

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

Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и долговечность газонефтепроводов и хранилищ»
 Отделение нефтегазового дела

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
«Моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при действии динамических нагрузок»

УДК 621.644: 539.376—048.58

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	У Вэйпэн		19.05.2018

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Харламов С.Н.	д. физ. – мат. н, профессор		19.05.2018

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Макашева Ю.С.	о.с.-г.н, ассистент		19.05.2018

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
инженер	Маланова Н. В.	к.т.н,		19.05.2018

Консультант-лингвист

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Немцова О.А.	к.т.н, ассистент		19.05.2018

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И.О. Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н, профессор		19.05.2018

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

Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и долговечность газонефтепроводов и хранилищ»
 Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2017/2018 учебного года)

Форма представления работы:

магистерская диссертация

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН
выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	26.05.2018г
--	-------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
28.03.2017	<i>Современное состояние проблем исследований НДС ТП</i>	15
15.04.2017	<i>Некоторые результаты современного анализа проблем. Математическое и физическое моделирования НДС системы</i>	25
29.04.2017	<i>Результаты и их обсуждение</i>	15
08.05.2017	<i>Производственная и экологическая безопасность эксплуатации линейной части магистральных газопроводов</i>	10
16.05.2017	<i>Организационно-экономическая часть</i>	10
22.05.2017	<i>Заключения</i>	10
25.05.2017	<i>Презентация</i>	25
	<i>Итого</i>	100

Составил преподаватель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Харламов С.Н.	д.физ. – мат.н, профессор		26.05.2018

СОГЛАСОВАНО:

И.О. Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ОНД ИШПР	Бурков П.В.	д.т.н, профессор		26.05.2018

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

Инженерная школа природных ресурсов
 Направление подготовки (специальность) 21.04.01 «Нефтегазовое дело»
 Профиль «Надежность и долговечность газонефтепроводов и хранилищ»
 Отделение нефтегазового дела
 Период выполнения _____ (осенний / весенний семестр 2016/2017 учебного года) _____

УТВЕРЖДАЮ:
 И.О.Зав. кафедрой

_____ **Бурков П.В.**
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

магистерской диссертации

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6А	У Вэйпэн

Тема работы:

«Моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при действии динамических нагрузок»	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 01.03.2018 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	26.05.2018г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Научно-техническая литература, интернет-ресурсы, руководящие и регламентирующие документы.
---------------------------------	--

Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ol style="list-style-type: none"> 1. Введение 2. Современное состояние проблем исследований НДС ТП 3. Некоторые результаты современного анализа проблем. Математическое и физическое моделирования НДС системы 4. Результаты и их обсуждение 5. Производственная и экологическая безопасность эксплуатации линейной части магистральных газопроводов 6. Организационно-экономическая часть 7. Заключение
---	--

Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Графические материалы оформлены в виде презентации Microsoft PowerPoint.
---	--

Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы
(с указанием разделов)

Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Макашева Ю.С.
«Социальная ответственность»	Макашева Ю.С.
Консультант-лингвист	Коротченко Т.В.

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.09.2018г
---	-------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
профессор	Харламов С.Н.	д.физ. –мат. н, профессор		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	У Вэйпэн		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6А	У Вэйпэн

Институт	Природных ресурсов	Кафедра	Транспорта и хранения нефти и газа
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль <u>«Надежность газонефтепроводов и хранилищ»</u>

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

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических,</i>	<i>Материально-технические ресурсы: Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния СДН-НДС, Оборудование сетевое СОЦ,</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>СНиП 1.04.03-85*Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений;</i>
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Налоговый кодекс Российской Федерации.</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка перспективности НИИ</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Расчет расходов на оборудование 9054631 руб</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной,</i>	<i>Расчет интегрального показателя эффективности научного исследования</i>

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. *Оценка конкурентоспособности технических решений*
2. *Матрица SWOT*

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	16.03.2018г
---	-------------

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Макашева Ю.С.	о.с.-г.н, ассистент		16.03.2018г

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ5Б	У Вэйпэн		16.03.2018г

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

Студенту:

Группа	ФИО
2БМ6А	У Вэйпэн

Институт		Кафедра	
Уровень образования	магистр	Направление/специальность	21.04.01 «Нефтегазовое дело» профиль «Надежность газонефтепроводов и хранилищ»

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
<i>Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона)</i>	<i>Магистральные газопроводные конструкции Республики Китая (Хуайбэй), являющиеся автономными энергетическими системами, впервые построены и эксплуатируются в зоне распространения вечномерзлых грунтов.</i>
<i>Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме</i>	<i>СНиП 2.05.06-85* «Магистральные трубопроводы. Нормы проектирования». ГОСТ 12.0.003-74 «Опасные и вредные факторы».</i>

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<i>1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:</i>	<i>К таким факторам можно отнести: – Отклонение показателей климата на открытом воздухе; – Превышение уровней шума; – Тяжесть и напряженность физического труда</i>
<i>2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности</i>	<i>При строительстве и капитальном ремонте газопроводов с применением обетонированных труб, могут возникнуть опасные ситуации, к ним относятся:</i>
<i>3. Охрана окружающей среды:</i>	<i>-загрязнением атмосферного воздуха; -нарушением гидрогеологического режима;</i>
<i>4. Защита в чрезвычайных ситуациях:</i>	<i>Прогнозирование и предупреждение последствий аварий на таких производствах связано, прежде всего, с прогнозированием и предупреждением действия поражающих факторов при реализации основных опасностей.</i>
<i>5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</i>	<i>Р Д 09-364-00 «Типовая инструкция по организации безопасного проведения огневых работ на взрывоопасных взрывопожароопасных объектах»;</i>

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

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
ассистент	Немцова О.А.	к.т.н, ассистент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
2БМ6А	У Вэйпэн		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 108 с., 29 рис., 9 табл., 53 источников, 4 прил.

Ключевые слова: Напряженно-деформируемое состояние трубопровода, Метод конечных элементов, ANSYS, моделирование, системы “Трубопровод – Грунт”

Объектом исследования является (ются): Напряженно-деформируемое состояние трубопровода

Цель работы – Исследования конструктивной надежности МТ при комплексном влиянии нелинейных эффектов, связанных с вязко пластической деформацией.

В процессе исследования проводилось моделирование и численные расчеты НДС системы “внешняя среда-ТП- грунт” с учетом влияния нагрузки (воздействия давления на грунт и ТП); аналитические расчеты толщины стенки трубопровода; расчеты на прогиб и изгиб ТП.

В результате исследования проведен анализ эффективного строительства трубопровода с учетом влияния давления на грунт и стенки ТП, оценено напряженно-деформируемое состояние системы.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: технология и организация выполнения работ

Область применения: в равнине Хуайбэй, КНР

Экономическая эффективность/значимость работы затраты на установку подсистемы мониторинга напряженно-деформированного состояния на трубопроводные обвязки газокompрессорной станции составят 9644080,89рублей.

В будущем планируется в сочетании с виртуальными (компьютерными) и теоретическими методами провести анализ вопросов совершенствования рассматриваемых технологий по оценке НДС ТП с помощью детального решения задач на базе уравнений деформируемого твердого тела и применения МКЭ для численного расчета моделируемых процессов.

Оглавление

.....	11
ВВЕДЕНИЕ	11
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС ТП	14
1. Данные библиографического анализа мирового опыта и специалистов в КНР	14
2. Некоторые сведения об исследованиях НДС ТП в российских публикациях	22
1. Исследования по оценке НДС трубопровода при пучении грунта.	22
2. Строительство трубопроводов в России	23
3. Данные исследований НДС трубопровода в других странах (Германии, США, Канада).....	24
1. Тензометрирование	24
2. Анализ данных исследования деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков.....	26
4. Основные выводы по данным обзора проблем исследования НДС ТП.....	29
5. Некоторые данные обзора методов и программы расчёта трубопроводных систем.....	30
2. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС СИСТЕМЫ	32
1. Детали моделирование процессов в тонкостенных ТП	32
1. Уравнение равновесия элемента трубы.....	32
2. Некоторые заключения о моделировании исследования напряжений при давлении на одном из контуров.....	36
3. Отдельные замечания об условиях прочности в задачах при упругой деформации тела	40
3. Детали о корректности и точности метода расчета	42
4. Физическая модель и замыкающие связи к исследованию трубопровода и его НДС в рамках цели ВКР	48
5. Постановка задачи о НДС ТП, определяющие уравнения математической модели и метод их решения.....	51
6. Постановка граничных условий задачи для численного интегрирования определяющих уравнений математической модели и её замыкающих соотношений	55
3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ	62
4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ.....	67
1. Организационно- техническая подготовка к капитальному ремонту.....	68
2. Расчет затрат на необходимые для проведения технической диагностики материалы	69
3. Расчет времени.....	70
4 Затраты на амортизационные отчисления	70
5. Расчет затрат на оплату труда	72
6 Затраты на страховые взносы	73
7. Затраты на проведение мероприятия.....	74
5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ РАЗРАБОТКА (УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ) ТЕХНОЛОГИИ В	

ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ (ВАРИАНТ 3 - 3).....	75
1. Производственная безопасность	75
2. Экологическая безопасность	78
3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях	78
4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	80
6. ЗАКЛЮЧЕНИЯ	81
1. Выводы по обзору исследований НДС трубопровода	81
2. Выводы по математическому и физическому моделированию	82
3. Данные анализа расчётов	83
7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРА.....	84
Приложение П.....	89
(справочное).....	89
ENGLISH PART.....	90
1 Analysis of the stress-strain state of an air crossing of pipeline in the course of repair.....	90
2 References	99

ВВЕДЕНИЕ

Роль трубопроводного транспорта в нефтегазовой отрасли любой промышленно развитой страны чрезвычайно высока. Это основа интенсивности роста производственных мощностей и безопасности государства. Такой вид транспорта позволяет снять проблемы грузоперевозок с железнодорожного сообщения и обеспечить снабжение предприятий природным сырьём более дешёвым способом.

Как известно [1], основной трубопровод (МТ) состоит из головных конструкций, линейной части, промежуточных насосных или компрессорных станций, оборудования конечных точек и т. Д. Несоблюдение любого из этих элементов приводит к остановке в транспортировке продукт. Однако систематизация и анализ процессов показывает [2], что решающее влияние на бесперебойную работу систем МТ - надёжность его линейной части, принятой в нормативных документах и правилах. Те. Необходимо детально изучить структурную надёжность магистральных трубопроводов.

Хорошо известно, что при эксплуатации разрушение стенок трубы усиливается в локальных участках с дефектами металлургического, строительно-монтажного и ремонтного происхождения.

					<i>Моделирование напряженно-деформированного состояния трубопровода при действии динамических нагрузок</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>У Вэйпэн</i>			<i>Введение</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Харламов С.Н.</i>					1	4
<i>Консульт.</i>						<i>НИ ТПУ гр.28м58</i>		
<i>Зав. Каф.</i>		<i>Бурков П.В.</i>						

Анализ проблем в МТ показывает [3], что на первый план выходят задачи о надежности расчетов на прочность, устойчивость, долговечность. Для их решения необходима: информация о нагрузках и воздействиях на трубопровод, анализ напряженно-деформированного состояния, что в итоге позволит увеличить ресурсы функционирования МТ.

Расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) основных трубопроводных сооружений на основе методов сопротивления материалов и механики строительства не позволяют адекватно анализировать прочность трубопроводов топливно-энергетического комплекса с требуемой точностью, а в некоторых случаях могут привести к неправильной качественной картине строительства НДС. В настоящее время интенсивное развитие получили численные методы, позволяющие значительно расширить класс и постановку рассматриваемых задач за счет более полного учета реальных условий нагружения и свойств используемых материалов. Среди этих методов наибольшее распространение получил метод конечных элементов (МКЭ). В ПК используют численные алгоритмы решения дифференциальных уравнений на основе МКЭ.

Актуальность выпускной работы определяется следующими положениями и факторами:

1. Магистральные трубопроводы (МТ) принципиально отличаются от других объектов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) любой экономически развитой страны наличием в его составляющих (элементах, узлах и соединениях со сложной конфигурацией поверхности конструкции) силовых факторов.

2. Сочленения МТ способны обострять процессы переноса в локальных зонах, неоднозначно распределять действующие нагрузки на стенку, а также приповерхностный слой грунта.
3. Имеется острая необходимость решения проблем многомасштабного и многопараметрического прогноза процессов в узлах и секциях трубопровода.
4. Требуется детальность анализа картины изменений параметров, определяющих напряженно-деформируемое состояния (НДС) стенки и окружающей внешней среды.
5. Высокая потребность в выдаче рекомендаций по эксплуатации и увеличению вероятности возникновения отказов при неблагоприятных внешних условиях.
6. Целесообразны шаги по поиску путей адекватного функционирования трубопровода под действием эксплуатационных и внешних воздействий по принятой расчётной схеме, рекомендуемым нормативным документам к надежности МТ.

Цель работы заключается в необходимости детального

исследования конструктивной надежности МТ при комплексном влиянии нелинейных эффектов, связанных с вязко пластической деформацией, возникающей в процессе производства и транспортировки труб к месту назначения, а также при выполнении строительно-монтажных и ремонтных работ, интенсифицирующих процессы износа и разрушения материала стенки трубопровода.

					<i>Введение</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>	13	4

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМ ИССЛЕДОВАНИЙ НДС ТП

1. Данные библиографического анализа мирового опыта и специалистов в КНР

В настоящее время существует достаточно много публикаций, в которых анализ НДС ТП выполняется с привлечением ПК. Так, исследование особенностей изменений поля давления в трубопроводе проводится с использованием метода конечных элементов [4]. В [5] анализируют трубопровод и окружающую грунт среду. Установлено, что поведение механических грунтовых трубопроводов зависит от нагрузки земли, деталей модели грунта, трубы и их взаимодействия. В частности, учитывают факторы.

1. Нагрузка на землю сооружений, долгосрочные усилия от равномерно распределенной статической нагрузки на землю.

2. Модель грунта предполагает, что имеется нагрузка от трубы.

Трубопроводные нагрузки тесно связаны со свойствами грунта.

Учитываются следующие свойства параметров грунта: нелинейные, упруго-пластические, вязко-пластические, дилатансия, анизотропия, полиморфизм и т.д.

3. Модель трубопровода включает положения. Так, трубопровод представляется из стали, используется модель Ramberg-Osgood [6] с параметрами, учитывающими растяжения от деформаций.

					НДС ТП с учетом особенностей свойств грунта и комплексного действия на стенки внутренних и внешних динамических нагрузках			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	У Вэйпэн				Современное состояние проблем исследований НДС ТП	Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Харламов С.Н.						5	28
Консульт.								
Зав. Каф.	Бурков П.Н.							
						НИ ТПУ гр.2бм5Б		

4. Модель “Трубопровод – Грунт” [7]. В таких исследованиях учитывается взаимодействие трубопровода и грунта. Это типичные нелинейные контактные задачи. В напряженно – деформированном состоянии может находиться система “ТП-грунт”. Таким образом, взаимодействие элементов системы в модели “Трубопровод – Грунт” представляется упрощенным: допускается тангенциальный контакт между элементами за счёт трения на трубу.

В частности, для данных систем получены результаты [8] для труб диаметром 630 мм, материалом X 65, модулем упругости при растяжении 207ГПа, пределом текучести 423 Мпа, связей напряжений и деформаций по Ramberg-Osgood [6] для области исследования: (ширина прямоугольника x длина) = (1.6m x 3m), распределений нагрузки 0.7 МПа. А также, с условиями, что почва есть бесконечное пространство, но включает прямоугольную область размещения трубопровода (длина x ширина x высота) = (24m x 10m x 3.2m), где были выполнены расчеты по схеме исследования НДС ТП (см. рис. 1).

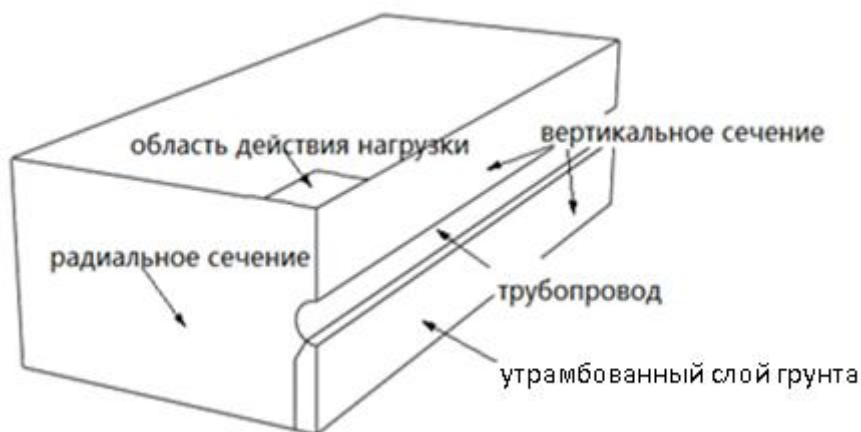


Рисунок 1. Схема области исследования НДС ТП

						Современное состояние проблем исследований НДС ТП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			6

Установлено [9], что согласно рис.2 имеется оседание грунта и деформация трубы. Причём вдали от внешней нагрузки на трубу влияние постепенно ослабляется.

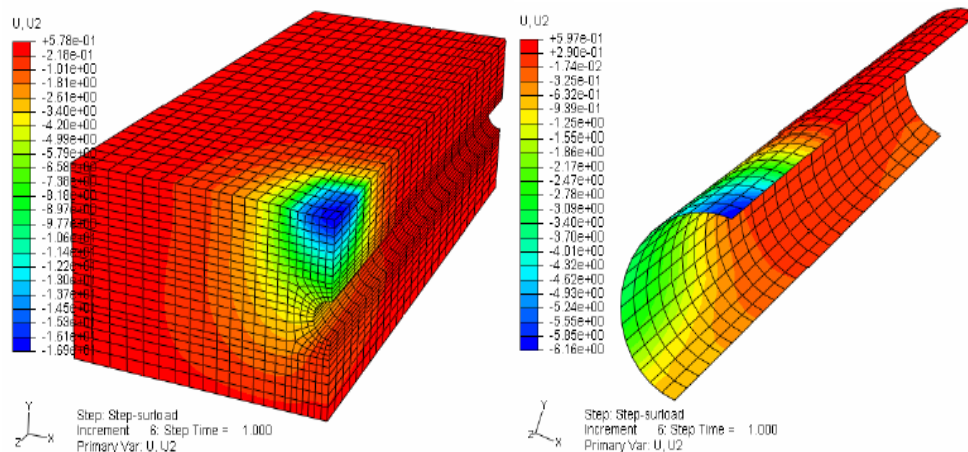


Рисунок 2. Картина радиальных смещений в ТП по комплексной модели “ТП – Грунт”[7].

Также видно, что трубопровод испытывает неравномерное воздействие окружающего грунта. На рис. 3 даны картины изменений напряжений на внутренней и внешней поверхностях стенки (кольцевые напряжения). Видно, что эти распределения неравномерны. Разница между напряжениями может достигать до 170 МПа. Можно сделать вывод, что для функционирования ТП требуются трубы с более твёрдыми краями, чтобы предотвратить их изгиб.

