

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  
«\_\_»\_\_\_\_\_ 2024 г.

## **ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА**

**Исследование применимости композитных труб для магистральных  
подводных трубопроводов**

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»  
направленность

01.03.03\_01 Механика и математическое моделирование сред с  
микроструктурой

Выполнил  
студент гр.5030103/00101

А.А. Капитонова

Руководитель  
доцент ВШТМиМФ, к.т.н., доцент

Е.Ю. Журавлева

Консультант  
руководитель группы расчётов  
нефтегазового оборудования АО «ЦИФРА»

Д.Г. Васильева

Санкт-Петербург

2024 г.

**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 Капитонова Анна Александровна, гр. 5030103/00101

1. Тема работы: Исследование применимости композитных труб для Магистральных подводных трубопроводов
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 10.06.2024
3. Исходные данные по работе: актуальные научные публикации, нормы и своды правил для морских трубопроводов
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов):
  - изучение свойств композитных материалов
  - создание материала в пакете Ansys
  - исследование прочностных свойств труб из созданного материала при разных углах намотки и процесса их разрушения
  - проведение расчетов с целью проверки труб на соответствие нормам и стандартам
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): -
6. Консультанты по работе: Васильева Г. Д., руководитель группы расчётов нефтегазового оборудования АО «ЦИФРА»
7. Дата выдачи задания 28.02.2024

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_ Журавлева Е. Ю. доцент ВШТМиМФ, к.т.н., доцент

Задание принял к исполнению 28.02.2024

Студент \_\_\_\_\_ Капитонова А. А.

## **РЕФЕРАТ**

На 41 стр., 35 рисунка, 5 таблиц

**КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПОДВОДНЫЕ ТРУБОПРОВОДЫ,  
ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ТРУБЫ, МЕТОД  
КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ANSYS, ANSYS ACP (PRE-POST)**

В данной работе проведено исследование прочностных свойств для многослойных труб из композитных материалов, а также выявлено влияние на них ориентации волокон внутри слоев. Расчеты проводятся в конечно-элементном пакете ANSYS в модулях Material Designer, Static Structural, Eigenvalue Buckling. Выбрана оптимальная модель трубы из рассматриваемых, рассчитаны нагрузки для трубы. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния, проведено сравнение рассчитанных коэффициентов запаса со стандартами, на основе полученных данных вычислена максимальная допустимая длина трубы.

## **ABSTRACT**

41 pages, 35 figures, 5 tables

**COMPOSITE MATERIALS, SUBSEA PIPELINES, FIBER COMPOSITES, PIPES,  
FINITE ELEMENT METHOD, ANSYS, ANSYS ACP (PRE-POST)**

In this work, the strength properties for multilayer composite pipes are investigated and the effect of fiber orientation within the layers is revealed. Calculations are carried out in ANSYS finite element package in modules Material Designer, Static Structural, Eigenvalue Buckling. The optimum model of the pipe from the considered ones is chosen, loads for the pipe are calculated. The stress-strain state is calculated, the calculated reserve coefficients are compared with standards, the maximum allowable length of the pipe is calculated on the basis of the obtained data.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>5</b>
<b>ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ .....</b>	<b>7</b>
<b>ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ .....</b>	<b>8</b>
2.1. Определение композита .....	8
2.2. Классификация композитов .....	8
2.3. Расчет упругих свойств волокнистых композитных материалов .....	9
2.4. Гомогенизация свойств композитного материала .....	11
2.5. Метод конечных элементов .....	12
<b>ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ .....</b>	<b>15</b>
3.1. Создание модели материала .....	15
3.1.1. Используемые материалы .....	15
3.1.2. Настройка геометрии модели материала на микроуровне .....	15
3.2. Создание геометрической модели трубы .....	17
3.3. Задание многослойной структуры материала .....	17
3.4. Создание сетки .....	18
3.5. Нагрузки и граничные условия .....	20
3.6. Результаты .....	21
3.7. Анализ результатов .....	29
<b>ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТРУБЫ В ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ .....</b>	<b>30</b>
4.1. Нагрузки .....	30
4.2. Результаты расчетов .....	33
4.3 Поиск оптимального расстояния между опорами .....	34
4.4 Анализ результатов .....	36
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>38</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>40</b>

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в различных областях промышленности набирает популярность использование композитов. Причиной этому служит то, что композитные материалы, несмотря на сложность и наукоемкость изготовления, имеют ряд таких преимуществ, как прочность, легкость, высокая устойчивость к агрессивным химическим воздействиям, а также долговечность таких материалов.

Композитные материалы имеют очень широкую область применения, которая стабильно растет. Это связано с тем, что композиты могут быть созданы из крайне разнообразных составных материалов как для армирующей составляющей, так и для матрицы. При этом есть возможность создать материал для конкретной задачи, находя лучшие комбинации, обладающие оптимальным для нее набором свойств.

Основными сферами, где применяются композитные материалы являются аэрокосмическая промышленность, автомобиле- и судостроение, строительство, энергетика, а также производство труб и резервуаров.

Одной из активно развивающихся в последнее десятилетие областей является применение композитов в подводных магистралах. Примерами могут послужить трубопроводы норвежской компании Aker Kvaerner Subsea и испытанная в Мексиканском заливе система композитных шлангокабелей без металлических слоев фирмы DeepFlex и многие другие. Количество подобных проектов стабильно растет, и у данной тенденции есть целый ряд причин.

Первой причиной является возрастающий в последнее время интерес нефтедобывающей индустрии к недрам континентального шельфа арктических, дальневосточных и южных морей, чье богатство природно-сырьевыми ресурсами подтверждают поисково-разведочные работы на нефть и газ в прибрежных регионах.

Второй причиной является выгодность применения композитных материалов в такой неблагоприятной среде, как морская вода. Именно здесь

композиты проявляют свой потенциал полностью: в условиях соленой воды важную роль играет низкая подверженность материалов коррозии, хорошие показатели усталостной прочности, легкость таких изделий при сохранении прочностных качеств, что делает проще и дешевле установку изделий из подобных материалов.

Целью данной работы является исследование прочностных свойств труб из композитных материалов, а также их применимости для магистральных подводных трубопроводов в соответствии с нормативной документацией. В рамках работы будет проведено исследование влияния угла, под которым располагается композит на критическое значение внутреннего давления, которое выдерживает труба, а также выполнен расчет трубы на прочность с основными нагрузками, которым подвержены подводные магистральные трубопроводы в жизни.

## ГЛАВА 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) трубы из композитного материала с целью получения информации о его применимости в подводных трубопроводах.

НДС получено с использованием метода конечных элементов, реализованным в расчетном пакете ANSYS.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- создание модели композитного материала, получение его упругих свойств;
- исследование влияния угла намотки композита на критическое значение внутреннего давления, которое выдерживает труба;
- выбор оптимальной модели, ориентируясь на прочностные характеристики рассматриваемых труб;
- исследование нагрузок, которым подвергаются подводные трубопроводы;
- расчет НДС выбранной модели с соответствующими нагрузками;
- анализ результатов и составление заключения о применимости данной трубы в качестве части подводного магистрального трубопровода.

## ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

### 2.1. Определение композита

Слово композит (композитный материал) имеет латинские корни и происходит от латинского «compositio» – соединение, составление.

В наиболее общем смысле композитным можно назвать любой материал, состоящий из нескольких частей. Одним из самых популярных является определение, называющее композитным материал, включающий в себя два или более простых составляющих (армирующих элементов и скрепляющих их матрицы), обладающий свойствами которых нет у его компонент. При этом составляющие композита не должны сливаться во едино тем или иным образом.

Однако данное определение позволяет причислить к композитным материалам множество материалов природного происхождения: кости, металлы с включениями, древесину, некоторые кристаллы и многое другое.

Поэтому обычно под термином композитный материал понимают материал, обладающий следующими свойствами:

- это искусственный материал;
- его форма, состав и распределение компонентов задано заранее;
- включает в себя несколько различных по химическому составу компонентов, имеющих между собой четкую границу;
- каждый из компонентов присутствует в количестве, большем чем некое критическое значение, чтобы внести значительный вклад в свойства нового материала;
- имеет свойства, которых нет у его компонент по отдельности;
- рассматривается как неоднородная структура в микромасштабе, но однороден в макромасштабе.

### 2.2. Классификация композитов

Существует множество разнообразных классификаций композитных материалов, но из них можно выделить несколько наиболее популярных.



Первой является классификация по типу армирующих компонентов. В зависимости от них, композитные материалы можно разделить на три типа:

- армированные частицами;
- армированные волокнами;
- слоистые.

Другой классификацией является разделение на основании расположения компонентов:

- изотропные или квазиизотропные композитные материалы;
- анизотропные композитные материалы.

К первому типу относятся порошковые, дисперсно-упрочненные, хаотично армированные дисперсными частицами, дискретными или непрерывными волокнами материалы, а ко второму слоистые или волокнистые материалы с определенной ориентацией армирующих компонентов относительно матрицы.

Также есть классификации, основывающиеся на природе компонентов (металлические, керамические, полимерные, неорганические и др.) или на структуре композита (каркасные, слоистые, матричные, комбинированные).

### **2.3. Расчет упругих свойств волокнистых композитных материалов**

По своей природе большинство композитных материалов является анизотропными, то есть они проявляют различные свойства в зависимости от направления. Это задает более сложную связь между тензорами напряжений и деформаций, так как в этом случае изменение любой из компонент тензора напряжений может вызвать изменение сразу всех компонент тензора деформаций. Эта связь выражается через закон Гука:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (2.1)$$

В силу теоремы о взаимности работ для компонент матрицы податливости материала мы можем сократить количество независимых компонент в матрице податливости с размерностью 6 до 21, за счет того, что матрица симметрична.

