На правах рукописи

Козулин Александр Анатольевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИИ И ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре механики деформируемого твердого тела физико-технического факультета ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель:	доктор физико-математических наук, профессор Скрипняк Владимир Альбертович
Официальные оппоненты:	доктор физико-математических наук, профессор Барашков Владимир Николаевич
	кандидат физико-математических наук, доцент Реутов Анатолий Ильич
Ведущая организация:	Институт физики прочности и материаловедения СО РАН

Защита состоится « 04 » июля 2008 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу 634050, г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан « 28 » мая 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Применение конструкций из полимерных материалов таких, как полимерные трубопроводы, в климатических условиях России сопряжено с необходимостью решения вопросов прочности и долговечности их элементов, с учетом особенностей нелинейного механического поведения термопластов в диапазоне температур – от 0 ^{o}C до +80 °C. В современной науке подобные решения проводятся, в основном, экспериментальными методами. В этой связи разработка теоретических методов для оценки прочности и долговечности элементов полимерных конструкций является актуальной как в научном, так и в практическом отношении. В инженерной практике расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) в материале элементов конструкций проводится с использованием аппарата сопротивления материалов, строительной механики, с помощью упрощенных схем основанных на постулатах теории упругости, деформационной теории пластичности. Результаты исследований последних десятилетий указывают на необходимость разработки конструкций полимерных трубопроводов на основе расчетов НДС их элементов с учетом сложных реологических свойств современных материалов и характера вероятных нагрузок. Актуальность диссертационной работы определяется потребностью в теоретически обоснованных проектных решениях при конструировании трубопроводов из нового поколения термопластичных полимерных материалов. Особую ценность таких задач представляет решение для полимерных материалов, когда помимо сопоставления механических свойств материалов необходимо делать расчеты на условия эксплуатации конструкций. Разработка математических моделей на основе метода конечных элементов и алгоритмов численного решения нелинейных задач механики деформируемого твердого тела для таких конструкций является новым перспективным шагом в развитии компьютерных технологий. Разработанные методики применяются для проектирования полимерных конструкций, предназначенных для эксплуатации в разнообразных условиях, и позволяют обосновать выбор концепции конструкции на ранних этапах ее проектирования, обеспечивая при этом выполнение технических требований, среди которых главными являются прочность, как всей конструкции в целом, так и ее элементов в отдельности.

Вопросы прочности и долговечности полимерных материалов в элементах конструкций, работающих в различных условиях нагружения, с учетом их

технологических особенностей исследовались экспериментально и теоретически многими авторами (Работнов Ю.Н., Фролов К.В., Махутов Н.А., Малинин Н. Н., Аскельрад Э.Л., Ильин В.П., Якобсен А.Я., Гусенков А.П., Магалиф В.Я., Якобсон Л.С., Ромейко В.С., Шестопал А.Н., Персион А.А., Хасилев В.Я., Мережков А.П. и др.). Актуальность вопросов более подробного анализа деформационных свойств полимерных конструкционных материалов в областях неразрушающих нагрузок неоднократно обсуждалась на международных конференциях по материаловедению. Можно утверждать, что единого подхода к решению вопросов прочности полимерных конструкций нет. Однако широкое разнообразие полимерных материалов и большой объем накопленных экспериментальных данных дают предпосылки к разработке новых методов исследования деформационных свойств полимеров и создания на их основе практических методик. Использование при этом программных комплексов основанных на методе конечных элементов дает возможность исследовать НДС конструкций любой геометрии на их конечно-элементных моделях.

Целью диссертационной работы является анализ поведения полимерных материалов при учете механических свойств, вносящих основной вклад в напряженно-деформированное состояние. Разработка новых методов оценки прочности и долговечности полимерных композиционных материалов в конструкциях, работающих в широком диапазоне температур и нагрузок, при учете нелинейного механического поведения полимерных материалов и зависимости их механических свойств от температуры.

Для достижения поставленных целей были сформулированы и решены следующие задачи:

- исследование поведения термопластических полимерных материалов при деформациях в неоднородных температурных полях;
- оценка прочности и долговечности полимерных композиционных материалов в многослойных элементах конструкций полимерных трубопроводов;
- трехмерное компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния прямолинейных и криволинейных труб, отводов и компенсаторов термических деформаций трубопроводов;
- прогнозирование предельно допустимых значений внутреннего давления для полипропиленовых труб в зависимости от эксплуатационной температуры;
- получение оценочных результатов НДС в элементах разъемных

соединений из полимерных материалов при сложно-деформированном состоянии.

Методы исследования. При решении сформулированных задач использован метод конечных элементов, реализованный в программных комплексах ANSYS, SOLIDWORKS, COSMOSWorks. Численные результаты определения НДС в элементах конструкций получены при учете физических и геометрических нелинейностей моделей. Все задачи решались в трехмерной постановке

На защиту выносятся:

1. Результаты численного решения нелинейных задач в трехмерной постановке о деформации прямолинейных и криволинейных труб из полимерных материалов под действием внутреннего давления, продольных и изгибающих усилий, свидетельствующие о необходимости учета изменений механических свойств полимерных материалов при больших деформациях и наличии градиентов температуры.
2. Результаты численного моделирования НДС в трубах из термопластичных полимерных материалов, деформирующихся под действием механических нагрузок в однородных и неоднородных полях температуры, свидетельствующие о существенном влиянии градиента температуры в стенке труб на предельно допустимые нагрузки.
3. Полученные на основе результатов моделирования прогнозы долговечности и предельно допустимых значений нагрузок для труб из сополимера полипропилена «Рандом сополимер» PPRC TYP3в зависимости от эксплуатационной температуры.
4. Результаты численного исследования НДС в компенсаторах температурных расширений и отводах полимерных трубопроводов, свидетельствующие о существенно больших допустимых торцевых смещениях по сравнению с рекомендациями, полученными на основе инженерных методик.
5. Результаты исследования НДС в элементах разъемных соединений полимерных высоконапорных труб при сложнонапряженных состояниях, позволяющие оценивать их прочность.

