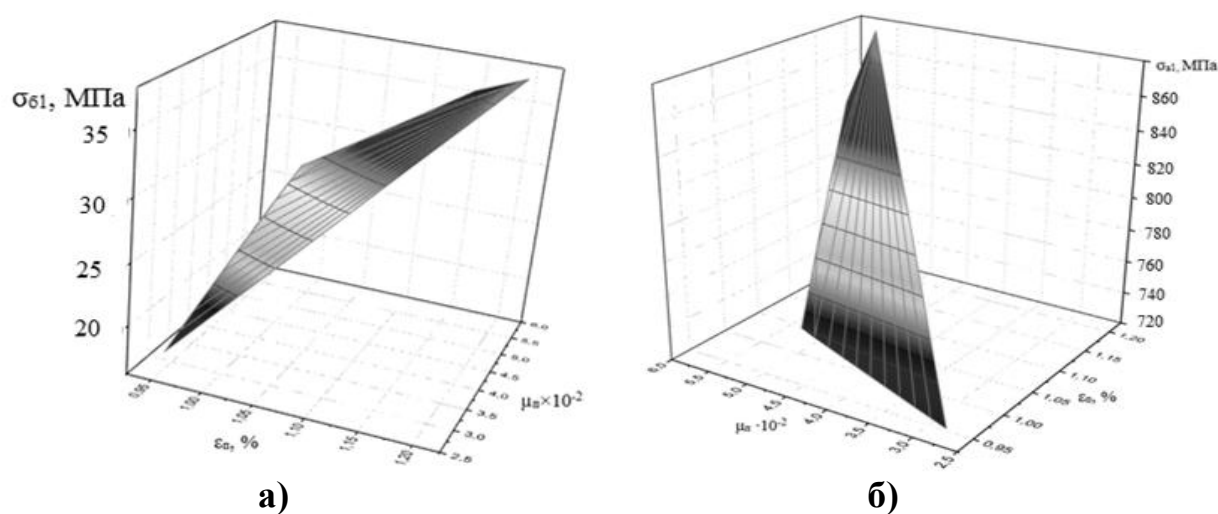


Рисунок 10 – Графическая зависимость напряжений в бетоне ($\sigma_{\delta l}$) (а) и арматуре (σ_{al}) (б) от коэффициента армирования (μ_n) и параметра памяти (ε_n)

С целью обеспечения требуемого уровня преднапряжения бетона с центрально расположенным армированным элементом, варьируя параметрами ε_n и μ_n , выполняют оценочные расчеты для конкретного элемента с ЭПФ.

Для анализа поведения предлагаемой армированной конструкции фундамента стержнями с ЭПФ проведено моделирование в программном комплексе ANSYS (платформа Workbench) методом конечных элементов (далее - МКЭ) системы «резервуар-фундамент-основание» для РВС-20000, расположенного на слабонесущих грунтах. Геометрическая модель плитного фундамента резервуара РВС-20000 представлена на рисунке 11.

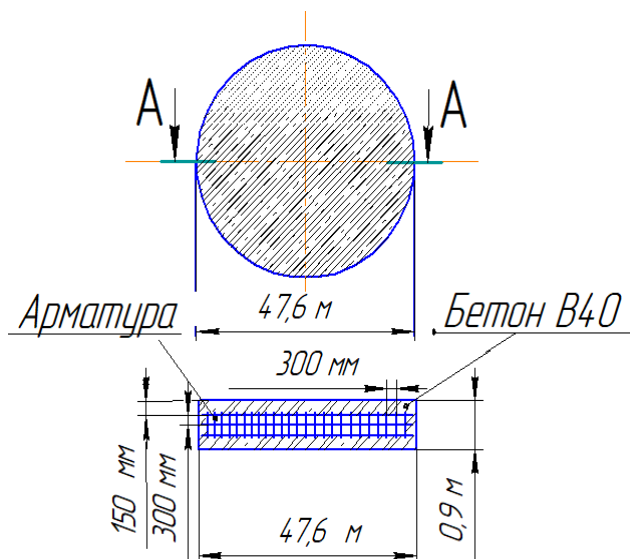


Рисунок 11 – Модель фундамента РВС-20000

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

После создания геометрической конструкции ей придаётся объём, в результате получаем пространственный объект, состоящий из четырех элементов, изображённый на рисунке 12.