Таким образом мы можем переписать закон Гука для анизотропного материала в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & & & & & \\ C_{21} & C_{22} & & & & \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & & & \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & & \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Но анизотропия самого общего вида очень редка, так как обычно число независимых компонент сокращается за счет использования симметрии в нескольких из направлений.

Для однонаправленных композитов, структура которых показана на рисунке 1, используемых в этой работе, модель материала является ортотропной: имеющей три плоскости симметрии, одна из которых перпендикулярна направлению волокна, а две другие могут быть выбранным произвольным образом, с единственным ограничением на то, что они должны быть ортогональны по отношению к направлению волокна.

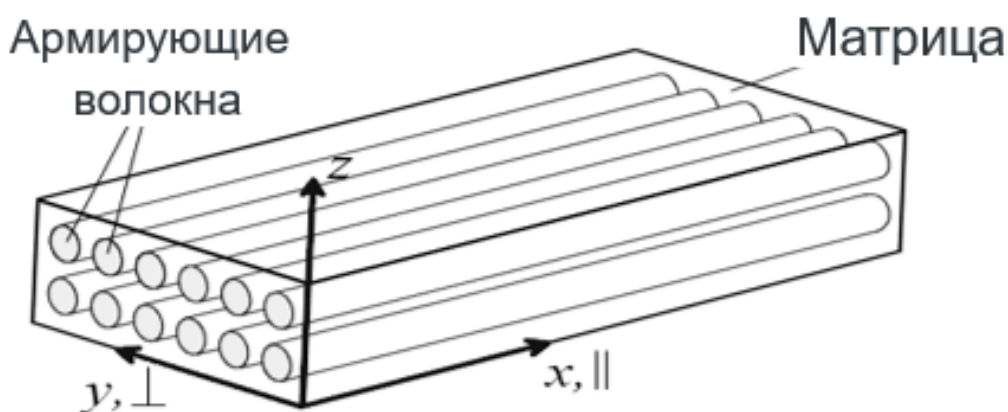


Рисунок 1. Модель однонаправленного композитного материала

Матрица податливости для такого материала имеет упрощенный вид:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{21} & C_{31} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{32} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Для определения констант  $C_{ij}$  используются 9 констант материала:

- $E_x, E_y, E_z$  – модули Юнга в направлениях X, Y, Z;
- $\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$  – коэффициент Пуассона в XY, YZ и XZ плоскостях;
- $G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}$  – касательный модуль в XY, YZ и XZ плоскостях.

С использованием данных констант материала и уравнения (2.3) можем получить следующую связь деформаций с напряжениями в локальной системе координат:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_x} & -\frac{\nu_{yx}}{E_y} & -\frac{\nu_{zx}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xy}}{E_x} & \frac{1}{E_y} & -\frac{\nu_{zy}}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{xz}}{E_x} & -\frac{\nu_{yz}}{E_y} & \frac{1}{E_z} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xy}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{yz}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{xz}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

## 2.4. Гомогенизация свойств композитного материала

Прогнозирование упругих свойств композитов обычно производится по правилу смесей. Данное правило говорит, что вклад каждого компонента в упругие модули пропорционально его объемной доле в композите и величине модуля упругости данного компонента.

Объемная доля армирующего компонента вычисляется по формуле (2.5), где  $V_k, V$  – объемы компонента и всего композита соответственно:

$$\varphi = \frac{V_k}{V}, \quad (2.5)$$

Далее с использованием данного параметра пересчитываются оставшиеся модули упругости по формулам (2.6)-(2.9):

$$E_1 = E_c \cdot \varphi + E_m \cdot (1 - \varphi), \quad (2.6)$$

$$E_2 = \frac{E_c \cdot E_m}{E_c \cdot (1 - \varphi) + E_m \cdot \varphi}, \quad (2.7)$$

$$G_{12} = \frac{G_c \cdot G_m}{G_c \cdot (1 - \varphi) + G_m \cdot \varphi}, \quad (2.8)$$

$$\nu_{12} = \nu_c \cdot \varphi + \nu_m \cdot (1 - \varphi), \quad (2.9)$$

Из условий ортотропности рассчитывается оставшийся коэффициент Пуассона (2.10):

$$\nu_{21} = \frac{\nu_{12} \cdot E_1}{E_2}. \quad (2.10)$$

## 2.5. Метод конечных элементов

При работе в расчетном пакете Ansys, с помощью которого решаются задачи данной работы, для получения численного решения используется метод конечных элементов.

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод, используемый для решения уравнений математической физики, таких как уравнения теплопроводности, механики деформируемого тела или электромагнетизма. Его основная суть заключается в том, что реальное тело, представляющее из себя систему с бесконечным количеством степеней свободы, аппроксимируется, как дискретная модель. При этом сложные области разбиваются на более простые подобласти, называемые конечными элементами, для каждого из которых в дальнейшем и решаются уравнения. Некоторые примеры конечных элементов показаны на рисунке 2.

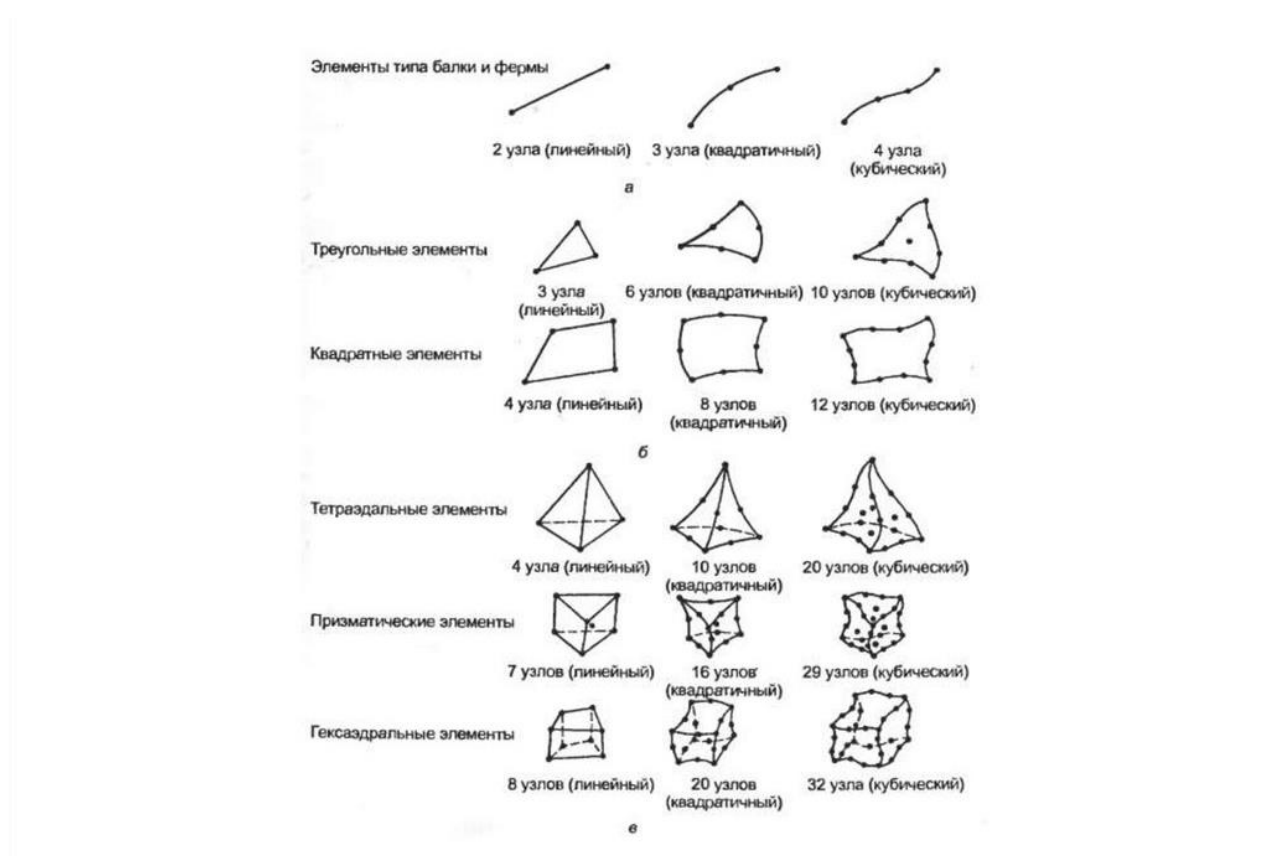


Рисунок 2. Примеры конечных элементов.

После разбиения области на конечные элементы, на каждом из них строится локальное приближение (2.11) с использованием непрерывных достаточно гладких функций, определяющих поведение решения внутри элемента. Такие функции называются функциями форм.

$$[U] = [N]\{q\}, \quad (2.11)$$

где  $[U]$  – матрица перемещений,

$\{q\}$  – столбец узловых перемещений,

$[N]$  – матрица функций форм.

Взаимодействие между узлами внутри элемента описывается при помощи локальной матрицы жесткости, являющейся квадратной с размерностью равной количеству узлов в элементе (2.12).

$$[k_e][U] = [f_e], \quad (2.12)$$

где  $[k_e]$  – локальная матрица жесткости,

$[f_e]$  – локальная матрица усилий.