Научная новизна.

1. Получены новые численные решения нелинейной задачи в трехмерной постановке о деформации под действием внутреннего давления прямолинейных и криволинейных труб, находящихся в однородных и неоднородных полях температуры, с учетом нелинейного поведения полимерных материалов. Показано, что напряжения, реализующиеся в трубах

из полимерных материалов с нелинейными механическими свойствами, ниже, а деформации - выше значений, полученных в приближении линейно-упругой модели. Учет распределения температуры в стенке труб приводит к качественным изменениям в распределении напряжений по сравнению со случаем однородного температурного поля.

2. Получен теоретический прогноз влияния нелинейного поведения термопластических материалов (полипропилена, полиэтилена) на прочность и долговечность прямолинейных и криволинейных труб, многослойных коаксиальных трубчатых элементов полимерных трубопроводов в диапазоне температур от 0 °С до +80 °С.

3. На основе новых численных решений задачи о деформации криволинейных труб из термопластов получен теоретический прогноз долговечности элементов полимерных трубопроводов при номинальных нагрузках (под действием внутреннего давления до 5 МПа и температурах в диапазоне от 0 °С до +80 °С).

4. Решена трехмерная задача о деформации двух типовых конструкций компенсаторов тепловых расширений полимерных трубопроводов («компенсирующей петли» и «компенсирующей скобы») с учетом нелинейного поведения материала.

5. В результате трехмерного моделирования деформации были получены оценки прочности разъемных соединений полимерных высоконапорных труб.

Практическая ценность работы. Диссертация выполнена в рамках ведомственной научной программы «Развитие научного потенциала высшей школы», подпрограмма: 3 «Развитие инфраструктуры научно-технической и инновационной деятельности высшей школы и ее кадрового потенциала», раздел 3.3: «Развитие научно-исследовательской работы молодых преподавателей и научных сотрудников, аспирантов и студентов». При участии автора в качестве исполнителя в составе коллектива проекта № 7828 (2005г.).

При поддержке двух Грантов Американского фонда гражданских исследований и развития (CRDF, проект ТО-016-02) на индивидуальную поддержку научных исследований в 2004-2005г, 2005-2006г;

Разработанные методики были включены в программу подготовки специалистов на физико-техническом факультете Томского государственного университета.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы доложены и обсуждены на 19 Международных, Всероссийских и

региональных конференциях: 1) Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», 8 апреля 2003г., г. Томск; 2) Всероссийская научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2003), 4 декабря 2003г., г. Новосибирск; 3) VII-ая Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука», 10 октября - 20 декабря 2003г., МИФИ, г. Москва; 4) Международная научно–практическая Интернет-конференция молодых исследователей «Перспектива и развитие», 1 сентября 2003г. – 15 февраля 2004г., г. Москва; 5) V Региональная школа-семинар молодых ученых «Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития», 4 - 6 февраля 2004г., г. Томск; 6) Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», 8 апреля 2004г., г.Томск; 7) 8th Korea-Russia International Symposium on Science and Technology KORUS 2004, June 26 – July 3 2004, Tomsk, Russia; 8) IV всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 5-7 октября 2004г., г. Томск; 9) Российская научно-техническая конференция «Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения», 28-29 сентября 2004., г. Томск; 10) Всероссийская научная конференция молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» 12-13 декабря 2004., г.Новосибирск; 11) VIII Московская международная телекоммуникационная конференция студентов и молодых ученых «Молодежь и наука». 10 октября - 20 декабря 2004 года, г. Москва; 12) I Всероссийская конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», 26-29 апреля 2005г., г. Томск; 13) Международная школа-конференция молодых ученых «Физика и химия наноматериалов», 13-16 декабря 2005г., г. Томск; 14) Всероссийская научно-техническая конференция «Физика и химия высокоэнергетических систем», 8 апреля 2006 г., г. Томск; 15) II Всероссийская конференция молодых ученых «Физика и химия высокоэнергетических систем», 26-29 апреля 2006 г., г. Томск; 16) X Российская научная студенческая конференция «Физика твердого тела», 4–6 мая 2006., г. Томск; 17) V Всероссийская конференция «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики», 3-5 октября 2006 ., г. Томск; 18) Зимняя школа по физике РФЯЦ-ВНИИТФ «Экспериментальные процессы и состояния» 25 января – 4 февраля 2007 г., г. Снежинск; 19) Конференция научно-образовательных центров «PAN REC» 14-15 июня 2007 г., г.Пермь.

Публикации. Результаты диссертационной работы опубликованы в 21 печатных работах, одна из них в издании, входящем в список ВАК. Публикации, отражающие основное содержание работы, приведены в конце данного автореферата.

Структура и объем диссертационной работы состоит из введения, четырех глав, заключения, списка используемой литературы; содержит 105 рисунков, 6 таблиц, библиографический список литературы из 100 наименований – всего 139 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение. Во введении обосновываются актуальность, практическая значимость проведенных исследований, сформулирована цель работы, изложены положения, выносимые на защиту. Приводится краткий обзор работ по вопросам нахождения НДС в элементах конструкций из полимерных композиционных материалов.

