

На правах рукописи



Зуйко Валерий Юрьевич

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ПОЛИМЕРНЫХ
АРМИРОВАННЫХ ТРУБ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь – 2012

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Аношкин Александр Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор кафедры «Прикладная механика,
динамика и прочность машин» ФГБОУ
ВПО «Южно-Уральский государственный
университет» (национальный
исследовательский университет)
Сапожников Сергей Борисович

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник Лаборатории
нелинейной механики деформируемых
твердых тел ФГБУН «Институт механики
сплошных сред Уральского отделения РАН»
Адамов Анатолий Арсангалеевич

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Самарский государственный технический
университет»

Защита состоится «24» мая 2012 года в 16:00 на заседании диссертационного
совета ДМ 212.188.05 при ФГБОУ ВПО «Пермский национальный
исследовательский политехнический университет» по адресу: 614990,
г. Пермь, пр. Комсомольский, д. 29, ауд. 423 б.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВПО
«Пермский национальный исследовательский политехнический
университет».

Автореферат разослан «____» апреля 2012 года

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук



Щербинин А.Г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

На нефтепромыслах России действует разветвленная система трубопроводов с суммарной протяженностью более 300 тыс.км. и диаметром от 114 до 1020 мм. Около половины этих трубопроводов было построено 30-50 лет назад, срок их обновления давно истек. В настоящее время 90% всех аварий на трубопроводах происходит в результате коррозионных разрушений металла труб.

Сложившаяся ситуация с трубопроводным парком страны требует все большего внедрения на нефтепромыслах коррозионно-стойких труб из полимерных и композиционных материалов. К числу таких труб относятся и полимерные армированные трубы (ПАТ), представляющие собой конструкцию, содержащую двухмерный стальной проволочный каркас и полимерную матрицу. Такие трубы выпускаются несколькими российскими предприятиями и в настоящее время эксплуатируются на нефтегазопромыслах, в горнодобывающей и перерабатывающей промышленности, на объектах коммунального хозяйства.

Механическое поведение полимерных армированных труб изучалось как отечественными, так и зарубежными авторами с 70-х годов XX века. Однако проведенные исследования не учитывают большинства важных особенностей их механического поведения, в частности, упругопластические и реологические свойства материалов, отсутствие адгезии между стальной арматурой и полиэтиленовой матрицей.

Для определения направлений их дальнейшего совершенствования, разработки новой номенклатуры труб и фасонных элементов, анализа отказов и рационального проектирования трубопроводов из ПАТ **актуально** проведение расчетно-экспериментальных исследований, математического моделирования механического поведения и разработка методик прогнозирования несущей способности полимерных армированных труб и элементов трубопровода при различных условиях нагружения. Следует отметить, что методы прочностного расчета трубопроводов из однородных материалов не применимы для ПАТ в виду их структурной неоднородности. Использование структурно-феноменологического подхода механики композитов, который основан на рассмотрении двух уровней – микро- и макроскопического и вычислении эффективных свойств, также некорректно, поскольку размеры армирующих элементов сопоставимы с характерными размерами труб.

Поэтому для моделирования механического поведения таких труб необходима разработка новых расчетных схем и математических моделей, описывающих особенности их структуры (схемы армирования), закономерности деформирования используемых материалов, в частности, контактное взаимодействие и нелинейное деформирование арматуры и матрицы, и конструктивные особенности элементов трубопровода: узлы соединений, фланцы и т.п.

Цель работы: разработка расчетных схем и математических моделей механики деформируемого твердого тела для исследования основных закономерностей механического поведения полимерных армированных труб при различных условиях нагружения с целью прогнозирования их несущей способности.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. анализ конструктивных особенностей и условий эксплуатации полимерных армированных труб в составе промышленных нефтегазопроводов, выбор расчетных схем, определение системы нагрузок и механических характеристик материалов, применяемых в конструкциях ПАТ, для оценки их несущей способности;
2. постановка краевых задач механики деформируемого твердого тела, соответствующих выбранным расчетным схемам, для прогнозирования несущей способности полимерных армированных труб с учетом их основных особенностей: схемы армирования, нелинейного деформирования и контактного взаимодействия структурных элементов, вязкоупругого поведения матрицы;
3. численное решение сформулированных краевых задач механики деформируемого твердого тела, прогнозирование несущей способности полимерных армированных труб при различных условиях нагружения; исследование влияния конструктивных параметров ПАТ и характеристик материалов, используемых в конструкции труб, на особенности их деформирования и несущую способность.

Научная новизна:

- разработаны двух- и трехмерные нелинейные модели механического поведения полимерных армированных труб, учитывающие параметры структуры, контактное взаимодействие, нелинейное деформирование компонентов; модели позволяют исследовать напряженно-деформированное состояние ПАТ при различных условиях нагружения;
- выявлены особенности деформирования армирующего каркаса, обусловленные взаимодействием продольной и кольцевой арматуры, на основании которых предложен критерий предельного состояния для прогнозирования несущей способности полимерных армированных труб;
- определены основные закономерности деформирования и механизмы разрушения стыковых соединений полимерных армированных труб, что позволило объяснить результаты испытаний и предложить методику прогнозирования прочности стыковых соединений ПАТ при различных условиях нагружения;
- получены расчетно-экспериментальные оценки длительной прочности полимерных армированных труб при различных уровнях нагрузок с учетом вязкоупругого поведения полиэтилена и упругопластических свойств арматуры.