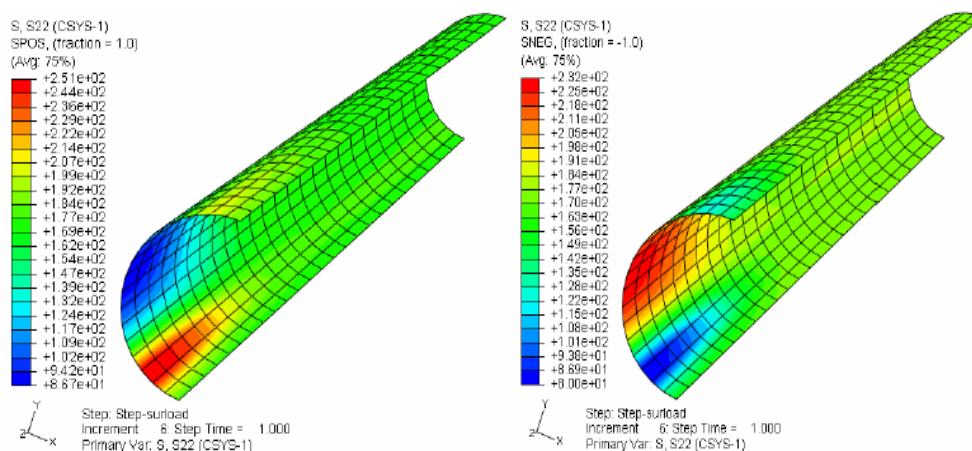


Рисунок 3. Изменения кольцевых напряжений на внутренней и внешней поверхностях стенки ТП

Отметим [9], что давление в трубе может привести к неравномерному воздействию на грунт и вызвать деформации изгиба. Причём эти деформации зависят от условий контакта с грунтом и его свойствами.

1. Характер влияния изменений внутреннего давления на деформационные процессы в грунте

Так, на рис.4 представлены данные вертикального смещения от различных значений модуля упругости E части грунта, расположенного над трубой. Предполагается, что под трубой грунт характеризуется величиной коэффициента упругости $E=600$ Мпа. Расчеты показывают [10], что с увеличением нагрузки (область, $m \sim 0-2$) на ТП при его контакте с грунтом прогиб (мм) уменьшается с ростом E модуля упругости грунта над верхней частью ТП. Т.е. трубопровод фиксирован более жестко в плотном грунте с $E=600$ Мпа. Далее, давление нагрузки на трубу ограничивается локальной областью ($x \approx 0-2, m$). В пределах области ($x \approx 2-4, m$) от начала действия давления на верхний слой грунта и трубу наблюдается уменьшение оседания пород грунта и деформаций в стенках трубопровода. Вдали от действия нагрузки ($x=0-2, m$) на трубу величина смещения почти не меняется (см. линии 1-6, рис. 4).

Распределение окружных деформаций $\sigma_{\text{гр}}$ в зависимости от угла φ по периметру приведены на рис. 5. Видно, что в различных грунтах на внутренней и внешней стенках ТП наблюдается максимальное кольцевое напряжение и деформации. Причем на внутренней стенке имеется максимум деформаций при угле в 160° , где возникает изгиб. Также расчеты показывают, что при угле равном $45^\circ - 135^\circ$ кольцевые деформации на внутренней стенке меньше, чем на внешней. Видно, что деформация

стенки уменьшается с увеличением модуля упругости грунта (E).

Приведенный анализ показывает, что в мягких грунтах с низким модулем упругости, деформации в трубе более выражены. Таким образом, для частичного давления на трубу, прокладка более качественна по плотному грунту.

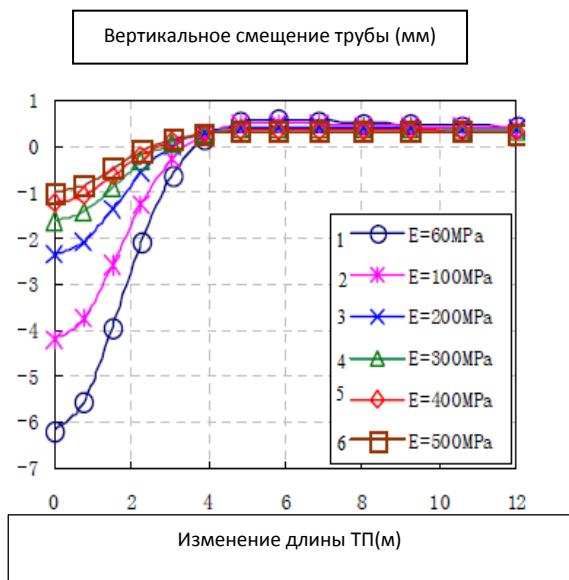


Рисунок 4. Эффект смещения ТП по длине в зоне верхней границы стенки

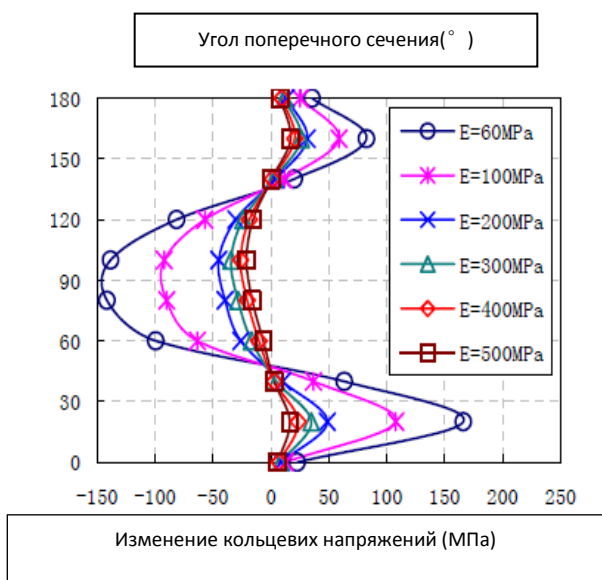


Рисунок 5. Изменение кольцевых напряжений в ТП в поперечном сечении стенки в зависимости от различных значений угла φ

Расчёты выполнены для грунта $E=0,6 - 6 \text{ GPa}$, $\nu=500\text{МПа}$. На рис.6 представлены данные смещения ТП в вертикальной плоскости и местности при различных свойствах грунта. Видно, что при низких значениях (E) свойств грунта эффект смещения ТП более слабый. Кроме того, предельные напряжения в стенке ТП при различных углах φ (по периметру ТП) более однородны при высоких значениях (E) грунта и $\varphi>0$ (см. рис.7). Видно (см. рис.7), что динамика процесса деформаций в плотных грунтах ($E>0,6\text{GPa}$) в стенке ТП ближе к внешней поверхности более выражена

(при $\varphi \approx 0 - 40^\circ$). Однако отметим, что интенсивность этих процессов уменьшается по всему периметру.

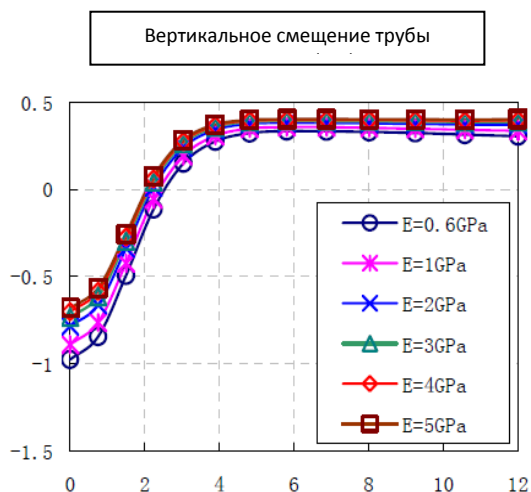


Рисунок 6. Эффект смещения ТП в вертикальной плоскости при различных свойствах грунта

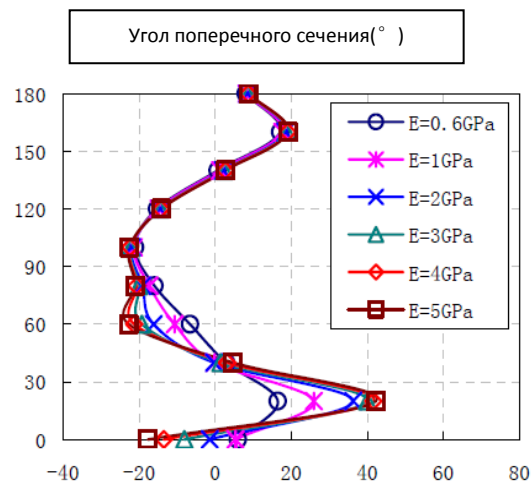


Рисунок 7. Изменение предельных напряжений при различных углах φ и действия нагрузки при разных свойствах грунта

2. Характер влияния изменений внутреннего давления на деформационные процессы в ТП

В настоящем обзоре выполнен анализ характера изменений внутреннего давления в 0.5 ~ 6 МПа на деформационные процессы в стенках ТП. На рис. 8 представлены вертикальные смещения трубы при разных значениях P (линии 1-5). Однако, установлено, что изменения давления могут оказывать влияние на устойчивость и деформацию трубы, но эти последствия не являются очевидными. Видно [10], что с ростом P смещение ТП уменьшается (см. линия 1, линия 5), с увеличением внутреннего давления, деформации в стенках ТП значительно увеличиваются, деформации напряжений в радиальном направлении при изменении угла φ на столь заметны (см. рис.9 линия 1, линия 5).

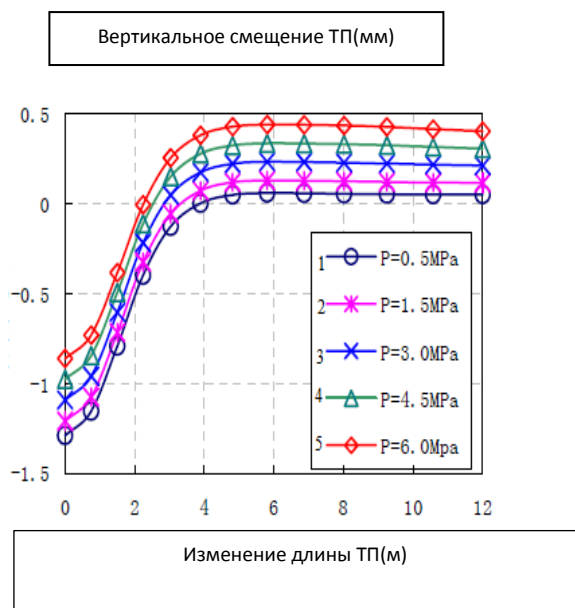


Рисунок 8. Влияние изменений внутреннего давления на характер вертикального смещения ТП



Рисунок 9. Изменение деформаций в стенке ТП при различных значениях угла ϕ и внутреннего давления в ТП (линии 1-5)

3. Оценка характера влияния геометрии ТП на интенсивность деформационных процессов в его стенках

Исследование характера воздействия геометрии ТП на деформационные процессы в стенках выполнены [11] при следующих сериях границ трубы (диаметр x толщина стенки). Из рис.10 (данные вертикального смещения трубы) видно, что для различных значений труб с низкими величинами параметров свойств грунта оседание (смещение) в основном тоже самое; От давления на область, вертикальное смещение трубы увеличивается с увеличением диаметра трубы. При различных значениях геометрии ТП (длины, толщины, стенки) имеем, что уровень изменения деформаций для труб с размерами 1012×14мм является высоким для труб с размерами (762 мм, 864 мм). Но, согласно рис. 11 деформация в ТП более заметна в трубах с большим диаметром.

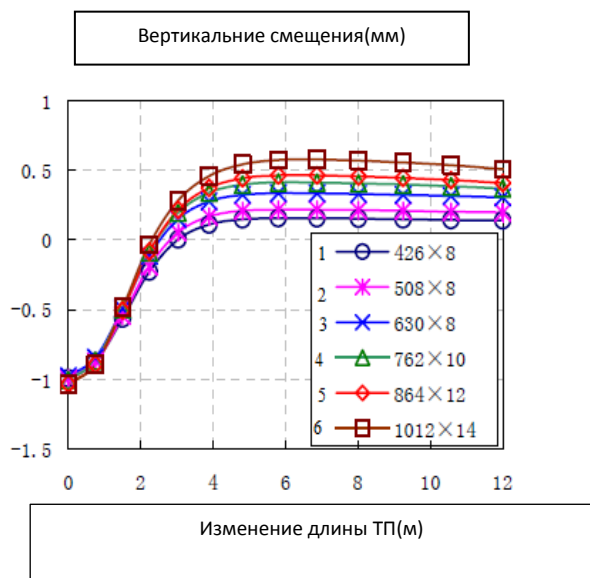
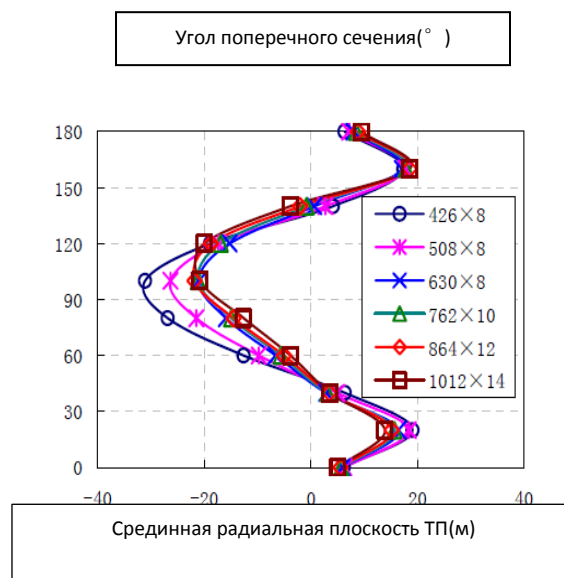


Рисунок 10. Характер влияния геометрических особенностей ТП (диаметр x толщина стенки) на вертикальные смещения ТП по длине ТП



Риснок 11. Изменение деформаций в радиальной плоскости ТП по толщине стенки в зависимости от угла ϕ и геометрии ТП (длина x толщина стенки)

4. Фактор учёта влияние давления нагрузки в локальной области ТП

Разрушение трубы сильно зависит от размера нагрузки и изменяет степень воздействия на ТП. В [Канада CSA-Z662-03] проводится анализ влияния нагрузки на окружные деформации трубы. Анализ данных эффектов выполнен по характеру изменения, параметра $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = 2(D_{\max} - D_{\min}) / (D_{\max} + D_{\min})$$

где D_{\max} - максимальный внешний диаметр трубы, D_{\min} - минимальный внутренний диаметр трубопровода.

Установлено [12], что для предотвращения преждевременного выхода из строя секции ТП изменение $\Delta\theta$ должно быть $\leq 0,06$. Рис.12 иллюстрирует влияние нагрузки на величину $\Delta\theta$. Видно, что $\Delta\theta$ увеличивается линейно по длине трубы, причём интенсивность изменения $\Delta\theta$ по длине ТП уменьшается (линия б) по мере увеличения нагрузки (до 500МПа). Согласно

границам изменения $\Delta\theta=(0,03-0,06)$ могут быть определены условия безопасности работы ТП.

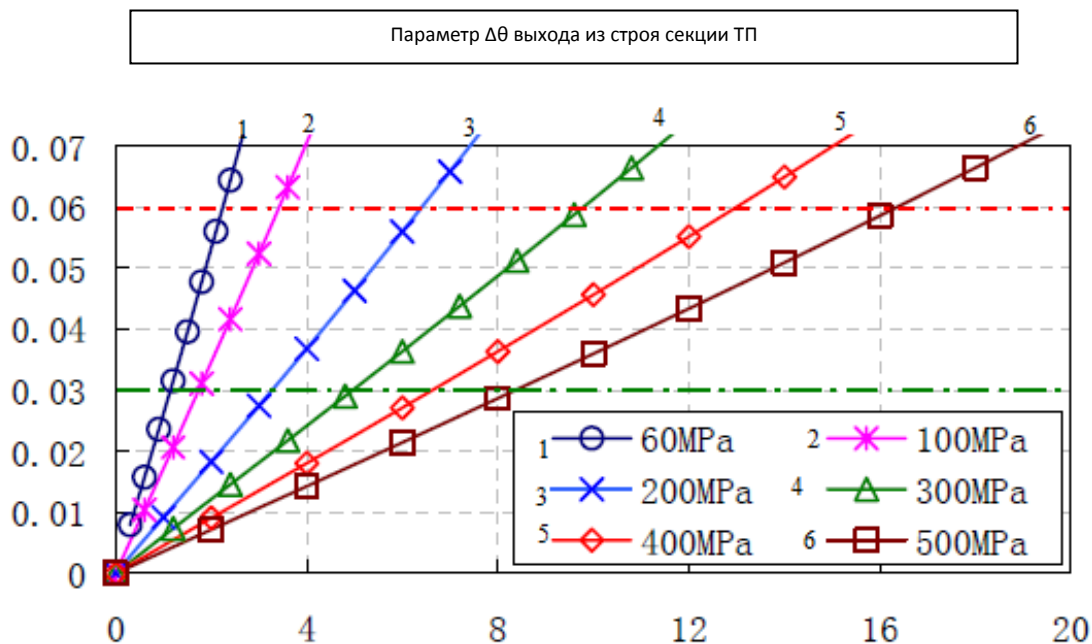


Рисунок 12. Характер изменения параметра интенсивности нагрузки R с изменением $\Delta\theta$ по длине ТП при различных значениях локального усилия (линии 1-6)

2. Некоторые сведения об исследованиях НДС ТП в российских публикациях

1. Исследования по оценке НДС трубопровода при пучении грунта.

Развитие нефтегазовой промышленности [15] на основе мощных трубопроводов и эксплуатация их в районах со сложными природными условиями поставили на повестку дня вопросы контроля и оценки прочности, работоспособности этих конструкций.

В России основной объем нефти добывается на северных месторождениях Западной Сибири, Республики Коми, обширные территории которых заболочены. Магистральные нефтепроводы, поставляя нефть в центральные

районы страны и на экспорт, пересекают водные преграды различной протяженности. Пересечение водных преград чаще всего решается путем строительства подводных переходов. Поэтому к надежности подводных переходов предъявляются высокие требования, так как даже незначительные повреждения переходов с потерей герметичности приводят к тяжелым экологическим последствиям.

2. Строительство трубопроводов в России

Анализ показывает [21], что с недавнего времени строительство подводных трубопроводов в России ограничивалось укладкой на сравнительно небольшие глубины, характерные для переходов магистральных нефте- и газопроводов через реки, озера, водохранилища и другие водные преграды (шельф Каспийского моря, Ладожское озеро, Охотское море, Куйбышевское водохранилище, Финский залив и др.) с глубинами до 60 метров.

Выполненный анализ результатов работ в [22] показывает, что в настоящее время актуальной является разработка уточнённого и эффективного метода расчёта НДС морских трубопроводов с бетонным утяжеляющим покрытием при укладке стингерным методом.

					Современное состояние проблем исследований НДС ТП	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. Данные исследований НДС трубопровода в других странах (Германии, США, Канада)

1. Тензометрирование

Первые два метода определения НДС трубопроводов носят эпизодический характер и не применимы для контроля НДС в реальном масштабе времени или с высокой периодичностью, а также требуют дорогостоящего высококвалифицированного персонала.