Первая глава. В первой главе решается задача об определении поля температуры в элементах полимерных конструкций при температурных воздействиях. Формулируется термомеханическая задача о нахождении НДС в элементах конструкций полимерных трубопроводов подверженных действию различных механических нагрузок в поле температур. Для таких конструкций, как полимерные трубопроводы, температурное поле или перепады температуры, реализовывающиеся в процессе эксплуатации, играют немаловажное значение. В этой связи важно не только адекватно описывать зависимость механических свойств от температуры, но и правильно оценивать температуру в элементах конструкций.

Однородное или неоднородное температурное поле формируется в результате теплообмена транспортируемой жидкости с элементами конструкций трубопровода и вмещающей трубопровод средой. Схема сечения исследуемого элемента коаксиального многослойного полимерного трубопровода показана на рисунке 1.

Для нахождения поля температуры в подобных конструкциях труб решалась стационарная задача теплопроводности. При численном решении задачи функции температуры задавались табличным способом. Текущие значения параметров отыскивались интерполяцией по экспериментальным данным в температурных диапазонах.

В результате проведенных расчетов были получены поля температуры в коаксиальных конструкциях трубопроводов горячего водоснабжения с

теплоизолирующим слоем. Расчеты выполнены для условий, имитирующих эксплуатацию трубопровода, проложенного в песчаном грунте, в весенне-зимний и летне-осенний периоды.

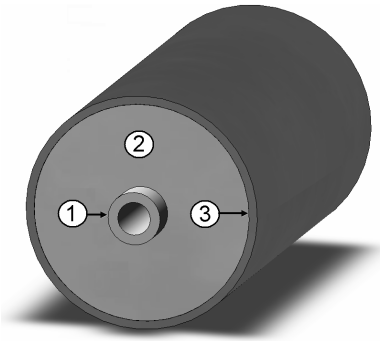

Рисунок 1 - Элемент полимерного трубопровода с теплоизоляцией и внешним защитным кожухом.
1 - полипропиленовая труба;
2 – теплоизолятор;
3 – полипропиленовая защитная оболочка

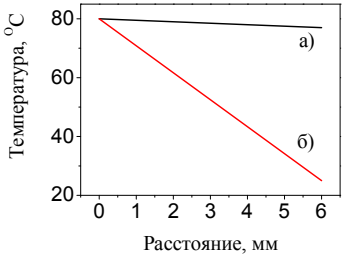

Рисунок 2 - Распределение температуры в стенке полимерной трубы. Температура на внутренней стенке трубы +80 °С. Линия а) соответствует трубе со 100 мм слоем теплоизоляции, б) – без теплоизоляции

Изменение температуры в стенке полипропиленовой трубы является практически несущественным при наличии 100 мм слоя пенополиуретановой теплоизоляции (линия 1 на рисунке 2). Теплозащитный слой такой толщины обеспечивает минимальный тепловой поток при максимально допустимых значениях разности температур теплоносителя и окружающей среды. В полипропиленовой трубе без теплоизолирующего слоя (линия 2 на рисунке 2) изменения температуры по толщине стенки в радиальном направлении существенны.

На рисунке 3 приведены результаты расчета полей температуры в сечении трубы со слоем теплоизоляции и защитной оболочкой, показаны расчетные зависимости температуры от радиуса. За начало отсчета принята точка, лежащая на внутренней стенке трубы. В расчетах учитывались сезонные изменения температуры на границе защитного кожуха и влагонасыщенного песчаного грунта. Результаты показывают, что 100 мм теплоизолирующий слой пенополиуретана обеспечивает практически постоянную температуру трубы, которая слабо зависит от годовых изменений температуры вмещающего трубопровод грунта.

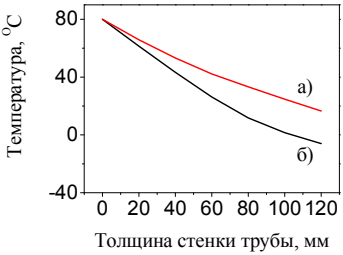

Рисунок 3 - Распределение температуры в сечении элемента трубопровода для условий эксплуатации: а) в зимних условиях; б) в летне-осенний период

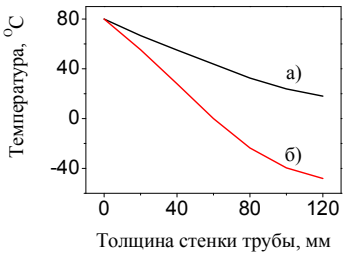

Рисунок 4 - Распределение температур в сечении элемента трубопровода для тепловых потерь при величине теплового потока:
а) Q= -1 Вт/ м^2; б) Q= -10 Вт/ м^2

На рисунке 4. приведены результаты расчетов полей температуры в сечении полипропиленовой трубы при значениях плотности потока тепла, отводящегося в окружающую среду, равных соответственно -1 Вт/м^2, -10 Вт/м^2. Отметим, что значения тепловых потерь зависят от теплопроводности вмещающей трубопровод среды. Изменение теплопроводности грунта, например, может быть связано с повышением его влагонасыщенности. Принятые значения плотности потоков Q оценивались по данным о возможных тепловых потерях при транспортировке горячей воды при различных условиях эксплуатации трубопровода.