На защиту выносятся:

1. оригинальные двух- и трехмерные численные модели механического поведения полимерных армированных труб, учитывающие нелинейное деформирование, контактное взаимодействие арматуры и матрицы при различных условиях нагружения;
2. результаты численного моделирования механического поведения полимерных армированных труб при различных условиях нагружения и выявленные закономерности влияния механических свойств материалов, геометрических параметров структуры на деформационные и прочностные свойства исследуемых труб.

Личный вклад автора.

Автором созданы численные и аналитические модели и проведены соответствующие расчеты. Автор принимал непосредственное участие в экспериментальных исследованиях. Проведена обработка всех экспериментальных данных.

Достоверность результатов подтверждается сравнением с экспериментальными данными. При использовании метода конечных элементов подтверждена практическая сходимость путем исследования зависимости результатов от степени дискретизации.

Практическая ценность.

Практическую ценность составляют результаты исследований напряженно-деформированного состояния и разработанная методика прогнозирования прочности полимерных армированных труб нефтяного и газового назначения. Получены оценки прочности полимерных армированных труб с различными конструктивными вариантами. Разработаны рекомендации по возможным направлениям повышения прочности труб и стыковых соединений. Результаты исследований внедрены в ЗАО «Полимак» (620085, г. Екатеринбург, ул. 8 марта, 212), где они использовались при проектировании новой номенклатуры полимерных армированных труб газового назначения, разработки ТУ 2248-006-54112451-07, разработки новых типов соединений ПАТ с усиленными муфтами.

Диссертационная работа связана с выполнением ряда госбюджетных и хоздоговорных НИР, в частности, проектов РФФИ № 04-01-81021, РФФИ-урал № 07-01-96075.

Апробация работы.

Основные положения и результаты работы докладывались на Всероссийских школах-конференциях молодых ученых «Математическое моделирование в естественных науках» (Пермь, 2002-2006), Всероссийской научно-технической конференции «Аэрокосмическая техника и высокие технологии» (Пермь, 2002), XVI сессии международной школы по моделям механики сплошной среды (Казань, 2002), международной молодежной научной конференции «XXIX Гагаринские чтения» (Москва, 2003), международной летней школе-конференции "Актуальные проблемы механики" (Санкт-Петербург, 2003), студенческой научно-технической конференции «Компьютерная механика материалов и конструкций» (Пермь,

2004), 13-ой международной конференции по механике композитных материалов “Mechanics of composite materials” (Рига, Латвия, 2004) международных научно-технических конференциях «Поликомтриб» (Гомель, Беларусь, 2005-2007), Российской научно-технической конференции «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2006), II-ой международной конференции «Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела» (Казань, 2009), Зимних школах по механике сплошных сред (Пермь, 2005, 2007, 2011).

Полностью диссертация обсуждалась на семинарах кафедр «Механика композиционных материалов и конструкций» (рук. д. физ.-мат. н., профессор Ю.В. Соколкин), «Вычислительная математика и механика» (рук. д. тех. н., профессор Н.А.Труфанов) ПНИПУ и Института механики сплошных сред УрО РАН (рук. академик РАН В.П. Матвеев).

Объем работы.

Диссертационная работа изложена на 150 страницах, иллюстрированных 76 рисунками и 18 таблицами. Состоит из введения, 4 глав и выводов по результатам исследования. Список цитируемой литературы состоит из 185 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана необходимость дальнейшего расширения использования коррозионно-стойких труб из полимерных материалов, и, в частности, полимерных армированных труб. Обоснована актуальность разработки новых расчетных схем и математических моделей для численного моделирования и исследования процессов упругопластического деформирования труб ПАТ при различных нагрузках. Представлен обзор работ по теме исследования, сформулированы цели и методы исследования.

Первая глава посвящена постановке задачи прогнозирования эксплуатационной прочности полимерных армированных труб. Описывается конструкция и технология изготовления данных труб. Приводятся физико-механические характеристики конструкционных материалов. Анализируются условия нагружения и эксплуатационные требования.

Полимерные армированные трубы (ПАТ) представляют собой трубы из полиэтилена низкого давления (ПЭНД), армированные металлическим каркасом из проволоки общего назначения (рис.1а). Каркас состоит из продольных и поперечных элементов, сваренных во всех точках пересечения с помощью контактной сварки (рис.1б).

Помимо величины внешнего диаметра (указывается после аббревиатуры ПАТ, например, ПАТ-140, ПАТ-160), производимые трубы отличаются по целому ряду параметров: размер ячейки каркаса, диаметр проволоки, толщина стенки.