Реализация метода тензодатчика позволяет определять НДС в реальном времени и с любой заданной периодичностью. Интеллектуальная вставка (IW) позволяет выполнять этот контроль как в режиме реального времени, так и в режиме посещения, как указано в [23]. Основной целью интеллектуальной вставки является контроль механических напряжений, возникающих при пересечении опасных участков трубопровода.

Контроль напряжения осуществляется в четырех контрольных точках: снизу, сверху, справа и слева от трубы в направлении прокачки. В результате полученные данные позволяют полностью регистрировать НДС по трубопроводу на месте установки IW и в смежных областях.

Проблемы, возникавшие при применении метода тензометрирования в полевых условиях, полностью решены благодаря переносу работ по монтажу

						Лист
					Современное состояние проблем исследований НДС ТП	15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

датчиков на патрубке в заводские условия, где могут быть реализованы недоступные в трассовых условиях технологии и конструктивные решения [23]. Кроме того, появилась возможность проведения тарировки всей измерительной системы «патрубок – датчик – вторичный преобразователь», как следствие, решение проблемы «нулевого НДС».

Как известно [24], при разработке «интеллектуальной вставки» проанализирован и учтен опыт аналогичных работ, проведенных в Германии, что позволило существенно увеличить точность определения НДС в стенке металла трубопровода и оптимизировать технико – экономические показатели системы.

Патрубок, изготовленный из соответствующей трубы и прошедший тарировку в диапазоне рабочего давления, является измерительным элементом. При этом значительно повышается точность измерений, так как при тарировке ликвидируются все погрешности, разбросом характеристик датчиков и передаточных характеристик вторичных преобразователей.

Наш анализ показывает, что конструктивно в состав «интеллектуальной вставки», изображенной на рис. 18 входят [25]:

- измерительный патрубок, оборудованный комплектом привариваемых высокостабильных тензорезисторов, обеспечивающих измерение деформаций в трех направлениях;
- термоконтейнер с комплектом вторичных преобразователей и процессором, располагаемых подземно и обеспечивающих измерение сигналов тензорезисторов, тока и защитного потенциала электрода сравнения;
- контрольно – измерительный пункт (КИП).

						Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	Современное состояние проблем исследований НДС ТП	

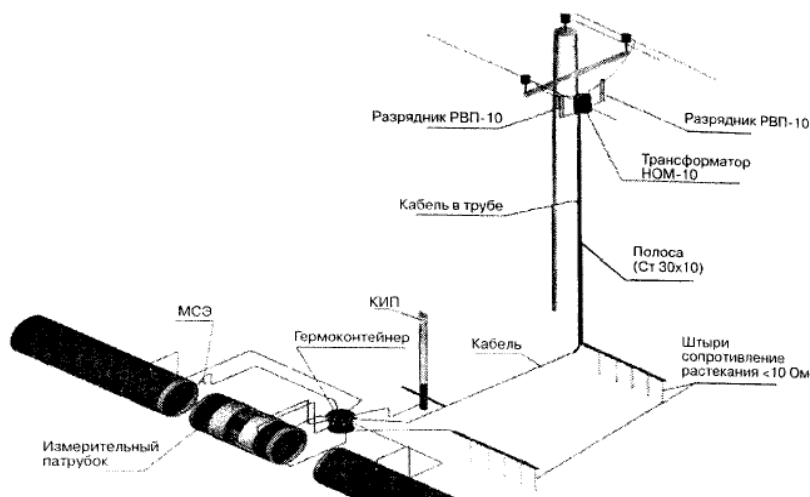


Рисунок 18. Схема установка «интеллектуальной вставки» на трассе магистрального трубопровода [25]

2. Анализ данных исследования деформированного состояния конструкций из композиционных материалов с помощью волоконно-оптических датчиков

Современные композитные материалы (КМ) на основе высокопрочных волокон находят все новые области применения. Успех использования этих материалов в значительной мере определяется возможностью достоверного прогнозирования их поведения при различных силовых и температурных воздействиях. Несмотря на большой опыт такого прогнозирования, накопленный к настоящему времени, существует и много нерешенных проблем, связанных с большой сложностью КМ как объектов моделирования, а также с появлением новых видов КМ и расширением областей их применения. В частности, встает задача контроля состояния изделий из КМ в процессе эксплуатации [31].

					Современное состояние проблем исследований НДС ТП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

Современные системы диагностики изделий из многослойных КМ должны оценивать их напряженно-деформированное состояние (НДС) и давать информацию для прогноза долговечности в реальном масштабе времени.

Чувствительные элементы, являющиеся источниками информации о состоянии КМ при эксплуатации реальных изделий, должны сами быть достаточно долговечными, обладать высокой чувствительностью, не должны создавать концентрации напряжений в изделии, и требовать громоздкой регистрирующей аппаратуры. Весьма перспективными для этих целей являются волоконно-оптические датчики (ВОД) [31].

В настоящее время на практике используются несколько типов датчиков: электрические датчики деформации (ЭДД) на основе пьезоэлектрических пленок; датчики акустической эмиссии на основе электронных или оптических эффектов; ВОД деформаций на основе дифракционных и интерференционных чувствительных элементов.

Активно развиваемые с конца прошлого столетия ВОД деформаций весьма удобны в конструкциях из волокнистых КМ. Они пригодны для измерений при высоких циклических нагрузках, во взры воопасных средах и в условиях электромагнитных воздействий. Их эффективность во многом обусловлена стойкостью сенсорного волокна к механическим повреждениям при интенсивных нагрузках, в том числе вибрационных. Они имеют легкие выводы, так как стеклянное волокно на порядок легче медного провода. Для них характерен малый объем проводниковых соединений, поскольку для сбора сигналов от множества датчиков используется одно оптоволокно или миникабель.

Волоконно-оптические датчики, пригодные для мониторинга НДС изделий из КМ, по типу физического эффекта, применяемого в них, можно

классифицировать следующим образом [32]: амплитудные, интерференционные, дифракционные, распределенные.

В лаборатории композитов НИИ СМ МГТУ им. Н.Э. Баумана [32] проведен анализ возможностей использования дифракционных ВОД при исследовании и текущем контроле НДС конструкций из КМ. В дифракционных ВОД, как правило, используются волоконные решетки Брэгга (ВОБР). Здесь применяется эффект, в соответствии с которым длина волны пика отраженного света пропорциональна изменению шага решетки Брэгга, который, в свою очередь, определяется деформацией и температурой. Деформацию в месте расположения ВОД определяют по сдвигу длины волны пика сигнала. Анализ показывает [33], что преимущества ВОБР следующие: высокое значение отношения полезного сигнала и шума; высокая чувствительность к деформациям (менее $0,5 \cdot 10^{-6}$); возможность опроса по одному волокну; мультиплексирование во множество ВОД (до 10 тыс. шт.); трехосевая деформационная чувствительность.

В лаборатории композитов проведена отработка методики использования ВОД в реальных изделиях из КМ. На первом этапе, который представлен в настоящей работе, отрабатывались расчетные методики и технологические методы на трубчатых многослойных образцах.

Целесообразность исследования таких образцов определяется следующими факторами [33]: образец прост в изготовлении и хорошо отработан в испытаниях, может содержать кольцевые слои и одно или несколько семейств спиральных слоев; удобно отрабатывать технологию внедрения ВОД в структуру многослойного КМ; можно создавать различные виды напряженного состояния. Результаты, полученные на трубчатых образцах, могут быть обобщены на другие конструкции из КМ.

					Современное состояние проблем исследований НДС ТП	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

При исследовании НДС композитных трубчатых образцов следует иметь в виду, что для анизотропных оболочек из КМ традиционные критерии тонкостенности могут приводить к большим ошибкам. Это потребовало проведения расчетного исследования зависимости деформаций, показываемых тем или иным датчиком, от положения этого датчика по толщине образца. Деформирование трубчатого образца рассматривалось в [34] цилиндрической системе координат, в которой ось X совпадает с осью трубы, ось r направлена по радиусу, а окружное направление обозначено θ . В одномерной постановке [34] пренебрегали напряжениями в осевом направлении, возникающими из-за разности коэффициентов Пуассона слоев. Полагали также, что все слои ортотропны в системе координат конструкции. Тогда осесимметричное деформирование можно рассматривать в одномерной постановке.

4. Основные выводы по данным обзора проблем исследования НДС ТП

Таким образом, анализ данных публикаций [1 - 34] позволяет утверждать, что:

1. В результате исследования разработанной модели методами планирования эксперимента и регрессионного анализа установлено, что определяющее влияние на статическую составляющую напряжений оказывает давление трубопровода.
2. При этом величины напряжений, связанных с нагрузками определяются расчетным путем, а напряжения, вызванные изгибающими моментами, на основании расчета или измерения упругой линии.

3. Установлено, что особенностью подземных трубопроводов является необходимость рассматривать систему "подземный трубопровод - массив грунт". В условиях ограниченности вычислительных возможностей данный факт требует индивидуального подхода при решении отдельных классов задач.

5. Некоторые данные обзора методов и программы расчёта трубопроводных систем

Трубопроводы различного назначения применяются практически во всех отраслях народного хозяйства. Они являются неотъемлемой частью конструкций современной техники.

Обзоры состояния исследований, включая существующие программные средства, содержатся в [35]. Ниже представлен обзор состояния исследований динамики и устойчивости трубок, проходящих через трубу; Рассмотрено взаимодействие трубок с невозмущенными и пульсирующими внутренними течениями

Наш анализ данных работ [35] показывает, что трубопроводы представляют собой обычно многократно статически неопределимые системы нерегулярной структуры. Поэтому определение внутренних усилий, возникающих в них под

действие внешних возмущений, в первую очередь связано с раскрытием их статической неопределенности. Основными методами, используемыми на этом этапе расчета, являются метод силы и метод перемещения [36]. Можно также использовать смешанный метод [36].



Риснок 20. Строительства НДС трубопровода для переходов через реку

							Лист
						Современное состояние проблем исследований НДС ТП	22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			

2. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ СОВРЕМЕННОГО АНАЛИЗА ПРОБЛЕМ. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ НДС СИСТЕМЫ

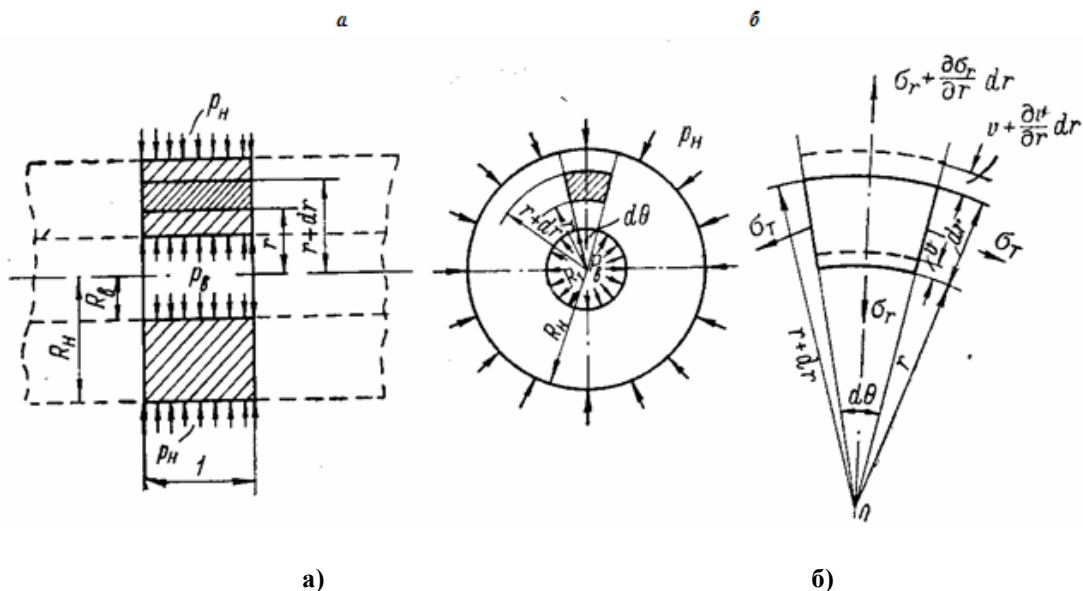
1. Детали моделирование процессов в тонкостенных ТП

1. Уравнение равновесия элемента трубы

Хорошо известно [42], что если толщина стенки трубы, нагруженной радиальной нагрузкой, превышает $0,1$ радиуса геометрической оси стенки, труба считается толстостенной.

Для проведения математического моделирования НДС ТП Рассмотрим длину трубы длиной, равной единице, вырезанной двумя участками, нормальными к оси трубки (рис. 21, а). Труба загружается на внутреннюю и внешнюю поверхности радиальной сжимающей нагрузкой; Интенсивность p_V и p_H этой нагрузки постоянны как вдоль оси трубки, так и вдоль ее окружности. Любой такой сегмент на некотором расстоянии от концов трубы находится в плоском деформированном состоянии.

					некоторые результаты современного анализа проблем. математическое и физическое моделирование НДС системы	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



Риснок 21. Схема процессов в элементе трубы между двух сечений, нормальных к оси трубы

Составим уравнение равновесия элемента трубы, выделенного двумя радиальными сечениями, составляющими между собой угол $d\theta$, и двумя окружными сечениями, радиусы которых r и $r + dr$ (рис. 21,б).

Дифференциальное уравнение равновесия (рис. 21,б) для осе симметричной задачи имеет вид

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (2.3)$$

Напряжения σ_r и σ_t выразим через относительные линейные деформации ε_r и ε_t с помощью закона Гука:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_r + \mu \varepsilon_t) \\ \sigma_t &= \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_t + \mu \varepsilon_r) \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

а относительные деформации заменим их выражениями через радиальное перемещение v (рис. 21,б), пользуясь зависимостями

$$\varepsilon_r = \frac{\partial v}{\partial r} \text{ и } \varepsilon_T = \frac{2\pi(r+v) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{v}{r} \quad (2.5)$$

Получим выражения для напряжений и дифференциальное уравнение равновесия элемента трубы в перемещениях

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \mu \frac{v}{r} \right) \\ \sigma_T &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{v}{r} + \mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial v}{\partial r} - \frac{v}{r^2} = 0 \quad (2.7)$$

Уравнение (2.7) может быть представлено в виде

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right) = 0 \quad (2.8)$$

откуда следует, что

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = \text{const} \quad (2.9)$$

Этому уравнению удовлетворяет решение

$$v = Ar + \frac{B}{r} \quad (2.10)$$

Заменив в формулах (2.6) перемещение v его выражением (2.10), получим для напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(A(1+\mu) - \frac{B}{r^2} (1-\mu) \right) \\ \sigma_T &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(A(1+\mu) + \frac{B}{r^2} (1-\mu) \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

На внутренней и наружной поверхностях трубы:

$$1) r=R_B, \sigma_r=-p_B; \quad 2) r=R_H, \sigma_r=-p_H.$$

Учет этих условий в первом уравнении (2.11) дает систему двух уравнений, содержащих A и B , решив которую, найдем

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1 - \mu}{E} \cdot \frac{R_B^2 p_B - R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} \\ B &= \frac{1 + \mu}{E} \cdot \frac{(p_B - p_H) R_B^2 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} \end{aligned} \right\}$$

Подстановка найденных значений A и B в уравнения (2.11) дает следующие выражения для напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_B^2 p_B - R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} - \frac{1}{r^2} \frac{(p_B - p_H) R_B^2 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} = C_1 - \frac{1}{r^2} C_2 \\ \sigma_T &= \frac{R_B^2 p_B - R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} + \frac{1}{r^2} \frac{(p_B - p_H) R_B^2 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} = C_1 + \frac{1}{r^2} C_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

а подстановка в уравнение (2.10) - выражение для радиального перемещения

$$\begin{aligned} v &= \frac{1 - \mu}{E} \frac{(R_B^2 p_B - R_H^2 p_H)}{R_H^2 - R_B^2} r + \frac{1 + \mu}{E} \frac{(p_B - p_H) R_B^2 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2} \cdot \frac{1}{r} \\ &= \frac{(1 - \mu) C_1}{E} r + \frac{(1 + \mu) C_2}{Er} \end{aligned} \quad (2.13)$$

В формулах (2.12) и (2.13)

$$C_1 = \frac{R_B^2 p_B - R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2}; \quad C_2 = \frac{(p_B - p_H) R_B^2 R_H^2}{R_H^2 - R_B^2}$$

Из формул (2.12) видно, что

$$\sigma_r + \sigma_T = 2C_1 = \text{const}$$

т. е. сумма радиального и окружного напряжений в любой точке есть постоянная величина, не зависящая от радиуса r .

По формулам (2.12) и (2.13) можно вычислить напряжения и радиальные перемещения, подверженного наружному радиальному давлению, если положить $R_B = 0$. В таком случае

$$(\sigma_r)_{R_B=0} = (\sigma_\tau)_{R_B=0} = -p_H \text{ и } v = -\frac{1-\mu}{E} p_H r$$

откуда видно, что материал стенки ТП испытывает однородное напряженное состояние. Это решение может использоваться для тестирования алгоритма решения задачи о НДС ТП.

2. Некоторые заключения о моделировании исследования напряжений при давлении на одном из контуров

В данном разделе остановимся на следующих результатах аналитического решения задачи о НДС, важных для практики приложений.

1. Пусть имеем случай сжимающей радиального давления на наружном контуре исследуемого элемента ТП. По формулам (2.12), положив в них $p_B = 0$, найдем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 - \frac{R_B^2}{r^2} \right) \\ \sigma_\tau &= \frac{R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 + \frac{R_B^2}{r^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

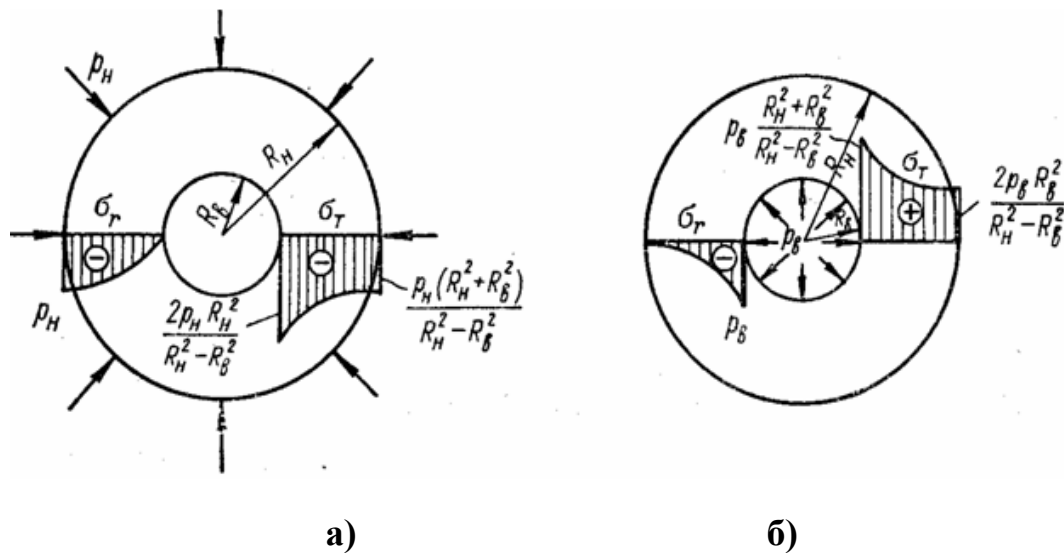
Заметим, что второй член в скобке (2.13) равен единице или меньше ее,

поэтому напряжения σ_r и σ_R во всех точках отрицательные, сжимающие. Видно, что окружное напряжение по абсолютной величине всегда больше радиального. Наибольшее нормальное радиальное напряжение σ_r возникает на наружной поверхности трубы ($r = R_H$) и равно $-p_H$, а наибольшее окружное напряжение σ_R - на внутренней поверхности ($r = R_B$) будет равно $-\frac{2R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2}$. Как видно из (2.14), напряжения меняются вдоль радиуса по криволинейному закону. Эпюры напряжений σ_r и σ_T показаны на рис. 22. Уменьшение наружного радиуса может быть определено по (2.13) для перемещения v , если положить в ней $p_B = 0$, а $r = R_B$. Тогда имеем напряжение:

$$v_{r=R_H} = -\frac{p_H R_H}{E} \left(\frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} - \mu \right) \quad (2.15)$$

2. Случай сжимающею радиального давления на внутреннем элементе контура ТП. По (2.12), положив в $p_H = 0$, найдем

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{R_B^2 p_B}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 - \frac{R_H^2}{r^2} \right) \\ \sigma_T &= \frac{R_H^2 p_H}{R_H^2 - R_B^2} \left(1 + \frac{R_H^2}{r^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.16)$$



Риснок 22. Эпюры напряжения [43]

Видно, что второй член в скобке (2.16) равен единице или больше ее, поэтому напряжения σ_r во всех точках трубы отрицательны, а σ_t - положительны. Наибольшее радиальное напряжение σ_r возникает на внутренней поверхности ($r = R_B$) и равно $-p_B$, наибольшее окружное σ_t - также на внутренней ($r = R_B$), оно создаёт растягивающий эффект и равно $p_B \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2}$.