Полученные результаты указывают на то, что теплоизоляция не вполне эффективна при прокладке труб на открытом воздухе в условиях пониженных (–40 °С ÷ –50 °С) температур. В этом случае полипропиленовая защитная оболочка может охлаждаться до температуры, существенно ниже температуры хрупкости полипропилена (–5 °С). Такое охлаждение недопустимо для полипропиленовых конструкций, т.к. материал кожуха будет хрупко разрушаться даже при небольших деформациях. Вместе с тем, необходимо отметить, что даже при таких условиях водоводная труба будет находиться в диапазоне допустимых для полипропиленовых изделий температурах.

Вторая глава. Глава посвящена описанию результатов моделирования напряженно-деформированного состояния в материале прямолинейных труб с теплоизоляцией и без нее, а так же в сложных пространственных элементах полимерных трубопроводов. Сложность геометрии, рассматриваемых

моделей, приводит к необходимости решения задачи в трехмерной постановке.

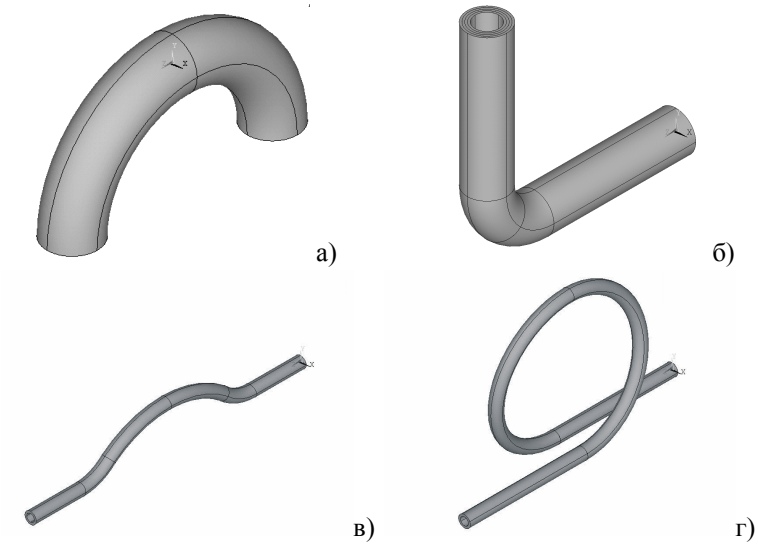

Рисунок 5 - Геометрические модели исследуемых криволинейных труб

На рисунке 5 представлены исследуемые трехмерные геометрические модели элементов трубопровода (а) – криволинейная труба; б) – отвод 90°; в) - компенсационная скоба; г) – компенсатор).

Специфика прочностных расчетов трубопровода из термопластов и его элементов связана с важностью учета нелинейно-упругого поведения при деформации и существенного влияния на механические свойства эксплуатационной температуры. Термопластические материалы в диапазоне температур от 0 °С до +95 °С могут деформироваться упруго до 10-20 %.

При нахождении напряженно-деформированного состояния в элементах конструкций трубопроводов учтены влияния нелинейности упругого поведения полимерных материалов и зависимость их механических характеристик от температуры.

Проведена оценка максимальных значений напряжений и деформаций при изгибе конструкции трубопровода со слоем теплоизоляции указывающая на возможность отслоения теплоизоляции от защитной оболочки. Найдены критические значения напряжений и деформаций теплоизолирующих полимерных материалов.

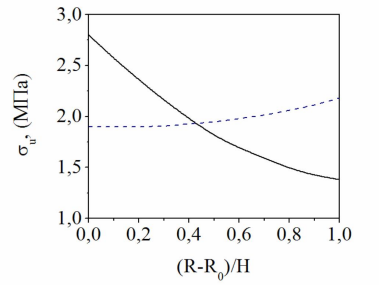

Рисунок 6 - Распределение интенсивности напряжений при распределении температуры в стенке трубы (пунктирная) и при постоянной температуре (сплошная)

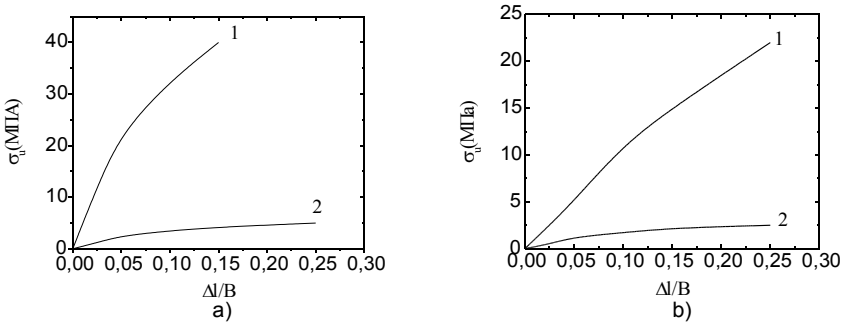

Рисунок 7 - Зависимость максимальных расчетных значений интенсивности напряжений σ_u в компенсаторе термических расширений в зависимости от относительного смещения торца компенсатора Δl/B, B – длина компенсатора. Температура: а) плюс 20 °С, б) плюс 80 °С. Линии 1 получены с применением линейно-упругой модели, 2 – с применением нелинейно-упругой модели

Получены численные решения нелинейной задачи в трехмерной постановке о деформации под действием внутреннего давления прямолинейных и криволинейных труб, находящихся в однородных и неоднородных полях температуры, с учетом нелинейного поведения полимерных материалов. Применяя результаты распределения температуры в стенке трубы, описанные в первой главе, установлено, что неоднородность температурного поля в стенках труб из термопластических полимерных материалов существенно влияет на их напряженно-деформированное состояние. Наличие градиента температур в стенке таких труб обуславливает

качественные изменения в распределении напряжений по сравнению со случаем однородного температурного поля (Рисунок 6).