Глобальная матрица жесткости составляется путем суммирования локальных матриц жесткости для каждого из элементов системы с учетом их взаимодействия между собой (2.13).

$$[K] = \sum_e [k_e] \quad (2.13)$$

Каждый элемент вносит свой вклад в глобальную матрицу жесткости в соответствующих позициях, связанных с его узлами.

С использованием глобальной матрицы жесткости получается система уравнений (2.14), решение которой дает численное решение.

$$[K] [U] = [F] \quad (2.14)$$

## ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБ

### 3.1. Создание модели материала

#### 3.1.1. Используемые материалы

Для труб, рассматриваемых в данной работе, использовался композитный материал с матрицей из эпоксидной смолы ARALDITE LY-1564 и стекловолокном типа E в качестве армирующей составляющей. В таблице 1 показаны характеристики материалов.

Таблица 1

Свойства материала

	Эпоксидная смола	Стекловолокно
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1160	2600
Модуль Юнга E, ГПа	7,85	73
Коэффициент Пуассона $\nu$	0,09	0,22
Модуль объемного расширения K, ГПа	32	43,45
Модуль сдвига G, ГПа	36	29,95

#### 3.1.2. Настройка геометрии модели материала на микроуровне

Для рассматриваемого материала была выбрана модель однонаправленного композитного материала, которую можно увидеть на рисунке 3, с объемной долей волокон 0,5 и диаметром волокна 0,8 мм. Были также опробованы волокна меньших диаметров, но значительных различий в результатах не было, так что дальнейшие исследования производились только с данным значением параметра.

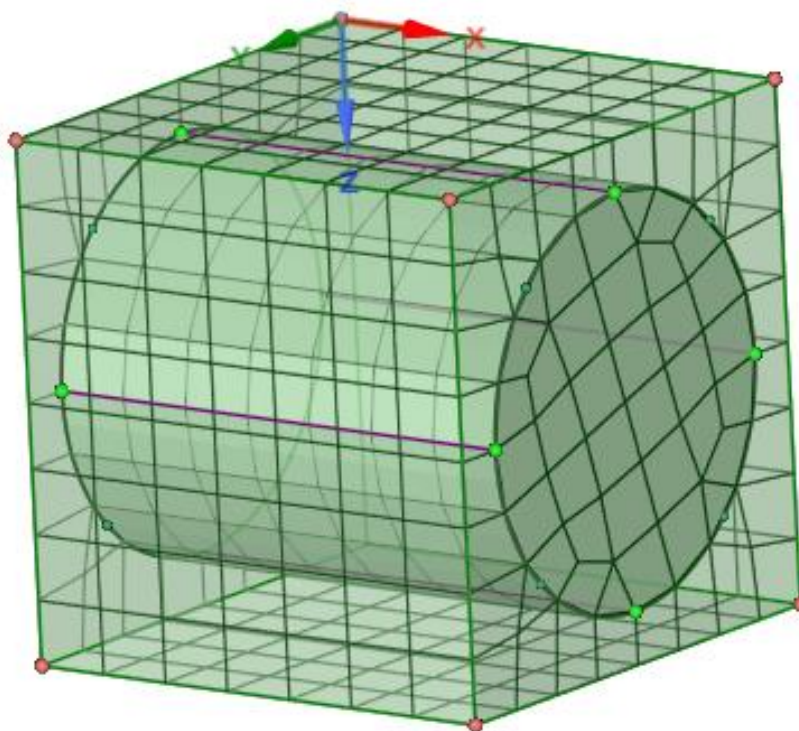


Рисунок 3. Модель материала на микроуровне

С помощью модуля Material Designer пакета Ansys была проведена гомогенизация свойств материала и были получены упругие свойства, показанные в таблице 2.

Таблица 2. Свойства материала

Плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	1880
$E_x$ , ГПа	40,47
$E_y$ , ГПа	18,069
$E_z$ , ГПа	18,069
$\nu_{xy}$	0,17288
$\nu_{yz}$	0,11647
$\nu_{xz}$	0,17288
$G_{xy}$ , ГПа	8,3465
$G_{yz}$ , ГПа	6,7222
$G_{xz}$ , ГПа	8,3465



### 3.2. Создание геометрической модели трубы

Размеры трубы выбираются в соответствии с референсами из статьи [14].

Внутренний диаметр трубы равен 110 мм, внешний – 117,8 мм. Длина трубы выбирается так, чтоб дать возможность исследовать напряженно деформированное состояние (НДС) трубы вдали от зоны влияния граничных условий и составляет 1 м. Твёрдотельная модель преобразуется для дальнейшей работы в оболочечную, с использованием модели срединной поверхности. Итоговая геометрия модели представлена на рисунке 4.

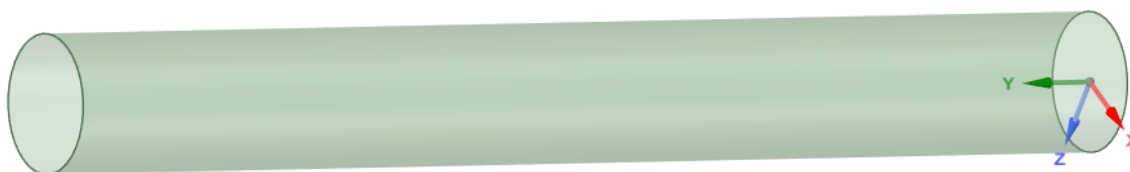


Рисунок 4. Геометрическая модель трубы

### 3.3. Задание многослойной структуры материала

В рамках данной работы рассматриваются четыре различных модели труб, каждая из которых состоит из 3 слоев композитного материала, созданного в пункте 3.1, каждый из которых толщиной 1,26 мм с ориентацией волокон  $[\theta; -\theta; \theta]$ , где  $\theta$  – угол отклонения от референсного положения, направленного по поверхности трубы параллельно торцевой поверхности, для  $\theta = 30^\circ; 45^\circ; 55^\circ; 63^\circ$ . Ориентация волокон в слое для различных углов  $\theta$  показана на рисунках 5-8. Слои пронумерованы от 1 до 3 по мере удаления от центра сечения.