Закон изменения напряжений вдоль радиуса тоже криволинейный [см. (2.16)]. Эпюры напряжений σ_r и σ_t показаны на рис. 22,б. Увеличение внутреннего радиуса может быть получено по (2.13) для перемещений v , если положить в ней $p_H = 0$, а $r = R_B$:

$$v_{r=R_B} = - \frac{p_B R_B}{E} \left(\frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} + \mu \right) \quad (2.17)$$

Соотношение окружных напряжений, вычисленных по формуле (2.16)

при $r = R_B$ и $r = R_H$, имеют вид:

$$\frac{(\sigma_T)_{r=R_B}}{(\sigma_T)_{r=R_H}} = \frac{(\sigma_T)_{\max}}{(\sigma_T)_{\min}} = p_B \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \div 2p_B \frac{R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} = \frac{R_H^2 + R_B^2}{2R_B^2} \quad (2.18)$$

Из (2.12) следует, что чем меньше толщина стенки ТП, т. е. чем ближе друг к другу значения R_B и R_H , тем ближе отношение (2.18) к единице, т. е. тем равномернее распределяются напряжения σ по толщине трубы. Например, при $R_B = 0,95$, отношение

$$\frac{(\sigma_T)_{\max}}{(\sigma_T)_{\min}} = \frac{R_H^2(1 + 0,95^2)}{2 \cdot 0,95^2 \cdot R_H^2} = 1,05$$

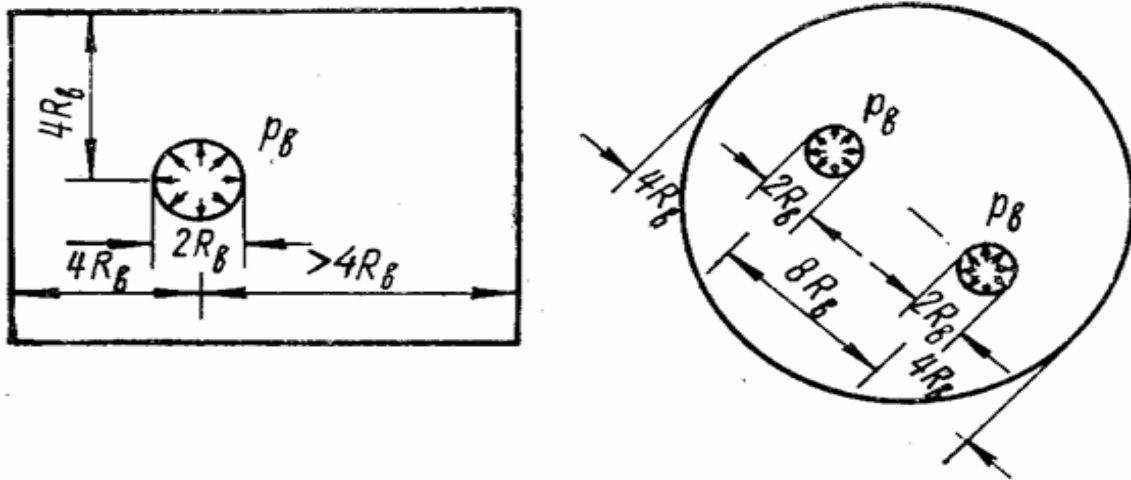
и окружные напряжения можно считать равномерно распределенными по толщине стенки ТП. При большой толщине трубы напряжения σ_z и σ_T в точках, удаленных от внутренней поверхности, сближаются по величине и в пределе, при $R_H \rightarrow \infty$.

Представим (2.11) в виде

$$(\sigma_z)_{R_H \rightarrow \infty} = \left[\frac{R_B^2 p_B}{1 - \frac{R_B^2}{R_H^2}} \left(\frac{1}{R_H^2} - \frac{1}{r^2} \right) \right]_{R_H \rightarrow \infty} = - \frac{R_B^2 p_B}{r^2}$$

$$(\sigma_T)_{R_H \rightarrow \infty} = \left[\frac{R_B^2 p_B}{1 - \frac{R_B^2}{R_H^2}} \left(\frac{1}{R_H^2} + \frac{1}{r^2} \right) \right]_{R_H \rightarrow \infty} = \frac{R_B^2 p_B}{r^2}$$

Тогда, имеем важные для практики случаи оценок изменений напряжений в стенке ТП. Так, если $r > 4R_B$, напряжения σ_r и σ_T будут равны и будут составлять меньше 6% от внутреннего давления. На этом основании по формуле (2.11) можно определять радиальные и окружные напряжения в случае плоской деформации тела стенки ТП, нагруженные радиальным давлением, расположенные друг от друга на расстоянии больше $8R_B$ (рис. 23). Внешний контур тела не имеет значения и может быть произвольной конфигурации.



Риснок 23. Случай прокладки ТП в констуре внешней среды плоской формы на росстоении болише $8R_B$ [44]

3. *Отдельные замечения об условиях прочности в задачах при упругой деформации тела*

В зависимости от принятого предельного состояния для наиболее напряженной точки на внутренней поверхности трубы получим следующие выражения:

					некоторые результаты современного анализа проблем. математическое и физическое моделирования НДС системы	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		44

1. Для хрупких материалов (чугун, бетон) по первой теории прочности имеем:

$$\sigma_1 \leq [\sigma] \text{ или } (\sigma_T)_{r=R_B} \leq [\sigma] \quad (2.19)$$

Тогда по (2.11) при $r = R_B$ следует расчетное напряжение:

$$\sigma_3 = p_B \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} \leq [\sigma]$$

или

$$-R_H^2(p_B - [\sigma]) \leq R_B^2(p_B + [\sigma])$$

откуда

$$\frac{R_H}{R_B} = \sqrt{\frac{p_B + [\sigma]}{[\sigma] - p_B}} \quad (2.20)$$

Связь (2.20) показывает, что при внутреннем давлении, приближающемся по величине к допускаемому напряжению $[\sigma]$, отношение $R_H/R_B \rightarrow \infty$, т.е.

Видно, что имеем никаким увеличением наружного радиуса R_H нельзя удовлетворить условию прочности (2.19).

2. Для пластичных материалов (сталь, медь) по третьей теории прочности

$$\sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma] \text{ или } (\sigma_T)_{r=R_B} - (\sigma_z)_{r=R_B} \leq [\sigma] \quad (2.21)$$

По формуле (2.11) при $r = R_B$ следует расчетное напряжение вида:

$$\sigma_3 = p_B \frac{R_H^2 + R_B^2}{R_H^2 - R_B^2} - (-p_B) \leq [\sigma] \quad (2.22)$$

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		41

или

$$R_H^2(2p_B - [\sigma]) \leq -R_B^2[\sigma]$$

откуда

$$\frac{R_H}{R_B} = \sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - 2p_B}} \quad (2.23)$$

Связь (2.23) показывает, что при напряжении $p_B \rightarrow \frac{[\sigma]}{2}$, отношение $R_H/R_B \rightarrow \infty$ увеличением наружного радиуса R_H удовлетворить условию прочности (2.22) нельзя.

3. Детали о корректности и точности метода расчета

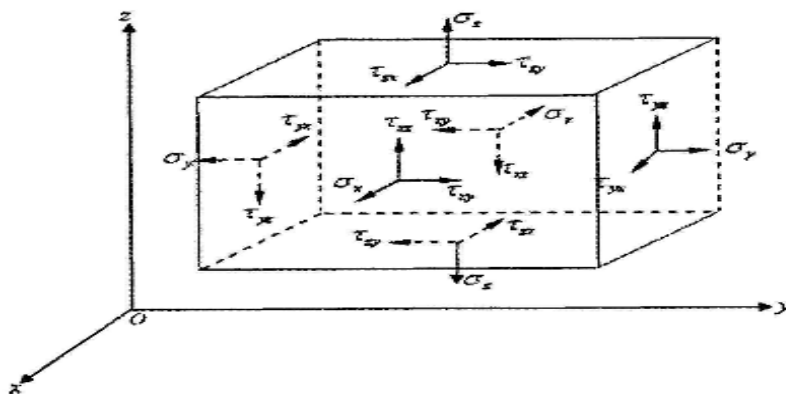
В данном разделе представлены функциональные связи о предельных НДС ТП случаях нагрузок на тело.

Хорошо известно [45], что наибольшее значение продольных напряжений проявляется в точках фиксации, т. е. величина продольного напряжения на внутренней стенке трубопровода в этих точках превышает предел текучести материала. Несущая способность трубопровода в точках крепления будет истощаться, когда давление в трубопроводе превысит предельное значение, при котором все поперечное сечение будет покрыто пластической деформацией. Ценная информация приведена в [45] результатов оценки стресс-деформации

состояния (НДС) системы. Расчёты показывают [46]. С целью повышения эксплуатационной надежности трубопроводов, необходимо своевременно проводить техническую диагностику и анализировать НДС, используя процедуры численного решения дифференциальных уравнений механики деформируемого твердого тела. Такие уравнения включают ряд важных понятий.

(1) Например, информацию о компонентах поверхностных сил напряжениях:

Так, когда объекты находятся под нагрузкой, то напряжение в любой момент можно разложить на величины: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$, где, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – нормальные напряжения, $\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{xz}$ – сдвигаемые напряжения [см. рис. 24]



Риснок 24. Компоненты напряжений и их направлений в случае пространственного действия нагрузки

(2) Эти напряжения связаны со смещением в точке соотношениями типа

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial w}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

Это формулы об деформации и смещения в объекта (есть условия)

(3) Определяющие уравнения к прогнозу НДС тела имеют символический вид:

и так,

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (2.25)$$

Здесь, $\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \sigma_{xy}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}\}^T$ – компонент тензора напряжений. $[D]$

– матрица упругой жесткости или матрица упругости или матрица

напряжение-деформация, которая включает данные о поведении с

коэффициент (упругости E) и коэффициент (Пуассона μ). $\{\varepsilon^{el}\}$ – упругие

деформация.

(4) Дифференциальные уравнения линейной теории упругости [47].

Основные уравнения теории упругости задаются тремя группами соотношений [47].

Первая группа представлена уравнениями статики в объеме

$$\text{Div} \hat{T} + \rho \vec{K} = 0 \quad (2.26)$$

Связывающими тремя соотношениями шесть компонент симметричного тензора напряжений \hat{T} .

Вторая группа уравнений содержит определение линейного тензора деформации $\hat{\varepsilon}$ через вектор перемещения u

$$\hat{\varepsilon} = \frac{1}{2} [\nabla u + (\nabla u)^*] \quad (2.27)$$

Здесь имеется шесть уравнений, определяющих компоненты тензора деформации по первым производным трех компонент вектора перемещения.

В третьей группе шести уравнений формулируется закон состояния линейно-упругого тела. Для изотропного тела и с учётом изобобщенного закон Гука, имеем:

$$\hat{T} = 2\mu \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \mathcal{E} \hat{E} + \hat{\varepsilon} \right), \quad (2.28)$$

где \hat{E} единичный тензор пятнадцать уравнений трех

групп содержат такое же число неизвестных: двенадцать компонент двух симметричных тензоров второго ранга \hat{T} , $\hat{\varepsilon}$ и три компоненты вектора u .

(5) Дифференциальные уравнения теории упругости в перемещениях уравнения (уравнения Ляме). Основываясь на исходных соотношениях, легко получить дифференциальные уравнения для вектора u . Имеют вид:

$$\mu \operatorname{div} \left[\frac{2\nu}{1-2\nu} \mathcal{E} \hat{E} + \nabla u + (\nabla u)^* \right] + \rho K = 0 \quad (2.29)$$

которое после подстановок

$$\operatorname{div} \mathcal{E} \hat{E} = \hat{E} \cdot \operatorname{grad} \mathcal{E} = \operatorname{grad} \operatorname{div} u, \operatorname{div} \nabla u = \nabla \cdot \nabla u = \nabla^2 u,$$

$$\operatorname{div} (\nabla u)^* = \nabla \cdot (\nabla u)^* = i_s \frac{\partial}{\partial x_s} \cdot i_k i_i \frac{\partial u_k}{\partial x_i} = i_t \frac{\partial^2 u_s}{\partial x_i \partial x_s} = \operatorname{grad} \operatorname{div} u$$

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

приводит к искомому дифференциальному уравнению

$$\frac{1}{(1-2\nu)} \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{u} + \nabla^2 \bar{u} + \frac{\rho}{\mu} \bar{K} = 0 \quad (2.30)$$

Проектируя его на оси декартовой системы, приходим к трем уравнениям, называемых дифференциальными уравнениями теории упругости в перемещениях уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial x} + \nabla^2 u + \frac{\rho}{\mu} K_x &= 0 \\ \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial y} + \nabla^2 v + \frac{\rho}{\mu} K_y &= 0 \\ \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial \mathcal{G}}{\partial z} + \nabla^2 w + \frac{\rho}{\mu} K_z &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.31)$$

где, $\mathcal{G} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = \operatorname{div} \bar{u}$ (2.32)

здесь - объемная деформация

Они были в первые даны Навье (1827), в «одноконстантной» теории (коэффициент Пуассона $\nu = 1/4$), и одновременно с ним Коши (1827-28).

Следствием уравнений (2.31) является дифференциальное уравнение для объемного расширения

$$\nabla^2 \mathcal{G} + \frac{\rho}{2\mu} \frac{1-2\nu}{1-\nu} \operatorname{div} K = 0 \quad (2.33)$$

Вспомнив преобразование, можно придать уравнению (2.30) другую, иногда применяемую форму:

$$\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \operatorname{grad} \mathcal{G} - \operatorname{rot} \operatorname{rot} u + \frac{\rho}{\mu} K = 0 \quad (2.34)$$

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Еще одна запись основана на легко проверяемом соотношении

$$\nabla^2 R\mathcal{G} = R\nabla^2 \mathcal{G} + 2\text{grad}\mathcal{G} = -\frac{\rho}{2\mu} \frac{1-2\nu}{1-\nu} R\text{div} K + 2\text{grad}\mathcal{G} \quad (2.35)$$

где $R=i_s x_s$ — вектор-радиус; заменив теперь $\text{grad}\theta$ в (2.30) его значением из (2.35), получаем уравнение в перемещениях в форме, предложенной Тедоне:

$$\nabla^2 \left(u + \frac{1}{2(1-2\nu)} R\mathcal{G} \right) + \frac{\rho}{\mu} \left(K + \frac{1}{4(1-\nu)} R\text{div} K \right) = 0 \quad (2.36)$$

При отсутствии объемных сил объемное расширение θ по (2.30) является гармонической функцией, а u — бигармоническим вектром:

$$\nabla^2 \mathcal{G} = 0, \nabla^4 U = 0, \nabla^4 u = 0, \nabla^4 v = 0, \nabla^4 w = 0 \quad (2.37)$$

Последнее сразу же следует из (2.31), но надо заметить, что три бигармонические функции (u, v, w) не независимы; действительно, по (2.37) вектор u представим (при $K=0$) через четыре гармонические функции — гармонический вектор a и гармонический скаляр \mathcal{G} :

$$u = a - \frac{1}{2(1-2\nu)} R\mathcal{G} \quad (2.38)$$

связанные условием (2.32)

Краевое условие на части границы, на которой заданы поверхностные силы, записывается через вектор перемещения в виде

$$\begin{aligned} F = n \cdot \hat{T} &= 2\mu \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \mathcal{G}n + n \cdot \hat{\varepsilon} \right) \\ &= 2\mu \left(\frac{\nu}{1-2\nu} \mathcal{G}n + n \cdot \nabla u + \frac{1}{2} n \times \text{rot} u \right) \end{aligned} \quad (2.39)$$

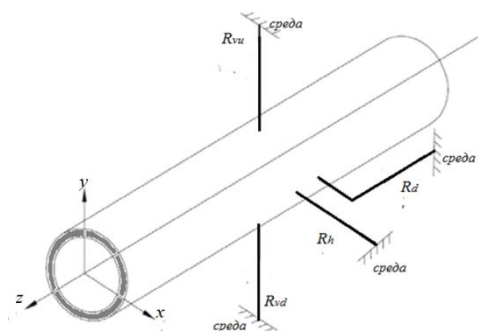
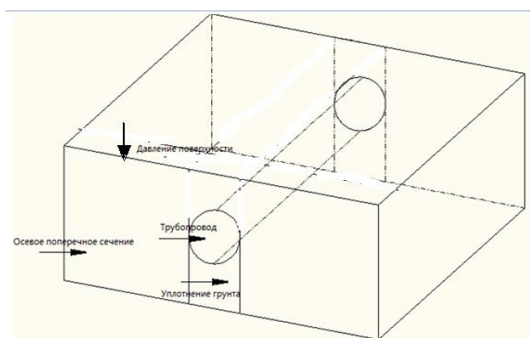
Там здесь получим уравнение

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	51
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\frac{\partial u}{\partial n} = n_x \frac{\partial u}{\partial x} + n_y \frac{\partial u}{\partial y} + n_z \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.40)$$

4. Физическая модель и замыкающие связи к исследованию трубопровода и его НДС в рамках цели ВКР

Основные допущения. Предполагается, что размещение трубопровода осуществляется в части местности со сложным рельефом, условиях изменения температуры окружающей среды. Причем в отдельных областях окружающего грунта вследствие его неоднородности, особенностей уплотнения под трубопроводом, имеются зоны повышенного внешнего давления. Размеры областей выраженного изменения давления и утрамбованного приповерхностного слоя под основание трубопровода иллюстрируют данные рис. 25, (а, б). Из схемы области исследования видно, что неоднородные нагрузки на трубу локализованы в приповерхностном слое длиной порядка (1-5)D. При моделировании распределения нагрузок в системе “трубопровод - внешняя среда” учитывается пространственный характер деформационных процессов, который выполняется в рамках “стержневой” модели сплошной среды для стенки и массива грунта [48]. Причем связи конечной жесткости устанавливаются в каждом узле системы по трем взаимно перпендикулярным направлениям [см. рис. 25, (б)].



