

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого  
Физико-механический институт  
Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите

Директор ВШТМиМФ,

д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ А. М. Кривцов

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

**Математическое моделирование в проектировании стенки трубопровода  
для нефти и газа из полимерных композиционных материалов**

По направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»

Направленность 01.04.03\_06 «Моделирование физико-механических свойств  
и технологии производства полимеров и композитов»

Выполнила

студентка гр. 5040103/20601

П. А. Мухаметова

Руководитель

доцент ВШТМиМФ, к.х.н.

А. В. Низовцев

Консультант

Инженер ОЭМ, ПИШ  
«Цифровой инжиниринг», СПбПУ

Д. Д. Ожгибесова

Консультант

по нормконтролю

Е. А. Хайбулова

Санкт-Петербург  
2024

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

**Физико-механический институт**

**Высшая школа теоретической механики и математической физики**

УТВЕРЖДАЮ

Директор ВШТМиМФ

А. М. Кривцов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

студенту Мухаметовой Полине Альбертовне, гр. 5040103/20601

1. Тема работы: Математическое моделирование в проектировании стенки трубопровода для нефти и газа из полимерных композиционных материалов
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 30.05.2024
3. Исходные данные по работе: справочная литература, актуальные научные публикации по теме работы, свойства используемых материалов по экспериментальным данным из открытых источниках.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): поиск экспериментальных данных для материалов матричной и армирующей фаз, расчет свойств монослоя из композиционного материала, исследование проницаемости материала матричной фазы, математическое моделирование свойств слоистой стенки трубы, расчет оптимальной укладки, анализ и сопоставление результатов.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей):
6. Консультанты по работе: Ожгибесова Д.Д., инженер Отдела энергетического машиностроения, Передовая инженерная школа «Цифровой инжиниринг», СПбПУ
7. Дата выдачи задания 26.02.2024

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Низовцев А.В., доцент ВШТМиМФ, к.х.н.

Задание принял к исполнению 26.02.2024

Студент \_\_\_\_\_ Мухаметова П.А.

## Реферат

На 50 с., 40 рисунков, 6 таблиц.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛИМЕРНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, МОДЕЛИ МИКРОМЕХАНИКИ, МЕХАНИКА СЛОИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ, ПРАВИЛО СМЕСЕЙ, ЛАМИНАТ, СЛОИСТЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ, ПОЛИМЕРНО-АРМИРОВАННАЯ ТРУБА, КОМПОЗИТНАЯ ТРУБА, МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА.

В данной работе представлена расчетная методика стенки нефтяного трубопровода под действием внутреннего давления. Проведен обзор существующих полимерно-армированных труб. В результате анализа открытых источников были выбраны компоненты композиционного материала, применяемые для производства композитных труб в нефтегазовой отрасли. Проведен обзор различных моделей микромеханики волокнистых композиционных материалов. Определены эффективные свойства монослоя и получена диаграмма растяжения композитного образца в продольном, поперечном и сдвиговом направлениях по правилу смесей. Предложен метод получения диаграммы растяжения композиционного материала с учетом нелинейного поведения компонент системы. Методом молекулярной динамики была изучена диффузия метана через полимерный слой. Описана математическая модель слоистого ламината. Рассмотрена задача напряженно-деформированного состояния композитной трубы. Проведена верификация полученного решения путем сравнения аналитического расчета с конечно-элементной постановкой.

## **Abstract**

50 pages, 40 pictures, 6 tables.

**KEY WORDS:** COMPOSITE MATERIAL, POLYMER COMPOSITE MATERIAL, MICROMECHANICS MODELS, MECHANICS OF LAYERED MATERIALS, RULE OF MIXTURES, LAMINATE, LAYERED COMPOSITE MATERIAL, FIBER-REINFORCED POLYMER PIPE, COMPOSITE PIPE, MATHEMATICAL MODEL, MECHANICAL PROPERTIES.

This paper presents a calculation methodology for the wall of an oil pipeline under the action of internal pressure. A review of existing composite pipes has been carried out. As a result of analyzing open sources, the composite material components used for composite pipe production in the oil and gas industry have been selected. Various micromechanics models of fiber composite materials were reviewed. The effective properties of monolayer are determined and the tensile diagram of composite sample in longitudinal, transverse and shear directions according to the rule of mixtures is obtained. A method for obtaining the tensile diagram of a composite material taking into account the nonlinear behavior of the system components was proposed. The diffusion of methane through a polymer layer was studied by the molecular dynamics method. The mathematical model of layered laminate is described. The problem of stress-strain state of a composite pipe has been considered. Verification of the obtained solution by comparing analytical calculation with finite element formulation has been carried out.

## Содержание

Обозначения и сокращения .....	5
Введение .....	6
ГЛАВА 1. Обзор литературы .....	8
1.1. Обзор полимерно-армированных трубопроводов.....	8
1.1.1. Армирование металлическими лентами .....	9
1.1.2. Армирование сетчатым каркасом.....	10
1.1.3. Армирование волокнами .....	11
1.2. Обзор экспериментальных данных.....	14
1.3. Обзор методов исследования .....	16
1.3.1. Модели микромеханики .....	16
1.3.2. Механика слоистых пластин .....	17
1.3.3. Метод молекулярной динамики .....	20
ГЛАВА 2. Разработка математической модели композиционного материала...	21
2.1. Математическая модель монослоя.....	21
2.2. Математическая модель ламината .....	27
2.3. Верификация модели образца из композиционного материала.....	29
2.4. Исследование газопроницаемости полимерного слоя .....	32
ГЛАВА 3. Проектировочный расчет стенки нефтяного трубопровода .....	36
3.1. Постановка задачи .....	36
3.2. Аналитический расчет .....	37
3.3. Численный расчет .....	40
3.4. Сравнение результатов аналитического и численного решений .....	40
Заключение .....	46
Список использованных источников .....	48

## Обозначения и сокращения

ГСК – глобальная система координат;

КМ – композиционный материал;

ЛСК – локальная система координат;

ММ – математическая модель;

ММД – метод молекулярной динамики;

ПАТ – полимерно-армированные трубы;

ПВДФ – поливинилиденфторид;

ПВХ – поливинилхлорид;

ПКМ – полимерный композиционный материал;

ПП – полипропилен;

ПЭ – полиэтилен;

HDPE (High Density Polyethylene) – полиэтилен высокой плотности;

LDPE (Low Density Polyethylene) – полиэтилен низкой плотности.

## Введение

В современном мире основными ресурсами, необходимыми для жизни человека, являются нефть, нефтепродукты и природный газ. Почти все отрасли промышленности зависят от этих ценных ископаемых.

Основное звено в нефтегазовой отрасли – это транспортировка нефти, нефтепродуктов, природного газа и других жидкостей, добытых из скважин. В качестве основного метода транспортировки используют трубопроводы.

В нашей стране основным материалом для труб, используемых в транспорте жидкостей, нефти и газа, является сталь [13]. Однако из-за агрессивной среды трубопроводы быстро выходят из строя, особенно их внутренняя поверхность, подверженная коррозии и износу [5]. В работе [11] было показано, что около 96% всех отказов промышленных трубопроводов связаны с внутренней коррозией, а доля отказов по всем остальным причинам не превышает 4%. Таким образом, основным негативным фактором, влияющим на состояние промышленного трубопровода при перевозке нефтяной эмульсии, является внутритрубная коррозия.

Одним из вариантов решения этой проблемы является использование альтернативных материалов, имеющих коррозионную устойчивость. В качестве таких материалов можно выделить композиционные материалы на основе полимеров (ПКМ), которые применяются для изготовления полимерно-армированных труб (ПАТ).

В Российской Федерации слабо развиты методики расчета и нормативная база для работы с трубами из композиционных материалов (КМ) из-за недостаточного опыта в этой области. В 2022 году был введен первый стандарт по применению ПАТ – ГОСТ Р 59910-2021 [7], относящийся к трубам из термопластов, укрепленных металлическим каркасом. Однако при использовании КМ в качестве армирующей фазы возможно применение неметаллических наполнителей. Совершенствование ПАТ и соответствующих расчетных методик является актуальной задачей для отечественной нефтегазовой промышленности.

Цель настоящей работы заключается в разработке методики расчета и построении математической модели (ММ) ПКМ для труб нефтяных промысловых трубопроводов с учетом нелинейного поведения материалов, используя методы микромеханики и молекулярной динамики.

Задачи, решаемые в ходе работы:

1. обзор существующих ПАТ;
2. поиск свойств материалов матричной и армирующей фазы по экспериментальным данным из открытых источников;
3. расчет свойств монослоя КМ;
4. разработка ММ для слоистого ламината из КМ;
5. исследование газопроницаемости материала матричной фазы;
6. моделирование напряженно-деформируемого состояния трубы под внутренним давлением;
7. сравнение результатов аналитического и численного решений.



## ГЛАВА 1. Обзор литературы

КМ или композиционный материал – это материал, состоящий из двух или более различных компонентов, где один компонент (матричная фаза) служит непрерывной связующей структурой, а другой компонент (армирующая фаза) укрепляет и улучшает свойства материала. Свойства КМ зависят от соотношения объемных долей матричной и армирующей фаз, а также от прочности связи между ними. Таким образом, комбинация матрицы и армирующего наполнителя обеспечивает уникальные свойства КМ, превосходящие свойства каждого компонента по отдельности.

ПКМ или полимерные композиционные материалы – это КМ с полимерной матрицей. ПКМ объединяет в себе преимущества как полимерных материалов, так и армирующего наполнителя, за счет чего обладает высокой прочностью и жесткостью при небольшом весе, хорошей коррозионной стойкостью, теплоизоляционными свойствами и другими характеристиками.

ПАТ или полимерные армированные трубы – это трубы, состоящие из ПКМ. Для ПАТ в качестве матрицы используются термореактивные или термопластичные полимеры, в качестве армирующей фазы применяются стальные или неметаллические наполнители. Полимерные материалы, из которых изготавливаются ПАТ, обладают химической инертностью, что делает трубы из ПКМ устойчивыми к коррозии, устраняя необходимость использовать электрохимическую и химическую защиту.

### 1.1. Обзор полимерно-армированных трубопроводов

ПАТ разделяются на несколько типов в зависимости от их конструкции: жесткие с армирующим сетчатым каркасом, гибкие с несвязанными слоями и гибкие со связанными слоями, где армирующие элементы могут быть металлическими лентами или синтетическими нитями соответственно [4].

В зависимости от типа армирующего наполнителя ПАТ подразделяют на трубы, армированные:

- металлическими лентами;
- сетчатым каркасом;
- волокнами.

В качестве матричной фазы применяются полимерные материалы, которые классифицируются на две категории [6]:

- термопластичные полимеры (термопласты);
- термореактивные синтетические смолы.

Чаще всего для создания основы композитных труб используют полиэтилен (ПЭ) или полипропилен (ПП) в качестве термопластов. Наиболее распространенным типом полимерной смолы для армированных труб является эпоксидная смола.

Для жестких труб из термопластов, укрепленных металлическим каркасом существует стандарт ГОСТ Р 59910-2021 [7], введенный в 2022 году. В том же году был введен стандарт ГОСТ Р 59834-2021 [8] для гибких труб из термопластов, армированных нитями, ровингом, проволоками или лентами из металлических или неметаллических материалов.

ПАТ также делятся на связанные и несвязанные. В связанной конструкции армирующий наполнитель встраивается в полимер, а в несвязанной, помимо усиливающего слоя, используется одиночный полимерный слой.

### **1.1.1. Армирование металлическими лентами**

Трубы, армированные металлическими лентами, относятся к несвязанным ПАТ, так как представляют конструкцию, состоящую из внутреннего и внешнего полимерных слоев, между которыми послойно наматываются металлические ленты. Такие трубы не являются композитными в том смысле, что металлическое армирование не интегрируется в матрицу полимера, а представляет собой отдельный слой.

Внутренний слой обеспечивает транспортировку перекачиваемого продукта и защищает армирующий слой от его воздействия, внешний слой предназначен для защиты трубы от механических повреждений. Прочность

трубы обеспечивается одним или несколькими слоями армирования. Намотка производится в противоположных направлениях, угол намотки измеряется от оси трубы [16] (см. рис. 1.1). В качестве матричного материала обычно используются ПЭ или ПП, в качестве материала для армирующих лент – сталь или алюминий.

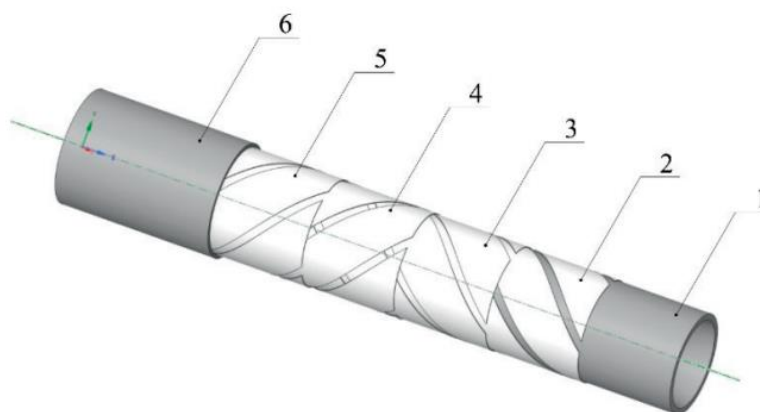


Рис. 1.1. Структура ПАТ с металлическими лентами: 1, 6 – полимерный слой, 2-5 – металлические ленты с противоположенным углом намотки

Трубы этого типа также оснащаются противоизносным слоем, расположенным между полимерным и металлическим слоями. Противоизносный слой представляет собой неметаллическую ленточную обмотку, которая уменьшает износ между слоями конструкции и предотвращает попадание расплавленного полимера в зазоры между металлическими лентами при формировании внешней оболочки.