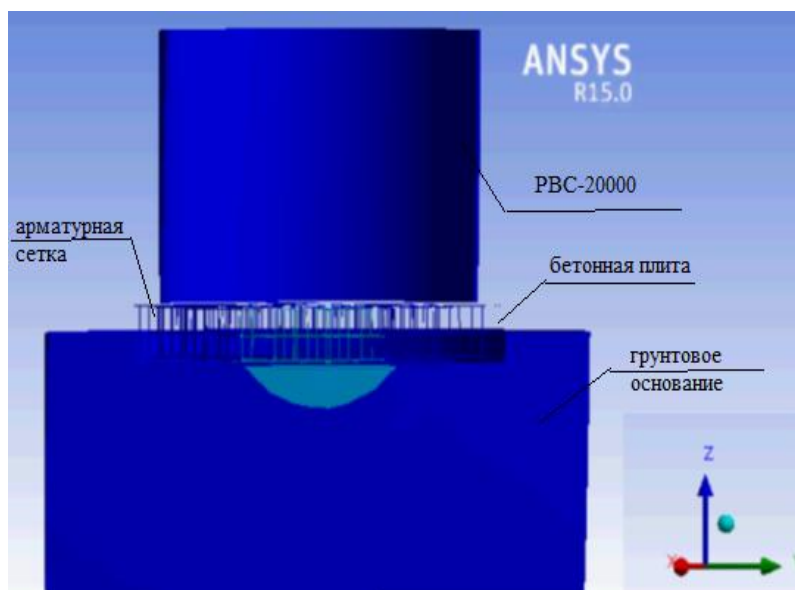
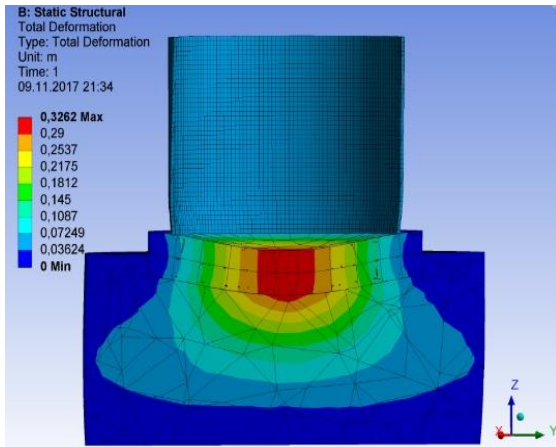


Рисунок 12 – Пространственная модель «резервуар-фундамент-основание» РВС-20000 в программном комплексе ANSYS

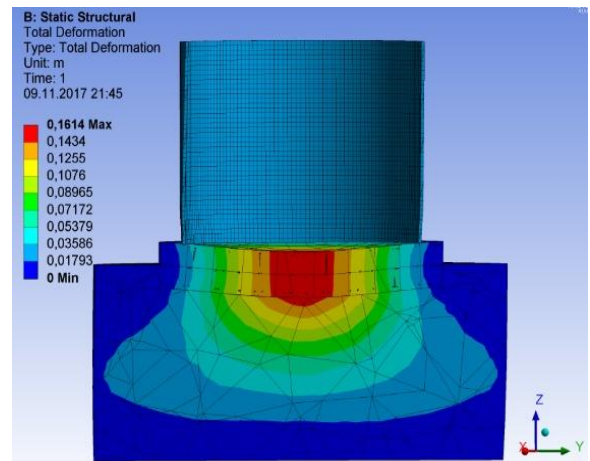
Решение МКЭ поставленной задачи осуществлялось программой ANSYS в три этапа:

- препроцессинге (создание модели и задание ее параметров);
- решение системы более 120000 алгебраических уравнений;
- постпроцессинговая обработка и анализ результатов расчёта.

Результаты моделирования системы «резервуар-фундамент-основание» для РВС 20000 на двух типах плитного фундамента, нагруженного эксплуатационными нагрузками приведены на рисунке 13.



а)



б)

Рисунок 13 – Деформации «фундамент-основание»: а) РВС-20000 на плите со стальной арматурой; б) РВС-20000 на плите с арматурой с ЭПФ

Произведено сравнение результатов расчета осадки и деформации фундаментной плиты по данным ПК ANSYS и нормативным значениям (таблица 3), приведено графическое сравнение распределения прогибов (рисунок 15).