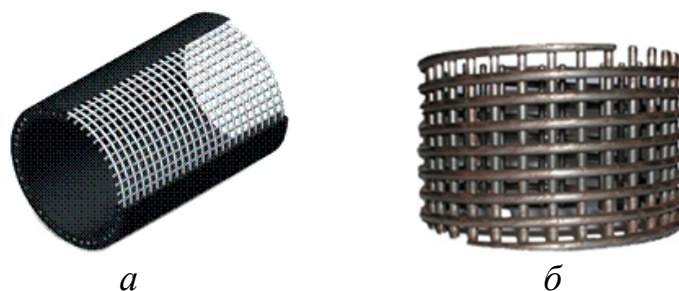


Рис. 1. Полимерная армированная труба (а) и армирующий каркас (б).

Анализ основных отказов, возникающих на трубопроводах из полимерных армированных труб в процессе их эксплуатации, показал, что порядка 80% отказов связано с разрушением тела трубы по образующей от разрыва кольцевой арматуры. Примерно 12% отказов связано с разрушением сварных стыковых соединений, где отсутствует стальной армирующий каркас. Остальные отказы происходят вследствие случайных внешних механических повреждений, гидроударов и т.п. Кроме внутреннего давления на трубопровод могут действовать и другие нагрузки, среди которых преобладают растягивающие осевые усилия.

Исходя из этого, выделено два основных направления исследований:

- прогнозирование кратковременной статической прочности линейной части полимерных армированных труб в условиях нагружения внутренним давлением при гидростатических испытаниях с осевой нагрузкой,
- прогнозирование кратковременной статической прочности узлов стыковых соединений в составе подземного трубопровода с осевой разгрузкой, а также при осевом нагружении в отдельности.

Физико-механические свойства стальной арматуры и полиэтиленовой матрицы существенно отличаются, поэтому при создании численных моделей данные трубы необходимо рассматривать как неоднородную конструкцию.

В рамках данной работы проведены испытания на растяжение образцов полиэтилена низкого давления (ПЭНД, или полиэтилен высокой плотности ПЭВП) и стальной проволоки при нормальной температуре. Также испытывалась проволока, подверженная влиянию контактной сварки, извлеченная из трубы. Результат эксперимента показал, что прочность такой проволоки не ниже исходных образцов. Полученные кривые деформирования были аппроксимированы двух- и четырехзвенными линейными диаграммами для удобства использования при численном моделировании (рис.2):

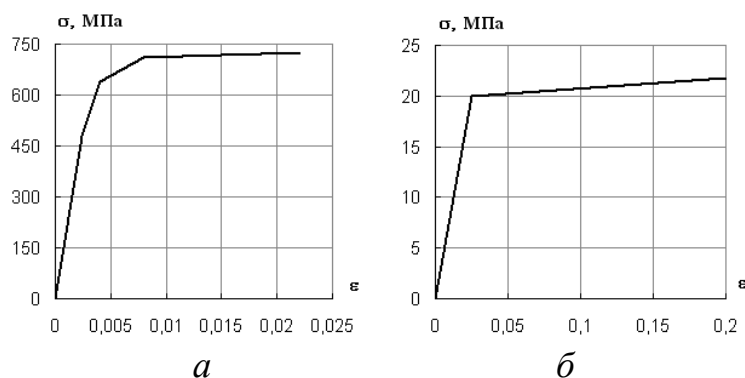


Рис. 2. Условные диаграммы деформирования стальной проволоки (а) и полиэтилена (б).

Во второй главе представлены постановка и численное решение задачи об упругопластическом деформировании линейной части полимерной армированной трубы, нагруженной внутренним давлением и осевым усилием. Проведено исследование влияния условий контакта между полимерной матрицей и армирующими элементами на напряженно-деформированное состояние трубы. Поставленные задачи решались методом конечных элементов в пакете ANSYS. Предложена приближенная аналитическая оценка несущей способности ПАТ при нагружении внутренним давлением. На основе полученных решений прогнозируется несущая способность труб различных типоразмеров и проводится сравнение с экспериментальными данными.

Ввиду наличия пространственного армирования, необходима трехмерная постановка рассматриваемой задачи. В конструкции линейной части трубы можно выделить повторяющийся элемент – ячейку периодичности. В качестве расчетной схемы достаточно рассмотреть четверть ячейки периодичности, включающей элементы продольной и кольцевой арматуры и участок полиэтиленовой матрицы (рис. 3).

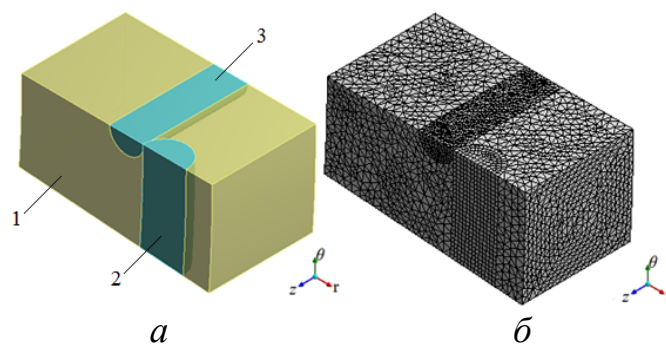


Рис.3. Расчетная схема - четверть ячейки периодичности трубы (а) и сетка конечных элементов (б): 1 – ПЭ матрица, 2, 3 – окружная и осевая проволоки

Выбранная четверть ячейки является представительным объемом линейной части трубы. Моделируя механическое поведение такого объема, можно сделать заключение о работоспособности всей трубы в целом.