					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирования НДС системы	52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Риснок 25,а. Область моделирования нагрузок в системе “трубопровод - внешняя среда” при ориентации объекта согласно координатам (см. рис.1,б).

Риснок 25,б. Схема стержневой модели участка трассы подземного магистрального трубопровода со связями конечной жесткости. Здесь обозначено: R_d - жесткая связь в осевом направлении; R_h - соответствующая связь в радиальном направлении; R_{vd} , R_{vd} - соответствующие связи в азимутальном (верх, низ) направлениях

В рамках выбранной физической модели (подобно подходу [49]) видно, что сопротивление массива грунта несимметрично из-за различий в значениях параметров, определяющих структуру и мощность грунта при засыпке (сверху) и под трубопроводом (снизу). С учетом сказанного предполагается, что в модели деформационных процессов в почве учитываются нелинейные эффекты в реологической связи для напряжений и скоростей деформаций, определенные в рамках расширенной модели Drucker-Prager, Ramberg-Osgood [6]. Заметим, что в представленном исследовании также проведены оценки НДС системы “трубопровод-почва” в рамках упрощенной модели с нелинейным тангенциальным контактом, в которой учитывается влияние трения грунта на внешнюю стенку трубы.

В общем случае кривые «сила – перемещение» имеют вид, представленный на рис. 26 Сопротивление массива грунта поперечным вертикальным перемещениям несимметрично, ввиду различной мощности обратной засыпки и грунта под трубопроводом.

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	53
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

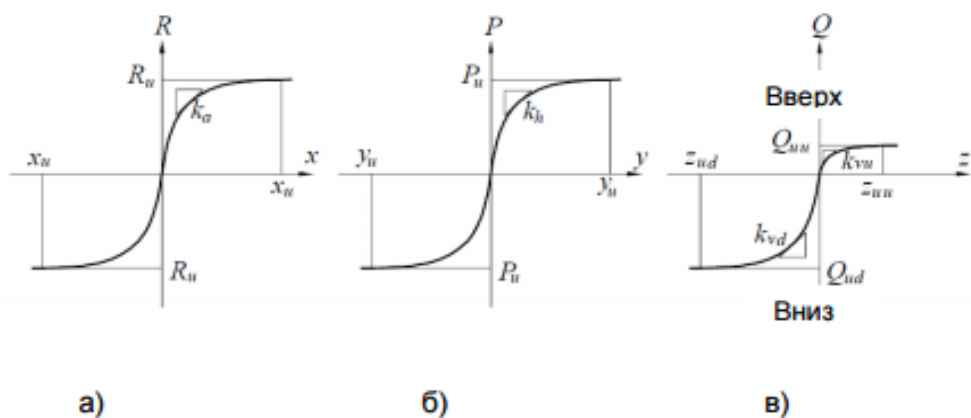


Рисунок 26. Характер сопротивления массива грунта перемещениям подземного трубопровода аналогично подходу[63]: а) продольным перемещениям (R-x), б) горизонтально поперечному перемещению (P-y), в) поперечным перемещениям по направлению вверх и вниз (Q-z)

Процедура задания жесткости связи включает: типизацию инженерно-геологических условий, выделение участков с одинаковыми грунтовыми условиями, определение для каждого участка жесткостных характеристик связей.

Для задания жесткостных характеристик связей возможно использование экспериментальных данных, инженерных и численных методов. Результаты экспериментов по определению сопротивления массива грунта перемещениям трубопровода приведены в работах [50].

Из рис. 25,26 видно, что сопротивление массива грунта поперечным азимутальным перемещениям несимметрично и различается в значениях параметров, определяющих структуру и мощность грунта при засыпке (сверху) и под трубопроводом (снизу). Кривые сопротивлений массива грунта от перемещений можно представить в виде функциональных зависимостей:

$$A=f_z(z); B=f_x(x); C=f_y(y).$$

Таким образом, из рис. 25,26 видно, что основная проблема прогноза процессов в системе с использованием связей состоит в определении функций сопротивления грунта $f_x(x)$, $f_y(y)$ и $f_z(z)$.

5. Постановка задачи о НДС ТП, определяющие уравнения математической модели и метод их решения

С учетом сказанного предполагается, что в модели деформационных процессов в почве учитываются нелинейные упруго- и вязкопластические, а также дилатантные эффекты в реологической связи для напряжений и скоростей деформаций, определенные в рамках расширенной модели Drucker-Prager. Трубопроводы представляют собой стальные трубы Ramberg-Osgood. Заметим, что в данной работе также проведены оценки НДС системы “трубопровод-почва” в рамках упрощенной модели с нелинейным тангенциальным контактом, в которой учитывается влияние трения грунта на внешнюю стенку трубы. Так, на шарнирных опорах расчет сил в системе выполняется с использованием уравнения трёх моментов, которое при равномерно распределённой поперечной нагрузке имеет следующий вид в условиях предположения о эквивалентности процессов в трубопроводе картина нагрузок в неразрезанной балке постоянного поперечного сечения [см. рис. 28,(a)]:

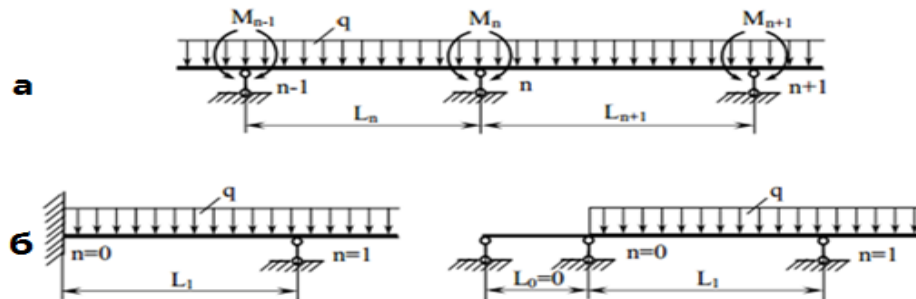
$$M_{n-1}L_n + 2M_n(L_n + L_{n+1}) + M_{n+1}L_{n+1} = -0.25q(L_n^3 + L_{n+1}^3). \quad (2.40)$$

Обозначения общепринятые: M_{n-1} , M_n , M_{n+1} – изгибающие моменты на опорах (n–1, n, n+1) соответственно; L_n – пролёт между опорами (n–1, n);

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

L_{n+1} – пролёт между опорами ($n, n+1$); q – интенсивность поперечной равномерно распределённой нагрузки.

Заметим, что при жёстком защемлении концов балки, для определения возникающих в заделке изгибающих моментов, со стороны заделки вводится дополнительный пролёт нулевой длины (рис. 27.б).



Риснок 27. Расчётная схема для определения опорных моментов неразрезной балки.

Здесь принято: рисунок (а) отвечает участкам балки на шарнирных опорах; рисунок (б) соответствует концу балки, имеющей жёсткое защемление

Влияние смещения опор учитывают путём добавления в левую часть уравнения (2.40) параметра R_n (опора реакция), вычисляемого по формуле:

$$R_n = -6EI \left(\frac{\Delta n - 1 - \Delta n}{L_n} - \frac{\Delta n - \Delta n + 1}{L_{n+1}} \right) \quad (2.41)$$

Где R_n – реакция опоры, EI – изгибная жёсткость сечения трубопровода.

Принимается, изгибная жесткость поперечного сечения прямого участка трубы:

$$EI_{b, str} = E \cdot (\pi D_e^4 / 64) \cdot (1 - (1 - 2 t / D_e)^4),$$

изгибная жесткость поперечного сечения отвода трубы (с учетом сплющивания):

$$EI_{b, elb} = E \cdot (\pi D_e^4 / 64) \cdot (1 - (1 - 2 t / D_e)^4) / k.$$

					некоторые результаты современного анализа проблем. математическое и физическое моделирования НДС системы	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		56

Здесь, D_e – наружный диаметр поперечного сечения трубы, t – толщина поперечного сечения трубы, E – модуль упругости, k – коэффициент гибкости по фон Карману; $\Delta_{n-1}, \Delta_n, \Delta_{n+1}$ – смещение опор $n-1, n, n+1$ соответственно (положительное при осадке опор).

Уравнение оси трубопровода представляем полиномом с аппроксимацией координат x и y , полученных геодезическим методом:

$$z = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m, \quad (2.42)$$

В методе моделирования уравнение трёх моментов (2.45) составляется для каждой опоры балочного перехода. После совместного решения полученных уравнений находим все значения неизвестных изгибающих моментов на опорах M_{n-1}, M_n, M_{n+1} .

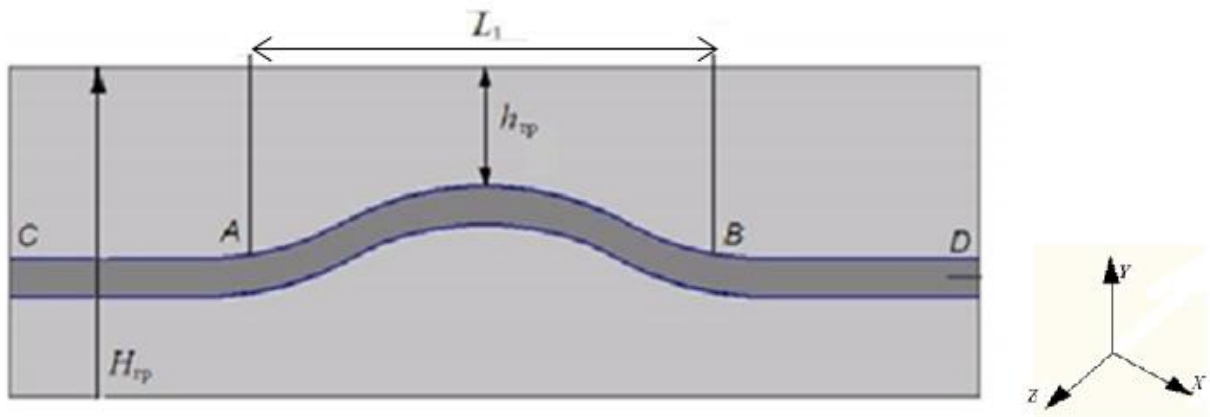
Для построения эпюры моментов каждый пролёт неразрезной балки рассматривают как балку на двух шарнирных опорах, нагруженных внешней нагрузкой и двумя опорными моментами. Ординаты эпюры вычисляют по формуле [51]:

$$M(x) = M_p^0(x) + M_{n-1} \frac{Ln - X}{Ln} + M_n \frac{X}{Ln} \quad (2.43)$$

где $M_p^0(x)$ – ордината эпюры изгибающих моментов от внешней нагрузки в основной системе.

С целью определения коэффициентов a_0, a_1, a_2 в соотношениях (2.42) решают систему уравнений, полученную на основании метода наименьших квадратов:

$$\left\{ \begin{array}{l} na_0 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n z_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ a_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + a_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n x_i^2 z_i \end{array} \right. \quad (2.45)$$



Риснок 28. Условные обозначения: АВ– участок пучения грунта; CD–расчетный участок; СА и BD– участки вне зоны пучения; $H_{гр}$ –высотное положение поверхности грунта; $h_{гр}$ – глубина залегания трубы

Решение задачи о взаимодействии трубопровода с грунтом на участках пучения строится с помощью системы дифференциальных уравнений [51]:

$$\left\{ \begin{array}{l} EJ_x \frac{d^4 v}{dz^4} - N(z) \frac{d^2 v}{dz^2} = q_y(z) \\ \frac{d^2 w}{dz^2} = - \frac{q_z(z)}{\pi DE \delta_R} \end{array} \right. \quad (2.46)$$

где v – вертикальное смещение трубы; w – продольное смещение трубы; $q_y(z)$ – вертикальная нагрузка на трубу; q_z – продольная нагрузка на трубу; E – модуль упругости металла трубы Па; $N(z)$ – продольная (осевая) сила, Н; $J_x(z)$ – момент инерции поперечного сечения трубы относительно горизонтальной оси x , M^4

площадь поперечного сечения стенки трубы

$$F(z) = \pi \delta_R (D - \delta_R) \quad (2.47)$$

, м²;

осевой момент инерции поперечного сечения трубопровода

$$J = \frac{\pi [D^4 - (D - 2\delta_R)^4]}{64} \quad (2.48)$$

, м⁴.

6. Постановка граничных условий задачи для численного интегрирования определяющих уравнений математической модели и её замыкающих соотношений

При численном интегрировании системы [52], включающей:

- основные уравнения механики деформируемого твёрдого тело [Навье, в форме Ламе] для составляющих вектора перемещений с компонентами (u, v, w) в направлении осей (x, y, z) декартовой систем координат виде:

$$\left. \begin{aligned} (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho x &= 0 \left(= \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \right) \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho y &= 0 \left(= \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} \right) \\ (\lambda + \mu) \frac{\partial \theta}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho z &= 0 \left(= \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

(2.49) – это 3 дифференциальных уравнение равновесие; θ – объёмная

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

деформация (=divū - условия совместности деформаций Сен – Венана или уравнениями неразрывности: дифференциальных уравнений совместности)

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y} \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z} \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{zx}}{\partial z \partial x} \\
 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y} \\
 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z} \\
 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{zx}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z \partial x}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.50)$$

Заметим, что в (2.49), (2.50) обозначено:

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ - линейные деформации соответственно (вдали осей x, y, z),

$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ - угловые деформации.

Эти величины входят в систему соотношений Коши (выражения связи деформаций через перемещения), дополняющие соотношения

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\
 \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\
 \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.51)$$

Заметим, что в качестве объёмных сил в задаче о НДС ТП в системе “ТП - грунт” выступают собственные вес ТП, постоянный для всех его точек, и вес грунта. Причём в нашем пространственном случае анализе задачи имеем составляющие объёмной силы \vec{K} ($K_x=x, K_y=y, K_z=z$), которые в

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

зависимости от ориентации системы. “ТП - грунт” относительно осей декартовой системы координат будут иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= \sigma_x \cos(x, n_x) + \tau_{xy} \cos(y, n_y) + \tau_{xz} \cos(z, n_z) \\ Y &= \tau_{yx} \cos(x, n) + \sigma_y \cos(y, n) + \tau_{yz} \cos(z, n) \\ Z &= \tau_{zy} \cos(x, n) + \sigma_{zy} \cos(y, n) + \sigma_z \cos(z, n) \end{aligned} \right\} \quad (2.52)$$

Здесь \vec{n} - внешняя нормаль к поверхности тела, \cos – косинусы углов наклона внешней нормали с осями координат, которые определяют расположение площадки.

Заметим, что условия (2.52) в случае учёта собственного веса ТП и ориентации системы координат с осью (y), совпадающей с действием ускорения свободного переня (g) (вертикально вниз), даёт: $y=g, \rho y = \rho g = p$ – вес тела единицы объёма, $X=Z=0$; при включении воздействия грунта в \vec{K} включаются в (2.52) силы реакции на ТП от грунта.

Подчеркнём, что для интегрирование системы (2.49) - (2.52) с 9-тью переменными ($u, v, w; \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z; \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$) и заданными условиями на поверхности (следуют из (2.52)) необходимы дополнительные замыкания

относительно тензора напряжений ($\vec{\tau}$) и деформаций ($\vec{\varepsilon}$), $\vec{\sigma} = \vec{E} \cdot \vec{\varepsilon}$. Эта связь формулируется законом Гука для упругого тела:

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_x = \lambda\theta + 2\mu \frac{\partial u}{\partial x}, \\
 \sigma_y &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_y = \lambda\theta + 2\mu \frac{\partial v}{\partial y}, \\
 \sigma_z &= \lambda\theta + 2\mu\varepsilon_z = \lambda\theta + 2\mu \frac{\partial w}{\partial z}, \\
 \tau_{xy} &= \mu\gamma_{xy} = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right), \tau_{yx} \equiv \tau_{xy} \\
 \tau_{xz} &= \mu\gamma_{yz} = \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right), \tau_{zx} \equiv \tau_{xz}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

Заметим, что λ, μ – упругие константы Ламе, причём $\mu \equiv G$ – модель сдвига, E – модуль упругости (для изотропного однородного тела это постоянная).

Введение ν – коэффициента Пуассона, даёт связь для настоящих Ламе (упругих постоянных материала) в (2.53):

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda &= \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \\
 2\mu &= \frac{E}{1+\nu}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.53)$$

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (2.54)$$

в (2.54) модуль объёмной деформации.

С учётом (2.54) имеем связь объёмной деформации θ через объёмные напряжения (a): $a=K\theta$.

Таким образом, в задаче о НДС ТП в системе “ТП - грунт” краевые условия для системы (2.49) – (2.54) включают задание грунты соотношений:

- 1) форму и геометрические размеры системы тел “ТП - грунт”,
- 2) упругие постоянные (модули упругости), Т.е. физические величины, характеризующие упругие свойства материала системы тел,

					некоторые результаты современного анализа проблем. математическое и физическое моделирование НДС системы	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		62

3) нагрузки (приложенные на поверхности тела (системы тел)): давление грунта; снега; ветра; объёмные силы, распределенные по всему объёму ТП – собственный вес ТП, грунта,

4) условия опирания на грунт в нижней части ТП.

Требуется определить напряжения σ_{ij} и перемещения u_i как функции координат точки тела.

Для решения поставленной задачи, имеем:

- дифференциальные уравнения равновесия (2.49), выраженные через перемещения (или напряжения),
- условия на поверхности тела (ТП), выраженные через напряжения (2.52),
- уравнение Коши, дающие связь между деформациями и напряжениями (2.51),
- уравнения неразрывности, выраженные через деформации,
- уравнения зависимости между напряжениями $\bar{\sigma}$ и деформациях $\bar{\varepsilon}$ (2.53).

Здесь основные неизвестные - u_i (перемещения) – непрерывные

Функции координат: $u_i = f_i(x, y, z)$.

Заметим, что в этом способе решения уравнение неразрывности Сен – Венана (2.50) тождественно удовлетворяются, их применять не нужно.