Установлено, что учет нелинейного поведения материала важен при определении деформаций и перемещений в полимерных трубах, находящихся под действием давления.

Показано, что напряжения, реализующиеся в трубах из полимерных материалов с нелинейными механическими свойствами, ниже (Рисунок 7), а деформации выше значений, полученных в приближении линейно-упругой модели.

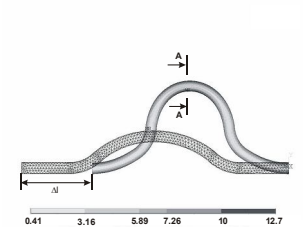

Рисунок 8 - Деформация компенсирующей скобы при смещении торца на Δl=0.10м

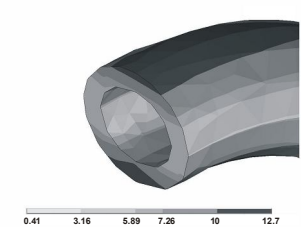

Рисунок 9 - Распределение напряжений σ_u, (МПа) в стенках трубы в сечении А А компенсирующей скобы

Проведенные исследования результатов деформирования криволинейных труб в трехмерной постановке свидетельствуют о неоднородном распределении напряжений в стенках труб, присутствии как растягивающих, так и сжимающих напряжений. Конфигурация поперечного сечения трубы в процессе деформации трансформируется из кругового кольца в эллипсовидное (рисунок 8, 9). Чрезмерные смещениях торца компенсаторов могут привести к потере устойчивости конструкции в области максимальных деформаций. При деформации компенсирующей петли, максимальные значения интенсивности напряжений, реализующиеся в ее стенках, в два и более раз ниже, чем при таких же изменениях длины в компенсирующей скобе.

Третья глава. Глава посвящена определению долговечности материала элементов конструкций из полимерных материалов, работающих в условиях переменных температур. Предложена методика расчета долговечности элементов конструкций полимерных трубопроводов, работающих в температурном диапазоне от +4 до +80 °С, с учетом изменения свойств полимерных материалов.

Цель данной работы состояла в изучении процесса разрушения конструкций из полимерных материалов при переменных термических и

механических воздействиях и в оценке долговечности элементов полимерных трубопроводов горячего водоснабжения.

Ресурс полимерных труб оценивается с учетом напряженного состояния в стенках труб и зависимости долговечности полимерного материала от температуры, действующих напряжений. Расчеты НДС выполнялись для труб находящихся под действием внутреннего и внешнего давлений, продольных и изгибающих сил. Учитывались зависимости механических параметров полимерного материала (модулей упругости, предела текучести) от температуры.

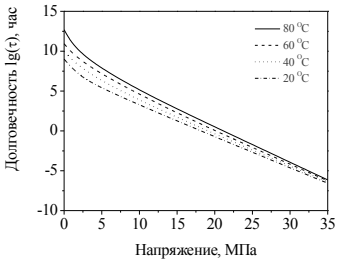

Рисунок 7 - Расчетные значения долговечности полипропилена в конструкции трубопровода

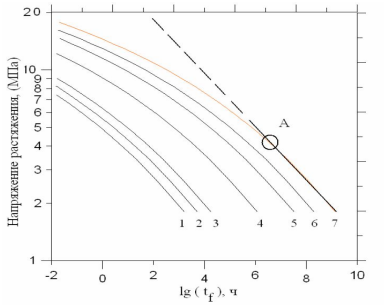

Рисунок 8 - Расчетные значения долговечности полипропилена при растягивающих напряжениях

Оценочные значения долговечности изотермически нагруженного полипропилена при ползучести в диапазоне температуры от +20 °С до +80 °С показаны на рисунке 7.

Полученные оценки показывают, что долговечность полипропилена в конструкциях находящихся при температуре 20 °С при максимальных напряжениях менее 1 МПа приближается к 100 годам. Долговечность полипропилена снижается экспоненциально с ростом напряжений. При напряжениях близких к пределу текучести рассматривать длительную прочность не имеет смысла. Существенное снижение долговечности полипропилена и других полимерных материалов происходит при повышенных температурах.

На основании результатов оценок долговечности полипропилена для номинальной эксплуатационной температуры воды в трубопроводах холодного и горячего водоснабжения +20 и +80 °С, были рассчитаны значения внутреннего давления, при которых ресурс трубопровода составлял – 5, 10, 20, 25, 50 лет. Расчеты НДС полипропиленовых труб

холодного водоснабжения позволили определить максимально допустимые значения внутренних давлений в указанных трубах.

Все расчетные значения допустимых давлений, при которых обеспечивается заданный уровень долговечности полипропиленовых труб оказались меньше по сравнению с оценками, сделанными на основе принятой инженерной методики. Результаты свидетельствуют о том, что принятые инженерные оценки допустимых давлений завышены для труб холодного водоснабжения на 15-47 %, а для труб горячего водоснабжения на 17-40 %. Изменения величин допустимых давлений возрастает с увеличением нормативной долговечности.

На рисунке 8 приведены расчетные значения долговечности полипропилена. Линии 1-7 соответствуют температурам +90, +80, +70, +40, +20, +10, 0 °С. Изменение наклона кривых $\sigma - \lg(t_f)$ в точке А на рисунке 8 может свидетельствовать о формировании диссипативных структур поврежденности, которое сопровождается уменьшением долговечности полимерных материалов.

Результаты моделирования свидетельствуют о том, что учет формирования диссипативных структур поврежденности является существенным при прогнозировании долговечности полимерных материалов.