Упруго-пластическое поведение материалов описывалось уравнениями Прандтля-Рейсса теории течения с изотропным упрочнением и условием текучести Мизеса. Вследствие низких характеристик адгезии полиэтилена к стали контакт этих двух материалов считался неидеальным.

При задании граничных условий для выбранной расчетной схемы принималось, что труба нагружается внутренним давлением и осевым усилием, возникающим в результате действия давления на заглушки трубы при испытаниях. Для интегрального осевого усилия можно найти соответствующее осевое перемещение границ ячейки. Зависимость осевых перемещений от внутреннего давления является нелинейной и определяется приближенно по правилу механической смеси с использованием диаграмм деформирования стали и полиэтилена.

Решая поставленную физически нелинейную задачу механики деформируемого твердого тела, можно получить неоднородные поля напряжений и деформаций в элементах конструкции трубы: полиэтиленовой матрице, осевой и окружной арматуре (рис. 4). На основе анализа полей, рассчитанных при различных значениях нагрузки, оценивается прочность трубы. Считалось, что труба теряет несущую способность, когда эквивалентные напряжения по Мизесу достигают предела временного сопротивления по всему сечению кольцевой или осевой арматуры.

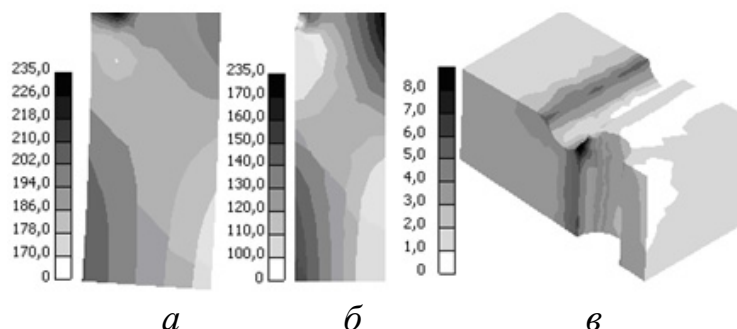


Рис.4. Эквивалентные напряжения по Мизесу (МПа) в окружной (а), осевой (б) арматуре и полиэтиленовой матрице (в) трубы ПАТ-160 (Ø160) при внутреннем давлении 1,2 МПа.

Для сравнения с результатами численных расчетов была получена приближенная аналитическая оценка несущей способности исследуемых труб: критическое давление для полимерной армированной трубы складывается из предельных давлений отдельно для стального кольца p_1 и для толстостенной полиэтиленовой трубы при упругопластическом поведении полиэтилена p_2 . Соответствующие значения давлений можно вычислить по формулам:

$$p_1 = \frac{\sigma_B \pi d_a^2}{4a(r_2 - d_a - h)}, \quad p_2 = \left(2 \ln \left(\frac{r_t}{r_1} \right) + \left(1 - \frac{r_t^2}{r_2^2} \right) \right) \frac{\sigma_t}{\sqrt{3}},$$

где σ_B – предел прочности стальной проволоки, a – шаг кольцевых витков, d_a – диаметр кольцевой проволоки, r_1 и r_2 – внутренний и внешний радиусы трубы соответственно, h – толщина слоя ПЭ над кольцевой арматурой, r_t – радиус, разграничивающий упругую и пластическую зоны ПЭ трубы.

Значения предельного давления различных типоразмеров труб, полученные по результатам численного анализа, по приближенной аналитической оценке, а также экспериментальные данные представлены в таблице 1. Следует отметить, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Таблица 1. Предельные давления для труб ПАТ, МПа

	ПАТ газового назначения			ПАТ нефтяного назначения	
Наружный диаметр, мм	160	195	270	140	200
Численный анализ	7,0	6,0	5,7	13,6	9,5
Аналитическая оценка	7,3	6,5	6,2	14,2	9,8
Эксперимент (среднее)	-	-	6,1	12,7	9,8

В третьей главе приводятся двух- и трехмерные постановки нелинейных задач расчета напряженно-деформированного состояния стыковых сварных соединений полимерных армированных труб под действием как внутреннего давления, так и осевой нагрузки. Проводится сравнение численных и экспериментальных результатов.

Сварные стыковые соединения труб ПАТ выполняются путем нагрева труб по торцам до температуры плавления, а затем сжатия с заданным осевым усилием с образованием сварного шва и грата. Для обеспечения стыкового соединения трубы снабжаются полиэтиленовыми законцовками, не имеющими армирующих элементов.