Если по смыслу задачи требуется найти напряжения, то применяем

уравнения Коши (2.51): $\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = f'_x(x, y, z)$

Затем использует связи закона Гука:

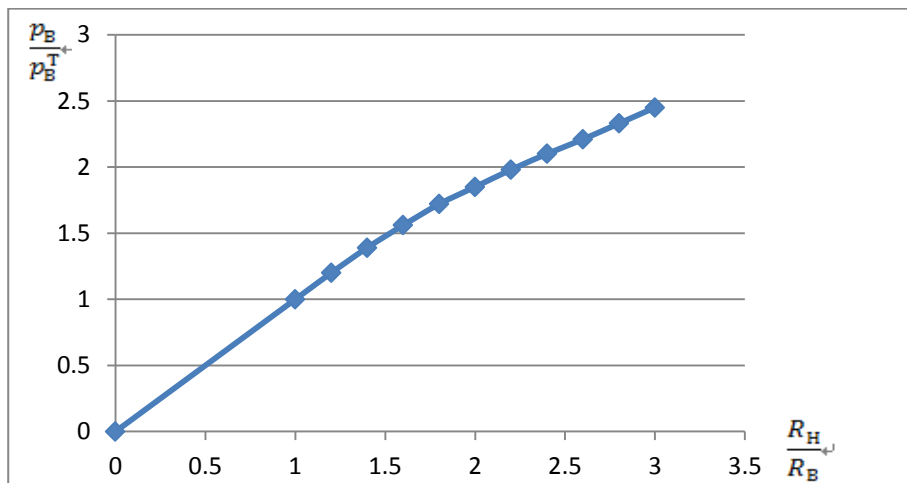
					некоторые результаты современного анализа проблем. математическое и физическое моделирование НДС системы	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

$$\left. \begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)] \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \\
 \gamma_{xy} &= \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{G} \tau_{xy} \\
 \gamma_{yz} &= \frac{\tau_{yz}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{G} \tau_{yz} \\
 \gamma_{zx} &= \frac{\tau_{zx}}{G} = \frac{2(1+\nu)}{G} \tau_{zx}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.55)$$

Рассмотрим некоторые результаты численного расчёта системы (2.49) – (2.54) с использованием МКЭ для дифференциальных уравнений (2.49). Расчёт выполнен на разностной сетке $H=(A_1 * A_2 * A_3)$ – числом конечных элементов – 10^4 . Дифференциальные уравнения сведены к разностным с L – порядком производных относительно шагов $\Delta x, \Delta y, \Delta z$. Линеаризованные уравнения решались ТДМА – методом расчёта и выполнено сравнение результатов на тривиальных случаях деформаций (данные задачи Ламе).

Таким образом, остаточные деформации появятся, прежде всего, у внутренней поверхности цилиндра, когда $(\sigma_T - \sigma_r)_{max}$ будет равно пределу текучести материала, и знаменатель (2.12) и (2.14); поэтому разность главных напряжений $(\sigma_T - \sigma_r)_{max}$ (здесь, $(\sigma_T - \sigma_r)_{max} = \frac{2\rho_B R_H^2}{R_H^2 - R_B^2}$) хотя и убывает, но очень медленно. Однако момент появления пластических деформаций у внутренней поверхности цилиндра далеко не соответствует исчерпанию грузоподъемности конструкции; для правильной оценки прочности необходимо перейти к расчету по допускаемым нагрузкам на рис. 30

					некоторые результаты современного анализа проблем.	Лист
					математическое и физическое моделирование НДС системы	64
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		



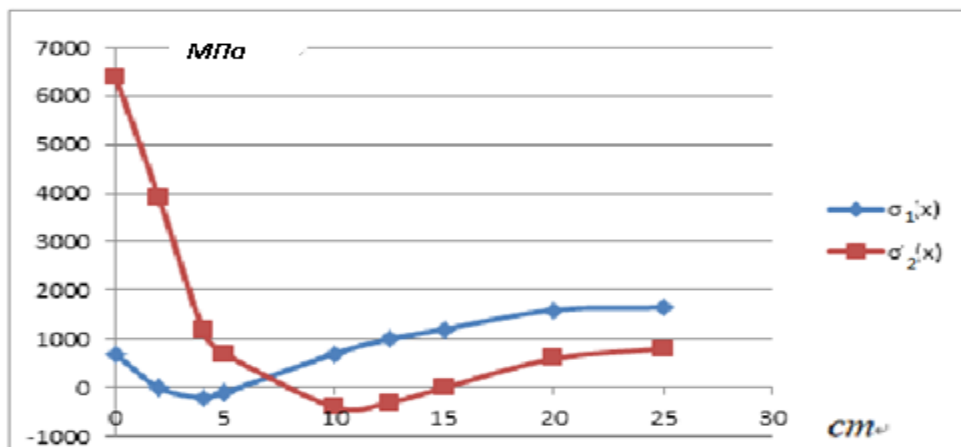
Риснок 30. Динамика зоны текучести, определенная параметром ($\frac{p_{B+}}{p_{B-}}$) по толщине цилиндра при изменении величины ($\frac{R_H}{R_B}$)

Продольные и кольцевые напряжения внутренней поверхности определяем по формулам

$$\sigma_1(x) = -\frac{6 \cdot M_1(x)}{h^2} + \frac{N_1}{h}$$

$$\sigma_2(x) = -\frac{6 \cdot M_2(x)}{h^2} + \frac{N_2}{h}$$

Распределений напряжений показаны на рис. 29 [53]



Риснок 30. Распределение продольных и кольцевых напряжений по длине ТП

Наибольшее значение продольных напряжений соответствует $x=0$ и равно $\sigma_r=6320\text{МПа}$, то есть величина продольного гапряжения у материала (3600МПа). Несущая способность ТП в сечение $x=0$ будет исчерпана, когда давление в НДС ТП превысит предельное значение, при котором все поперечное сечение будет охвачено пластической деформацией.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В этом пункте представлены данные расчёта НДС ТП со следующими условиями.

Исследование НДС системы “трубопровод-грунт” давлением в одном направлении проводилось при следующих значениях определяющих параметров: диаметр трубопровода – $D=1\text{m}$; материал – сталь МХ65; модуль упругости при растяжении - 207GPa ; предел текучести - 423MPa . Кроме того, в рамках модели Ramberg-Osgood связи “напряжение-деформации” используется коэффициент жесткости - 10.309 и коэффициент вариации - $2,66$. Область размещения трубопровода определялась параметрами - (длина x ширины x высота) = $(10\text{m} \times 1\text{m} \times 5\text{m})$.

Данные исследования локального воздействия (через грунт) НДС ТП. Предполагается, что имеет место распределенная нагрузка трубопровода на грунт с величиной 5MPa . Почва представляет собой пространство, окружающее объект изучения – трубопровод с параметрами: (длина x ширина x высота) = $(10\text{m} \times 10\text{m} \times 5\text{m})$.

Параметры почвы: коэффициент упругости - 60MPa , коэффициент Пуассона – 0.32 , коэффициент трения в системе “трубопровод-почва” - $0,6$. Дно траншеи предполагалось как абсолютно твердое с высоким уплотнением почвы на концах трубопровода.

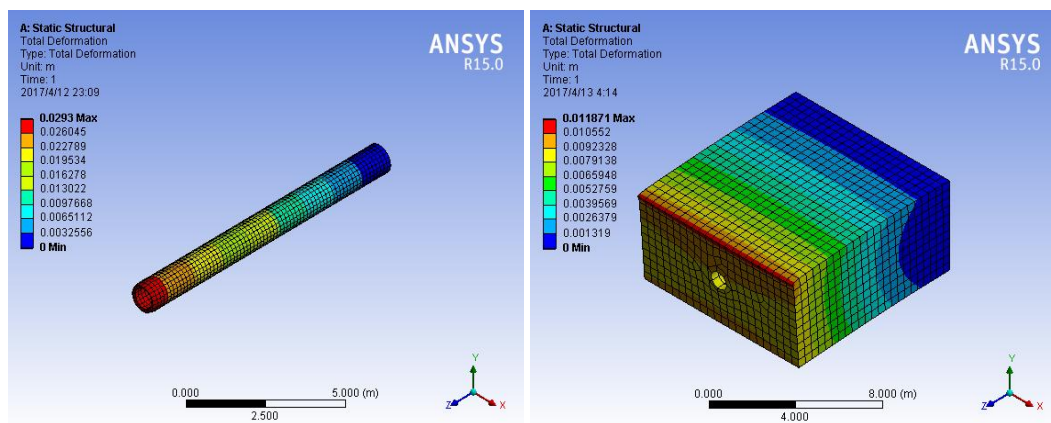
Отдельные результаты эффектов деформации и распределений напряжений в системе представлены на рис. 31,32. Здесь приведены характерные распределения перемещений в системе “почва-труба”.

					НДС ТП с учетом особенностей свойств грунта и комплексного действия на стенки внутренних и внешних динамических нагрузках			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	У Вэйпэн				Результаты и их обсуждение	Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Харламов С.Н.						66	8
Консульт.								
Зав. Каф.	Бурков П.В.					НИ ТПУ гр.2бм5Б		

Рисунок 31 показывает, что в результате контакта трубопровода с грунтом в условиях взаимовлияния нагрузок имеет место оседание почвы, способное деформировать (в виде изгиба) трубу. Это способно вызвать изменение общей нагрузки в нижней части трубы и определить характер азимутальных деформаций в стенке трубопровода. Видно, что рост напряжений и нагрузок проявляется в направлении к верхней части трубопровода и в основном относится к нижней зоне поверхности. Результаты позволяют утверждать, что в верхних областях стенки трубопровода доминируют деформационные процессы, обусловленные действием внутреннего гидродинамического давления. Причем реакция стенки на эти процессы характеризуется стабильностью и однородным распределением напряжений по периметру трубы. Это подчеркивает ослабление скорости деформационных процессов в указанных областях системы “трубопровод-грунт”.

Ниже приведены результаты, иллюстрирующие изменение напряжения трубопровода: $\sigma = \gamma h + \gamma_{\text{sat}} (z - d)$,

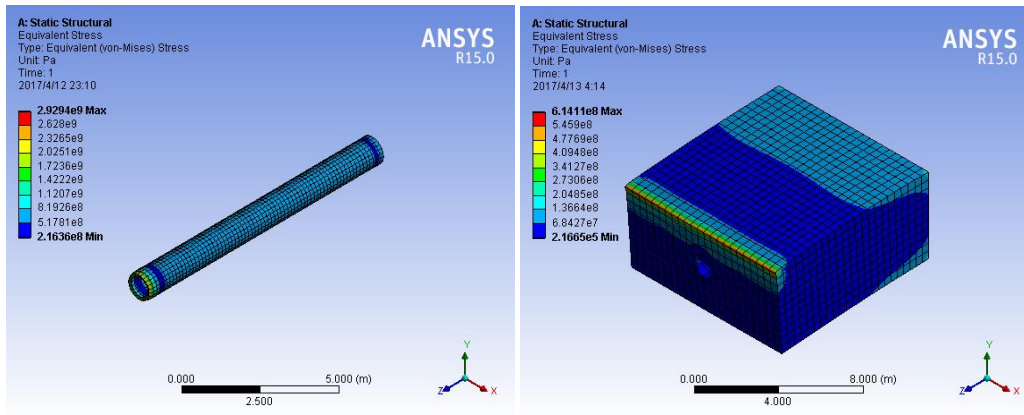
где σ – напряжение, γ – удельный вес грунта, γ_{sat} – все грунта НДС ТП, h – высота НДС ТП, z – укладке ТП от поверхность до трубопровода, d – радиус трубы.



(а)

(б)

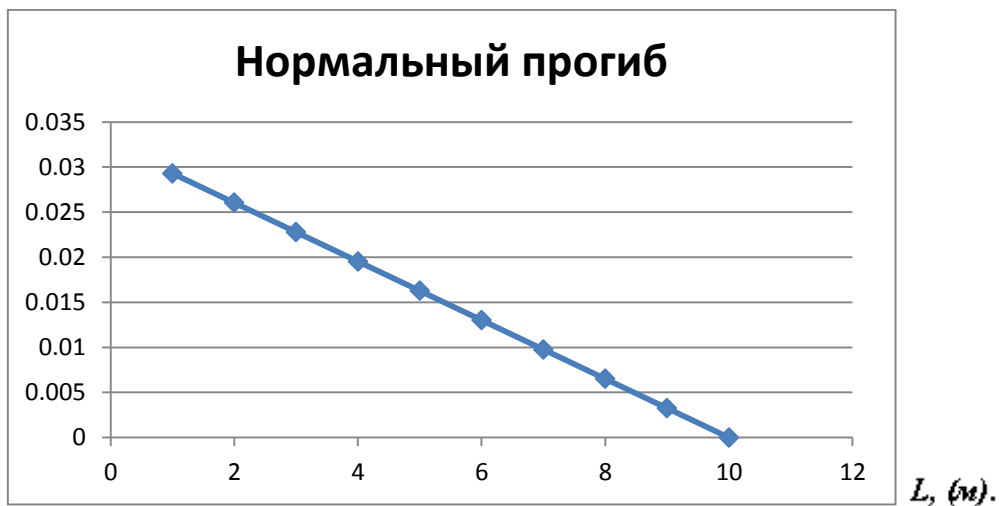
Рисунок 31. Картины характерных распределений полных деформаций трубопровода (а) и области грунта (б), м



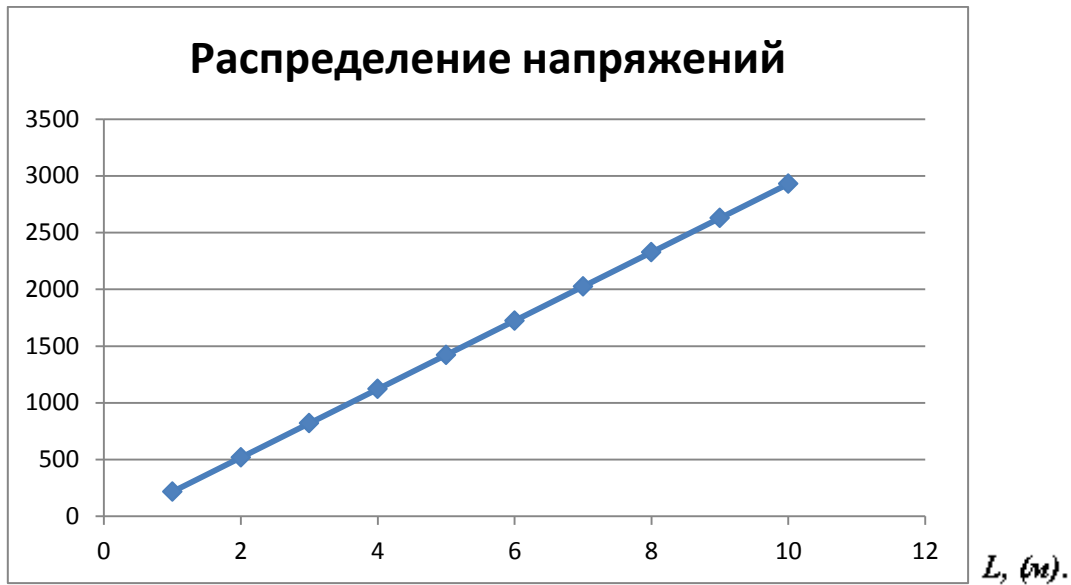
(а) (б)

Риснок 32. Картины характерных распределений эквивалентных напряжений в трубопроводе (а) и объёме пространства грунта(б),Па

Прогиб в месте закрепления отсутствует. Линии изменений деформаций (вертикального прогиба) и напряжений по длине трубопровода представлены на Рис 33,34.

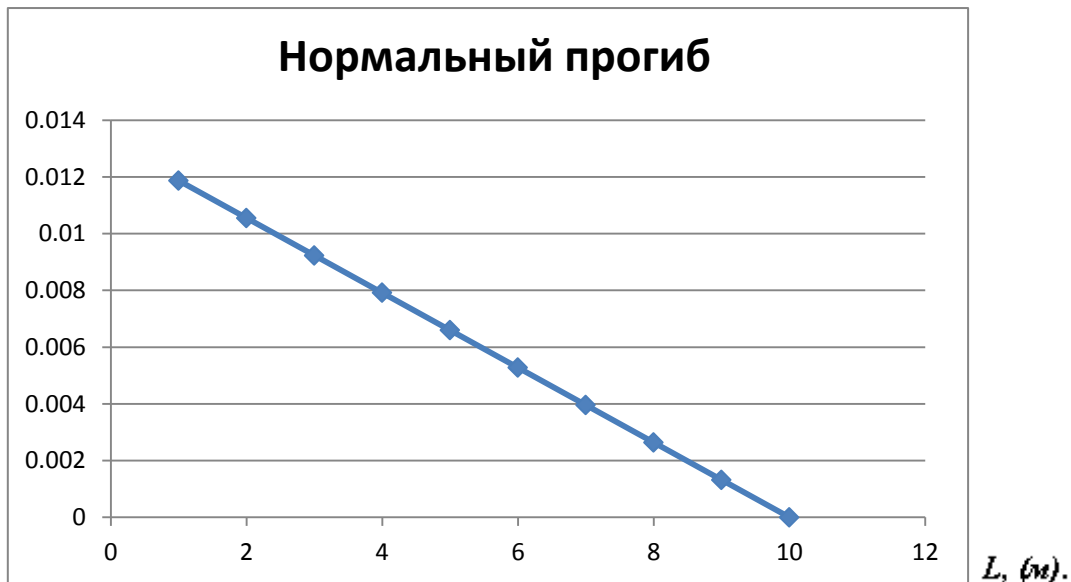


Риснок 33. Распределение величины нормального прогиба W_l (м) от длины трубопровода L , (м). Максимальное значение прогиба соответствует $W_l(max)=0.0293м$

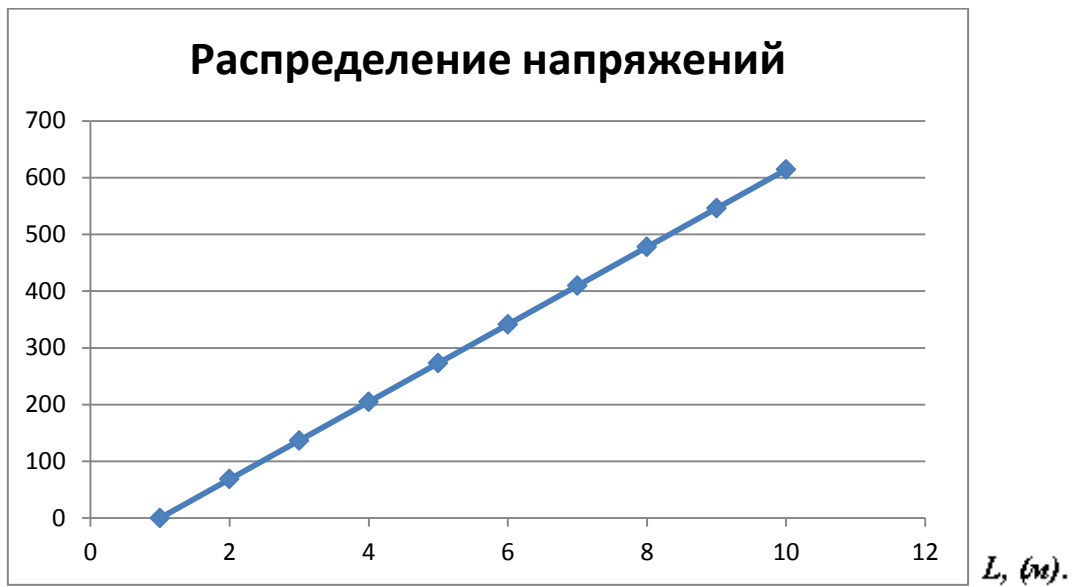


Риснок 34. Распределение величины напряжения $B_l(m)$ от длины трубопровода $L, (m)$. Максимальное значение прогиба соответствует $B_l(max)=2929,4MPa$

Прогиб в месте закрепления отсутствует. Линии изменений деформаций (вертикального прогиба) на напряжения грунта и деформации даны на рис. 35,36.