### 1.1.2. Армирование сетчатым каркасом

ПАТ с сетчатым каркасом производятся методом экструзии с одновременным внедрением металлического каркаса в стенки трубы. Конструкция трубы включает в себя армирующий каркас, сваренный из спиральных (поперечных) и продольных стальных проволок, который расположен в полимерной матрице, где условно можно выделить внутренний и внешний полимерный слой. (см. рис. 1.2).

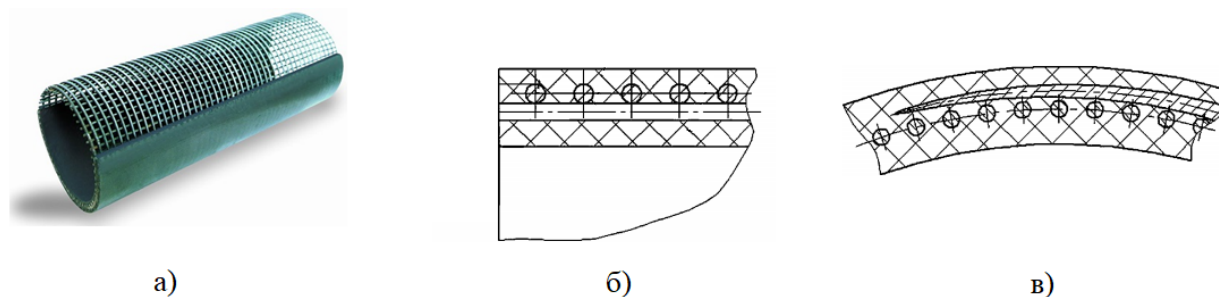


Рис. 1.2. ПАТ с сетчатым каркасом: а) общий вид трубы, б) продольный разрез, в) поперечный разрез

Рассматриваемые трубы изготавливаются в соответствии с ГОСТ Р 5910-2021 [7]. Данный стандарт распространяется на трубы для трубопроводов нефтяной и газовой промышленности, эксплуатируемых при рабочем давлении не выше 6,3 МПа и рабочей температуры не выше +80 °С. Армирующий каркас должен обеспечивать коэффициент прочности трубы не менее 2,0. Для изготовления данных труб применяют композиции ПЭ 80, ПЭ 100 или полиамид (ПА) 12 в качестве материала матрицы.

### 1.1.3. Армирование волокнами

Среди композитов на основе синтетических полимеров ведущее положение занимают армированные КМ, состоящие из волокон и полимерной матрицы в качестве основных компонентов. Волокна отвечают за основную механическую нагрузку и определяют прочность и жесткость материала [1].

Основными армирующими волокнами для ПАТ по типу материала среди всех разновидностей являются: стеклянное, базальтопластиковое, арамидное и стальное (жгут).

1) **Стекловолоконные или стеклопластиковые трубы** – это трубы на основе терморезистивной смолы, армированные стекловолокном. Стеклянные волокна производятся как непрерывные нити (также известные как стекловолоконные прутки) или в виде резаного волокна (стекловолоконная

стружка). Выбор смолы зависит от характеристик перекачиваемой через трубопровод среды.

Стекловолоконные трубы применяются для переноса агрессивных сред с высокой концентрацией углекислого газа и сероводорода, а также являются наиболее оптимальным выбором для транспортировки жидкостей с высоким содержанием воды благодаря своим физико-механическим свойствам [12]. Рассматриваемые трубы изготавливаются в соответствии со стандартом ГОСТ Р 56277-2014 [9], который регулирует применение и производство композитных труб, предназначенных для надземных и подземных внутрипромысловых газо- и нефтепроводов.

**2) Базальтопластиковые трубы** со спиральной перекрестной намоткой используются для обсадных колонн нефтяных скважин. Для создания таких труб применяются эпоксидные и полиэфирные смолы в качестве матрицы, а базальтоволокно используется в качестве армирующего материала [10].

Базальтовое волокно – это неорганическое силикатное волокно, изготовленное из базальтовой руды посредством высокотемпературного плавления и вытяжки. Эти волокна не подвержены горению, а сплавы породы не обладают гигроскопичностью и не выделяют влагу. По сравнению со стекловолокном базальтовые волокна обладают лучшими механическими свойствами, жаростойкостью и коррозионной стойкостью [19]. Такие трубы также легче по сравнению с металлическими трубами, а также не нуждаются в теплоизоляции и антикоррозийной обработке.

**3) Трубы с арамидными волокнами** имеют многослойную структуру, состоящую из внутренней полимерной трубы, окружённой арамидными волокнами, покрытыми полимерным связующим, в несколько слоёв в чередующихся направлениях.

Арамидное волокно является синтетическим волокном, которое изготавливается из ароматического полиамида. Достоинства этих волокон заключаются в их высоких механических свойствах в большом диапазоне температур и химической стойкости. В сравнении со стеклянными волокнами,

aramидные волокна обладают большей пластичностью. Однако у арамидных волокон есть недостаток, связанный с поглощением влаги, что приводит к снижению свойств на 15–20 %.

**4) Композитная труба с армированием стальными волокнами (шнурами)** представляет собой многослойную конструкцию. Внутренний и последующие слои выполнены из полимерного материала, усиленного оцинкованными стальными шнурами. Наружный слой служит полимерной оболочкой.

Такое строение обеспечивает трубе высокую прочность и устойчивость к коррозии. Благодаря стальному армированию, труба способна выдерживать значительные нагрузки и внешние воздействия. Полимерная оболочка защищает сталь от воздействия агрессивных сред и механических повреждений.

**5) Гибридные ПКМ для трубопроводов** содержат несколько армирующих компонентов в одной матрице, где обычно один тип волокна имеет более значительную деформацию разрушения, чем другой. Гибридные волокна могут быть скомбинированы в трех основных конфигурациях: «межслойной» или послойной, «внутрислойной» или «пряжа-за-пряжей» и «внутринитевой» или «волокно-за-волокном» (см. рис.1.3).

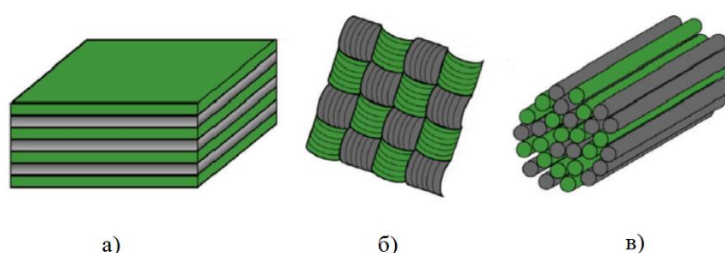


Рис. 1.3. Три основные гибридные конфигурации: а) послойная, б) «пряжа-за-пряжей», в) «волокно-за-волокном».

Послойное расположение в гибридном армированном композите является наиболее распространенным методом гибридизации волокон в ПАТ. В таких гибридных композитах в основном используются стеклянные и углеродные волокна и эпоксидная смола. Проблема гальванической коррозии, характерной

для углеродных волокон, может быть решена путём нанесения одного слоя стеклопластика на поверхность.

Другим типом гибридных композитов является гибридная текстильная лента, состоящая из двух типов волокон, сплетенных в одну ткань. Этот гибридный тип ткани обладает высокой прочностью при использовании с эпоксидной смолой [15].

## 1.2. Обзор экспериментальных данных

В настоящей работе в качестве материала для армирующей фазы выбрана сталь марки API 5L X65, используемая в трубах по стандарту Американского института нефти (American Petroleum Institute, API) [14]. Сталь данной марки обладает высокой прочностью и стойкостью к коррозии, что обеспечивает долговечность и надежность труб.

Существуют различные марки ПЭ, но наиболее распространенным вариантом является ПЭ высокой плотности или HDPE (High Density Polyethylene), обладающий хорошей устойчивостью к химическим воздействиям, высокой прочностью и жесткостью, что делает его подходящим материалом для защиты стальных нефтепроводов от коррозии и механических повреждений.

ПЭ низкой плотности или LDPE (Low Density Polyethylene) обладает более низкой плотностью и меньшей прочностью, поэтому трубы из LDPE рекомендуется использовать только для безнапорных систем (без насосов). Применение LDPE в напорных системах возможно, однако в таких случаях возникает необходимость повышать прочность за счет увеличения толщины стенок, что ведет к дополнительным затратам.

Для матричной фазы выбран высокоплотный ПЭ (HDPE), так как трубы из HDPE являются более прочными и применяются в напорных трубопроводах.

Экспериментальные данные растяжения образцов из выбранных материалов при одноосной нагрузке взяты из [17, 20] (см. рис.1.4). Характеристики материалов сведены в табл. 1.1, оцифрованные кривые представлены на рис. 1.5.

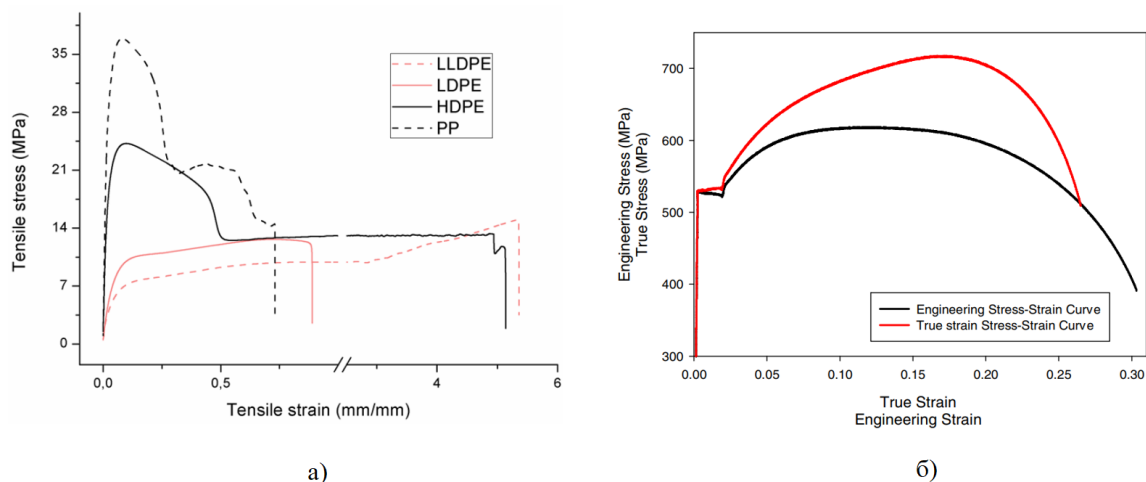


Рис. 1.4. Кривые напряжения-деформации для материалов матричной и армирующей фаз: а) HDPE, б) сталь марки API 5L X65.

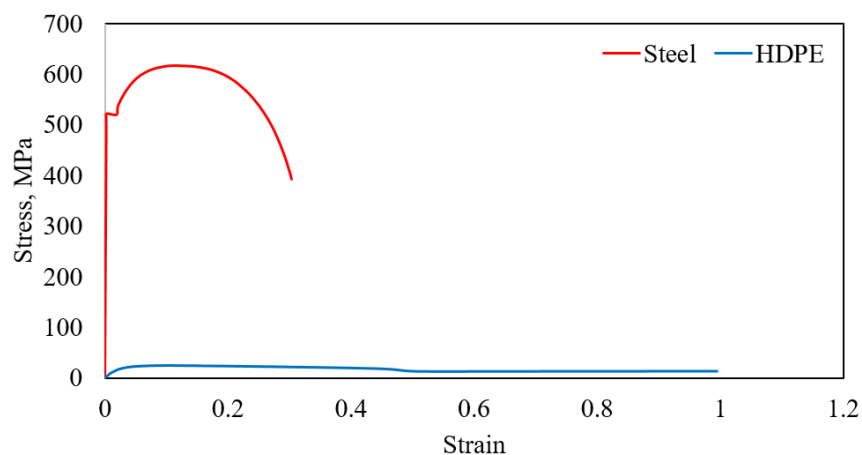


Рис. 1.5. Оцифрованные кривые напряжений-деформаций для выбранных материалов.

Таблица 1.1

Перечень параметров выбранных материалов

Название параметра	Обозначение	Величина		Размерность
		API 5L X65	HDPE	
Плотность	$\rho$	7.85	0.97	$\frac{\Gamma}{\text{см}^3}$
Модуль упругости	$E$	211 000	953	МПа
Коэффициент Пуассона	$\nu$	0.3	0.4	-
Прочность на растяжение	$S$	614	24	МПа



### 1.3. Обзор методов исследования

В настоящей работе рассматривается конструкция трубы из КМ, состоящего из нескольких слоев. Каждый слой представляет собой монослой с параллельными непрерывными волокнами, равномерно распределенными в матричной фазе. Общая конструкция, включающая несколько слоев, называется слоистой пластиной или ламинатом (см. рис.1.6).

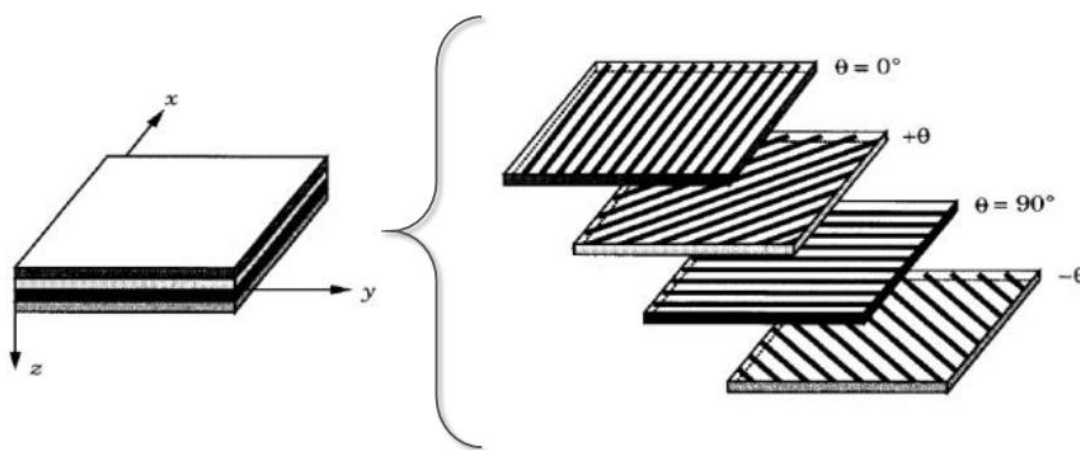


Рис. 1.6. Ламинат, состоящий из слоев с разной ориентацией волокон.