Лабораторные испытания образцов труб со сварным соединением, а также опыт их эксплуатации показал, что разрушение трубопроводов из ПАТ под действием внутреннего давления происходит по телу трубы, как правило, вблизи законцовки, с разрывом кольцевой арматуры и образованием осевой трещины (рис. 5).



Рис. 5. Характерный вид разрушения образцов ПАТ со сварным соединением при испытании на внутреннее давление.

Для расчета узлов стыка ПАТ необходимо рассматривать всю законцовку трубы, включая полимерную муфту и достаточно большое количество витков арматуры. На первом этапе исследований механического

поведения узлов стыка ПАТ была выбрана расчетная схема, соответствующая двумерной осесимметричной задаче механики деформируемого твердого тела для неоднородной области. Расчетная схема включала муфту, участок трубы ПАТ с несколькими витками кольцевой арматуры и анизотропный кольцевой слой с эффективными свойствами, соответствующий совокупности проволок продольной арматуры с кольцевыми прослойками полиэтиленовой матрицы (рис. 6).

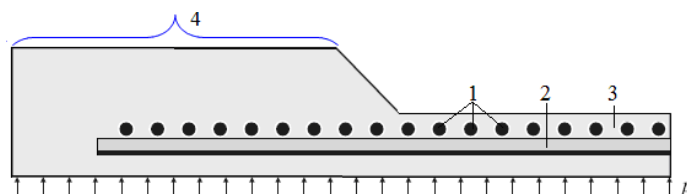


Рис. 6. Расчетная схема стыка ПАТ: 1 – окружная арматура, 2 – слой с эффективными свойствами, 3 – матрица, 4 – муфта, p – внутреннее давление.

Эффективные упругопластические свойства введенного анизотропного слоя рассчитывались приближенно с использованием методов механики композиционных материалов – оценки Рейса и Фойгта.

Моделировалась работа стыка в составе заглубленного трубопровода, т.е. продольная деформация при нагружении внутренним давлением отсутствовала. Было принято допущение об идеальном контакте полиэтиленовой стенки и армирующих элементов.

На основании анализа полей напряжений и деформаций, полученных в результате пошагового нагружения внутренним давлением, принималось заключение о несущей способности узла стыка. Получены оценки прочности стыковых соединений ПАТ различных типоразмеров.

В результате исследования обнаружен эффект перераспределения напряжений в армирующем каркасе по мере роста внутреннего давления (рис.7).

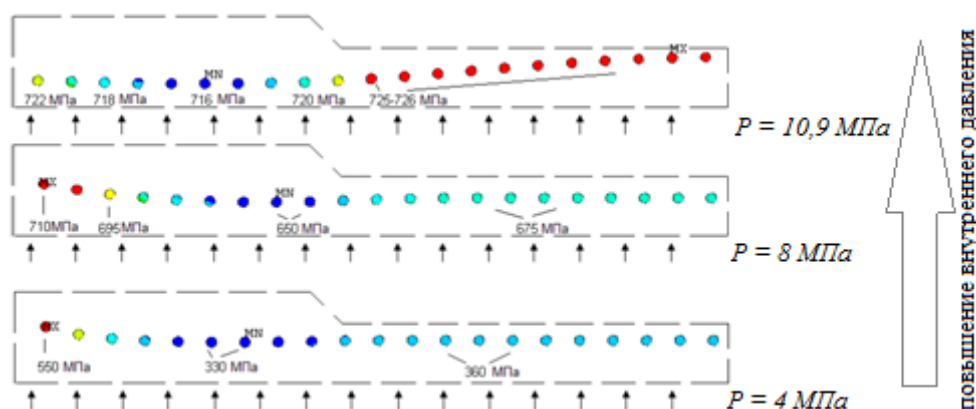


Рис. 7. Эквивалентные напряжения по Мизесу (МПа) в окружной арматуре в области стыка труб ПАТ-140 при различных значениях внутреннего давления.

Окружная арматура в основном теле трубы, будучи менее нагруженной на первых этапах нагружения, затем начинает воспринимать нагрузку в большей мере по сравнению с проволокой в законцовке. Это позволило объяснить результаты разрушающих испытаний стыковых соединений ПАТ: распространение трещины в трубопроводе начинается от разрыва окружной арматуры в теле основной трубы.

Следует отметить, что эффект перераспределения напряжений в армирующем каркасе не проявляется при моделировании напряженно-деформированного состояния труб в упругой постановке. Таким образом, учет физической нелинейности материалов приводит к качественному изменению характера напряженно-деформированного состояния.

С помощью разработанной двумерной модели проведены численные эксперименты по изучению влияния отклонений геометрических характеристик и механических свойств полиэтиленовых муфт на характер разрушения узлов стыка при статическом нагружении внутренним давлением. Проведен анализ изменения прочности сварных стыков ПАТ с удлиненными законцовками. Показано, что при некоторых сочетаниях толщин и механических свойств законцовок при статическом нагружении внутренним давлением существует возможность разрушения трубопроводов по сварному стыку при незначительном снижении величины разрушающего давления.