Таблица 3 – Результаты расчетов

Показатели	РВС-20000	
	Плита с преднапряженной стальной арматурой	Плита с преднапряженной арматурой с ЭПФ
Справочные значения согласно СП 22.13330.2016		
$S_{ц}$, мм	200	
$S_{к}$, мм	50	
$S_{ср}$, мм	150	
f	0,0045	
Расчет с помощью программного комплекса ANSYS методом МКЭ		
$S_{ц}$, мм	326	161
$S_{к}$, мм	36	17
$S_{ср}$, мм	204	100,1
f	0,0065	0,004

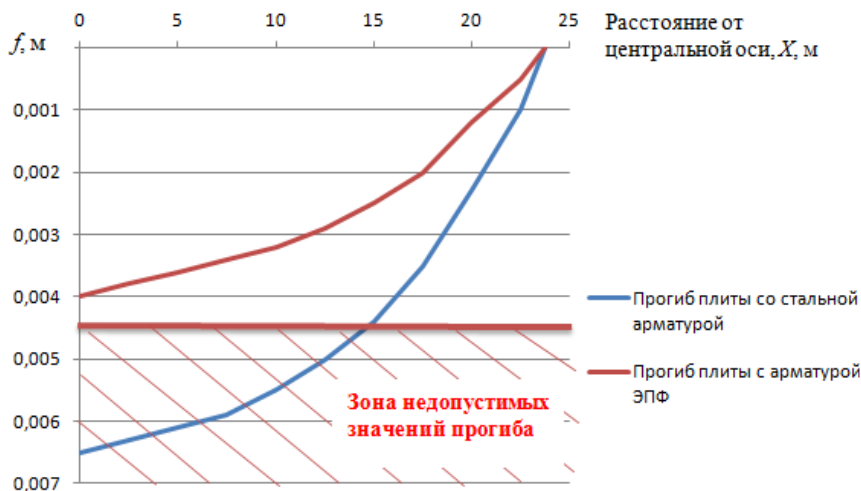


Рисунок 14 - Распределение прогибов по радиусу фундаментной плиты резервуара в зависимости от вариантов армирования

Таким образом, численное моделирование статического состояния резервуара РВС-20000 под наливом показало снижение значений деформации плиты при варианте армирования стержнями с ЭПФ, которые не превышают значений согласно СП 22.13330.2016.

Для оценки работы арматуры с ЭПФ в сравнении со стальной, предложен параметр эффективности армирования (K) плитного фундамента резервуара:

$$K = \frac{E_A}{E_{cm}} \cdot \frac{\varepsilon_n}{\alpha \cdot (A_k - A_n)}, \quad (19)$$

где E_A – модуль Юнга арматуры с ЭПФ в аустенитном состоянии; E_{cm} – модуль Юнга стальной арматуры; ε_n – параметр памяти арматуры из материала с ЭПФ; α – коэффициент линейного расширения арматуры из материала с ЭПФ; A_k и A_n – температура конца и начала аустенитного перехода арматуры с ЭПФ.

В четвертой главе «Технология сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с памятью формы для вертикальных стальных резервуаров» разработана методика сооружения основания и фундаментной плиты, преднапряженной арматурными стержнями из материала с ЭПФ для нефтяного резервуара.

Особенностью методики сооружения плитных фундаментов, армированных материалами с памятью формы для РВС от традиционной, является технология создания предварительного напряжения стержней с применением 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; повышение выносливости конструкции фундамента, работающего под воздействием циклических нагрузок.

Применительно для резервуаров, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, по результатам исследования выбран сплав с ЭПФ составом – Ni45-Ti45-Nb10, температурные характеристики которого входят в эксплуатационный интервал температур работы фундаментной плиты.