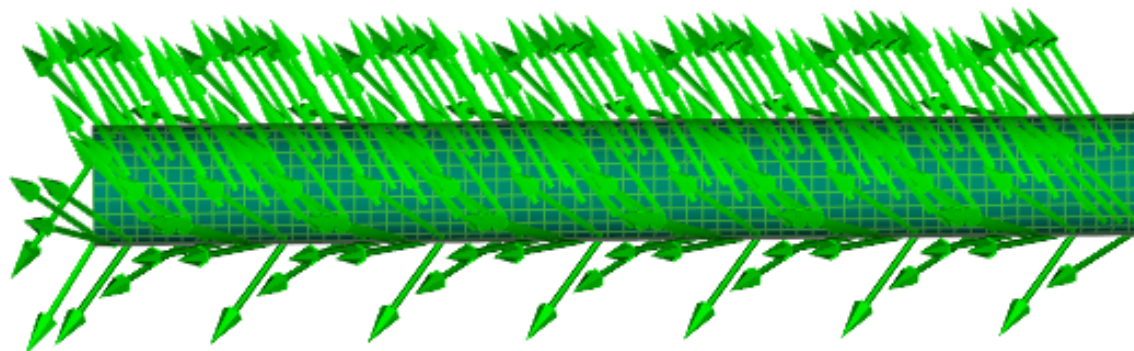


Рисунок 5. Ориентация волокон материала для угла  $30^\circ$

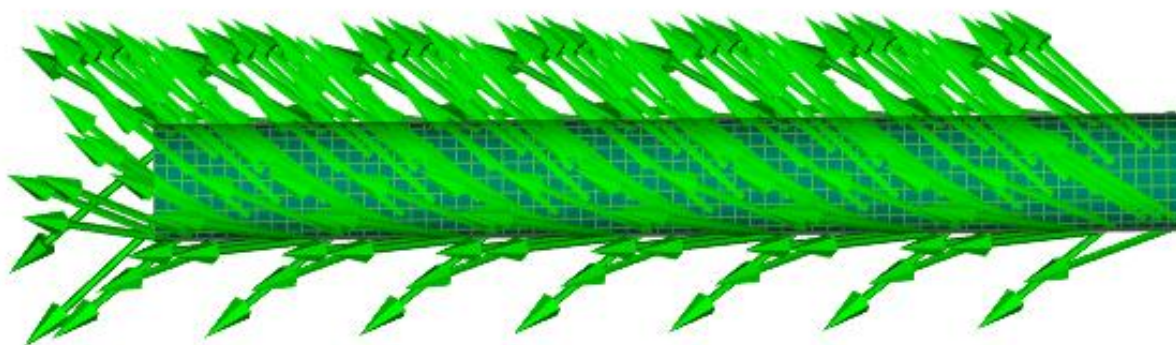


Рисунок 6. Ориентация волокон материала для угла 45°

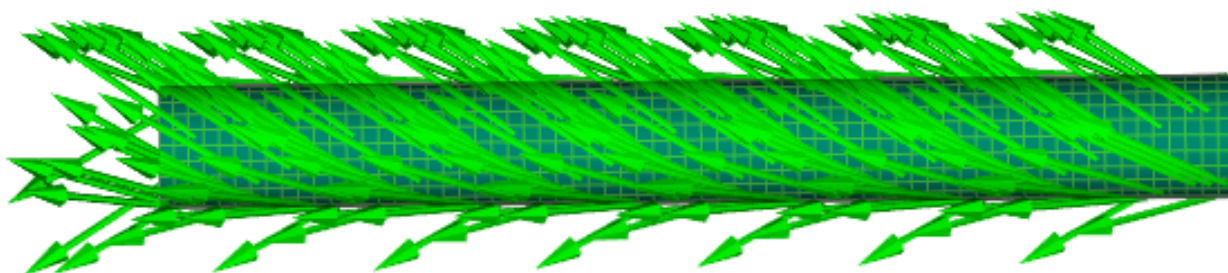


Рисунок 7. Ориентация волокон материала для угла 55°

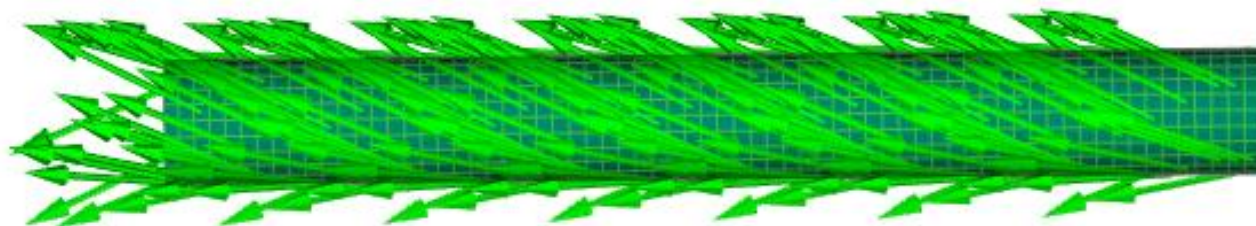


Рисунок 8. Ориентация волокон материала для угла 63°

### 3.4. Создание сетки

В силу простоты используемой модели сетка была создана автоматически с единственной настройкой, определяющей размер элемента.

Чтобы исключить влияние размера элемента на результат было проведено исследование сеточной сходимости. Средний размер элемента менялся от 15 до 6 мм с шагом 3 мм.

Считается, что сеточная сходимость произведена если соседние результаты отличаются друг от друга не более чем на 5%. После проведения расчетов и построения графика сеточной сходимости, показанного на рисунке 9 был выбран размер элемента равный 12 мм, так как начиная с данного размера элемента

график выходит на плато и в дальнейшем измельчении сетки нет необходимости, так как значение напряжений меняются менее чем на 5%.

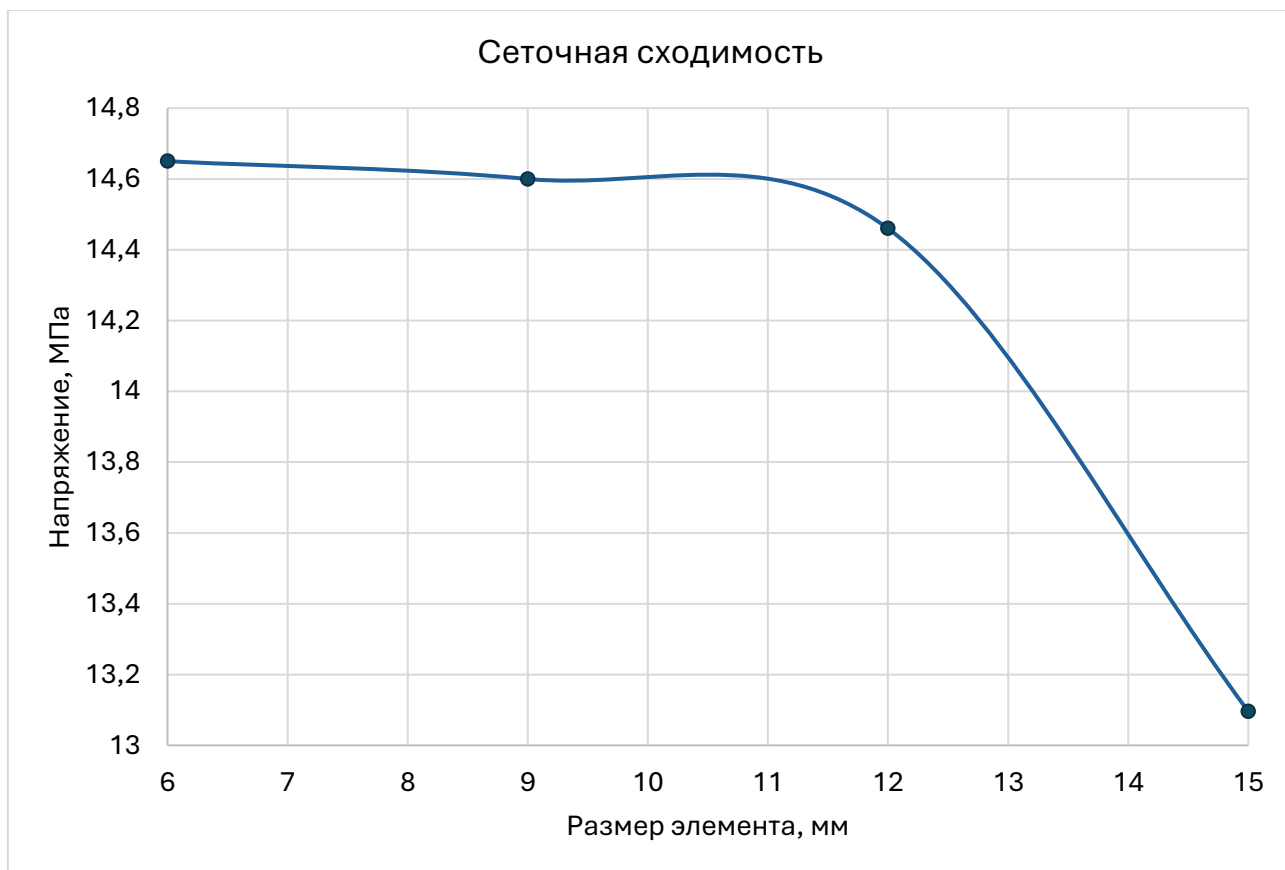


Рисунок 9. График сеточной сходимости по напряжениям

Параметры сетки представлены в таблице 3, а распределение качества элементов на рисунке 10.

Таблица 3

Тип элементов	Количество узлов	Количество элементов	Средний размер элемента, мм
Quad4	1898	1872	12

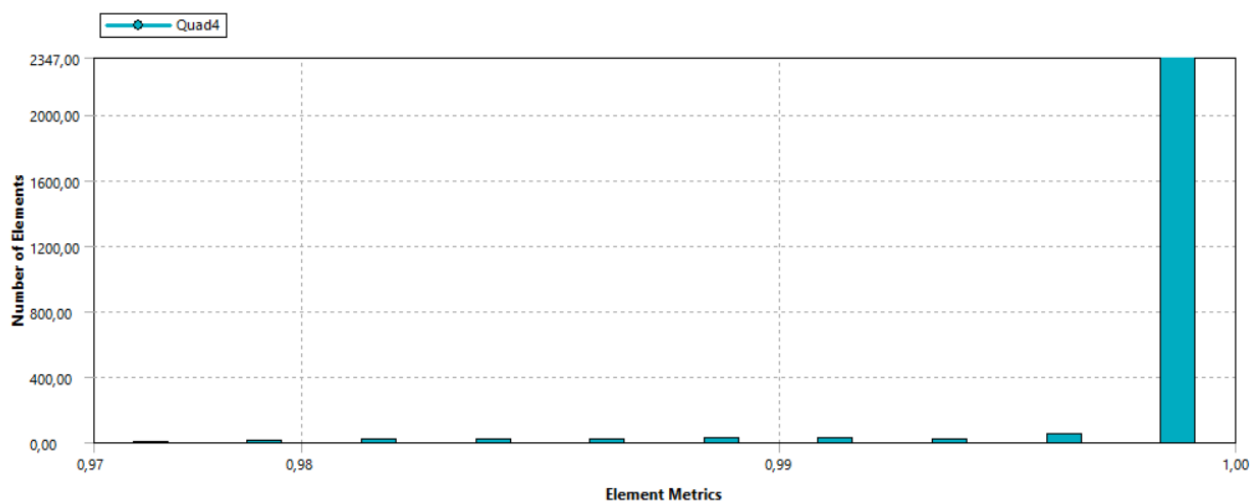


Рисунок 10. Качество элементов

Как видно на рисунке 10 почти все элементы имеют качество близкое к единице, что является очень хорошим показателем.

### 3.5. Нагрузки и граничные условия

В качестве граничных условий используются условия жесткого закрепления на обоих торцах трубы, как показано на рисунке 11.



Рисунок 11. Граничные условия

В качестве нагрузки задается внутреннее давление, направленное по нормали приложенное ко всей боковой поверхности трубы. Общая схема нагружения трубы изображена на рисунке 12.