Для адекватного моделирования механического поведения сварных стыковых соединений ПАТ при воздействии осевых усилий была выполнена пространственная постановка контактной упругопластической задачи механики деформируемого твердого тела. На основе решения поставленной задачи проведен анализ напряженно-деформированного состояния стыкового участка при испытаниях образцов на стойкость к осевой нагрузке, а также при осевых деформациях в составе трубопровода.

На рис. 8 представлены расчетные схемы для численного анализа стыкового соединения двух труб в пространственной постановке. В расчетных схемах использовалось условие симметрии стыка двух труб, а также, возможность выделения в стыке ячейки периодичности по окружной координате, включающей отрезок одной продольной и несколько отрезков кольцевой арматуры.

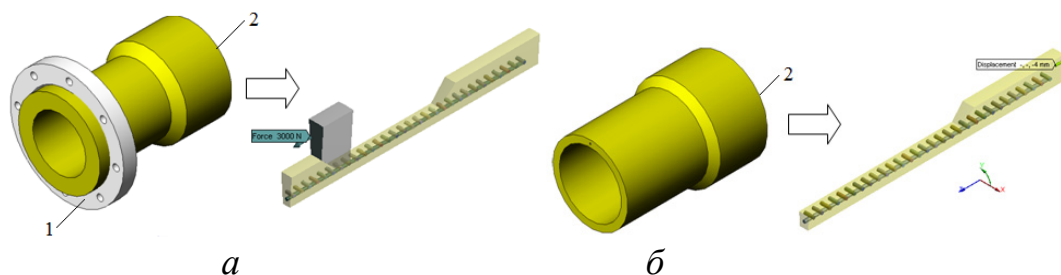


Рис.8. Расчетные схемы и ячейки периодичности: а - при испытаниях образца стыка на осевую прочность, б – при осевом деформировании узла стыка в составе трубопровода (1 – фланец, 2 – зона стыкового соединения).

Первая расчетная схема (рис.8, а) отрезка трубы с двумя законцовками с накидным металлическим фланцем описывает процесс лабораторных испытаний стыковых соединений на осевую прочность непосредственным нагружением осевой силой через фланец. В общем случае данная модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние стыков и при сложном нагружении – одновременном воздействии внутреннего давления и осевой силы.

Вторая расчетная схема (рис. 8, б) с одной законцовкой и линейным участком трубы позволяет анализировать напряженно-деформированное состояние стыковых узлов при осевой деформации трубопровода. В этом случае задается кинематическое нагружение – приложение осевых перемещений к торцу законцовки. Полученное предельное значение осевого перемещения может быть пересчитано в соответствующее осевое усилие осреднением продольных напряжений по толщине законцовки.

Расчеты по первой расчетной схеме с нагружением осевой силой через фланец сопряжены с вычислительными трудностями из-за необходимости описания контактного взаимодействия фланца и поверхности трубы, а также учета больших локальных пластических деформаций в полиэтилене в области крепления фланца. Анализ полученных полей напряжений показал, что участок крепления фланца раньше переходит в пластическое состояние, чем испытываемое стыковое соединение. Это свидетельствует о возможности срыва законцовки в данном месте, что нередко наблюдается при лабораторных испытаниях. Оценка осевой прочности непосредственно сварного стыкового соединения при данной схеме испытаний затруднительна.

Вторая расчетная схема, без фланца, позволяет более полно проанализировать напряженно-деформированное состояние стыковых узлов при осевой деформации. В результате исследования были выявлены качественные отличия в процессе развития деформаций в стыковых образцах труб газового и нефтяного назначения (рис. 9).

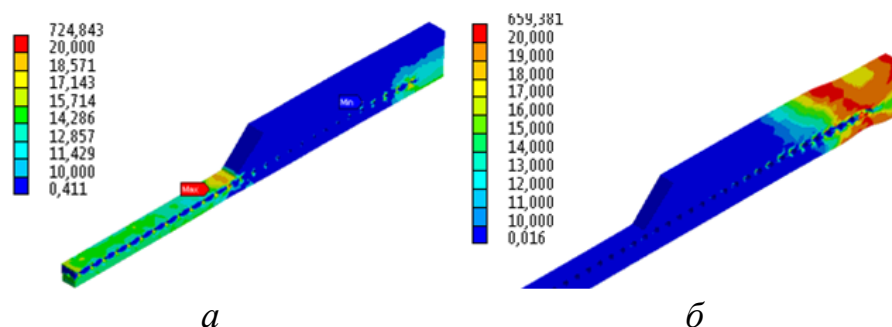


Рис. 9. Эквивалентные напряжения по Мизесу (МПа) для ПАТ газового (а) и нефтяного назначения (б).