Риснок 35. Распределение величины нормального прогиба $W_l(m)$ от длины трубопровода $L, (m)$. Максимальное значение прогиба соответствует $W_l(max)=0.011871m$



Риснок 36. Распределение величины напряжения $B_l(m)$ от длины трубопровода $L, (m)$. Максимальное значение прогиба соответствует $B_l(max)=614,11MPa$

4. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В настоящее время перед РН-Ванкор стоит задача обеспечения работоспособности газотранспортной системы в условиях высокого износа основных производственных фондов и ограниченных инвестиционных возможностей по их капитальному ремонту и реконструкции. Одним из наиболее перспективных и экономически обоснованных вариантов решения данной проблемы является построенное на прогнозировании активное предотвращение различных инцидентов, аварий и чрезвычайных ситуаций. РН-Ванкор решает эту задачу путем создания и реализации целевых комплексных программ, к которым, в частности, относится создание системы управления целостностью газотранспортной системы.

Система управления целостность проектируется как вертикально-интегрированное решение, в котором информация по текущему техническому состоянию производственного объекта, выработка рекомендаций и осуществление мероприятий по надежности эксплуатации производятся по результатам диагностического обследования оборудования и трубопроводов с использованием инструментов управления рисками, моделирования и прогнозирования на основании данных технической диагностики.

Целью экономического расчета является расчет стоимости проведения операции по установки подсистемы мониторинга напряженно-деформированного состояния трубопроводных обвязок газокompрессорной станции.

					<i>НДС трубопровода с учетом геологической местности и условий эксплуатации трубы при динамических нагрузках</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>У Вэйпэн</i>				<i>Финансовый менеджмент</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Рцковод.</i>	<i>Харламов С.Н.</i>						71	8
<i>Консульт.</i>						НИ ТПУ гр.2дм5Б		
<i>Зав. Каф.</i>	<i>Бурков П.В.</i>							

1. Организационно-техническая подготовка к капитальному ремонту

При разработке проекта организации учитывались требования и основные положения следующих нормативных документов:

СНиП 3.01.01-85* Организация строительного производства;

СНиП 1.04.03-85* Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений;

расчетных нормативов для составления ПОС.

Так как газопровод прокладывается в районах вечномерзлых грунтов, проектирование следует осуществлять в соответствии с требованиями СНиП 2.02.04-88, специальных ведомственных нормативных документов, утвержденных Миннефтегазстроем, Мингазпромом и Миннефтепромом по согласованию с Минстроем РФ, и дополнительными указаниями настоящих норм.

Капитальный ремонт объекта осуществлялся по проекту производства работ, разработанного подрядной организацией, в соответствии с требованиями СНиП 3.01.01-85*, материалов рабочих чертежей и инженерных изысканий, исходных данных для составления проекта капитального ремонта.

До начала подготовительного периода должны быть проведены организационные мероприятия:

1. Утверждена и выдана подрядной организации проектно-сметная документация;
2. Решены вопросы обеспечения капитального ремонта материалами, конструкциями и деталями;
3. Определены строительные, монтажные и специализированные организации для осуществления запланированного капитального ремонта, и решены вопросы по обслуживанию строителей;

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	

Таблица 5.2 – Расчет затрат на материалы

Наименование	Затраты, руб.
Моющие средства	200
Хозяйственный инвентарь	700
Полотенца	950
Средства гигиены	350
Спецодежда	60150
Итого:	62350

3. Расчет времени

Рассчитаем время проведения технологических операций. Также необходимо принять во внимание, что работы по установки системы мониторинга проводятся на газокompрессорной станции.

$$N_{\text{ч}} = \sum_{i=1}^9 T_i; \quad (4.1)$$

Времени проведения технологических операций (сумма)

Норма времени, час:

1. Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния=25
2. Оборудование сетевое (цеховой уровень) СОЦ=33
3. Оборудование сетевое (агрегатный уровень) СОА=33
4. Место автоматизированное рабочее АРМ-01=33

4 Затраты на амортизационные отчисления

Норму амортизации для рассчитаем по линейному методу начисления амортизации:

$$K = \frac{1}{36} = 2,8 (\%);$$

Расчет амортизационных отчислений при проведении технической диагностики представлен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Расчет амортизационных отчислений

Объект	Стоимость руб.	Ко л- во	Месяч ная норма аморти зации %	Норма амортиза ции в месяц, руб.	Норма амортиза ции в час, руб.	Врем я рабо ты, час.	Сумм а аморт ., руб.
Подсистема мониторинга напряженно-деформированного состояния	2403761		2,78	8848,33	12,29	25	307,25
Оборудование сетевое (цеховой уровень) СОЦ	2001207	1	2,08	16458,33	22,86	33	754,34

Оборудование сетевое (агрегатный уровень) СОА	3123363	1	2,08	9027,33	12,54	33	413,75
Место автоматизированное рабочее АРМ-01	1526300	1	1,04	9027,33	12,54	33	413,75
Итого	1889,09						

5. Расчет затрат на оплату труда

К расходам на оплату труда относятся суммы, начисленные по тарифным ставкам, сдельным расценкам или в процентах от выручки от реализации продукции (работ, услуг) в соответствии с принятыми на предприятии (организации) формами и системами оплаты труда;

Таблица 5.3 – Расчет заработной платы

Должность	Разряд	Количество	Тарифная ставка, руб./час	Время на проведение мероприятия, ч.	Тарифный фонд ЗП, руб.	Сев. и рай. коэф. 50%+60%	Заработная плата с учетом надбавок, руб.
Мастер ЦКГ	8	1	245	31	11426,8	12569,4	23996,2
Оператор ТУ	6	2	160	31	7462,4	8208,6	15671

Оператор ТУ	5	2	154	31	7182,56	7900,8	15083,4
Сварщик	5	2	110	31	5130,4	5643,4	10773,8
Итого		11			38944,4	42838,8	144859,1

6 Затраты на страховые взносы

Рассчитывая затраты на страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний, выбираем класс III с тарифом 0,4 для предоставления прочих услуг, связанных с добычей нефти и газа (код ОКВЭД – 11.20.4)

Таблица 5.4 – Расчет страховых взносов

Показатель	Мастер ЦГ	Оператор ТУ 6 разряд	Оператор Т 5 разряда	Сварщик 5 разря
Количество работников	1	2	2	2
ЗП, руб.	23996,2	15671	15083,3	10773,8
ФСС (2,9%)	695,8	454,4	437,4	312,4
ФОМС (5,1%)	1223,8	799,2	769,2	549,4

ПФР (22%)	5279,1	3447,6	3318,3	2370,2
Страхов-ие от несчаст. случаев (тариф 0,4%)	95,9	62,6	60,3	43
Всего, руб.	7294,8	4763,9	4585,3	3275,2
Общая сумма, руб.	44037			

7. Затраты на проведение мероприятия

На основании вышеперечисленных расчетов затрат определяется общая сумма затрат на проведение технологического мероприятия (Таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Затраты на установку подсистемы мониторинга НДС ТПО

Состав затрат	Сумма затрат, руб.
Затраты на оборудование	9054631
Затраты на материалы	62350
Амортизационные отчисления	1889,09
Оплата труда	144859,2
Страховые взносы	44037
Накладные расходы (20%)	336314,6
Всего затрат:	9644080,89

Вывод: затраты на установку подсистемы мониторинга напряженно-деформированного состояния на трубопроводные обвязки газокompрессорной станции составят **9644080,89**рублей.

**5. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ РАЗРАБОТКА
(УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ) ТЕХНОЛОГИИ В
ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ УСЛОВИЯХ (ВАРИАНТ 3 - 3)**

1. Производственная безопасность

Таблица 6.1 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы при эксплуатации линейной части магистрального газопровода

Наименование видовы работа	Факторы		Нормативные документов
	Вредные	Опасные	
1) очистка внутренней полости трубопровода от инородных предметов; 2) калибровка трубопровода; 3) обследование трубопровода профилемером; 4) обследование трубопровода внутритручными магнитными и/или ультразвуковыми дефектоскопами .	1. Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе;	2. Пожаро и взрывоопасность.	ГОСТ 12.1.010–76 [2]

					НДС трубопровода с учетом геологической местности и условий эксплуатации трубы при динамических нагрузках			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Разраб.	У Вэйпэн				социальная ответственность	Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Харламов С.Н.						79	9
Консульт.						НИ ТПУ гр.2бм5Б		
Зав. Каф.	Бруков П.В.							

2.1 Анализ опасных производственных факторов и обоснование мероприятий по их устранению

1. Отклонение показателей микроклимата на открытом воздухе.

В холодный период года допустимая температура воздуха 19,1-22,0 °С.

В теплый период года допустимая температура воздуха 21,1-27,0 °С.

Таблица 6.2 – Работы на открытом воздухе приостанавливаются при погодных условиях

Скорости ветра, м/с	Температуры воздух °С
При безветренный погоде	-40
Не более 5,0	-35
5,1-10,0	-25
10,0-15	-15
15,1-20,0	-5
Более 20,0	0

2. Превышение уровней шума.

Высокомощные газоперекачивающие агрегаты, насосы, компрессоры, дизельные установки, двигатели внутреннего сгорания, электродвигатели, сепараторы и другое технологическое оборудование при работе создают шум, значительно превышающий предельно допустимые величины уровня шума, регламентированные ГОСТ 12.1.003-83, [5] ГН 2.2.4/2.1.8.562-96, ГН 2.2.4/2.1.8.566-96 и ГН 2.2.4/2.1.8.583-96.

Природоохранная служба обязана принимать непосредственное участие в проведении мероприятий, снижающих шумовое воздействие предприятия, таких как:

- внедрение малошумных технологий;
- звукоизоляция оборудования;

Согласно ГОСТ 12.1.003 – 83 (1999) [5] эквивалентный уровень шума (звука) не должен превышать 80 дБА.

Средства индивидуальной защиты:

- наушники;
- ушные вкладыши.

3. Утечка токсичных и вредных веществ в атмосферу.

Природный газ бесцветен, значительно легче воздуха, малотоксичен если не содержит вредных примесей более допустимых норм.

Если природный газ очищен в соответствии с требованиями ОСТ 51.81—82[8], «Газы горючие природные, подаваемые в магистральные газопроводы», его свойства мало отличаются от свойств метана.

2.2 Обоснование мероприятий по защите персонала предприятия от действия опасных и вредных факторов.

Опасными производственными факторами называются факторы, способные при определенных условиях вызывать острое нарушение здоровья и гибели человека.

									Лист
									81
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	социальная ответственность				77

2. Экологическая безопасность

В настоящее время большинство объектов нефтегазового профиля эксплуатируются более 20 – 25 лет и являются загрязнителями окружающей среды.

Конструктивная НДС трубопровода, как критерий его экологической безопасности, опирается на систему нормированных количественных показателей, определяющих уровень работоспособности трубопровода в реальном диапазоне эксплуатационных нагрузок и воздействий. В этой связи можно считать, что экологическая безопасность трубопровода является объективной мерой его эксплуатационных свойств, обеспечиваемых в процессе проектирования, строительства и эксплуатации трубопровода.

Магистральные трубопроводы воздействуют на окружающую среду не только при аварийных ситуациях. При строительстве трубопроводов наблюдается деструкция грунтового массива и нарушение сложившихся равновесных взаимосвязей между компонентами ландшафта.

3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Наиболее типичной и опасной является ЧС техногенного характера. Поскольку при аварии по причине износа уплотнительного устройства, а также

									Лист
									82
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	социальная ответственность				

ошибочных действиях персонала появляется возможность газовыделения с последующим возгоранием и взрывом.

Для снижения риска возникновения ЧС проводятся следующие мероприятия:

- -периодически анализ воздуха на содержание углеводородов;
- -техническая диагностика оборудования, а так же его техническое обслуживание и ремонт;
- замена физически и морально устаревш их приборов контроля и сигнализации на современные новые;
- проведение периодических и внеочередных инструктажей с обслуживающим персоналом.

Чрезвычайные ситуации на трубопроводном транспорте могут возникнуть по различным причинам, например:

- паводковые наводнения;
- лесные пожары;
- террористические акты;
- по причинам техногенного характера (аварии) и др.

								Лист
								85
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	социальная ответственность			

4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Технолог должен знать и соблюдать гражданский и трудовой кодексы и налоговое законодательство Российской Федерации. Работа вахтовым методом регламентирована главой 47 трудового кодекса Российской Федерации (ст. 297–302) [10].

По всей территории, рабочие места должны быть обеспечены средствами связи. Все помещениях организации должны быть оборудованы согласно принятым нормативным документам, санитарно-бытовые помещения иметь в наличии аптечки, носилки, шины и другие средства первой и основной медицинской помощи пострадавшему на объекте строительства трубопровода.

									Лист
									86
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	социальная ответственность				

6. ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Выводы по обзору исследований НДС трубопровода

1. Разработаны математические модели для аналитического и численного расчета изменения НДС трубы в процессе ее производства.
2. Методика численного моделирования формовки трубы в процессе производства реализована в виде подпрограммы для вычислительного комплекса ANSYS.
3. Установлено, что эффекты НДС трубопровода обостряются в тонко – стальных трубах (в сравнении с толстостенными) при увеличении внешней нагрузки. Причём рост диаметра ТП ведёт к большей устойчивости (от повреждений) и способствует увеличению срока функционирования системы в целом, при условии действия нагрузок равной интенсивности (в сравнении с трубами меньшего размера).
4. Установлено, что при контакте трубопровода с грунтом в условиях нагрузок на равнине Хуайбэй имеет место оседание грунта, способное деформировать (в виде изгиба) трубу.
5. Выявлено специфическое действия изменений общей нагрузки в нижней части трубы на характер азимутальных деформаций в стенке трубопровода, планируемого к размещению на равнине Хуайбэй, КНР.

					НДС ТП с учетом особенностей свойств грунта и комплексного действия на стенки внутренних и внешних динамических нагрузках		
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата			
Разраб.	У Вэйлэн				Лит.	Лист	Листов
Руковод.	Харламов С.Н.					88	3
Консульт.					НИ ТПУ гр.2бм5Б		
Зав. Каф.	Бруков П.В.						
Заключение и выводы работы в системе "ТП - грунт"							

2. Выводы по математическому и физическому моделированию

1. В настоящей работе выполнен обзор исследований, посвященных напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов. Установлено, что особенностью подземных трубопроводов является необходимость рассматривать систему "подземный трубопровод - массив грунта". В условиях ограниченности вычислительных возможностей современных ЭВМ требуются определенные физические упрощения для анализа процессов НДС.
2. Получены аналитические выражения для описания радиационного баланса слоистой дисперсной среды с отражающей поверхностью: коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности.
3. Функции $A=f_x(x)$; $B=f_y(y)$; $C=f_z(z)$ определены для случая трубопровода с осевой линией, лежащей в одной плоскости, и основана на использовании семузловых конечных элементов.

					Заключение и выводы работы в системе "ТП - грунт"	Лист
						89
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. Данные анализа расчётов

1. Приведены специфические распределения перемещений и деформаций в системе “трубопровод-грунт”.
2. Результаты показывают, что при контакте трубопровода с грунтом в условиях нагрузок имеет место оседание грунта, способное деформировать (в виде изгиба) трубы.
3. Изменения напряжений и нагрузок проявляются в направлении к верхней части трубопровода и в основном относятся к нижней зоне поверхности.
4. Установлено, что в верхних областях стенки трубопровода доминируют деформационные процессы, обусловленные действием внутреннего гидродинамического давления.
5. Реакция стенки на эти процессы характеризуется стабильностью и однородным распределением напряжений по периметру трубы.

					Заключение и выводы работы в системе "ТП - грунт"	Лист
						90
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

7. СПИСОК ЛИТЕРАТУРА

1. Афонасьев В.А., Березин В.Л. Сооружение газохранилищ и нефтебаз: Учебник для вузов. –М.: Недра, 1986. – 334с.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах/ К.А. Басов. –М.: Компьютер Пресс, 2002. – 224с.
3. Рудаченко А.В., Саруев А.Л. Исследования напряженно-деформированного состояния трубопроводов 2011(диссертация).
4. ABAQUS Inc. Abaqus analysis user's manual. ABAQUS Inc, 2004.
5. Watkins, Reynold K.; Moser, Alma P. Soil and surface loads on buried pipes including minimum cover requirements. American Society of Mechanical Engineers, Pressure Vessels and Piping Division (Publication) PVP, v 360, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards;1998: 483-495.
6. Kawabata T, Uchida K, Ariyoshi M, et al. D.E.M. analysis on behavior of shallowly buried pipe subject to traffic loads: Proceedings of the ASCE International Conference on Pipeline Engineering and Construction: New Pipeline Technologies, Security, and Safety, Jul 13-16 2003. American Society of Civil Engineers, 2003.

					<i>НДС трубопровода с учетом геологической местности и условий эксплуатации трубы при динамических нагрузках</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>	<i>У Вэйпэн</i>				<i>список литература</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Рцковод.</i>	<i>Харламов С.Н.</i>						91	4
<i>Консульт.</i>						НИ ТПУ гр.2дм5Б		
<i>Зав. Каф.</i>	<i>Бруков П.В.</i>							

7. Trickey Susan A, Moore Ian D. Three-dimensional response of buried pipes under circular surface loading. *Journal of Geo-technical and Geo-environmental Engineering*, 2007, 133(2): 219-223.
8. Lioliosao K, Pitilakisb M, Yeroyianni. ABEM-FEM convolutional approach to the unilateral contact problem of seismic soil-pipeline interaction. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1998, 22(1): 77-81.
9. S Iimura. Simplified mechanical model for evaluating stress in pipeline subject to settlement. *Construction and Building Materials*, 2004, 18(6): 469-479
10. Canadian Standards Association. CSA Z662-03, Oil and Gas Pipeline Systems. Rexdale, Ontario, Canada: Canadian Standards Association, 2003: 326-327
11. Березин Л.В. Методология оценки технического состояния и обеспечения работоспособности подводных переходов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук. РГУ нефти и газа им. И.М.Губкина. - Москва: 2004.-44с

						<i>Лист</i>
					<i>список литература</i>	92
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		

12. Виноградов С.В. Определение предельных напряжений в трубопроводах // Строительство трубопроводов. -М.: 1969. №10-С.21-23.
13. Иванцов О.М. Надежность строительных конструкций магистральных трубопроводов. М.: Недра, -1985. - 231 с
14. Басарыгин Ю.М., Будников В.Ф., Булатов А.И. Теория и практика предупреждения осложнений и ремонта скважин при их строительстве и эксплуатации: Справ, пособие: в 6 т. М.: Недра, 2004. - Т. 6. - 447 с.
15. РД 12-411-01. Инструкция по диагностированию технического состояния подземных стальных трубопроводов. — М.: Гостехнадзор, 2002. — 120 с.
16. Бородавкин П.П., Хигер М.Ш. Модель системы труба-грунт для определения продольных перемещений трубопровода // Строительство трубопроводов. 1977. - №5. - С.24-25.
17. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы (проектирование и строительство). М.: Недра, 1982. - 384 с.
18. Бородавкин П.П. Механика грунтов. М.: Недра, 2003. - 349 с.
19. Бородавкин П.П., Березин В.Л., Быков Л.И., Григоренко П.Н. Вопросы проектирования и эксплуатации подземных магистральных нефте-и продуктопроводов / Тем.обзор. Сер. «Транспорт и хранение нефти и нефтепродуктов». М.: ВНИИОЭНГ, 1972. - 83 с.
20. Чирков В.П. Вопросы надёжности механических систем. М.: Знание, 1981.- 121 с.
21. Гумеров А.Г., Зайнуллин Р.С. Безопасность нефтепроводов. М.: Недра, 2000.-310 с.
22. Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. -М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.
23. Указания по расчёту параметров электрохимической защиты подземных коммуникаций компрессионных станций. РМ 51-11-75. М.: Мингазпром, 1975. - 50 с.
24. Методика расчёта технологических трубопроводов компрессорных станций — М : ВНИИГАЗ, 1992 — 53 с

25. Синюков А.М., Бородавкин П.П., Литвин И.Е. Основы расчёта надёжности и оптимизации коэффициентов запаса прочности основных несущих элементов магистральных трубопроводов. — М.: ГУЛ Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2002. 242 с.