Исследуемые материалы для матричных и армирующих компонент являются изотропными. В случае КМ, армированного однонаправленными непрерывными волокнами, материал считается трансверсально-изотропным, так как обладает осью симметрии, перпендикулярной плоскости, внутри которой свойства являются изотропными.

#### 1.3.1. Модели микромеханики

Для описания математической модели монослоя и оценки упругих свойств КМ применяются различные модели микромеханики. Учитывая геометрию и свойства каждого компонента, можно оценить эффективные свойства КМ. Для этого рассматривается элементарный объем ячейки моделирования, который повторяется в пространстве для формирования полной микроструктуры материала.

В основе микромеханических моделей лежит идея гомогенизации, которая заключается в сведении неоднородной структуры КМ к однородной путем обобщения свойств матрицы и наполнителя. Гомогенизированные упругие свойства КМ рассчитываются на основе индивидуальных свойств волокна и матрицы.

Модели микромеханики обычно основаны на предположении о линейности поведения отдельных компонентов материала. В реальности при достижении больших деформаций или высоких напряжений нелинейное поведение может стать значительным и требовать использования более сложных моделей и методов анализа.

В данной работе будет предложена методика для определения упругих свойств материала как в области линейного, так и нелинейного поведения, используя модели, основанные на исходных свойствах матричной и армирующей фаз, а также объемной доле волокна [22]: правило смесей (Rule of Mixture – ROM), модифицированное правило смесей (Modified Rule of Mixture – MROM), модель Халпина-Цая (Halpin-Tsai), модель Чамиса (Chamis), модель Хилла-Хашина-Кристенсена-Ло (Hill-Hashin-Christenses-Lo), модель Мори-Танака (Mori-Tanaka) и мостовая модель (Bridging model).

### 1.3.2. Механика слоистых пластин

Механика слоистых пластин используется для определения характеристик ламината на основе жёсткости его слоёв. Поскольку элементы конструкций из волокнистых КМ являются тонкостенными, в большинстве случаев их можно описать с использованием традиционных расчётных моделей, таких как тонкостенные оболочки или пластины [3]. Учитывая тонкостенность, рассмотрим случай плоского напряженно-деформированного состояния (НДС) ламината в плоскости слоя.

В соответствии с рис. 1.7 используются две системы координат: локальная и глобальная. Локальная система координат (ЛСК) представляет собой систему координат монослоя  $(l, t)$ , где  $l$  обозначает продольное (волоконное)

направление, а  $t$  – поперечное (матричное) направление, Глобальная система координат (ГСК) – это система координат ламината  $(x, y, z)$ , где  $x$ - $y$  является срединной плоскостью ламината, а ось  $z$  – нормаль к этой плоскости. Координата  $z$  определяет положение  $k$ -ого слоя, угол  $\theta$  – угол армирования или угол поворота ЛСК.

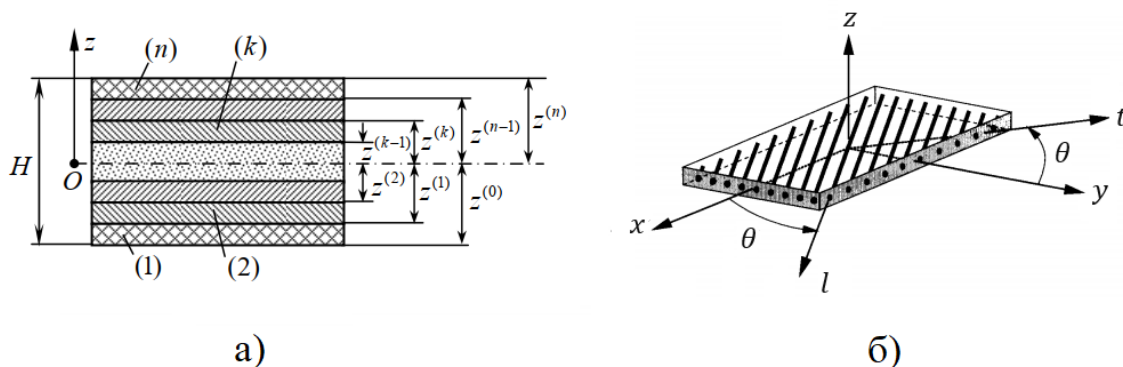


Рис. 1.7. Сечение многослойного ламината: а) определение положения  $k$ -ого слоя, б) определение ЛСК и ГСК.

Для напряжений и деформаций в ЛСК записывается закон Гука для ламината через матрицу жесткости монослоя  $[Q]$  по формуле (1.1):

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} = [Q] \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}, \quad (1.1)$$

где:

$$Q_{11} = \frac{E_l}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}}, \quad Q_{22} = \frac{E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}}, \quad (1.2)$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{lt}E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} = \frac{\nu_{tl}E_l}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}}, \quad Q_{66} = G_{lt}.$$

Матрица жесткости  $[Q]$  в ЛСК преобразуется в матрицу жесткости ламината в ГСК  $[\bar{Q}]$  через матрицу поворота для каждого слоя (1.3):

$$[T]^{-1}[Q][[T]^{-1}]^T = [\bar{Q}], \quad (1.3)$$

где  $[T]$  – матрица поворота на угол армирования  $\theta$ , имеющая вид:

$$[T] = \begin{bmatrix} c^2 & s^2 & 2cs \\ s^2 & c^2 & -2sc \\ -cs & cs & c^2 - s^2 \end{bmatrix}, \quad c = \cos(\theta), \quad s = \sin(\theta).$$

На основе коэффициентов матрицы  $[\bar{Q}]$  собираются матрица мембранной жесткости  $A$ , матрица мембранно-изгибных жесткостей  $B$ , матрица изгибных жесткостей  $D$ , имеющие зависимости (1.4), (1.5) и (1.6) соответственно от положения вдоль оси  $z$  каждого  $k$ -ого слоя:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (z_k - z_{k-1}), \quad (1.4)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (z_k^2 - z_{k-1}^2), \quad (1.5)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [\bar{Q}_{ij}]_k (z_k^3 - z_{k-1}^3). \quad (1.6)$$

Таким образом определяется математическая модель ламината из КМ, армированного волокнами. При этом используются следующие допущения:

1. слои считаются идеально склеенными между собой;
2. толщина ламината намного меньше размеров длины и ширины;
3. исследуемый материал находится в состоянии плоского напряжения, т.е. напряжения и деформации в направлении по толщине не учитываются;
4. данная теория основывается на гипотезе Кирхгофа, согласно которой линии, перпендикулярные поверхности ламината, остаются прямыми и перпендикулярными поверхности после деформации.

В настоящей работе расчеты с применением механики слоистых пластин ограничены упругим откликом выбранных материалов армирующей и

матричной фаз при воздействии на них погонных силовых факторов (т.е. сил на единицу длины).

### 1.3.3. Метод молекулярной динамики

При выборе материалов в случае использования КМ необходимо учитывать их механизмы взаимодействия, которые могут быть определены на молекулярном уровне. Для обоснования выбора системы материалов возможно применение метода молекулярной динамики (ММД).

ММД позволяет эффективно определять проницаемость материалов через моделирование процессов диффузии молекул газа. Известен опыт моделирования процесса проницаемости угля в среде метана [21], где описывается влияние давления, температуры и диаметра пор угля на адсорбцию и диффузию газа.

С применением ММД также возможно отслеживать траектории молекул и их поведение в других системах. Данным методом, к примеру, изучался механизм проникновения гелия и диоксида углерода через газоразделительную полимерную мембрану [18], что позволило получить пути диффузии каждой молекулы газа.

В связи с этим в данной работе методом молекулярной динамики исследуется диффузия метана сквозь аморфный ПЭ, а также анализируется влияние температуры на подвижность молекул метана под давлением.

## **ГЛАВА 2. Разработка математической модели композиционного материала**

При проектировании трубопроводов из КМ необходимо проводить исследования на разных уровнях моделирования:

- макроуровень включает инженерные расчёты для определения общей прочности и надёжности конструкции;
- микроуровень изучает структуру и свойства материалов на уровне отдельных фаз;
- наноуровень исследует характеристики материалов на молекулярном и атомном уровнях.

В данной главе рассматривается прогнозирование свойств композиционного монослоя на микроуровне. На макроуровне изучаются характеристики ламината, состоящего из нескольких слоев с разной схемой армирования. На наноуровне анализируется проницаемость ПЭ слоя, взаимодействующего с транспортируемой средой.

### **2.1. Математическая модель монослоя**

Для определения механических свойств КМ с полимерной матрицей используется стандарт ASTM D3039 (Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials), устанавливающий метод испытания образца на растяжение. Этот метод реализуется путем прикладывания растягивающего усилия к образцу, в результате чего строится кривая напряжения-деформации, описывающая свойства монослоя. Так как стандарт применим к ортотропным КМ, армированным волокнами, то данный метод позволяет измерить их свойства в продольном и поперечном направлениях. При этом для труб используется стандарт ASTM D2290, где используются кольцевые образцы. Для верификации численного моделирования стандарта ASTM D3039 будет достаточно, так как для численной постановки не будет разницы.

Для обозначения армирующей фазы используется нижний правый индекс  $f$ , для обозначения матричной фазы –  $m$ . Учитывая, что выбранные материалы являются изотропными, для описания однородной изотропной среды достаточно двух приведенных модулей для каждой фазы:  $E_f = 211\,000$  МПа,  $\nu_f = 0.3$ ,  $E_m = 953$  МПа,  $\nu_m = 0.4$ . Через связь данных модулей по формуле из линейной теории упругости [2] вычисляется модуль сдвига:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}. \quad (2.1)$$

Правило смесей позволяет получить свойства КМ на основе свойств армирующей и матричной фаз следующим образом:

$$E_l = E_{11} = V_f \cdot E_f + (1 - V_f) \cdot E_m, \quad (2.2)$$

$$E_t = E_{22} = \frac{E_m \cdot E_f}{V_f \cdot E_m + (1 - V_f) \cdot E_f}, \quad (2.3)$$

$$G_{lt} = G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_f \cdot G_m + (1 - V_f) \cdot G_f}, \quad (2.4)$$

$$\nu_{lt} = \nu_{12} = V_f \cdot \nu_f + (1 - V_f) \cdot \nu_m. \quad (2.5)$$

Полученные характеристики монослоя КМ, состоящего из ПЭ матрицы, армированной стальными волокнами, соответствуют линейному участку кривой напряжений и деформаций (см. табл. 2.1).

Таблица 2.1

Свойства КМ с 60% долей армирующего наполнителя

Название параметра	Обозначение	Величина	Размерность
Продольный модуль упругости	$E_{11}$	126981.20	МПа
Поперечный модуль упругости	$E_{22}$	2366.47	МПа
Модуль сдвига	$G_{12}$	845.57	МПа
Коэффициент Пуассона	$\nu_{12}$	0.34	-

(2.6)

(2.7)

(2.8)

(2.9)

(2.10)

(2.11)

(2.12)



(2.13)

По данным формулам строятся кривые напряжения-деформации КМ с учетом нелинейного поведения армирующей и матричной фаз (см. рис. 2.1-2.3).

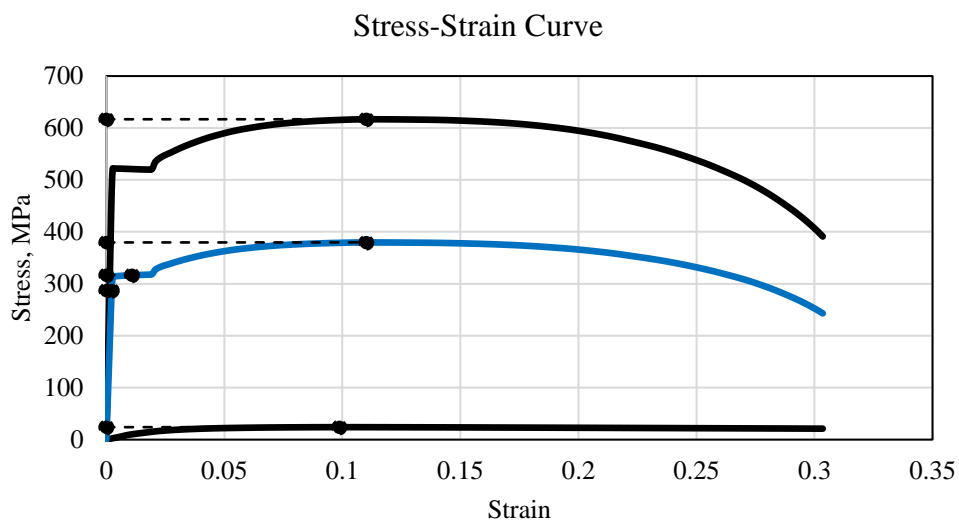


Рис. 2.1. Кривая напряжения-деформации КМ монослоя с учетом нелинейного поведения компонент в продольном направлении.