При продольном растяжении стыковых узлов труб газового назначения, имеющих менее жесткий каркас, можно прогнозировать, что разрушение произойдет по осевой арматуре в районе перехода линейной части трубы в

законцовку. Иной характер деформирования имеют стыки нефтяных труб с более жестким каркасом: локализация пластических деформаций происходит в неармированной области стыка, при этом напряжения в армирующем каркасе не превышают предела текучести стали. В процессе проведенных исследований получены оценки осевой прочности стыковых соединений ПАТ различных типоразмеров. Отмечено хорошее соответствие расчетных результатов и экспериментальных данных. Таким образом, разработанную расчетную схему и математическую модель можно рекомендовать для оценки осевой прочности стыковых узлов ПАТ различных типов.

Четвертая глава посвящена прогнозированию длительной прочности исследуемых труб.

Используя результаты анализа напряженно-деформированного состояния полимерных армированных труб по созданным двумерным и трехмерным математическим моделям и эталонные кривые длительной прочности полиэтилена, проведена приближенная оценка запаса длительной прочности полиэтиленовой матрицы труб при рабочем давлении. Получено, что расчетный запас длительной прочности на базе 50 лет для газовых труб ПАТ из полиэтилена ПЭ-80 при рабочем давлении не менее 3,5, для нефтяных труб – не менее 1,5.

По результатам проводившихся испытаний образцов ПАТ на длительную прочность при действии внутреннего давления было получено, что при высоком уровне давлений (~80% от кратковременной прочности) разрушение образцов произошло меньше, чем за сутки, с разрывом окружной арматуры. При давлении меньше этого уровня образцы труб не разрушились и за 1,5 года. Можно предположить, что длительная прочность ПАТ при высоких уровнях давления обусловлена перераспределением напряжений между полиэтиленом и кольцевой проволокой вследствие реологических свойств полиэтилена.

Для оценки длительной прочности ПАТ при высоком уровне нагрузки была разработана аналитическая модель, которая учитывает вязкоупругость полиэтилена и нелинейное деформирование стальной проволоки. Для расчетов использовалась упрощенная кусочно-линейная двухзвенная диаграмма растяжения стальной проволоки. Вязкоупругие свойства полиэтилена были приняты по литературным данным. Для малых деформаций, ограниченных двумя процентами, нелинейное вязкоупругое поведение полиэтилена аппроксимировалось линейной вязкоупругой моделью.

Вязкоупругопластическое деформирование армированной трубы, нагруженной внутренним давлением, исследовалось по упрощенной модели, аналогичной приведенной в главе 2, где труба заменялась полиэтиленовым кольцом со стальным сердечником.

Рассматривая нагружение с постоянной скоростью, были получены расчетные оценки кратковременного предельного давления ПАТ, хорошо совпадающие с экспериментом. Получена зависимость окружной деформации трубы от времени в режиме долговременных испытаний при

высоком уровне нагрузки для трубы ПАТ-140, когда давление поднимается с постоянной скоростью до заданного уровня, а потом удерживается на этом уровне до разрушения. Рассмотренные уровни нагрузки составляли порядка 80% от кратковременной прочности, что соответствовало экспериментальным условиям. На рис.10 приведены обобщенные данные по длительной прочности трубы ПАТ-140, полученные экспериментально, по вязкоупругопластической модели, а также на основе численного анализа напряженно-деформированного состояния данной трубы в упругопластической постановке с использованием эталонных кривых длительной прочности ПЭ-80.

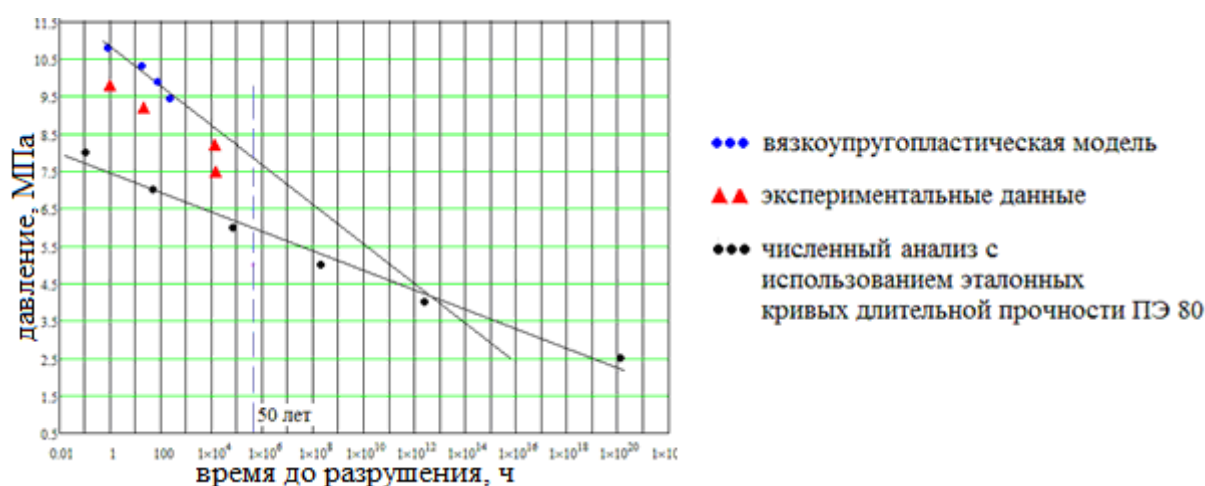


Рис. 10. Длительная прочность трубы ПАТ-140

Видно, что для высоких уровней нагрузки получено хорошее совпадение расчетной долговечности с экспериментальными данными для данной трубы. При рабочем уровне давления существует большой запас длительной прочности, которая определяется напряженным состоянием матрицы ПАТ.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