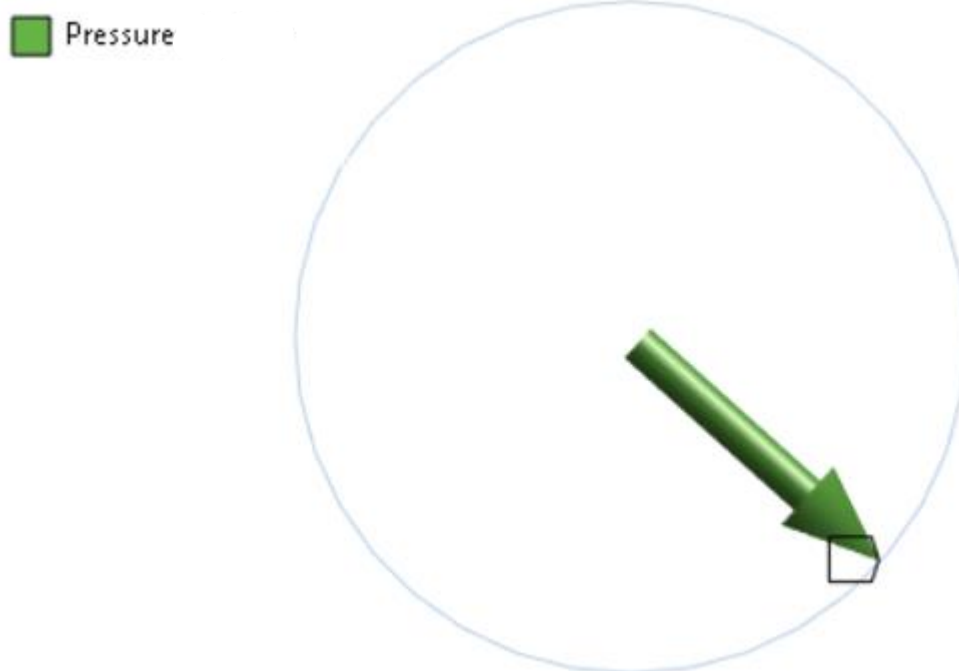


Рисунок 12. Приложенная нагрузка в поперечном сечении трубы

Диапазон значений нагрузок для разных труб различен, так как значение приложенного давления увеличивается, пока не случится полное разрушение трубы, то есть всех трех ее слоев.

### 3.6. Результаты

В данной части работы целью является нахождение критического значения прикладываемого давления, начиная с которого начинается разрушение одного из слоев трубы и значения, соответствующего полному разрушению.

Для определения нагрузки, приводящий к разрушению использовался критерий разрушения по максимальным напряжениям. Это один из методов оценки прочности материалов и конструкций. Он основан на предположении, что материал разрушается, когда в нем возникает напряжение, превышающее предел прочности материала.

Для того чтобы определить, произойдет ли разрушение материала при заданных условиях нагружения, необходимо вычислить максимальное напряжение, возникающее в конструкции под действием нагрузки. Если полученное значение превышает предел прочности материала, то материал разрушится.

Значения критических значений были взяты из статьи [12], где проводилось исследование разрушения сосудов из материала, укрепленного стекловолокном с матрицей из эпоксидной смолы с близкими по значению модулями упругости к используемому в созданной в ходе данной работы материалу. Значения напряжений были ограничены покомпонентно и имели следующие значения, указанные в таблице 4.

Таблица 4

Предельные значения напряжений

Предел напряжения на растяжение вдоль волокна $X_t$ , МПА	1250
Предел напряжения на растяжение поперек волокна $Y_t$ , МПА	-650
Предел напряжения на сжатие вдоль волокна $X_c$ , МПА	36
Предел напряжения на сжатие поперек волокна $Y_c$ , МПА	-165
Предельное напряжение на сдвиг $S_{12}$ , МПА	86

Для оценки напряжений использовались напряжения по Мезису вычисляемые по формуле 3.1

$$\sigma_{Von Mises} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + 6(\tau_{12}^2 + \tau_{23}^2 + \tau_{13}^2)}{2}}, \quad (3.1)$$

где  $\sigma_i$  – главные напряжения,  $\tau_{ij}$  – касательные напряжения.

В качестве результатов рассматриваются графики зависимости обратного значения коэффициента запаса в каждом из слоев в зависимости от величины внутреннего давления на участке, удаленном от граничных условий чтобы

избежать учета их влияния на результаты. Данные представлены на рисунках 13-16.

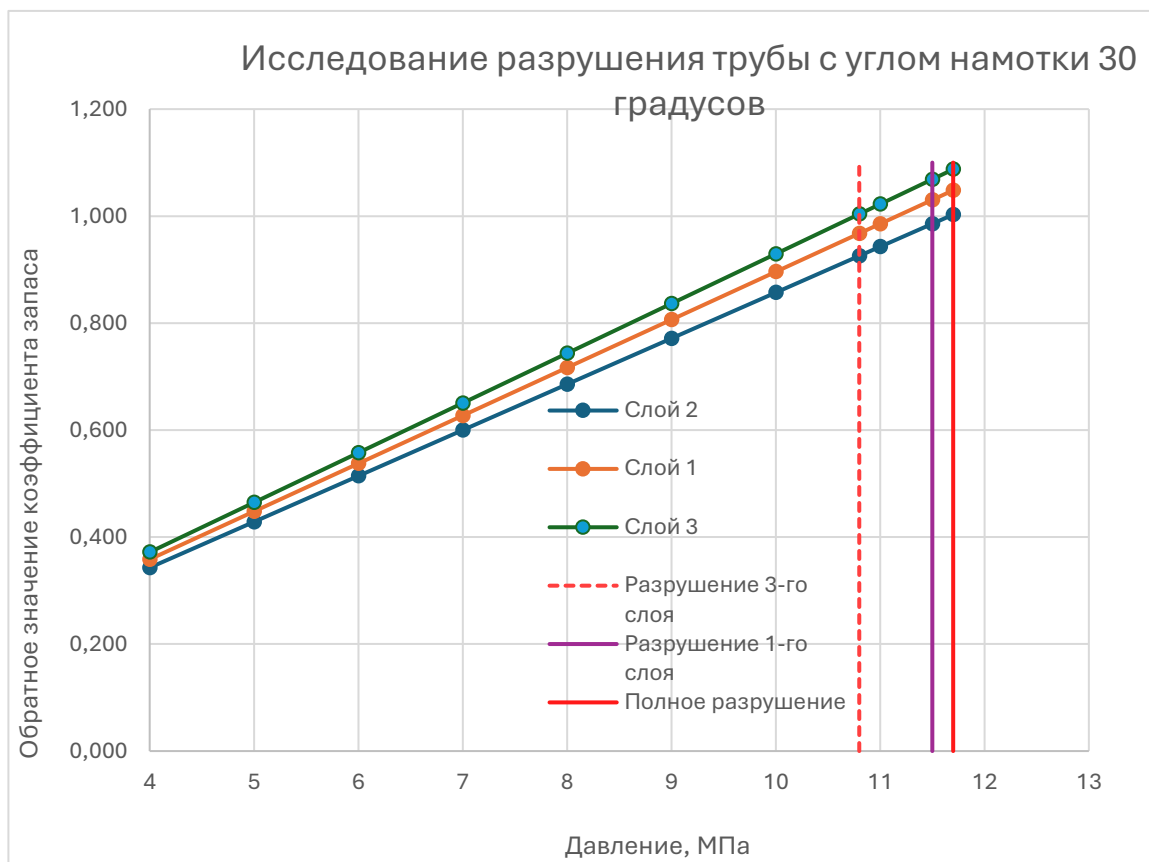


Рисунок 13. Зависимость обратного коэффициента запаса от давления в трубе с намоткой под углом 30°.

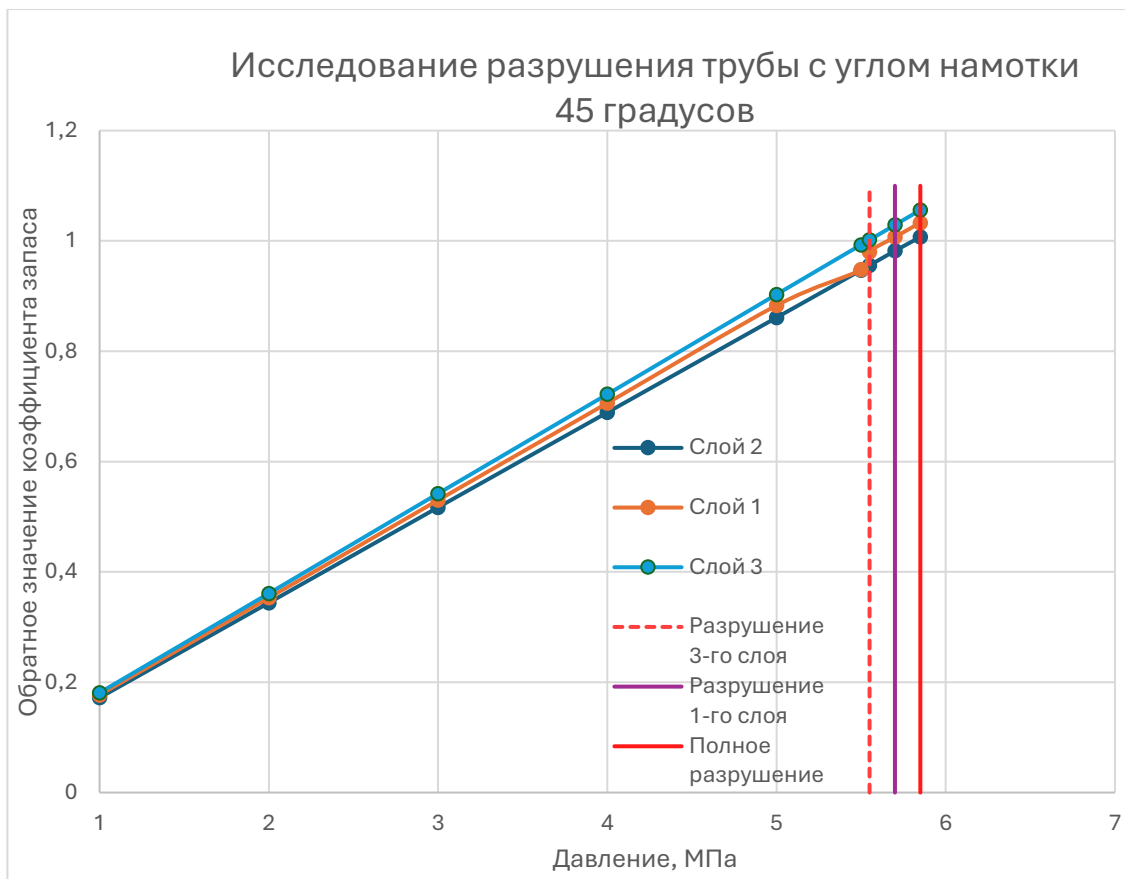


Рисунок 14. Зависимость обратного коэффициента запаса от давления в трубе с намоткой под углом  $45^\circ$ .