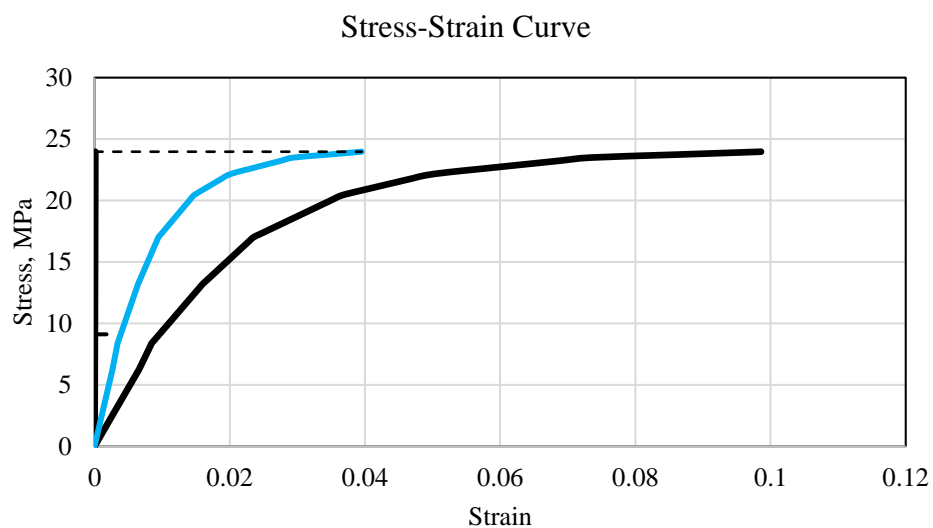


Рис. 2.2. Кривая напряжения-деформации КМ монослоя с учетом нелинейного поведения компонент в поперечном направлении.

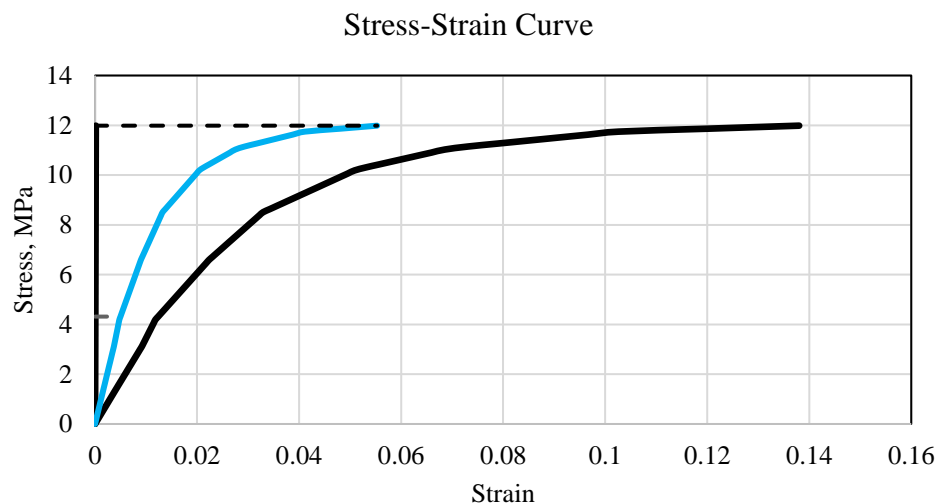


Рис. 2.3. Кривая напряжения-деформации КМ монослоя с учетом нелинейного поведения компонент в сдвиговом направлении.

Так как армирующая фаза имеет более высокие предел прочности и жесткость, её график зависимости напряжения от деформации располагается выше графика матричной фазы. Однако матрица имеет более высокую пластичность и, следовательно, более высокую деформативность. Из-за этого предел прочности ПКМ находится между армирующей фазой и матрицей.

Используя другие модели микромеханики из первой главы, по аналогии получаем кривые напряжения-деформаций (см. рис. 2.4-2.6).

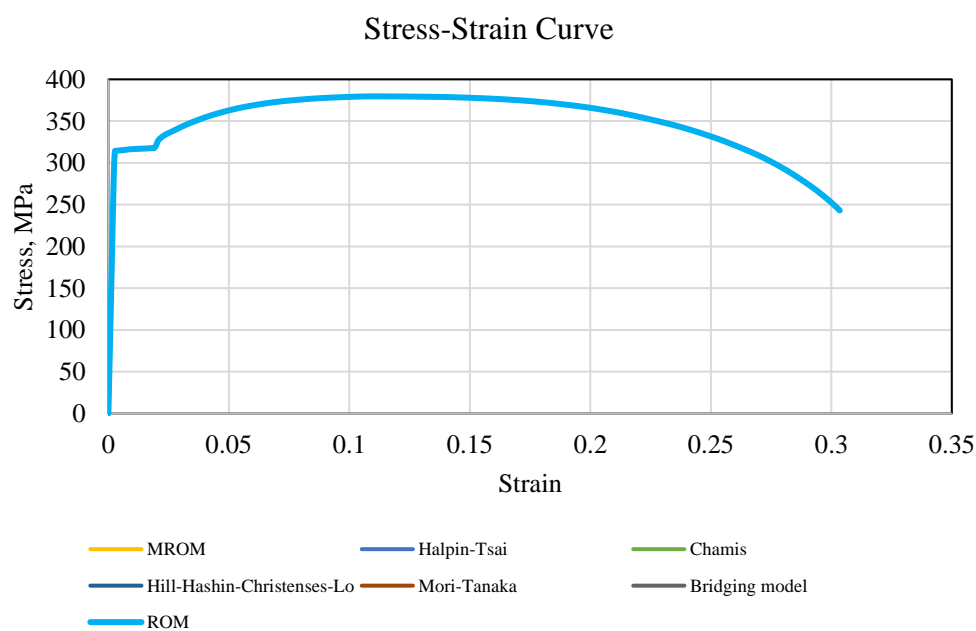


Рис. 2.4. Сравнение моделей микромеханики для продольного направления.

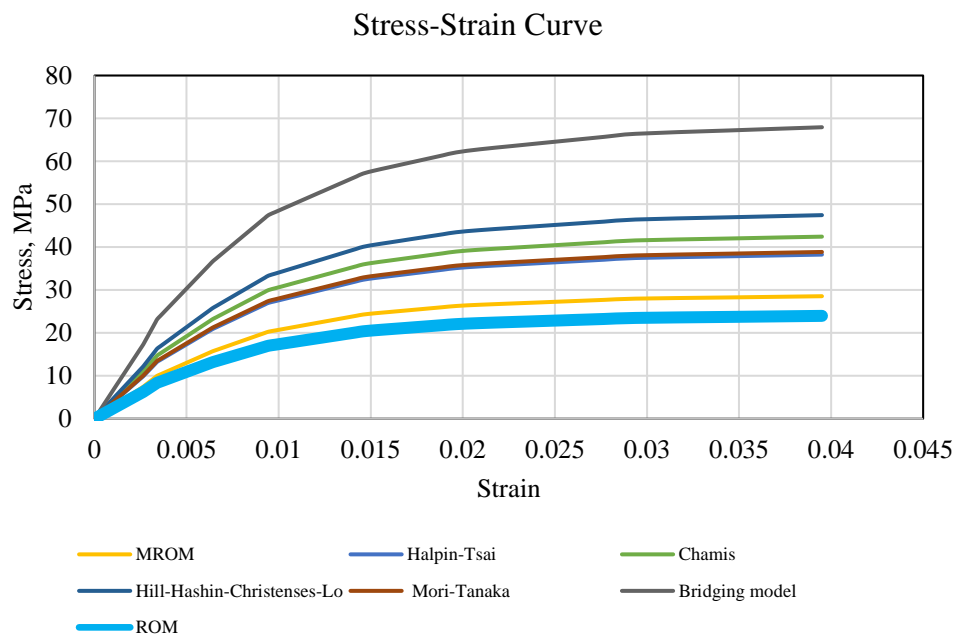


Рис. 2.5. Сравнение моделей микромеханики для поперечного направления.

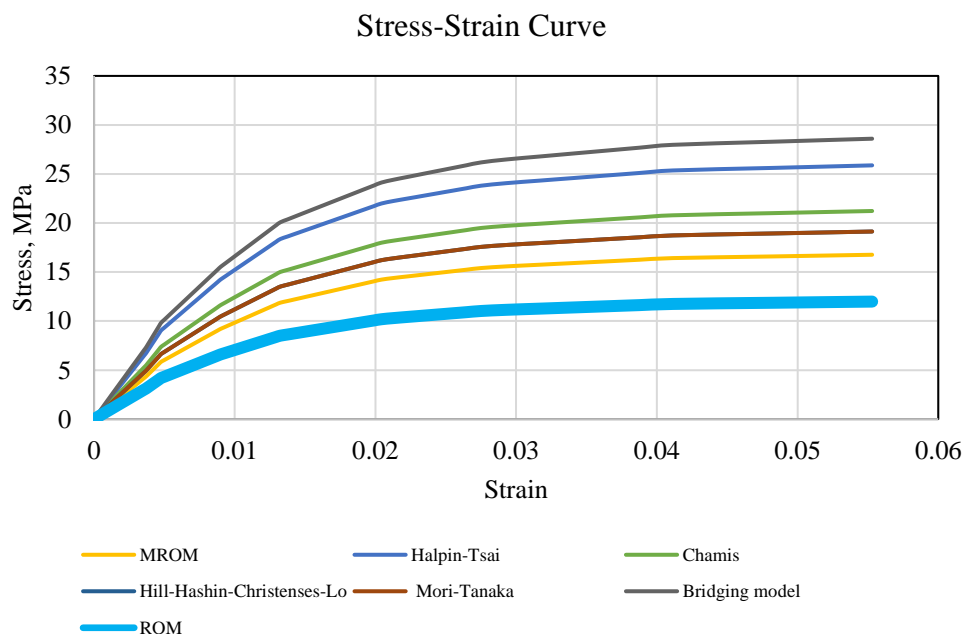


Рис. 2.6. Сравнение моделей микромеханики для направления сдвига.

Были получены типовые диаграммы растяжения образцов. Для продольного направления результаты близки по значению для всех рассмотренных моделей. Для поперечного и сдвигового направлений наблюдаются различия: все модели прогнозируют более высокие значения напряжений по сравнению с моделью правила смесей. Эксперимент позволил бы

определить, какая модель наилучшим образом описывает свойства выбранного КМ.

## 2.2. Математическая модель ламината

Рассматривается растяжение слоистого композиционного образца, состоящего из четырех слоев с симметричной схемой армирования  $[+35/-35]_S$  (см. рис. 2.7).

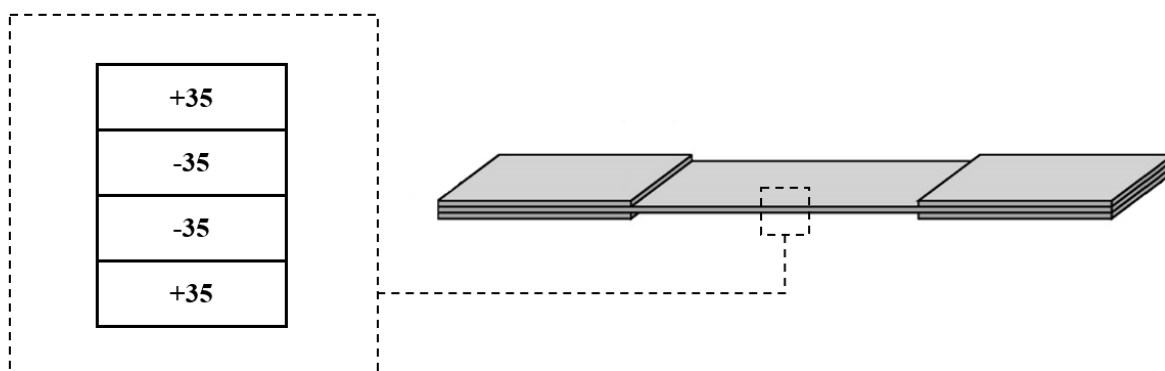


Рис. 2.7. Схема армирования образца из КМ.

В соответствии с формулой (1.2) из первой главы формируется матрица жесткости  $[Q]$  в ЛСК на основе свойств слоя, полученных по микромеханике. Для перехода из ЛСК в ГСК применяется матрица поворота  $[T]$ . После преобразования матрицы  $[Q]$  составляется матрица жесткости ламината для каждого слоя  $[\bar{Q}]$ :

№ Слоя	[Q]		
1	58656.65	28319.54	39352.08
	28319.54	15943.88	19324.11
	39352.08	19324.11	28358.77
2	58656.65	28319.54	-39352.08
	28319.54	15943.88	-19324.11
	-39352.08	-19324.11	28358.77
3	58656.65	28319.54	-39352.08
	28319.54	15943.88	-19324.11
	-39352.08	-19324.11	28358.77
4	58656.65	28319.54	39352.08
	28319.54	15943.88	19324.11
	39352.08	19324.11	28358.77

Рис. 2.8. Матрица жесткости ламината  $[\bar{Q}]$  для каждого слоя.

На основе данной матрицы по формулам (1.4-1.6) формируются матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $D$ :

A			B		
A11	A12	A16	B11	B12	B16
A12	A22	A26	B12	B22	B26
A16	A26	A66	B16	B26	B66

B			D		
B11	B12	B16	D11	D12	D16
B12	B22	B26	D12	D22	D26
B16	B26	B66	D16	D26	D66

 $=$ 

A			B		
1055.82	509.75	0.00	0.00	0.00	0.00
509.75	286.99	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	510.46	0.00	0.00	0.00

B			D		
B11	B12	B16	0.03	0.01	0.01
B12	B22	B26	0.01	0.01	0.01
B16	B26	B66	0.01	0.01	0.01

Рис. 2.9. Матрица мембранной жесткости  $A$ , матрица мембранно-изгибных жесткостей  $B$ , матрица изгибных жесткостей  $D$  ламината.

Нормальные деформации  $\varepsilon^0$  и кривизны  $K$  определяются из соотношения (2.14) в ГСК через погонные силы  $[N] = \{N_x N_y N_{xy}\}$  и моменты  $[M] = \{M_x M_y M_{xy}\}$ :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.14)$$

Так как для полученного образца проводится испытание на одноосное растяжение, через действующую нагрузку и толщину образца определяется только один погонный силовой фактор  $N_x$  (см. рис. 2.10).