1. Разработаны двух- и трехмерные нелинейные модели механического поведения полимерных армированных труб, учитывающие параметры структуры, контактное взаимодействие, нелинейное деформирование компонентов. С помощью разработанных моделей проведено исследование напряженно-деформированного состояния полимерных армированных труб при различных условиях нагружения.
2. На основе анализа напряженно-деформированного состояния армирующего каркаса и матрицы полимерных армированных труб предложен критерий, позволяющий прогнозировать их несущую способность. Получены оценки кратковременной статической прочности линейных участков трубопроводов и узлов стыкового соединения полимерных армированных труб при различных вариантах нагружения.
3. Обнаружен эффект перераспределения напряжений в армирующем каркасе в окрестности стыковых соединений полимерных армированных

труб при нагружении внутренним давлением, при котором витки окружной арматуры в основном теле трубы, будучи менее нагруженными на первых этапах нагружения, по мере повышения давления начинают воспринимать нагрузку в большей мере по сравнению с проволокой в законцовке. Это позволяет частично разгрузить неармированную часть стыка по мере роста внутреннего давления и в ряде случаев исключить возможность его разрушения.

4. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния узлов стыка полимерных армированных труб при осевом нагружении, определен механизм разрушения стыковых соединений в составе линейных участков трубопроводов, а также механизм разрушения стыковых соединений при лабораторных испытаниях. Предложена методика расчетного определения осевой прочности стыков полимерных армированных труб.
5. На основе исследований напряженно-деформированного состояния различных конструктивных вариантов полимерных армированных труб с модифицированными узлами стыка разработаны рекомендации по возможным направлениям повышения прочности труб и стыковых соединений, обеспечения заданных запасов прочности новой номенклатуры труб газового назначения.
6. Получены расчетно-экспериментальные оценки длительной прочности полимерных армированных труб при различных уровнях нагрузок с учетом вязкоупругого поведения полиэтилена и упругопластических свойств арматуры.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Зуйко В. Ю., Гуляева М. А., Иванов С. Г. Моделирование напряженно-деформированного состояния металлопластовых труб при испытаниях // Труды Математического центра им. Н.И.Лобачевского. Т. 16. Модели механики сплошной среды. Материалы XVI сессии междунар. школы по моделям механики сплошной среды, 27 июня – 3 июля 2002 г., Казань. – Казань: Изд-во Казанск. матем. об-ва, 2002. – С. 179–185.
2. Иванов С.Г., Стриковский Л.Л., Гуляева М.А., Зуйко В.Ю. Моделирование механического поведения металлопластовых труб под действием внутреннего давления // Механика композитных материалов, 2005, Т. 41, № 1, С. 57–70.
3. Зуйко В.Ю., Аношкин А.Н., Иванов С.Г. Исследование нелинейного деформирования металлопластовых труб // Мавлютовские чтения: Российская научно-техн. конференция: сб. трудов. Т. 3. – Уфа: УГАТУ, 2006. – С. 287-292.
4. Зуйко В.Ю. Численные модели в оценке осевой прочности полимерных армированных труб // Зимняя школа по механике сплошных сред (пятнадцатая): Сборник статей. Ч.2. - Екатеринбург: УрО РАН, 2007.- С. 84-87.

5. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Иванов С.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния и прогнозирование прочности полимерных армированных труб газового назначения // Вестник Самарского государственного университета - Естественнонаучная серия, 2007, №6(56), С.419-426. **(из перечня ВАК)**
6. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю., Иванов С.Г. Компьютерное моделирование и прогнозирование прочности сварных соединений полимерных армированных труб нефтегазового назначения // Нефтяное хозяйство, 2011, №11. С.95-97. **(из перечня ВАК)**
7. Иванов С.Г., Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю. Вязкоупругое поведение и долговечность при высоком уровне нагрузки полиэтиленовых труб, армированных стальной проволокой // Механика композитных материалов, 2011, Т. 47, № 2, С. 277–288. **(из перечня ВАК)**
8. Зуйко В.Ю., Аношкин А.Н. Математические модели нелинейного деформирования полимерных армированных труб при сложном нагружении. Труды 17-й Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2011, -1 электрон. опт. диск.
9. Аношкин А.Н., Зуйко В.Ю. Сравнительный анализ осевой прочности сварных стыковых соединений полимерных армированных труб нефтяного и газового назначения// Нефтяное хозяйство, 2012, №2. С.94-97. **(из перечня ВАК)**

Подписано в печать 19.04.2012. Формат 60×90/16.

Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 1332 / 2012

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии издательства
Пермского национального исследовательского
политехнического университета
614600, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, к. 113.
Тел.: (342) 219-80-33