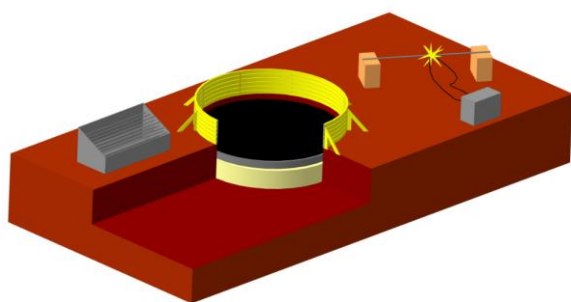
Предлагаемый комплекс работ по сооружению оснований и плитных фундаментов под РВС включает: вертикальную планировку, земляные работы, уплотнение грунта и устройство грунтовой подготовки, устройство гидроизоляционного слоя, монтаж опалубки и размещение арматурного каркаса с заземлением, заливка бетона в опалубку и преднапряжение арматурного каркаса, снятие заземлений с арматурного каркаса и демонтаж опалубки, установка гидрофобного слоя, контроль качества проведенных работ.

Арматурные стержни с ЭПФ поставляются на площадку в специальных термоконтейнерах с хладагентом, охлажденные до температуры минус 60 °С – конца мартенситного превращения, в таком состоянии стержни имеют увеличенную длину на процент деформации памяти материала (ε_n).

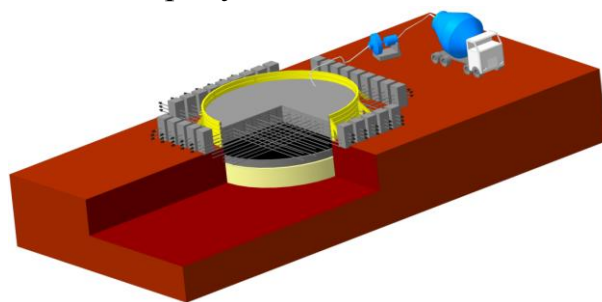
Предлагаемый арматурный каркас фундамента формируют путем сварки одиночных стержней между собой в плети необходимой длины, ручной дуго-

вой сваркой внахлест электродами типа Э42А диаметром 4 мм при силе тока 220 А агрегатом АС-81 на строительной площадке и одновременной укладкой на предварительно подготовленное основание с фиксацией в упорах анкерными креплениями. Далее плиту бетонируют и электротермическим путем арматуру нагревают до температуры +20 °С, снимают фиксаторы и дают остыть полученному изделию до эксплуатационной температуры. После описанных процессов, арматура укорачивается на процент деформации памяти (ε_n), в ней возникают сжимающие усилия, которые передаются на бетонную конструкцию.

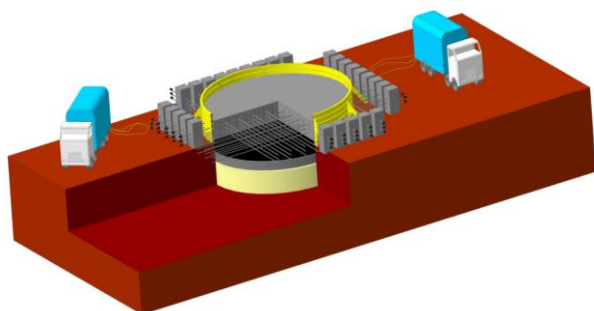
Контроль режима нагрева арматуры осуществляют с помощью термоэлектрических термометров. Деформацию арматуры измеряют штангенциркулем между бетоном конструкции и рисккой, нанесенной на каждом из контактов. Последовательность основных работ приведена на рисунке 15.



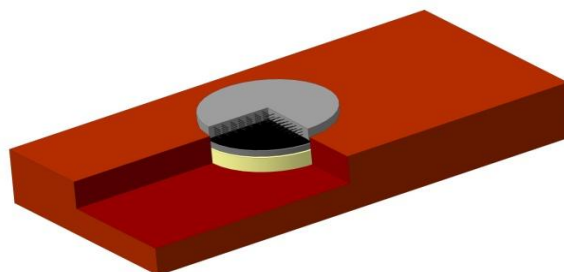
1) Монтаж и сварка арматурного каркаса и бетонирование плиты



2) Заневоливание арматурного каркаса



3) Электротермический нагрев арматуры



4) Демонтаж опалубки и освобождение от фиксирующих устройств арматуры

Рисунок 15 – Последовательность работ при сооружении фундамента резервуара

Для реализации варианта усиления бетонной матрицы разработан патент на изобретение RU 2619578 С1 «Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции». Согласно данному патенту осуществляется технология усиления бетонной плиты резервуара при армировании стержнями из сплава Ni45-Ti45-Nb10.