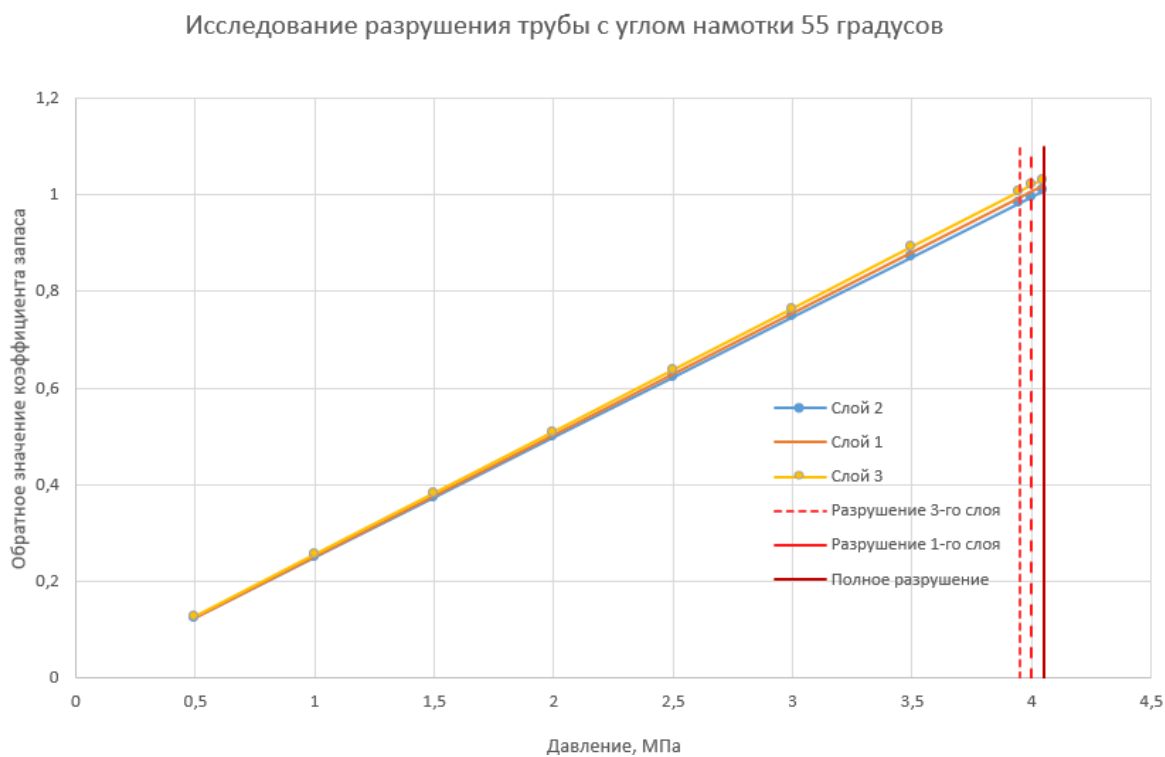


Рисунок 15. Зависимость обратного коэффициента запаса от давления в трубе с намоткой под углом  $55^\circ$ .



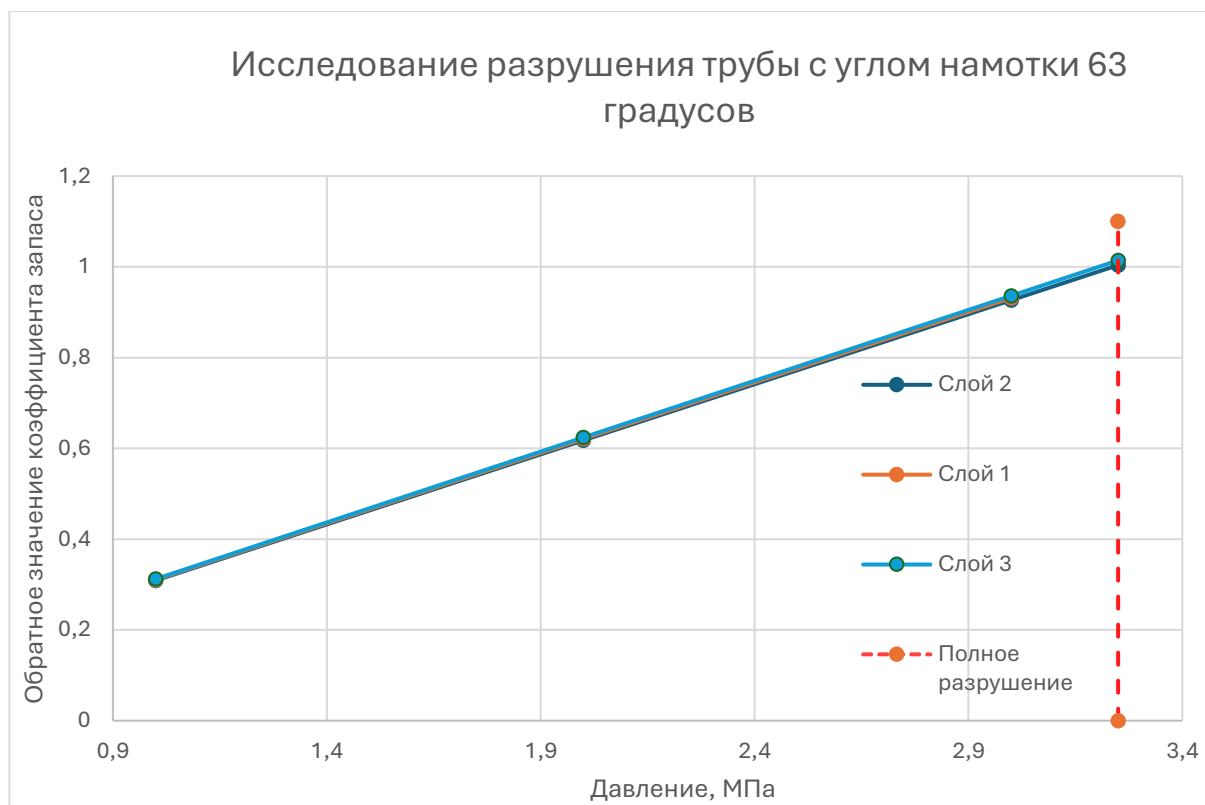


Рисунок 16. Зависимость обратного коэффициента запаса от давления в трубе с намоткой под углом 63°.

Так же были отдельно рассмотрены значения коэффициента запаса, полученные для критических значений нагрузки, полученные для каждого из слоев труб с использованием модуля АСР(Post) представленные на рисунках 17-24, и возникающие в момент разрушения последнего из слоев напряжения продемонстрированные на рисунках 25-28.

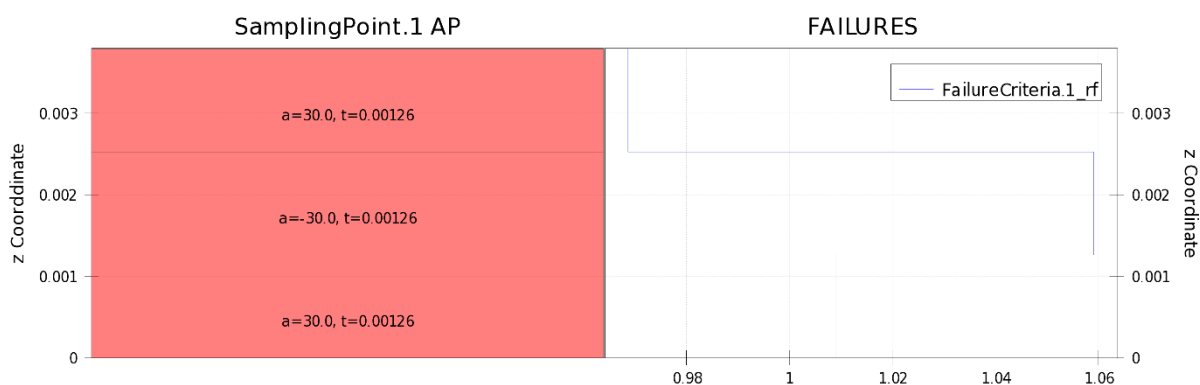


Рисунок 17. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом 30° в момент разрушения 1-го из слоев.