Обратная матрица A,B,D					
0.01	-0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
-0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	277.35	-430.02	-68.89
0.00	0.00	0.00	-430.02	907.73	-16.37
0.00	0.00	0.00	-68.89	-16.37	152.62

 $\times$ 

Силовые факторы	
$N_x$	4.05E-03
$N_y$	0.00E+00
$N_{xy}$	0.00E+00
$M_x$	0.00E+00
$M_y$	0.00E+00
$M_{xy}$	0.00E+00

 $=$ 

Деформации и кривизны	
$\varepsilon_{xx}^0$	0.00002690
$\varepsilon_{yy}^0$	-0.00004778
$\gamma_{xy}^0$	0.00000000
$K_x$	0.00000000
$K_y$	0.00000000
$K_{xy}$	0.00000000

Рис. 2.10. Нормальные деформации  $\varepsilon^0$  и кривизны  $K$ .

Выражение для расчета деформаций в ГСК или глобальных деформаций через нормальные деформации  $\varepsilon^0$  и кривизны  $K$  имеет вид:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.15)$$

С учетом того, что  $1/2 \gamma_{xy} = \varepsilon_{xy}$ , через матрицу трансформации  $[T]$  получаем деформации в ЛСК или локальные деформации:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

Напряжения в ГСК или глобальные напряжения определяются через матрицу жесткости  $[\bar{Q}]$ :

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.17)$$

По аналогии с (2.16) получаем напряжения в ЛСК или локальные напряжения для каждого слоя:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}. \quad (2.16)$$

### 2.3. Верификация модели образца из композиционного материала

Для верификации модели проводится численное моделирование в многоцелевой программе конечно-элементного анализа LS-DYNA. Данное программное обеспечение позволяет выполнять расчеты в 3D и 2D постановках с применением solid, shell и beam элементов.

Для проведения испытания на растяжение создается модель образца с заданными свойствами и схемой армирования слоев, соответствующая стандарту ASTM D3039 (см. рис. 2.11).

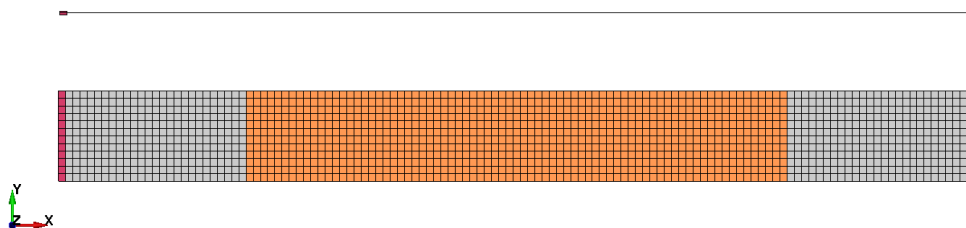


Рис. 2.11. Конечно-элементная модель образца из КМ для испытания на растяжение.

Участки серого цвета повторяют области закрепления образца в тисках испытательной машины. На узлы слева накладывається условие жесткой заделки, на узлы справа – растягивающая нагрузка вдоль оси  $x$ :

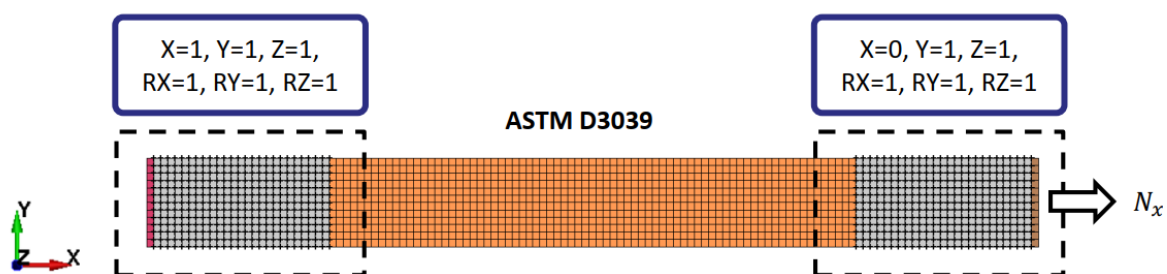


Рис. 2.12. Граничные условия.

Распределения полей напряжений и деформаций в ГСК представлены на рис. 2.13 и 2.14. Видно, что эти распределения являются неоднородными, на что оказывает влияние численный краевой эффект. Таким образом, анализировать результаты следует только для областей, которые не попадают под зону краевого эффекта.

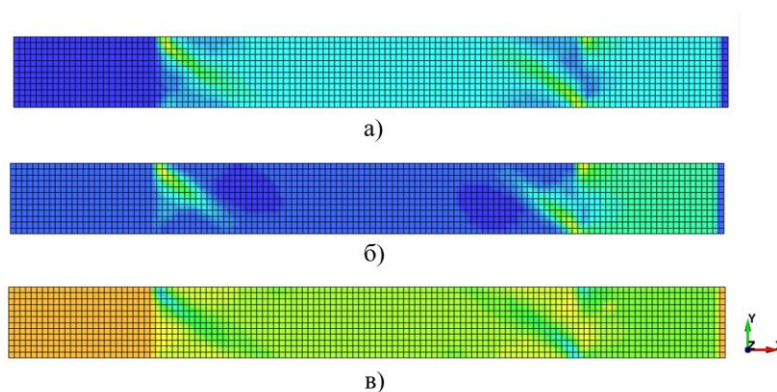


Рис. 2.13. Распределение полей напряжений: а) по оси  $x$ , б) по оси  $y$ , в) в плоскости  $xy$ .

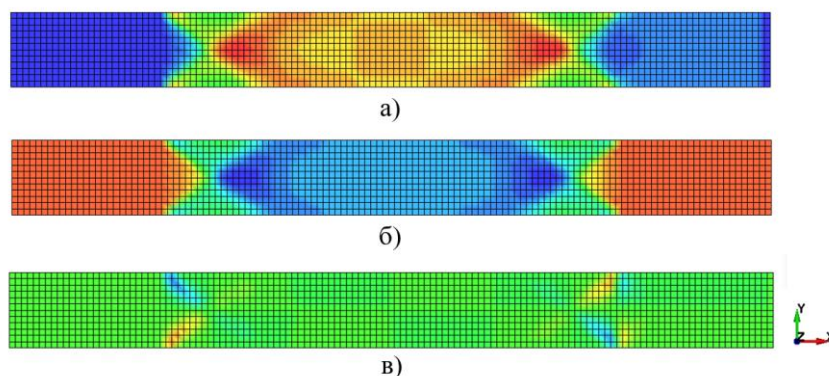


Рис. 2.14. Распределение полей деформаций: а) по оси  $x$ , б) по оси  $y$ , в) в плоскости  $xy$ .

Результаты, полученные из аналитического решения и путем численного расчета, представлены в табл. 2.2 и 2.3. Так как схема армирования является симметричной, рассмотрим значения напряжений и деформация для первого и второго слоя с углами  $+35^\circ$  и  $-35^\circ$ .

Таблица 2.2

Сравнение аналитических и численных результатов в ГСК

Параметр	Размерность	Величина		$\Delta$ , %
		Аналит.	Числ.	
$\sigma_x^{+35}$	МПа	0.2247500000	0.2246575000	0.04
$\sigma_y^{+35}$	МПа	0.0000000000	0.0007575308	0.00
$\tau_{xy}^{+35}$	МПа	0.1352616655	0.1353132188	0.04
$\sigma_x^{-35}$	МПа	0.2247500000	0.2247058438	0.02
$\sigma_y^{-35}$	МПа	0.0000000000	0.0007814739	0.00
$\tau_{xy}^{-35}$	МПа	-0.1352616655	-0.1353482656	0.06
$\varepsilon_x^{+35}$	мм/мм	0.0000268985	0.0000267269	0.64
$\varepsilon_y^{+35}$	мм/мм	-0.0000477772	-0.0000474240	0.74
$\gamma_{xy}^{+35}$	мм/мм	0.0000000000	-0.0000000003	0.00
$\varepsilon_x^{-35}$	мм/мм	0.0000268985	0.0000267269	0.64
$\varepsilon_y^{-35}$	мм/мм	-0.0000477772	-0.0000474240	0.74
$\gamma_{xy}^{-35}$	мм/мм	0.0000000000	-0.0000000003	0.00



Сравнение аналитических и численных результатов в ЛСК

Параметр	Размерность	Величина		$\Delta$ , %
		Аналит.	Числ.	
$\sigma_1^{+35}$	МПа	0.2779139026	0.2781495000	0.08
$\sigma_2^{+35}$	МПа	-0.0531639026	-0.0527344883	0.81
$\tau_{12}^{+35}$	МПа	-0.0593357440	-0.0589186445	0.71
$\sigma_1^{-35}$	МПа	0.2779139026	0.2782226875	0.11
$\sigma_2^{-35}$	МПа	-0.0531639026	-0.0527353945	0.81
$\tau_{12}^{-35}$	МПа	0.0593357440	0.0589182852	0.70
$\varepsilon_1^{+35}$	мм/мм	0.0000023310	0.0000023317	0.03
$\varepsilon_2^{+35}$	мм/мм	-0.0000232096	-0.0000230288	0.78
$\gamma_{12}^{+35}$	мм/мм	-0.0000701722	-0.0000696792	0.70
$\varepsilon_1^{-35}$	мм/мм	0.0000023310	0.0000023323	0.06
$\varepsilon_2^{-35}$	мм/мм	-0.0000232096	-0.0000230294	0.71
$\gamma_{12}^{-35}$	мм/мм	0.0000701722	0.0000696788	0.70

Как видно по полученным результатам, аналитическое и численное решения показывают погрешность менее 1 %, что указывает на высокую точность полученных результатов. Это свидетельствует о правильном выборе метода решения и корректности математических моделей, использованных в работе.

#### 2.4. Исследование газопроницаемости полимерного слоя

Для исследования диффузии газа сквозь полимер использовался программный пакет классической молекулярной динамики LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator). Основой любого компьютерного моделирования молекулярной динамики является межатомный потенциал, который представляет собой силовое поле, описывающее взаимодействия между атомами в изучаемой системе. Потенциал ReaxFF является одним из наиболее широко используемых потенциалов для моделирования химических реакций и процессов с большим числом частиц.

В настоящей работе для описания межатомного взаимодействия использовался потенциал *ci-ReaxFF* (Charge-Implicit *ReaxFF* Potential for Hydrocarbon Systems). Данный потенциал является модификацией классического потенциала *ReaxFF* для углерода и водорода. *ci-ReaxFF* устраняет трудоемкое уравнивание зарядов и демонстрирует ряд преимуществ, делающих его более эффективным в сравнении с оригинальным *ReaxFF* с точки зрения вычислительных затрат.

Для моделирования взаимодействия молекул метана с макромолекулами ПЭ в качестве исходной структуры была выбрана ячейка моделирования размером  $27 \times 27 \times 50 \text{ \AA}$ , содержащая 749 атомов углерода  $N_C$  и 1636 атомов водорода  $N_H$ . Метан располагается в ряд в количестве 32 молекул в нижней части ячейки и находится на расстоянии  $4 \text{ \AA}$  от макромолекул ПЭ (см. рис. 2.15). Выбор количества молекул метана обусловлен простотой наблюдения за траекториями газовых молекул внутри ПЭ. Плотность полиэтилена  $0.41 \text{ g/m}^3$  выбрана таким образом, чтобы молекулы метана могли проникать внутрь. Ячейка моделирования всего содержит 2385 атомов.

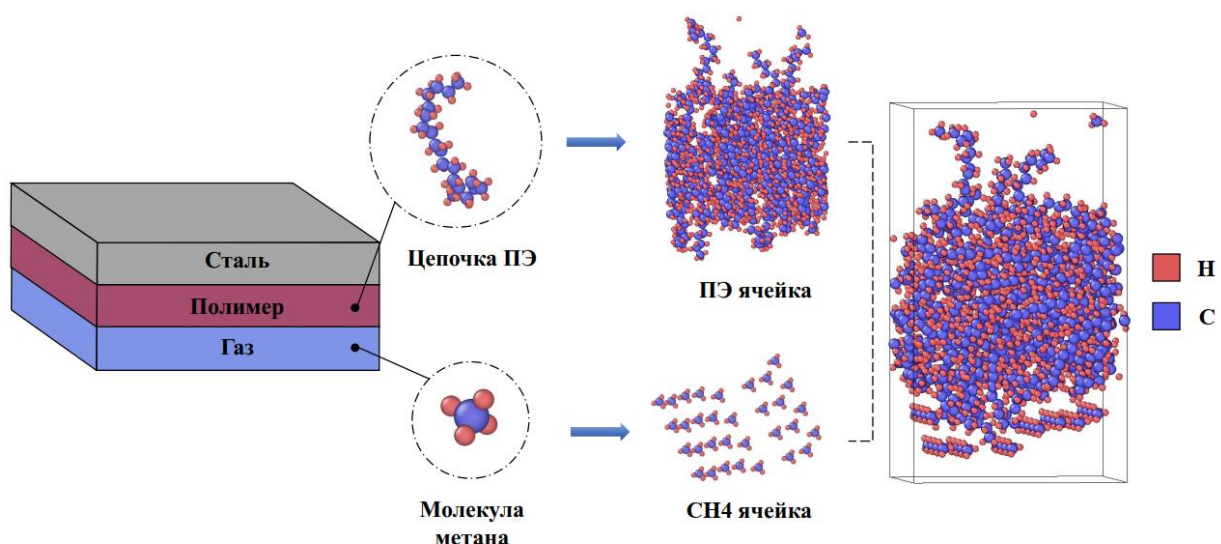


Рис. 2.15. Исследуемая структура, состоящая из макромолекул ПЭ и молекул метана.