Приложение П
(справочное)

**Форма титульного листа приложения для раздела ВКР,
выполненного на иностранном языке**

Приложение (обозначение приложения)

Раздел (номер раздела)

(наименование раздела)

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата

Консультант кафедры _____ (аббревиатура кафедры) _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

Консультант – лингвист кафедры _____ (аббревиатура кафедры) _____:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата

ENGLISH PART

1 Analysis of the stress-strain state of an air crossing of pipeline in the course of repair

Introduction

Main pipelines form a large part of tangible assets in the industry. They should be regarded as heavy duty structures because, even in the stage of design, very low safety factors (as compared with the other branches of industry) are specified for these objects with an aim of metal saving. Indeed, the integral safety factor of a main pipeline k with respect to the ultimate strength of the material u taking into account all partial safety factors is given by formula [1]

$$k = \frac{m}{k_1 k_a n} \tag{1}$$

where m is the factor of operating conditions and k_1 , k_a , and n are the safety factors with respect to the material, application, and loading, respectively.

We now substitute the typical values of these factors [1], i.e., 0.9, 1.4, 1.05, and 1.1, respectively, in relation (1) and obtain $k = 1.8$. This value is much lower than that usually used in designing, e.g., pressure vessels for which the standard safety factor is in no case lower than 2.5. The value of this integral factor is used to determine the working (standard) pressure according to the value of tangential stresses given by the formula $\sigma_\theta = pR/t$, where R is the radius of the pipe and t is the thickness of the pipe wall. Thus, even under the action of internal pressure, the metal of the pipe is close to the limits of the admissible state and the action of any other additional loads, e.g., of the weight of soil, can formally result in the transition of the pipeline into the inadmissible state.

					<i>НДС трубопровода с учетом геологической местности и условий эксплуатации трубы при динамических нагрузках</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>				
<i>Разраб.</i>		<i>У Вэйпэн</i>			<i>English Part</i>	<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Руковод.</i>		<i>Харламов С.Н</i>				98	12	
<i>Консульт.</i>						НИ ТПУ зр.2дм5Б		
<i>Зав. Каф.</i>		<i>Бруков П.В.</i>						

Another problem is related to the fact that the indicated standard specifications [1], unlike the standards accepted abroad, contain no classification of stresses into categories depending on their nature and the range (radius) of action. Therefore, since each stress concentrator can formally be regarded as a factor multiplying the acting stresses which is greater than one, the presence of any irregularities of the shape (mismatching of the axes of pipes walls, welding beads, etc.) may lead to the critical situations in which the acting stresses exceed the admissible levels. These facts are usually neglected and the admissible defects or concentrators are determined according to the standard specifications for the production of pipes or construction of pipelines. However, these requirements have nothing common with the actual strength and should, most likely, be regarded as specifications guaranteeing the required quality of works.

As a result, we encounter serious methodological problems when it becomes necessary to estimate strength in nonstandard situations with regard for the action of various other force factors and actual defects of shape of the metal. In what follows, we analyze an example of this sort. Indeed, we consider the procedure of local lifting of an air crossing of pipeline above the supports performed with an aim of replacement of insulation under the conditions of operating pipeline (loaded by internal pressure). At these sites, insignificant corrosion defects were detected.

In the literature sources, problems of this sort are considered fairly rarely and mainly deal with the construction of new structures but not with the maintenance of operating pipelines. The experience of lifting of pipelines with defects in the transverse weld is described in [2]. Much attention is given to the numerical analysis of the global stressed state of pipelines regarded as beams. The stress intensity factors are computed with regard for the actual geometry of the welds. The obtained bending stresses in the zone of welded joints (as in the case of the beam) are multiplied by the computed concentration factors and the resulting maximum values of stresses are equated to the admissible stresses [2]. Note that the admissible level of stresses

is chosen to be twice (!) larger than the yield strength σ_Y . The indicated value $2\sigma_Y$ appears as a direct consequence of application of the notion of categorization of stresses extensively used in foreign literature sources [3].

Thus, the justification of the necessity of realization of this kind of repairs is, as a rule, reduced to the solution of two problems: Determination of the stress-strain state depending on the mode of application of lifting forces and the height of lifting of the pipeline at the points of their application and finding the proper criteria of admissible state, including the possibility of taking into account the existing defects. The solution of these problems makes it possible to justify the possibility of lifting the pipeline and optimize this process. Thus, it is very important to know the distribution of forces acting upon the pipe-laying machines depending on the height of lifting because the maximum load that can be applied to each machine is limited.

Another problem that can be encountered in the process of lifting of pipelines is connected with the presence of transverse friction forces and potentially dangerous possibility of motion of the pipeline in the transverse horizontal direction. We now explain this observation in more detail.

Consider a long section of a pipeline lying on supports. Assume that the pipeline is heated to a certain temperature ΔT , which leads to the formation of compressive stresses N :

$$N = \alpha \Delta T E F \quad (2)$$

Where α is the coefficient of thermal expansion, E is the modulus of elasticity, and F is the cross-sectional area.

The critical buckling force of a hinged rod depends on the length of the section of pipeline L and the moment of inertia I

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (3)$$

We now equate the right-hand sides of relations (2) and (3) with regard for the facts that $F = 2\pi R t$ and $I = \pi R^3 t$. As a result, we obtain $\Delta T_{cr} = \pi^2 R^2 / (\alpha L^2)$. Thus, for

carried out in summer, we also took into account the fact that the actual temperature may exceed the temperature of closing of the pipeline in the process of manufacturing. Hence, to make correct decisions in managing the repair works, we pose the following set of problems that should be solved in our investigation:

(i) to find the tractive forces formed in pipe-laying machines in the case of motion of the pipe above the supports and as a result of lifting by 10 cm over the supports; to analyze the process of lifting of the pipe by up to 50 cm over the anchor supports;

(ii) to determine the bending stresses at each point of the pipeline in the course of lifting of the pipe over some supports; to compare these stresses with admissible stresses with regard for the stress concentration;

(iii) to analyze the situation of possible transverse motion of the pipeline with evaluation of the corresponding displacements and the possibility of their compensation as a result of mounting of additional transverse supports.

2. Preliminary Static Analysis of the Air Crossing. Prior to the evaluation of the stress-strain state (SSS) of the air crossing in the process of lifting of the pipe, we analyze the currently existing SSS. The SSS of the crossing with regard for the influence of underground sections is found by using the “3D PipeMaster” software complex. This complex is used for the numerical analyses of complex three-dimensional multiloop branched pipeline systems under static and dynamic loads [4–7]. In this case, the computational scheme may simultaneously include surface and underground sections with regard for different types of interaction of the pipeline with the soil. The proposed scheme of air crossing with underground sections is shown in Fig. 2. The static analysis of the SSS was performed under the following loading conditions: the total weight of the pipeline $q = 7300 \text{ N/m}$ (including the weights of the pipe and the product) and the internal pressure $p=4.5\text{MPa}$. To find temperature displacements, we performed numerical calculations for several cases, namely, by neglecting the friction forces on the supports, by taking into account these forces, and under the condition that the pipe is rigidly fixed on the supports.

with regard for the friction forces are detected on the first and 23rd supports. They are equal to 13 and 17 cm, respectively. In the case where the pipe-laying machines lift the pipe over the neighboring supports, the corresponding friction forces disappear and, as a result, the horizontal displacements become somewhat larger. The analysis of this situation is presented in the next section.

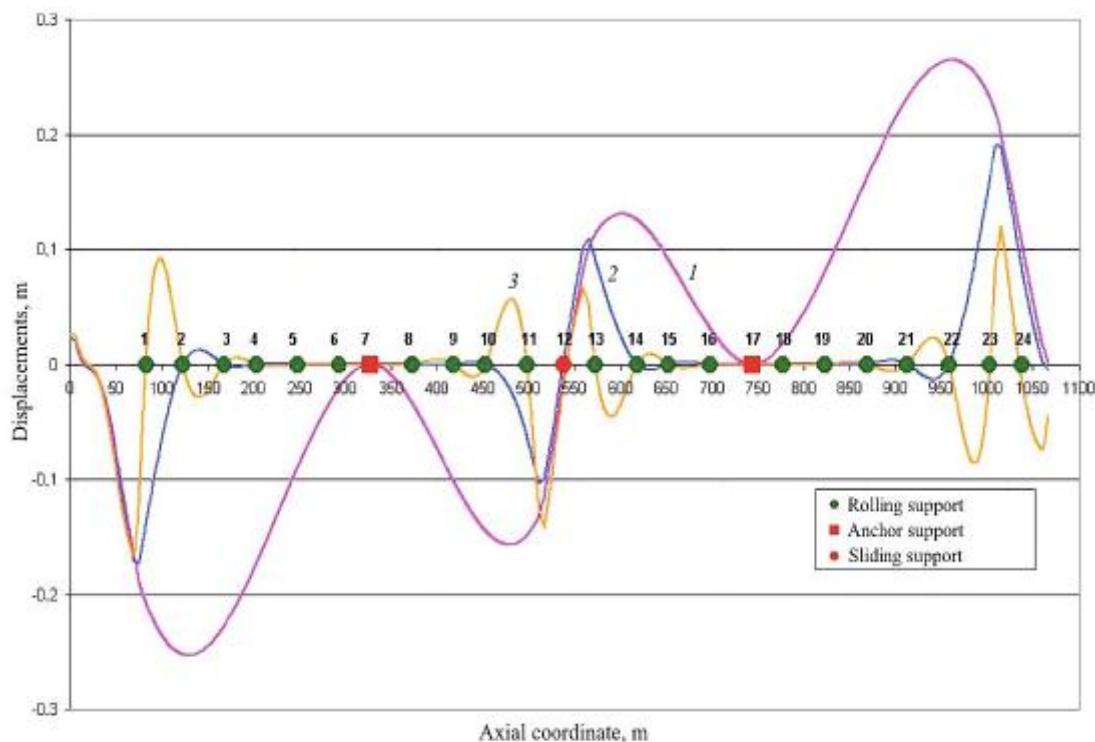


Fig. 3. Horizontal displacements in the presence of a temperature drop depending on the action of friction forces: (1) in the absence of friction, (2) in the presence of friction forces, (3) rigid supports.

3. Evaluation of Admissible Stresses. Prior to calculations, we determine the admissible stressed state. This state is used for the sake of comparison with the current stressed state corresponding to the repair works realized with lifting of the pipe over certain supports. Under the normal operating conditions of the gas pipeline, the internal pressure $p = 5.5$ MPa and the corresponding hoop stress is given by the well-known formula:

$$\sigma_{\theta} = \frac{pR}{t} = 195 \text{ MPa} \quad (4a)$$

In our analysis, this level of stresses is regarded as admissible. Clearly, the admissible design stresses are somewhat higher because they are specified depending on the ultimate strength of the material of the pipe. However, Fig. 2.

Schematic diagram of the air crossing constructed by using the “3D PipeMaster” software complex. To justify our choice, we can use the fact that the pipe has been in operation and may contain in-service defects or defects of the welds. This is why it is indeed reasonable to use a somewhat lower level of admissible stresses.

The nominal axial stresses are computed as follows:

$$\sigma_x^{\pm} = \frac{pR}{2t} \pm \sigma_M \quad (4b)$$

where σ_M are the stresses induced by the bending moment. Since the maximum bending stress in the gas pipeline $\sigma_M = 52$ MPa (see Section 2), the nominal axial stresses in the zones of tension and compression of the analyzed air crossing constitute $\sigma_x^+ = 149.5$ MPa and $\sigma_x^- = 45.5$ MPa, respectively.

We now use the third (Tresca) theory of strength as a criterion for the evaluation of the stressed state under the joint action of hoop σ_θ and axial σ_x^+ stresses:

$$\max\{\sigma_x^+, \sigma_\theta, \sigma_\theta - \sigma_x^-\} < [\sigma] = 195 \text{ MPa} \quad (5)$$

In the course of repair, the nominal internal pressure is reduced to $p_1 = 4.5$ MPa. Thus, according to relation (4), the nominal hoop stresses caused by the internal pressure are equal to 159 MPa. We evaluate the level of admissible bending stresses for the most conservative condition $\sigma_\theta - \sigma_x^- < [\sigma]$. According to (5) and (6), we can write

$$\sigma_M = [\sigma] - \frac{p_1 R}{2t} = 195 - 79.5 = 115.5 \text{ MPa} \quad (6a)$$

Further, we make a conservative assumption that the maximum bending stresses should not exceed

$$|\sigma_M| < 100 \text{ MPa} \quad (6b)$$

To take into account the presence of possible defects, we use the above-mentioned procedure of calculations with regard for the categorization of stresses. Since the presence of concentrators increases the level of stresses only in a local vicinity of the defect, and stress relaxation may occur in the presence of plastic

strains, the admissible level of stresses is usually much higher than the level of stresses induced by internal pressure. According to the practice of foreign standards [3], we assume that the acting stresses should be not higher than $2\sigma_Y$. In this case, the criterion used for the evaluation of the stressed state takes the form

$$k_1\sigma_\theta + k_2 \left| \sigma_M - \frac{p_1 R}{2t} \right| = 2\sigma_Y \leq 600 \text{MPa} \quad (7)$$

where k_1 and k_2 are the stress concentration factors in the circumferential and longitudinal directions, respectively. We now conservatively choose the maximum value of the indicated two stress concentration factors and obtain the following additional restriction on the level of bending stresses:

$$\sigma_M < \frac{600}{k} = 72.5 \quad (8)$$

Note that, for $k < 3.5$, this condition does not lead to any additional restrictions as compared with (6b).

4. Analysis of Lifting of the Pipe Over the Anchor Supports. Since the anchor supports 7 and 17 are similar (the lengths of the spans between neighboring supports are identical), we analyze process of lifting of the pipe solely for support 7. According to the preliminarily accepted “Program of Maintenance,” the pipe-laying machines are placed in pairs in front of and behind the support at a distance of 2 m. For this scheme, we computed the process of lifting of the pipe up to a height of 50 cm. In Fig. 4, we present the plots of vertical displacements of the pipe for the step-by-step loading process with identical forces applied to each pair of pipe-laying machines. It is easy to see that, in order to lift the pipe to a height of 50 cm over the support, it is necessary to apply a tractive force of 34 to each pair of pipe-laying machines. In this case, the corresponding maximum bending stresses become as high as 165 MPa, i.e., exceed the admissible level of stresses equal to 100 MPa.

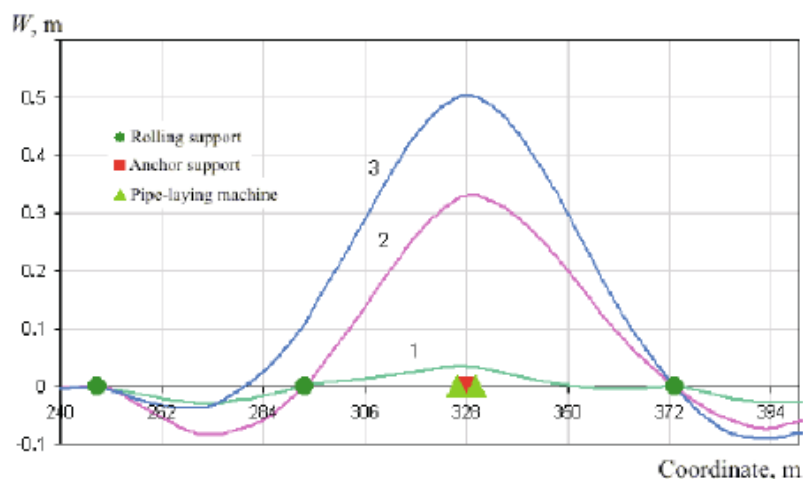


Fig. 4. Plots of vertical displacements in the process of lifting of the pipe over the anchor support:(1) P=16, (2) P=30, (3) P=34.

To decrease the level of bending stresses, the pipe-laying machines should be located at larger distances from each other, e.g., as shown in Fig. 5. For this scheme, the required displacement by 50 cm over the support is attained for the uniform loading of pipe-laying machines by a tractive force of 21. In this case, the maximum bending stresses become more than twice lower (77 MPa), which means that they are admissible.

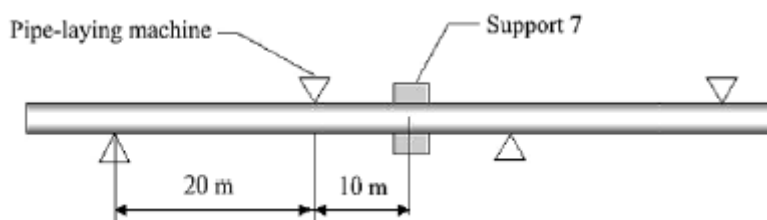


Fig. 5. Schematic diagram of location of the pipe-laying machines.

2 References

1. SNiP 2.05.06-85. Main Pipelines [in Russian], TsITP Gosstroya SSSR, Moscow (1986).
2. C. Alexander and R. Scrivner, "Analysis of girth welds in pipelines subjected to lifting loads," in: Proc. Of the 6th Int. Pipeline Conf. (IPC 2006, September 25–29, 2006, Calgary) (2006).
3. V. Orynyak, A. V. Bohdan, and M. V. Borodii, "Application of the categorization of stresses and strain criteria in the evaluation of the strength of main pipelines," Tekhn. Diagnost. Nerazrush. Kontr., No. 4, 6–15 (2007).

4. Ya. Krasovskii, I. V. Orynyak, S. A. Radchenko, and A. S. Batura, “Evaluation of the strength of pipelines of nuclear power plants with regard for their actual state by using the “3D PipeMaster” software complex,” in: Problems of the Service Life and Safety of Operation of Structures, Buildings, and Machines
5. [in Ukrainian], Kiev (2006), pp. 171–176.
6. I. V. Orynyak, S. A. Radchenko, and A. S. Batura, “Calculation of natural and forced vibrations of a piping system. Part 1. Analysis of vibrations of a 3D beam system,” Strength Mater., 39, No. 1, 53–63 (2007).
7. I. V. Orynyak, S. A. Radchenko, and A. S. Batura, “Calculation of natural and forced vibrations of a piping system. Part 2. Dynamic stiffness of a pipe bend,” Strength Mater., 39, No. 2, 52–71 (2007).

						<i>English Part</i>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			108