В зависимости от конкретных инженерно-геологических условий строительства и объема резервуара предложен алгоритм выбора типа основания и фундамента для РВС (рисунок 16), который позволяет осуществить выбор типа основания и основного несущего элемента резервуара – фундамента для различных грунтовых условий и вместимости объекта хранения.

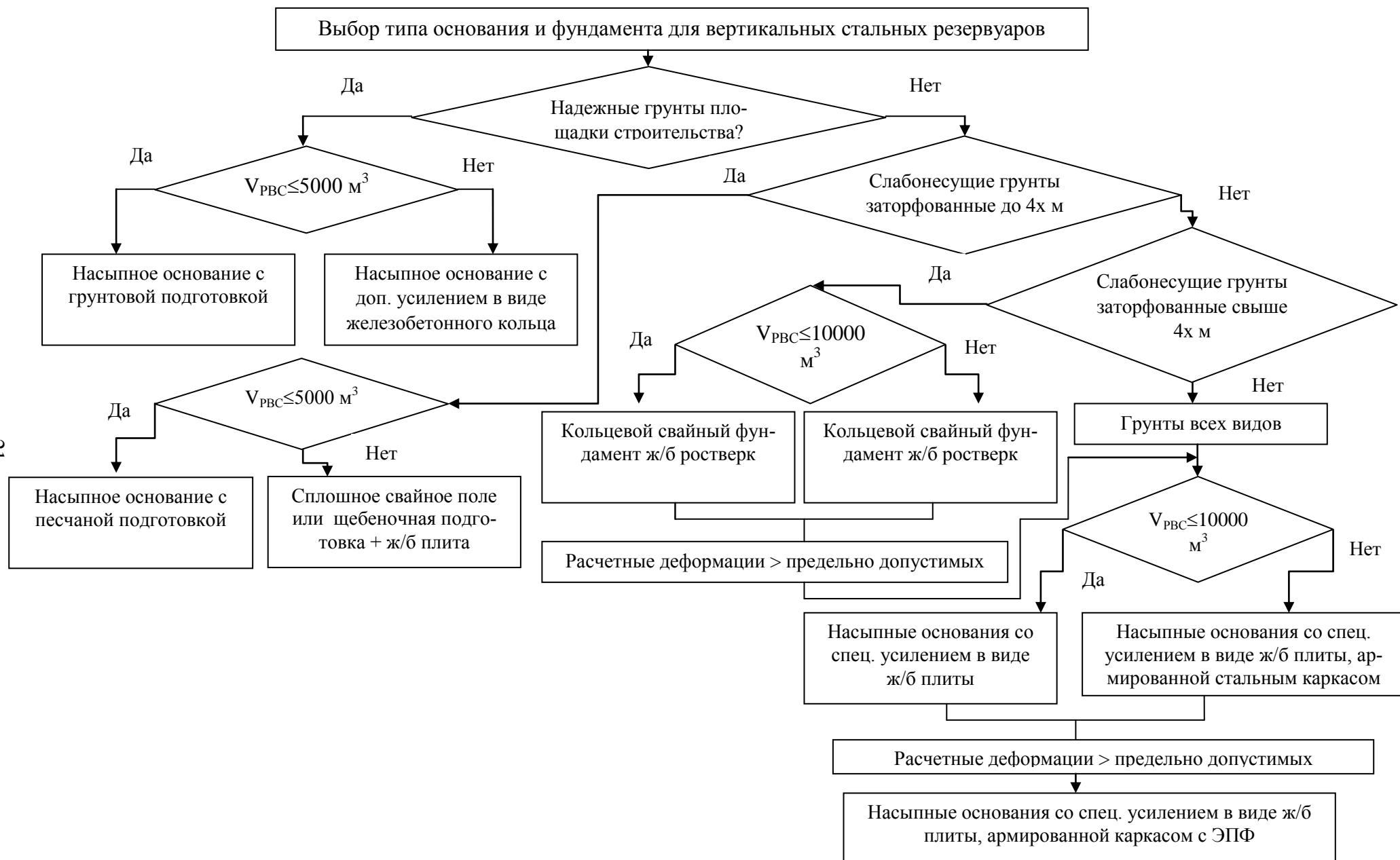


Рисунок 16 – Алгоритм выбора типа основания и фундамента для вертикальных стальных резервуаров

Основные выводы:

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 (σ_0 , σ_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.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. Андронов И. Н., Беляев Н. С., Сальников А. В., Майорова Н. С., Терентьева М. В. Разработка надежной преднапряженной конструкции фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов в сложных инженерно – геологических // Нефтегазовое дело. – 2016. – №1. – С.123-129.