Исследованный полипропилен при нормальных условиях имеет предел текучести 25-35 МПа. Под действием напряжений, приближающихся к пределу текучести, и температурах, близких к 0 °С, полипропилен хрупко разрушается, что выражается в резком уменьшении долговечности. При повышенных температурах $0.2\,T_m$ (T_m~ 120 °С) долговечность полипропилена под нагрузкой резко уменьшается. Для обеспечения долговечности конструкций из полипропилена, эксплуатирующихся при повышенных температурах $+40\,°C \div +80\,°C$ порядка 50 лет, необходимо снизить действующие в конструкции напряжения до 0,5-0,7 МПа.

Четвертая глава посвящена определению напряженно-деформированного состояния полимерных конструкционных материалов разъемного соединения труб высокого давления.

В работе разъемного соединения имеет место трехмерное напряженное состояние, сопровождаемое весьма широким кругом явлений.

Для определения деформаций в резьбовом соединении методом конечных элементов решалась геометрически нелинейная трехмерная статическая задача МДТТ. В соединении моделировался спектр значимых условий: контактная задача с переменной границей контакта, разнообразные варианты нагружения. При задании силовых граничных условий учитывались

эксплуатационные нагрузки: давление на внутренней поверхности до 10 МПа, осевые растягивающие усилия до 30 кН.

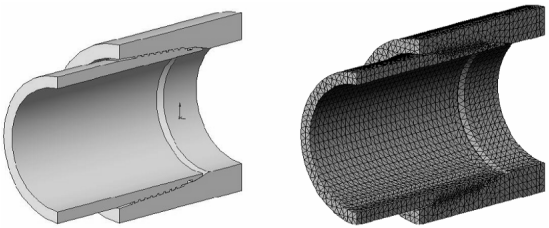

Рисунок 9 - Геометрическая и конечно-элементная модели резьбового соединения

Твердотельная геометрическая модель рассмотренного в работе разъемного соединения в сборке и его конечно-элементная модель, использованная в расчетах, показана на рисунке 9.

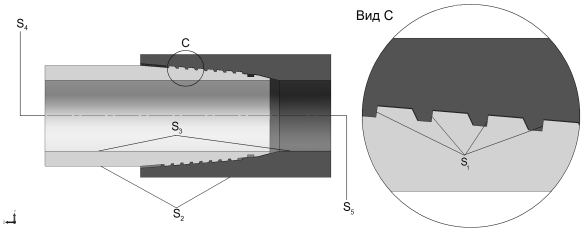

Рисунок 10 - Зоны нагружения модели резьбового соединения

При построении КЭМ применялись десятиточечные тетраэдальные изопараметрические конечные элементы. Схема разъемного соединения типовой конструкции показана на рисунке 10. Соединение состоит из двух элементов: внутреннего и наружного. В разъемных элементах трубопроводов граничные условия формулируются для пяти зон: зона контакта тела А и В, кот обозначена S_1; область внешней поверхности трубчатых элементов вне зоны контакта S_2, внутренняя область трубчатых элементов вне зоны контакта, которую обозначена как S_3 и торцевые зоны S_4 и S_5.

Формулировка граничных условий задачи, отвечающей режиму эксплуатации, состоит в задании нормативных давлений и температуры на внутренней и внешней поверхностях трубчатых элементов и задании контактных граничных условий на поверхности S_1. Граничные условия задачи для режима сборки-разборки соединения заключается в формулировке контактных граничных условий на поверхности S_1 и задании скручивающих моментов на торцевых поверхностях трубчатых элементов. Отметим, что при

формировании контактных граничных условий учтено возникновение касательных усилий на контактирующих поверхностях в результате трения. В начальном состоянии материал элементов сборки считается свободным от внутренних напряжений.

К комбинации нагрузок следует отнести продольные растягивающие и сжимающие усилия, изгибающие моменты, внутреннее давление. Система уравнений, описывающая деформацию конструкции сформулирована в Лагранжевой постановке и включает уравнения равновесия, соотношения Коши, определяющее уравнение для изотропного и ортотропного материала.

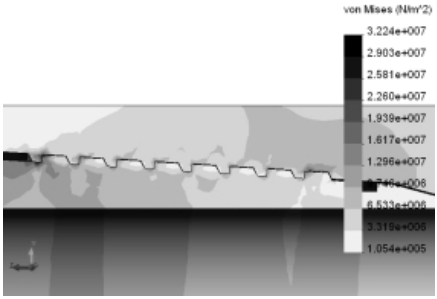

Рисунок 11 - Расчетные значения интенсивности напряжений

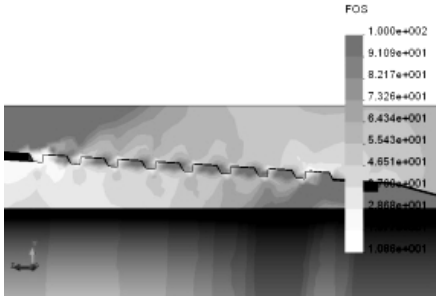

Рисунок 12 - Распределение запаса прочности

На рисунке 11 представлена картина распределения интенсивности напряжений. Результаты численных расчетов свидетельствуют о существенно неоднородном распределении нагрузки по виткам разъемного соединения. Наиболее нагруженная зона расположена во впадинах витков резьбового соединения. Максимальные деформации реализуются в зоне первого нагруженного витка резьбы. Принятая условная нумерация взаимодействующих витков резьбы разъемного соединения труб показана на рисунке 13. Неоднородное поле напряжений в стенках трубы формируется в зоне примыкающей к поверхности с нанесенной резьбой и имеет толщину от 3 до 5 величин высоты зубьев резьбы.