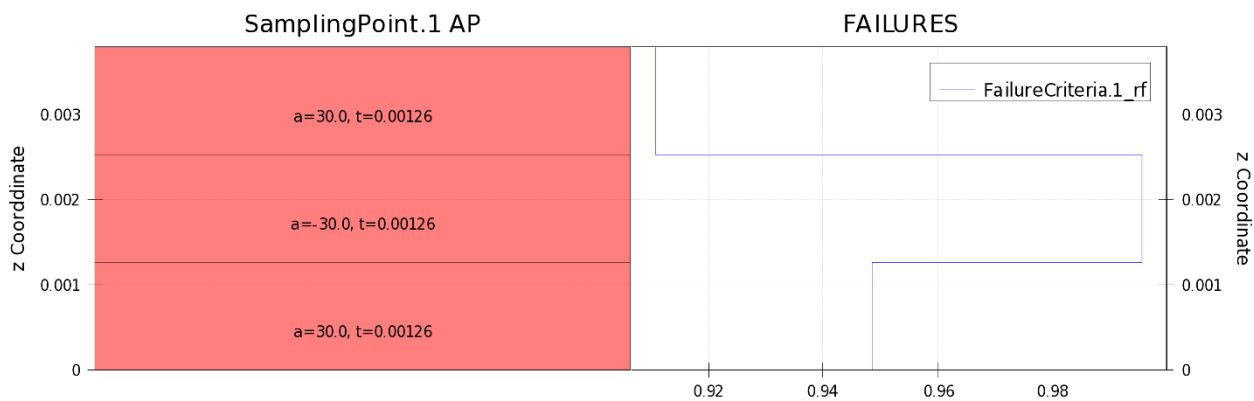


Рисунок 18. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $30^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев.

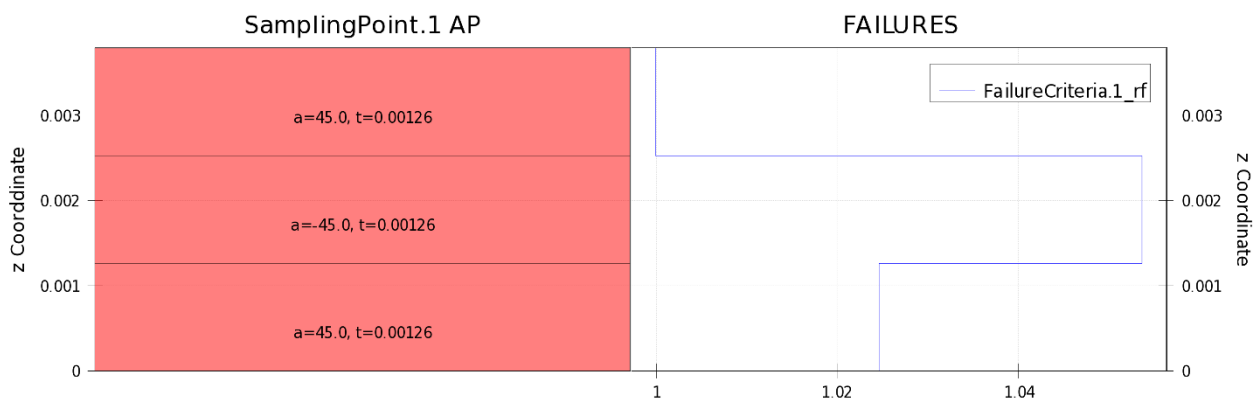


Рисунок 19. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $45^\circ$  в момент разрушения 1-го из слоев.

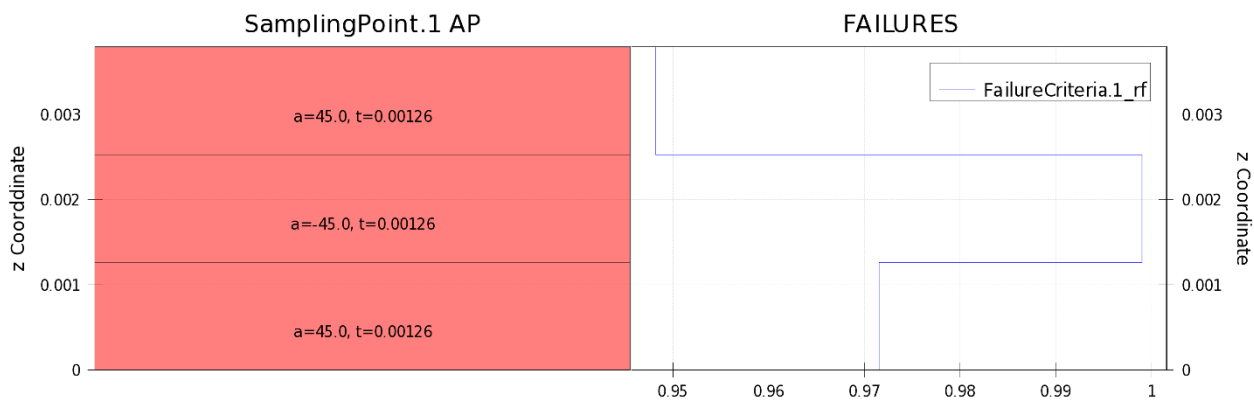


Рисунок 20. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $45^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев.

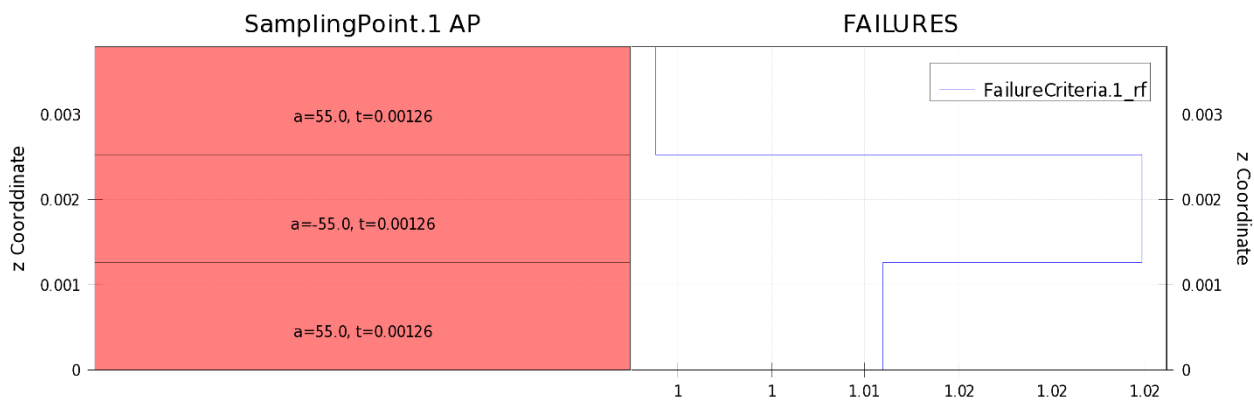


Рисунок 21. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $55^\circ$  в момент разрушения 1-го из слоев.

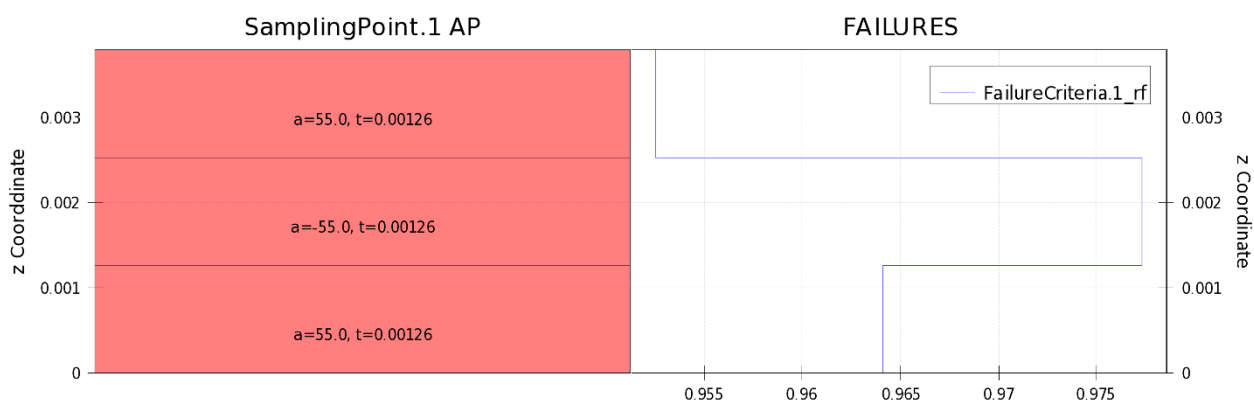


Рисунок 22. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $55^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев.

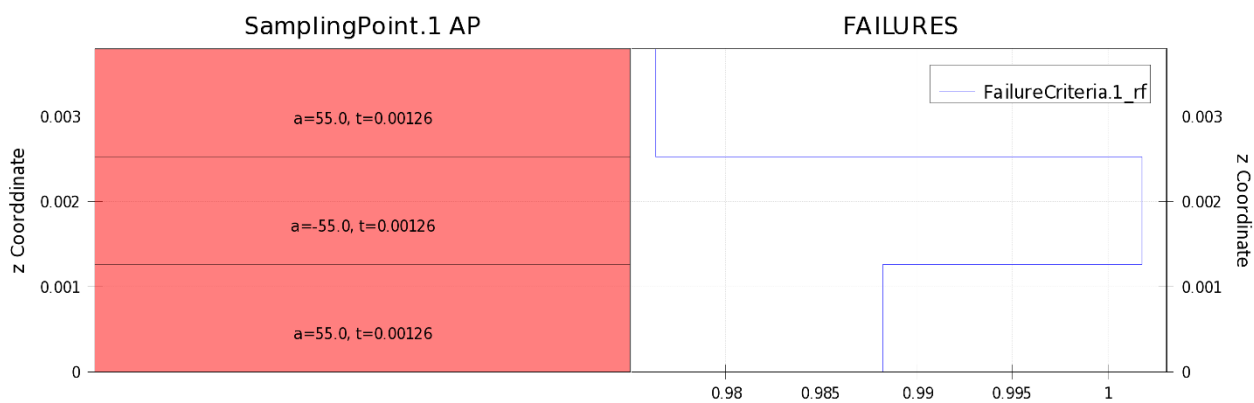


Рисунок 23. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $63^\circ$  в момент разрушения 1-го из слоев.