Процесс диффузии молекул  $\text{CH}_4$  делится на два этапа: (1) до момента, когда внешнее давление начинает действовать на стенку полимера, и (2) с момента, когда начинается сжатие ПЭ. Плотность ПЭ до начала сжатия

составляет  $0.74 \text{ g/m}^3$ . После сжатия до 60% от начального объема ячейки плотность ПЭ равна  $1.06 \text{ g/m}^3$ .

На рис. 2.16 показана средняя и максимальная глубина проникновения молекул метана внутрь ПЭ в разные моменты времени до того, как на стенку ПЭ начало действовать внешнее давление. Величина  $z_{av}$  – средняя глубина проникновения молекулы рассчитывается как сумма путей, пройденных всеми молекулами метана внутрь ПЭ, разделенная на количество молекул, проникнувших внутрь. Для сравнения приведено максимальное расстояние  $z_{max}$ , на которое проникла молекула  $\text{CH}_4$ .

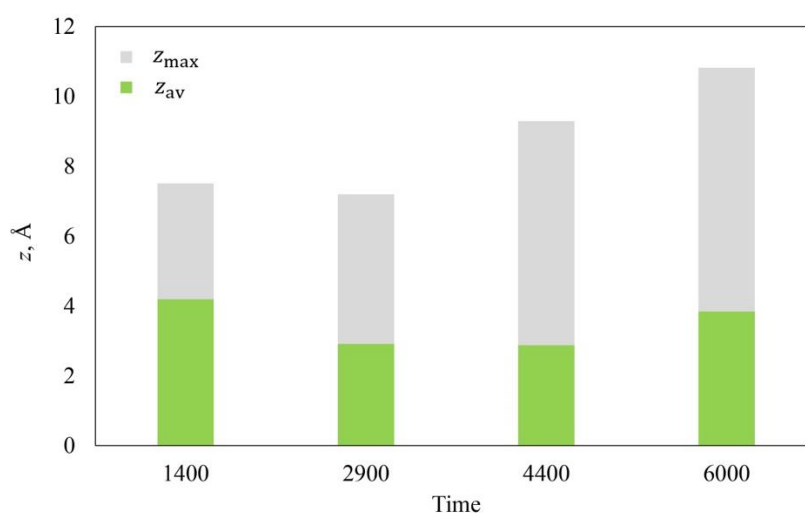


Рис. 2.16. Зависимость глубины проникновения молекул метана внутрь полиэтилена при выдержке при 350 К.

Видно, что средняя глубина проникновения молекул метана изменяется незначительно с течением времени, в то время как максимальное пройденное расстояние увеличивается. Изменение средней глубины связано с ростом проникающих внутрь молекул.

На рис. 2.17 показана средняя и максимальная глубина проникновения молекул метана внутрь ПЭ при различных температурах в конечный момент времени, когда под действием внешнего давления стенки ПЭ сместились и была достигнута плотность  $1.06 \text{ g/m}^3$ .

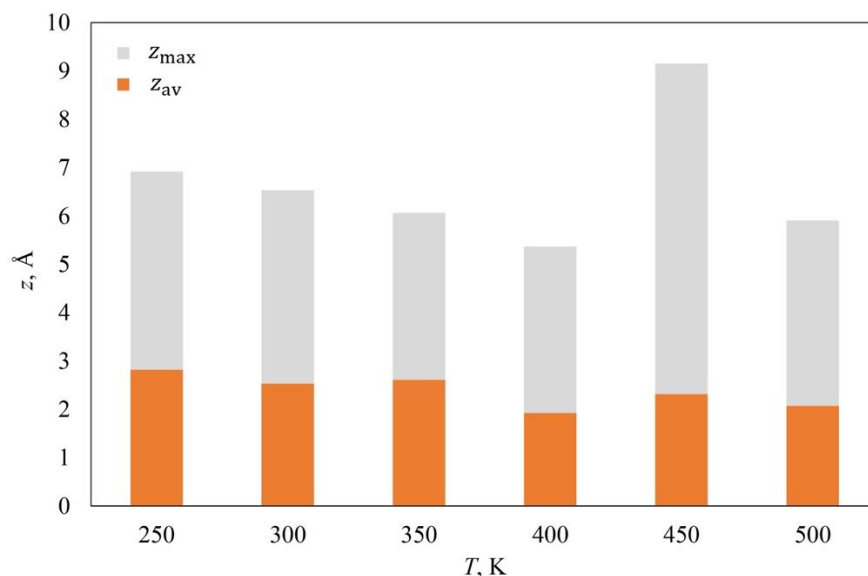


Рис. 2.17. Итоговая глубина проникновения молекул метана внутрь ПЭ при выдержке при разных температурах.

Как видно, во всем диапазоне рассмотренных температур диффузия метана внутрь ПЭ происходит почти одинаково, средняя величина погружения  $\text{CH}_4$  близка по значению для всех рассмотренных температур. С одной стороны, температура должна увеличить скорость диффузии, но с другой стороны, ПЭ уже имеет достаточно высокую плотность, что не позволяет молекулам метана проникать глубоко даже при повышенных температурах. Тем не менее, величина  $z_{max}$  достаточно велика, то есть некоторые молекулы проникают достаточно глубоко, особенно при повышенных температурах.

При температуре 450 К наблюдается увеличение как средней глубины проникновения молекул метана, так и максимального расстояния проникновения. Это может быть обусловлено тем, что при данной температуре молекулы метана становятся более активными и быстрее проникают внутрь полимерной системы. Данный эффект может оказывать существенное влияние при наличии дефектов в полимерном слое, так как ведет к ускорению процесса накопления газа между стенками.

## ГЛАВА 3. Проектировочный расчет стенки нефтяного трубопровода

Промысловые трубопроводы используются для транспортировки нефти, газа и воды на нефтяных и газоконденсатных месторождениях. Разделяют два режима эксплуатации трубопроводов:

- нормальный процесс транспортировки, при котором действует рабочее давление, определяемое гидравлическим расчетом трубопроводов исходя из проектных объемов транспортируемой среды. В зависимости от величины рабочего давления промышленные трубопроводы делятся на трубопроводы высокого давления (6 МПа и выше), среднего (1.6 МПа) и низкого (0.6 МПа);
- определенные технологические операции (глушение скважины, промывка и др.), где максимальное давление соответствует давлению срабатывания предохранительных устройств.

Использование трубных изделий определяется составом транспортируемой среды и условиями эксплуатации и устанавливается проектировщиком или заказчиком.

### 3.1. Постановка задачи

В данной работе проводится расчет стенки нефтяного трубопровода из КМ толщиной  $t = 0.018$  м, наружным радиусом  $R_n = 0.108$  м и симметричной схемой армирования  $\pm\theta = 45^\circ$  под действием внутреннего рабочего давления  $p$  (см. рис. 3.1). Согласно ГОСТ Р 59910-2021 [7] конструкция армирующего слоя должна обеспечивать коэффициент запаса прочности трубы не менее 2.

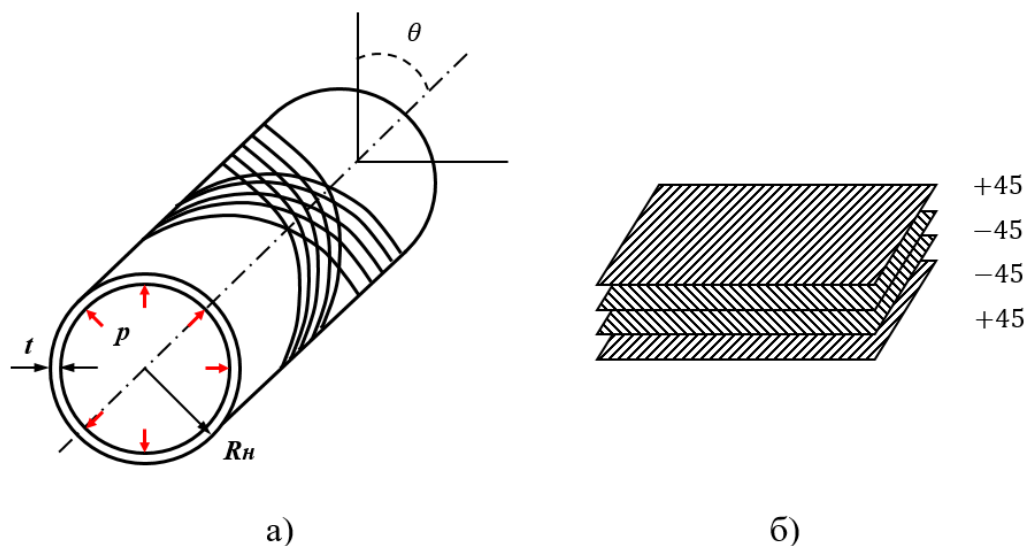


Рис. 3.1. Конструкция КМ трубы: а) общий вид, б) схема армирования [45/-45]s.

### 3.2. Аналитический расчет

В случае расчета стенки композитной трубы рассматривается задача тонкостенного цилиндрического сосуда. Внутреннее давление распределяется равномерно относительно оси сосуда. Под действием такого давления в боковой стенке сосуда возникают окружные (кольцевые)  $\sigma_n$  и продольные (меридиональные)  $\sigma_a$  напряжения (см. рис. 3.2).

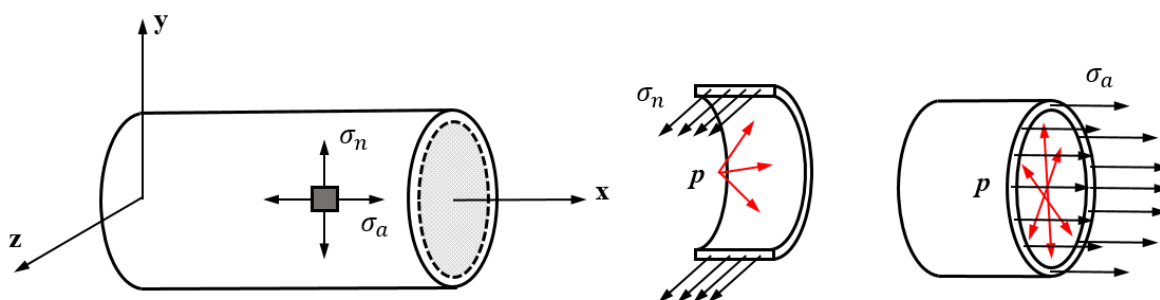


Рис. 3.2. Напряжения в стенка цилиндрического сосуда.

Давление на днище стремится разорвать цилиндрическую часть по поперечному сечению, а давление на боковые стенки – по окружному направлению. В цилиндрических сосудах окружные напряжения в два раза больше, чем продольные:

$$\sigma_n = \frac{pR_H}{t}, \quad \sigma_a = \frac{pR_H}{2t} \quad (3.1)$$

Таким образом, при расчете цилиндрического сосуда под внутренним давлением возникают силовые факторы  $N_x$  и  $N_y$ :

$$N_x = \sigma_a t = \frac{pR_H}{2}, \quad N_y = \sigma_n t = pR_H \quad (3.2)$$

Для расчёта многослойной конструкции из КМ применяется механика ламинатов, алгоритм которой был рассмотрен во второй главе. Эффективные свойства композитного монослоя получены по правилу смесей так же во второй главе. Алгоритм расчета стенки композитной трубы под действием внутреннего давления схематично можно представить следующим образом:

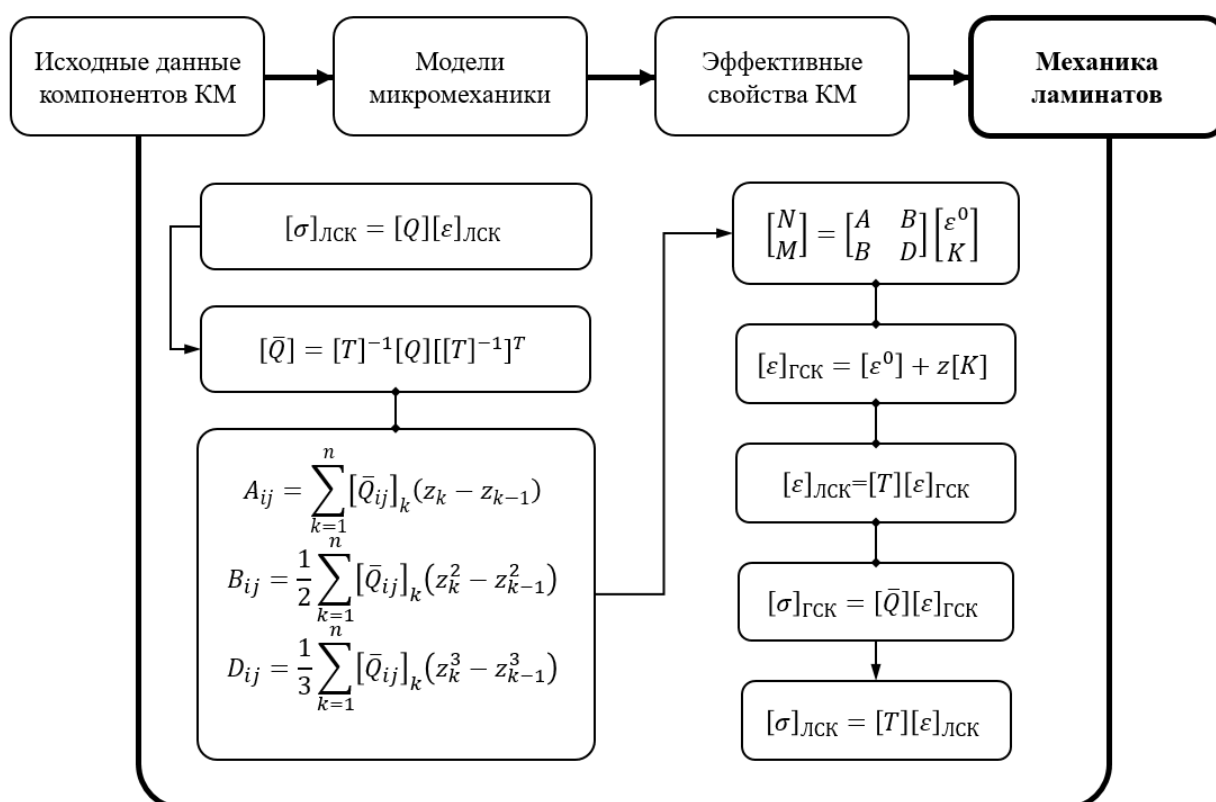


Рис. 3.3. Схематичное представление алгоритма расчета КМ.