Расчетные значения напряжений и деформаций в соединительных узлах позволяют оценить ресурс конструкции на основании оценок допустимых напряжений в наиболее нагруженной области разъемного соединения. На рисунке 12. представлена картина распределения запаса прочности. Минимальный коэффициент запаса прочности равен 10. На практике прочностных расчетов значение коэффициента запаса прочности принимают в следующем виде

$$FOS = \sigma_{\lim} / \sigma_{vonMises},$$

где $\sigma_{\lim}$ - предел прочности на растяжение.

Минимальные значения коэффициента запаса прочности реализуется в пространственных областях, где реализуются максимальные напряжения вблизи первого витка резьбы.

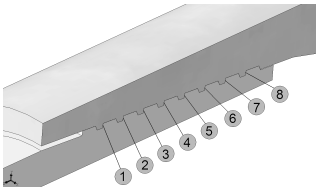

Рисунок 13 - Нумерация взаимодействующих витков резьбы

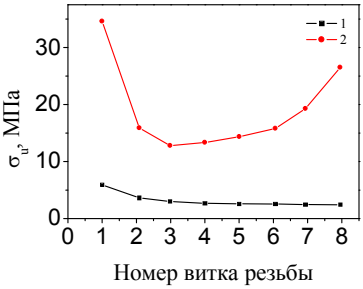

Рисунок 14 - Распределение интенсивности напряжений по виткам резьбы соединения (Рисунок 13), находящегося под действием: осевых растягивающих усилий (кривая 1); осевых растягивающих усилий и внутреннего давления (кривая 2)

На рисунке 14 показано изменение максимальных значений интенсивности напряжений по виткам резьбы соединения. Распределение НДС в резьбовом разъемном соединении из металлических и полимерных материалов качественно подобно, различаются величины деформаций и напряжений. Расчетные значения напряжений и деформаций в соединительных узлах позволяют оценить ресурс конструкции на основании оценок прочности наиболее нагруженной области разъемного соединения.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Диссертационная работа посвящена решению актуальной задачи разработки методов оценки прочности и долговечности

элементов конструкций из термопластических полимерных материалов, деформирующихся в диапазоне температур от 0 °С до +80 °С.

Сформулирован и численно решен ряд важных, с практической точки зрения, задач о деформации полимерных труб под действием стационарных нагрузок.

1. Получено новое численное решение нелинейной задачи в трехмерной постановке о деформации под действием внутреннего давления прямолинейных и криволинейных труб из термопластичных полимерных материалов, механическое поведение которых зависит от температуры.

2. Показано, что реализующиеся напряжения в трубах из полимерных материалов, с учетом нелинейности определяющего уравнения ниже, а деформации выше значений, полученных в приближении линейно-упругой модели. Учет градиента температуры приводит к качественным изменениям в распределении напряжений по сравнению со случаем однородного температурного поля.

3. Исследовано влияние нелинейного поведения термопластических материалов (полипропилена, полиэтилена) на прочность и долговечность прямолинейных и криволинейных труб, многослойных коаксиальных трубчатых элементов полимерных трубопроводов в диапазоне температур от 0 °С до +80 °С. На основе новых численных решений задачи о деформации криволинейных труб из полимерных материалов исследованы напряженно-деформированные состояния в элементах полимерных трубопроводов при стационарных нагрузках (при внутреннем давлении до 5 МПа в диапазоне температур от 0 °С до +80 °С). Показано, что при одинаковых изменениях длины компенсатора температурных расширений трубопровода относительное снижение напряжений в стенках трубы пропорционально относительному изменению в них температуры.

4. Показано, что при сжатии компенсатора температурных расширений трубопровода интенсивность напряжений достигает максимальных значений лишь в определенных зонах компенсаторов. Эти зоны при сжатии и растяжении компенсатора температурных расширений трубопровода различны. При деформации компенсационной петли, максимальные значения интенсивности напряжений, реализующиеся в ее стенках, в 2 и более раз ниже, чем при таких же изменениях длины в компенсационной скобе.

5. Расчетные значения допустимых давлений, при которых обеспечивается заданный уровень долговечности полипропиленовых труб PN 10 и PN 20, полученные с учетом нелинейного поведения материала, меньше по сравнению со значениями допустимых давлений, рассчитанных на основе

принятой инженерной методики. Пиковые давления выше 2.5 МПа при номинальной эксплуатационной температуре +80 °С неизбежно приводят к развитию в стенках трубы пластических деформаций.

6. Для труб холодного водоснабжения из сополимера полипропилена «Рандом сополимер» PPRC TYP3 PN 10 различие допустимых давлений составляет 15-47 %, а для труб, применяемых в системах горячего водоснабжения PN 20 - 17-40 %. Отклонение расчетных значений допустимых давлений увеличивается с повышением величины нормативной долговечности.

7. Разработана вычислительная модель для расчета НДС в элементах разъемных соединений полимерных труб.