2. Андронов И. Н., Терентьева М. В. Проектировочный расчет упрочнения резервуаров сжиженного природного газа путем армирования стержнями из материалов с памятью // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2017. – №6. – С.32-37.

3. Андронов И. Н., Терентьева М. В. Компьютерное моделирование конструкции плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов с использованием арматуры из материалов с памятью // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2018. – № 3. – С.33-39.

Авторские свидетельства и патенты:

4. Патент РФ №2619578 Заявл. 29.10.2015, опубл. 16.05.2017, Бюл. № 14, Андронов И. Н., Беляев С. Н., Майорова Н. С., Семиткина Е. В., Терентьева М.

В. Способ создания предварительного напряженного состояния в армированной бетонной конструкции.

Статьи в научно-технических сборниках и других изданиях:

5. Тюфякова М. В. (Терентьева М. В.), Карнович Е. В. Использование хо-мутов из материалов СПФ в нефтегазотранспортной отрасли // Международная научная конференция «Сплавы с эффектом памяти формы: свойства, технологии, перспективы» (26-30 мая 2014 г.) – Витебск, Беларусь: Институт технической акустики НАН Беларуси, 2014. – С.28.

6. Тюфякова М. В. (Терентьева М. В.), Семиткина Е. В. Применение ма-териалов с эффектом памяти формы в нефтегазовой промышленности // XV международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2014» (март 2014) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2014. – С.120-126.

7. Тюфякова М. В. (Терентьева М. В.), Семиткина Е. В., Расчет и проек-тирование силовых элементов с памятью формы с использованием эффекта низкотемпературной сверхпластичности // Научно-техническая конференции молодежи ОАО «Северные МН- 2014» – Ухта: УГТУ, 2014. – С. 20.

8. Тюфякова М. В. (Терентьева М. В.), Семиткина Е. В. Проектирование силовых конструкций с памятью формы с использованием эффекта низко-температурной сверхпластичности // Международный семинар «Рассохинские чтения» (7-8 февраля 2015 г.) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2015. – С.114-120.

9. Тюфякова М. В. (Терентьева М. В.), Семиткина Е. В., Расчет силовых эле-ментов с памятью формы с использованием эффекта низкотемпературной сверхпла-стичности // XVI международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕО-ЭКОТЕХ-2015» (март 2015) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2015. – С.130-124.

10. Терентьева М. В., Разработка преднапряженной конструкции фунда-мента резервуара для нефти в сложных инженерно-геологических условиях // Международный се минар «Рассохинские чтения» (4-6 февраля 2016 г.) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2016. – С.113-116.

11. Терентьева М. В., Расчет надежной преднапряженной конструкции фундамента резервуара для нефти в сложных инженерно-геологических // XVII международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ - 2016» (23-25 марта 2016 г.). – Ухта : УГТУ, 2016. – С.99-102.

12. Терентьева М. В., Упрочнение резервуаров сжиженного природного газа путем армирования стержнями из материалов с памятью // XVII междуна-родная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2017» (12–14 апреля 2017 г.) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2017. – С.113-116.

13. Терентьева М. В., Проектирование плитного фундамента резервуара для нефти и нефтепродуктов // II Международная научно-техническая конфе-ренция молодежи ПАО "Транснефть" в АО "Транснефть-Север". Этап 2. (22 но-ября - 25 ноября 2017 г.). - Ухта: УГТУ, 2017. – С.20.

14. Терентьева М. В. Проектирование плитного фундамента резервуара, упрочненного материалами СПФ // XIX международная молодежная научная конференция «СЕВЕРГЕОЭКОТЕХ-2018» (21-23 марта 2018 г.) : в 2 ч. ; ч.1. – Ухта :УГТУ, 2018. – С.124-126.