Образование трещит в матрице композитных труб приводит к потере герметичности стенки. Для обеспечения запаса прочности по матрице в данной

работе используется критерий максимальных деформаций  $R_{ij}$ , для определения предельной несущей способности – критерий Цая-Хилла.

Критерий Цая-Хилла определяется знаком нормального напряжения, которое действует вдоль соответствующей оси в ЛСК, т.е. в зависимости от сжатия или растяжения вдоль этой оси. Функция критерия Цая-Хилла должна удовлетворять условию  $f \leq 1$  и имеет следующий вид:

$$f = \left(\frac{\sigma_1}{S_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_2}{S_2}\right)^2 + \left(\frac{\tau_{12}}{S_{12}}\right)^2 - \frac{\sigma_1\sigma_2}{S_1^2}, \quad (3.3)$$

$$S_1 = \begin{cases} S_1^T, & \text{при } \sigma_1 > 0 \\ S_1^C, & \text{при } \sigma_1 < 0 \end{cases}$$

$$S_2 = \begin{cases} S_2^T, & \text{при } \sigma_2 > 0 \\ S_2^C, & \text{при } \sigma_2 < 0 \end{cases}$$

Критерий максимальный деформаций определяется отношением фактических деформаций к деформациям разрушения, которые определяются в ЛСК монослоя. Функция критерия прочности должна удовлетворять условию  $R_{ij} \leq 1$  и определяется следующим образом:

$$R_{11} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_1 > 0 \\ -\frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_1 < 0 \end{cases},$$

$$R_{22} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_2}{Y_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_2 > 0 \\ -\frac{\varepsilon_2}{Y_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_2 < 0 \end{cases}, \quad (3.4)$$

$$R_{12} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_{12}}{S_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_{12} > 0 \\ -\frac{\varepsilon_{12}}{S_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_{12} < 0 \end{cases},$$

где  $X, Y, S$  – соответствующие пределы в продольном (волоконном) направлении, поперечном (матричном) и сдвиговом. Так как в КМ матричное направление является более слабым, целевой функцией выбран критерий  $R_{22}$ .



### 3.3. Численный расчет

Численное моделирование расчета на прочность композитной трубы проводилось в LS-DYNA. Была создана модель цилиндра с днищами из shell элементов с соответствующей схемой армирования  $\pm\theta = 45^\circ$ . К внутренней поверхности сосуда прикладывалось давление, равное 1.6 МПа. В качестве граничных условий были выбраны условия в цилиндрической системе координат, разрешающие расширение сосуда вдоль радиального направления.

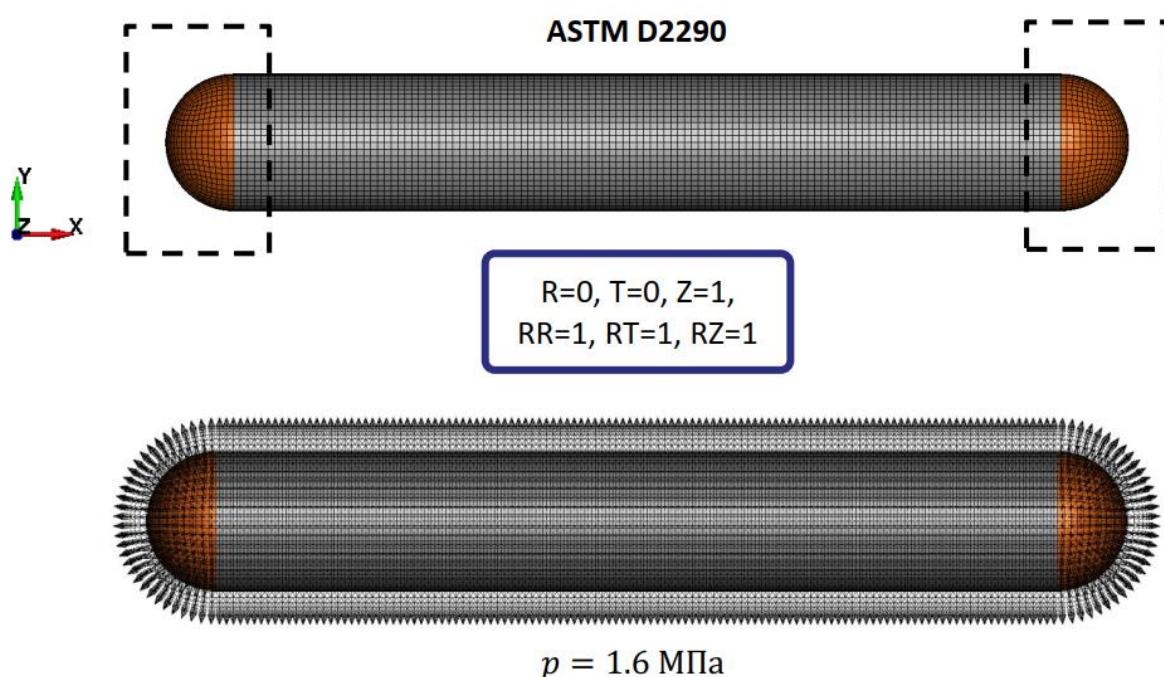


Рис. 3.4. Конечно-элементная модель цилиндрического сосуда.

### 3.4. Сравнение результатов аналитического и численного решений

На рис. 3.5-3.16 представлены результаты распределения полей напряжений и деформаций в ГСК и ЛСК.

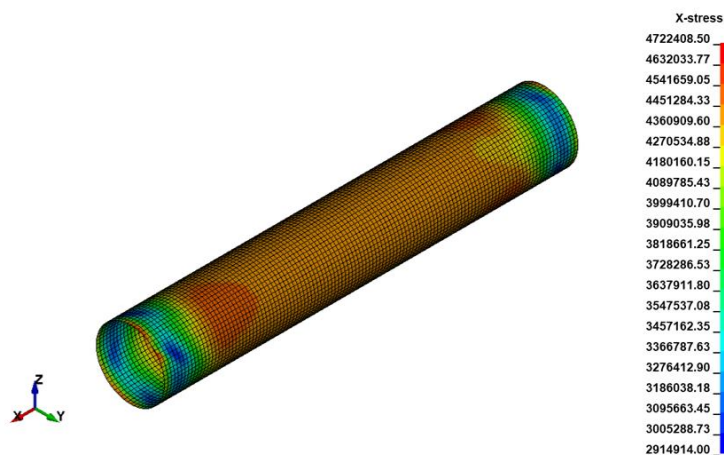


Рис. 3.5. Распределение поля напряжений по x в ГСК.

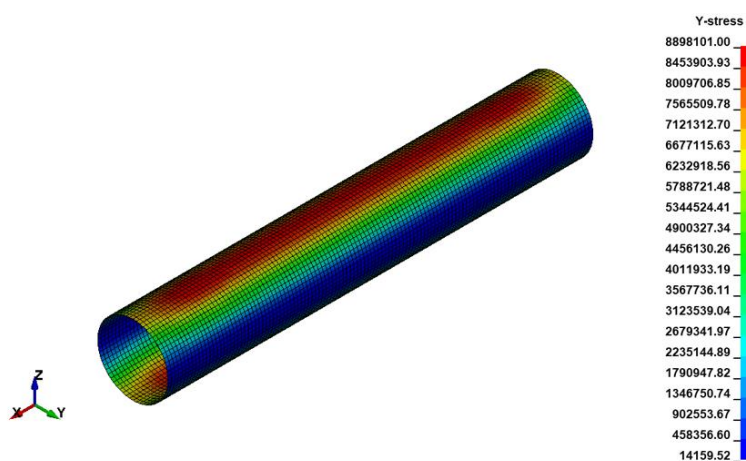


Рис. 3.6. Распределение поля напряжений по y в ГСК.

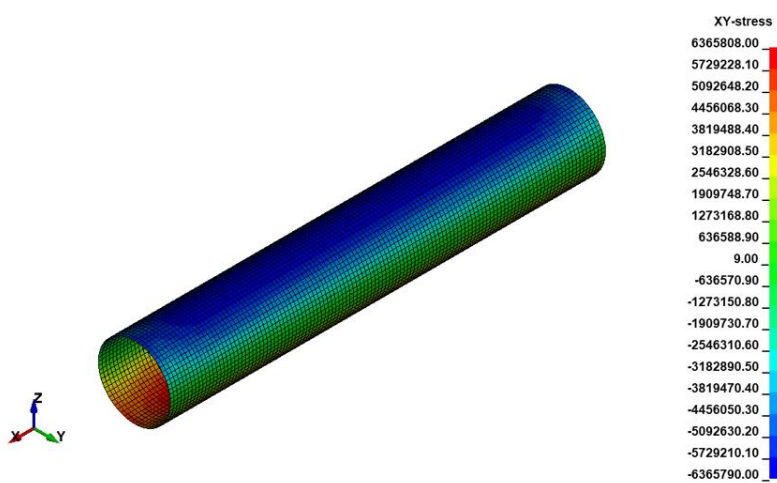


Рис. 3.7. Распределение поля напряжений в плоскости xy в ГСК.

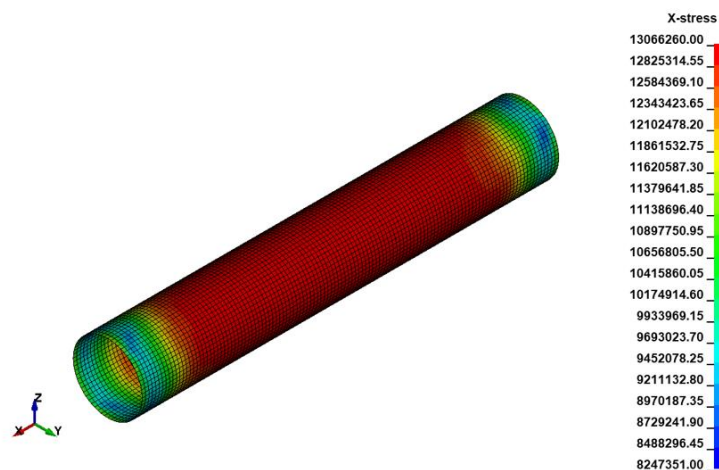


Рис. 3.8. Распределение поля напряжений по x в ЛСК.

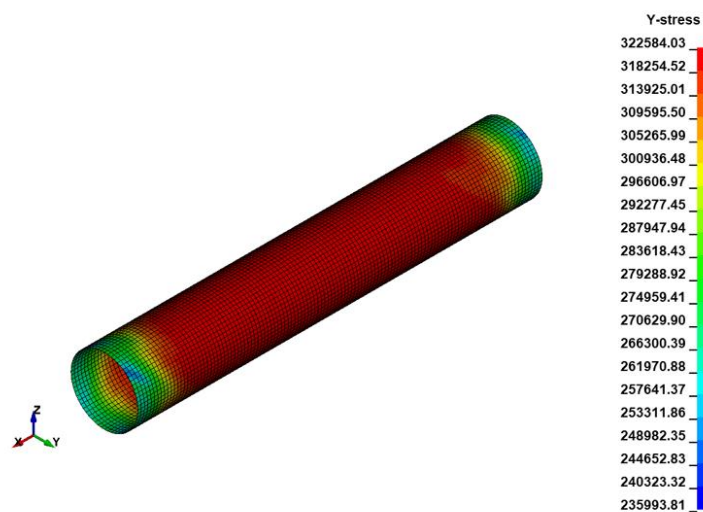


Рис. 3.9. Распределение поля напряжений по y в ЛСК.

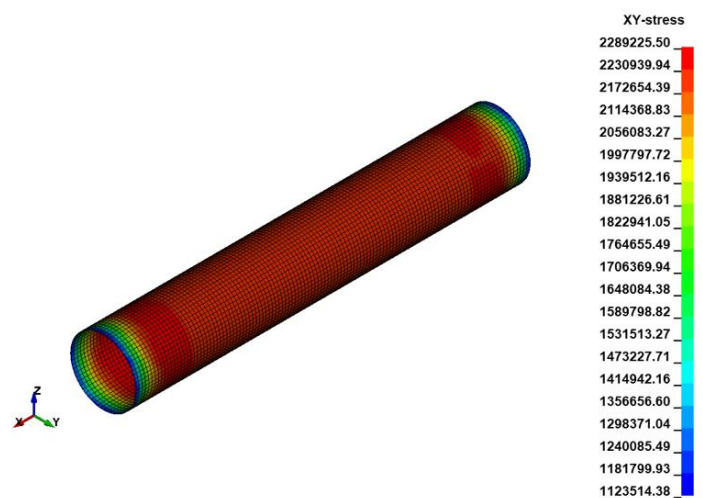


Рис. 3.10. Распределение поля напряжений в плоскости xy в ЛСК.