8. С помощью численного моделирования получены оценки прочности элементов разъемных соединений полимерных труб, которые показывают возможность применения рассмотренных резьбовых соединений в рамках допустимых эксплуатационных нагрузок.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Скрипняк В.А., Устюгов В.А., Савельев Н.Л., Козулин А.А., Напряженно-деформированное состояние в прямолинейных полимерных трубах, находящихся под давлением при повышенных температурах // Физика и химия высокоэнергетических систем: Доклады Всероссийской студенческой конференции, - Томск: ТГУ, 2003. - С. 85-86.
2. Устюгов В.А., Савельев Н.Л., Козулин А.А. Анализ напряженно-деформированного состояния полимерных труб, находящихся под давлением при повышенных температурах // Современная техника и технологии: Труды IX Международной научно-практической конференции студентов аспирантов и молодых ученых. - Томск: Изд-во Том. Политех. Ун-та, 2003. Том 1. - С. 205-207.
3. Скрипняк В.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А., Козулин А.А. Расчет напряженно-деформированного состояния в компенсаторах тепловых расширений полимерных трубопроводов // Фундаментальные и прикладные вопросы механики. - Хабаровск: Изд-во ХГТУ, 2003 г. – С. 111-120.
4. Козулин А.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А. Напряженно-деформированное состояние в трубах, находящихся под давлением, с учетом градиента температур вдоль радиуса стенки трубы // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной

конференции молодых ученых. - Новосибирск: Изд-во НТГУ, 2003. Часть 6. - С 80-81.

5. Скрипняк В.А., Козулин А.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А., Моделирование деформаций компенсаторов термических расширений трубопроводов из гиперупругих материалов // Научно-инновационное сотрудничество: Сборник научных трудов третьей научно-технической конференции. - М.:МИФИ, 2004. Ч.2. - С. 149
6. Козулин А.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А., Скрипняк В.А., Моделирование деформаций компенсаторов трубопроводов из гиперупругих материалов // Современные проблемы физики, технологии и инновационного развития: Сб. статей молодых ученых. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 2004. - С. 42-44.
7. Козулин А.А., В.А. Устюгов, Н.Л. Савельев. Проблема определения напряженно-деформированного состояния криволинейных полимерных труб // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. - М.:МЭИ, 2004. Т.3. - С. 192-193.
8. Скрипняк В.А., Устюгов В.А., Савельев Н.Л., Козулин А.А., Прочностной расчет элементов полимерных трубопроводов // Физика и химия высокоэнергетических систем: Доклады Всероссийской студенческой конференции, - Томск: ТГУ, 2004. - С. 36-37.
9. Козулин А.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А. Учет физических и геометрических нелинейностей при расчете конструкций из полимерных материалов // ВНКСФ-10: Тез. докл. X Всероссийской научной конф. студентов-физиков и молодых ученых. – Екатеринбург – Красноярск: Издательство АСФ России, 2004. Т.2 - С. 1184.
10. Kozulin A.A., Skripnyak V.A. Strength calculation of polymer pipeline elements // Proceedings KORUS 2004, Tomsk Polytechnic University, Russia June 26 – July 3, 2004, v.3, - P.29-32.
11. Козулин А.А., Савельев Н.Л., Устюгов В.А., Скрипняк В.А. Прочностной расчет элементов полимерных трубопроводов горячего водоснабжения // Наука. Промышленность. Оборона: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. - Новосибирск: Изд-во НТГУ, 2004. - С. 100-101.
12. Козулин А.А. Определение прочности и долговечности полимерных труб горячего и холодного водоснабжения // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. - Новосибирск: Изд-во НТГУ, 2004. Часть 3. - С 52-53.

13. Скрипняк В.А., Савельев Н.Л., Козулин А.А. Оценка долговечности элементов конструкций из полимерных материалов, работающих в условиях переменных температур // Научно-технические проблемы приборостроения и машиностроения: Сборник трудов Российской научно-технической конференции. -Томск: Изд-во ТПУ, 2004. - С. 22-27.
14. Козулин А.А. Прочность и долговечность конструкций из полимерных материалов // Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых. - Новосибирск: Изд-во НТГУ, 2004. Часть 3. - С 52-53.
15. Козулин А.А. Прочность и долговечность конструкций из полимерных материалов // Физика и химия высокоэнергетических систем: Материалы I Всероссийской конференции молодых ученых. - Томск: Изд-во ТГУ, 2005. – С. 362-363.
16. Скрипняк В.А., Козулин А.А., Савельев Н.Л. Определение ресурса трубопроводов из полимерных материалов // Физика и химия наноматериалов: Материалы Международной школы-конференции молодых ученых. - Томск: Изд-во ТГУ, 2005. – С. 233-236.
17. Козулин А.А., Скрипняк В.А. Напряженно-деформированное состояние в элементах разъемных соединений стеклопластиковых труб // Физика и химия высокоэнергетических систем: Доклады студенческой конференции. - Томск: ТГУ, 2006. - С. 27-29
18. Козулин А.А., Скрипняк В.А. Оценка ресурса стеклопластиковых труб с безмуфтовыми соединениями// Физика и химия высокоэнергетических систем: Материалы II Всероссийской конференции молодых ученых. - Томск: Изд-во ТГУ, 2005. – С. 226-228.
19. Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование безмуфтовых соединений стеклопластиковых труб // Физика твердого тела: Сборник материалов X Российской научной студенческой конференции. Томск: Изд-во ТГУ, 2006. – С.66-68.
20. Козулин А.А., Скрипняк В.А. Моделирование напряженно-деформированного состояния в области разъемного соединения стеклопластиковых труб с резьбой АНИ // Фундаментальные проблемы современной механики: Материалы конференции. – Томск: Изд-во ТГУ, 2006, - С. 267.
21. Козулин А.А., Скрипняк В.А. Влияние на долговечность полимерных материалов технологических микродефектов структуры // Известия вузов. Физика. Томск: Изд-во ТГУ, - 2007. № 7. – С. 5 -7.

Тираж 100 экз.
Отпечатано в КЦ «Позитив»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а