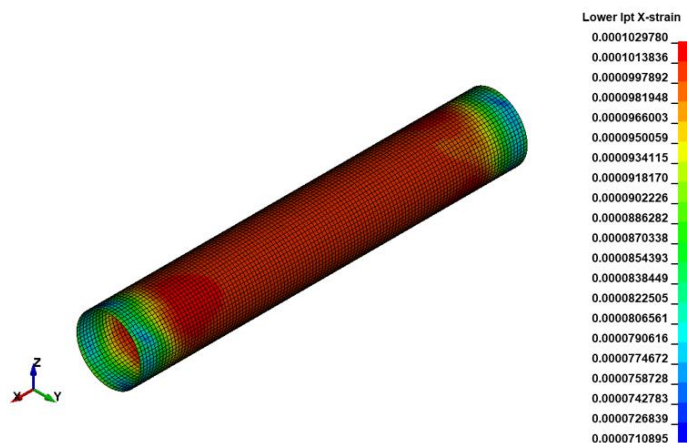


Рис. 3.11. Распределение поля деформаций по  $x$  в ЛСК.

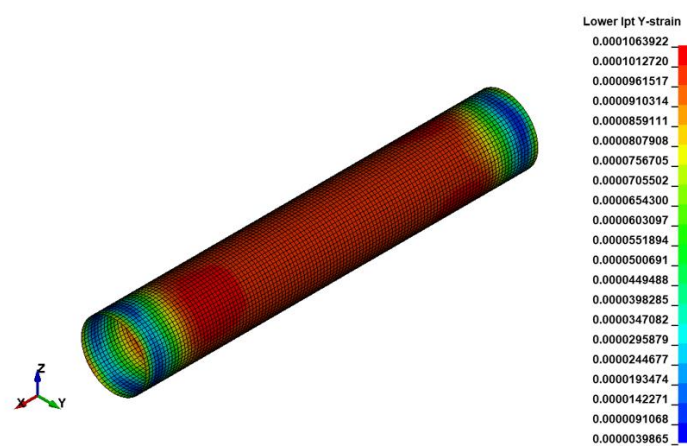


Рис. 3.12. Распределение поля деформаций по  $y$  в ЛСК.

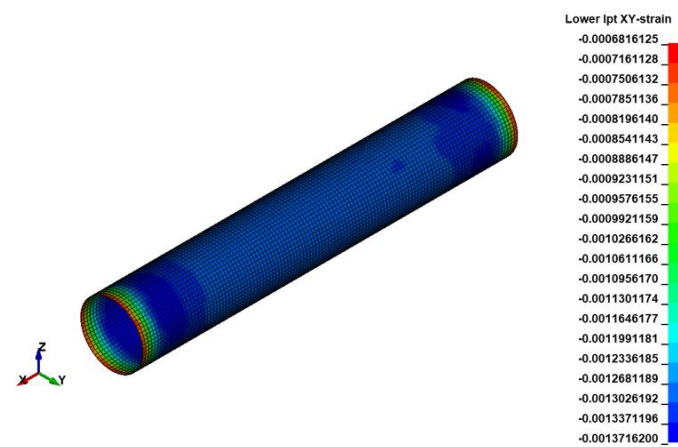
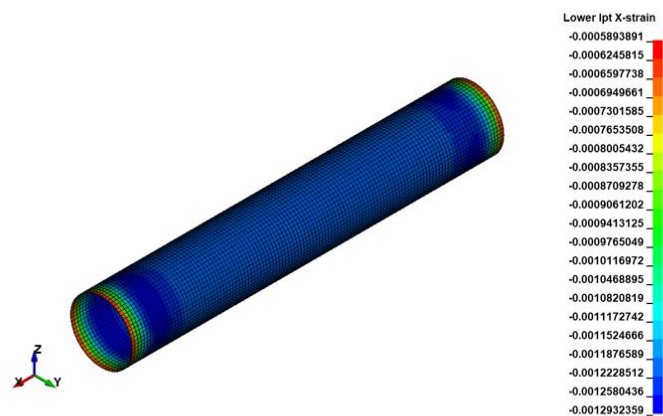
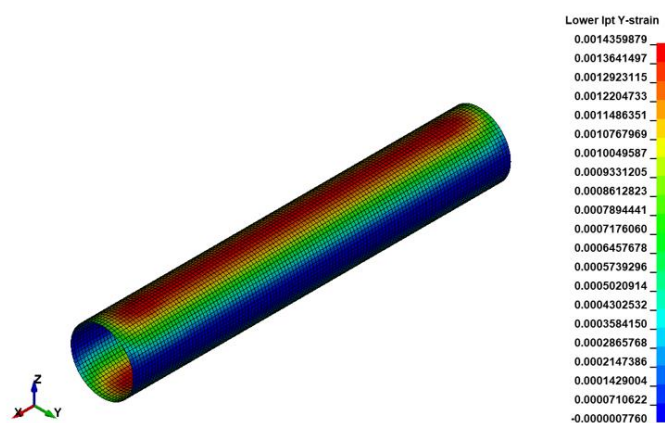
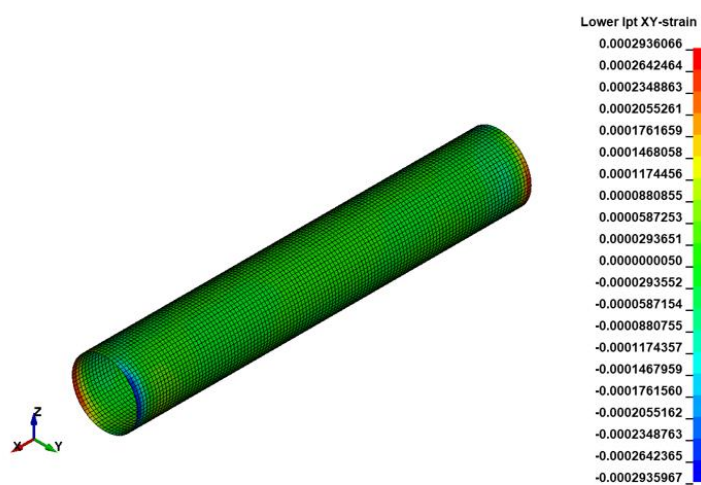


Рис. 3.13. Распределение поля деформаций в плоскости  $xy$  в ЛСК.

Рис. 3.14. Распределение поля деформаций по  $x$  в ГСК.Рис. 3.15. Распределение поля деформаций по  $y$  в ГСК.Рис. 3.16. Распределение поля деформаций в плоскости  $xu$  в ГСК.

В табл. 3.1 и 3.2 представлены результаты аналитического и численного решений в ГСК и ЛСК. Погрешность полученных результатов составляет менее 1%, что говорит о достаточной точности выбранного метода решения.

Таблица 3.1

Сравнение аналитических и численных результатов в ГСК

Параметр	Размерность	Величина		$\Delta$ , %
		Аналит.	Числ.	
$\sigma_x$	МПа	4.400000	4.408197	0.19
$\sigma_y$	МПа	8.775000	8.787094	0.14
$\tau_{xy}$	МПа	6.268472	6.281697	0.21
$\varepsilon_x$	мм/мм	-0.001193	-0.001200	0.61
$\varepsilon_y$	мм/мм	0.001394	0.001398	0.31
$\gamma_{xy}$	мм/мм	0.000000	-1.23784E-07	0.00

Таблица 3.2

Сравнение аналитических и численных результатов в ЛСК

Параметр	Размерность	Величина		$\Delta$ , %
		Аналит.	Числ.	
$\sigma_1$	МПа	12.855972	12.862803	0.05
$\sigma_2$	МПа	0.319028	0.318949	0.02
$\tau_{12}$	МПа	2.187500	2.200139	0.58
$\varepsilon_1$	мм/мм	0.000100	0.000101	0.12
$\varepsilon_2$	мм/мм	0.000100	0.000101	0.45
$\gamma_{12}$	мм/мм	0.002587	0.002599	0.44

Данная схема армирования также обеспечивает большой запас прочности по матрице, равный 36, согласно критерию максимальных деформаций, а также имеет коэффициент запаса прочности, равный 3, по критерию Цзя-Хилла.

## Заключение

Проведен обзор существующих композитных труб с полимерной матрицей, используемых на практике в настоящее время. Из открытых источников получены экспериментальные данные растяжения образцов материалов матрицы и наполнителя.

По экспериментальным данным одноосного растяжения для материалов армирующей и матричной фаз были аппроксимированы зависимости для напряжений и деформаций. По правилу смесей для линейного участка кривых были найдены значения продольного модуля упругости, поперечного модуля упругости, модуля сдвига и коэффициента Пуассона монослоя.

Для построения кривых напряжений и деформаций нелинейного участка монослоя была использована гипотеза о равенстве деформаций и напряжений. Для каждого шага по деформациям были найдены секущие модули в поперечном и продольном направлениях, секущий модуль сдвига и соответствующие напряжения. Таким образом, построена ММ монослоя с учетом нелинейного поведения армирующей фазы.

Методом молекулярной динамики исследовано взаимодействия метана с ПЭ покрытием, используемым для защиты стальных трубопроводов. Воздействие внутреннего давления транспортируемой среды реализовано путём приложения сжимающих деформаций к ячейке моделирования. Проанализировано влияние температурных режимов на среднюю глубину проникновения молекул метана и максимальное расстояние, на которое они проникают в ПЭ. Исследование показало, что повышение температуры влияет на пропускную способность полиэтилена (ПЭ). Установлено, что при воздействии внешнего сжимающего фактора макромолекулы ПЭ способны заполнять свободное пространство между собой, перераспределяясь и изменяя свою конфигурацию, что затрудняет дальнейшее проникновение молекул метана.

Разработана ММ композитного ламината, которая прошла верификацию в программе конечно-элементного анализа LS-DYNA. С применением данной ММ

был произведен расчет стенки композитного нефтепровода под действием внутреннего давления. Выбранная схема армирования отвечает требованиям по запасу прочности согласно ГОСТ Р 59910-2021.



### Список использованных источников

1. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
2. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.
3. Скворцов Ю.В. Механика композиционных материалов: конспект лекций. – Самара: СГАУ, 2013. – 94 с
4. Бикмасов Р.Г. Проблемы применения полимерно-армированных труб на объектах промысловых нефтегазопроводов // Вопросы развития современной науки и техники. 2021. №1.
5. Бикмасов Р.Г., Резанов К.С. Нефтепроводы из композитных труб как решение проблемы коррозионного разрушения // Наука и образование сегодня. – 2021. – № 2 (61). – с. 34–36.
6. Голубева А.А., Слаутина А.В., Малеткина Т.Ю. Использование композитных материалов для труб нефтегазовой отрасли // Инноватика-2021: сборник материалов XVII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 22–23 апреля 2021 г., г. Томск, Россия. – Томск, 2021. – с. 64–67.
7. ГОСТ Р 59910–2021 Трубы полимерные, армированные металлическим каркасом, и соединительные детали к ним. – Введ. 03.01.2022. – 40 с.
8. ГОСТ Р 59834–2021 Трубы гибкие полимерные армированные и соединительные детали к ним. – Введ. 01.03.2022. – 38 с.
9. ГОСТ Р 56277–2014 Трубы и фитинги композитные полимерные для внутрипромысловых трубопроводов. – Введ. 01.01.2016. – 42 с.
10. Исмаилов Г.Г., Курбанов М.М., Садыгов Р.Э. Коррозионностойкие композитные базальтопластиковые обсадные трубы для нефтяных скважин // Нефтепромысловое дело. – 2017. – № 8. – с. 48–50.
11. Острейковский В.А., Силин Я.В. Статистический анализ надежности нефтепромысловых трубопроводов // Нефтегазовое дело. 2008. №1.

- 12.Слаутина А.В., Малеткина Т.Ю. Композиционные материалы для труб и их применение в нефтегазовой отрасли // Инноватика-2022: сборник материалов XVIII Международной школы-конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, 21–22 апреля 2022 г., г. Томск, Россия. – Томск, 2021. – с. 67–70.
- 13.Старикова П.В., Пастернак А.Ю. Анализ возможности применения композитных материалов для транспорта нефти по промысловым трубопроводам // Материалы конф. с международным участием «Транспорт и хранение углеводородов», 21 апреля 2023, г. Омск, Россия. – Омск, 2023. – с. 122–124.
- 14.API Specification 5L: Specification for Line Pipe. 45<sup>th</sup> Edition, December 2012.
- 15.Alabtah F.G., Mahdi E., Eliyan F.F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review. // Composite Structures. – Vol. 276. – 2021.
- 16.Chen W, Xiong H, Bai Y. Failure behavior analysis of steel strip–reinforced flexible pipe under combined tension and internal pressure // Journal of Thermoplastic Composite Materials. – 2020. – 33(6) – p. 727–753.
- 17.Fatoba, O., Akid, R. Low cycle fatigue behaviour of APL 5L X65 pipeline steel at room temperature. // Procedia Engineering. – 2014. – 74. – p. 279-286.
- 18.Frentrup H., Hart K.E., Colina C.M., Müller EA. In Silico Determination of Gas Permeabilities by Non-Equilibrium Molecular Dynamics: CO<sub>2</sub> and He through PIM-1. // Membranes. – 2015. – 5(1). – p. 99-119.
- 19.Liu H, Yu Y, Liu Y, Zhang M, Li L, Ma L, Sun Y, Wang W. A Review on Basalt Fiber Composites and Their Applications in Clean Energy Sector and Power Grids. // Polymers. – 2022. – 14(12).
- 20.Van Belle A., Demets R., Mys N., Van Kets K., Dewulf J., Van Geem K., De Meester S., Ragaert K. Microstructural Contributions of Different Polyolefins to the Deformation Mechanisms of Their Binary Blends. // Polymers (Basel). – 2020. – 12(5).

21. Xiang J., Li X., Gao W., Liu Y., Li J., Yang J., Gong Y. Molecular Dynamics Simulation of Methane Adsorption and Diffusion: A Case Study of Low-Rank Coal in Fukang Area, Southern Junggar Basin. // Minerals. – 2023. – 13(2).
22. Younes R, Hallal A, Fardoun F, Hajj F. Comparative Review Study on Elastic Properties Modeling for Unidirectional Composite Materials. // Composites and Their Properties. InTech. – 2012.