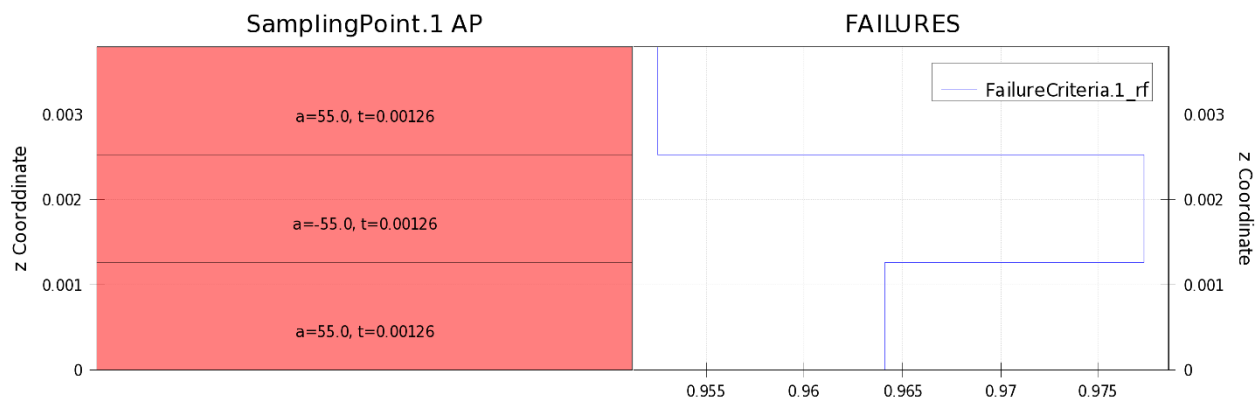


Рисунок 24. Коэффициент запаса в трубе с намоткой под углом  $63^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев.

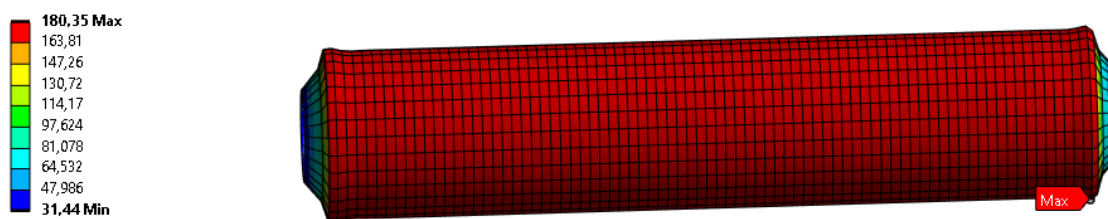


Рисунок 25. Напряжения в трубе с намоткой под углом  $30^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев, МПа.

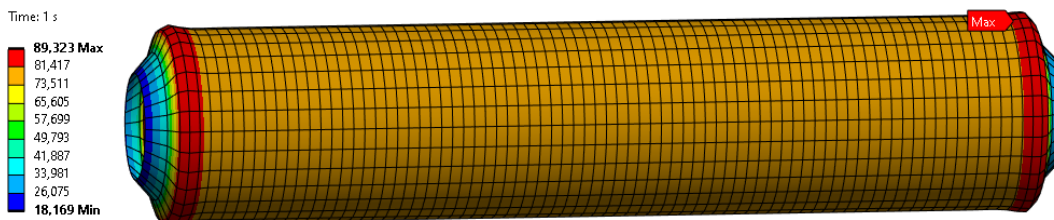


Рисунок 26. Напряжения в трубе с намоткой под углом  $45^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев, МПа.

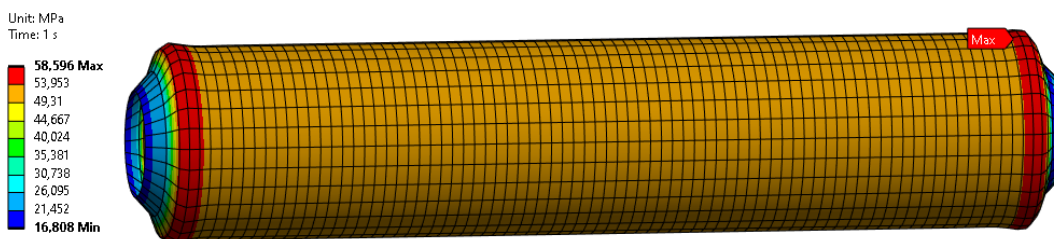


Рисунок 27. Напряжения в трубе с намоткой под углом  $55^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев, МПа.

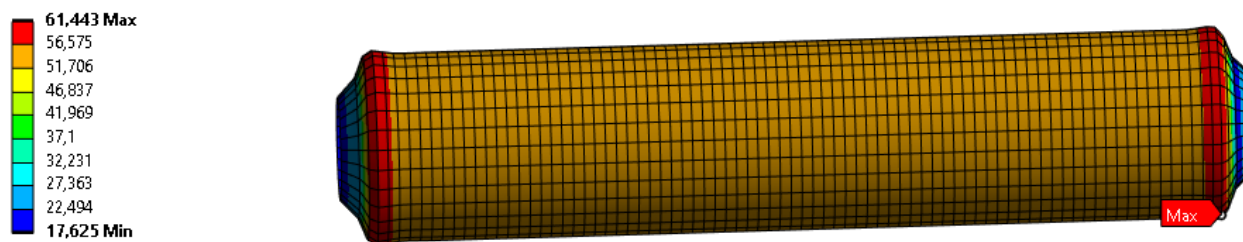


Рисунок 28. Напряжения в трубе с намоткой под углом  $63^\circ$  в момент разрушения каждого из слоев, МПа.

### 3.7. Анализ результатов

В ходе работы была выявлена закономерность, что слои разрушаются в следующем порядке: третий слой, первый слой, второй слой, если нумеровать слои по мере удаления от центра трубы.

По результатам сравнения графиков 13-16 выявлена закономерность: чем меньше угол намотки, тем большую нагрузку выдерживает труба.

На основании сравнения критических значений давления, которое выдерживает каждая из труб, дальнейшие расчеты будут проводиться для трубы с углом намотки композита, равным  $30$  градусам.

## ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ТРУБЫ В ПОДВОДНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

### 4.1. Нагрузки

Аварии на подводных трубопроводах представляют серьезную опасность для окружающей среды, здоровья людей и экономики. Потенциальные утечки нефти, газа или других опасных веществ могут привести к загрязнению водоемов, разрушению экосистем, а также вызвать катастрофические последствия для местного населения. Поэтому тщательный анализ нагрузок на морские трубопроводы является критически важным для обеспечения их безопасной эксплуатации.

Морские трубопроводы подвержены множеству различных воздействий, которых необходимо учесть для безопасной эксплуатации трубопровода. Согласно стандарту для морских трубопроводов [15], нагрузки можно разделить на несколько категорий:

- функциональные нагрузки;
- природные нагрузки;
- строительные нагрузки, подразделяемые на функциональные и природные;
- случайные нагрузки.

К функциональным нагрузкам причисляются нагрузки, возникающие по причине физического существования трубопроводной системы и ее эксплуатации по назначению.

При определении результатов действия нагрузок должны быть учтены, как минимум,

следующие функциональные нагрузки:

- вес;
- наружное гидростатическое давление;
- температура перекачиваемого продукта;
- реакции элементов (фланцев, хомутов и т.д.);

- засыпка и защитные конструкции (грунт, скальная порода, маты);
- внутреннее давление при обычной эксплуатации;
- реакция морского дна (трение и жесткость при кручении);
- предварительное напряжение;
- остаточная деформация опорной конструкции;
- остаточные деформации вследствие осадок грунта, как вертикальных, так и горизонтальных;

- возможные нагрузки, обусловленные нарастанием льда вокруг заглубленных трубопроводов вблизи неподвижных сечений (линейная запорная арматура/тройники, неподвижные установки и т.д.), вызываемого охлаждением перекачиваемого газа/жидкости;

- нагрузки, вызванные частым пропуском внутритрубных устройств.

Очевидно, что вычислить каждую из данных нагрузок, не имея полных данных о конкретном объекте, для которого ведется расчет, не представляется возможным. В связи с этим в рамках данного исследования рассматриваются только самые общие нагрузки, представленные на рисунке 29:

- собственный вес трубы;
- собственный вес газа в трубе;
- сила выталкивания;
- внутреннее рабочее давление в трубе;
- гидростатическое давление.

- A** Pressure: -11,5 MPa
- B** Pressure 2: 0,2943 MPa
- C** Standard Earth Gravity: 9806,6 mm/s<sup>2</sup>
- D** Force: 405, N

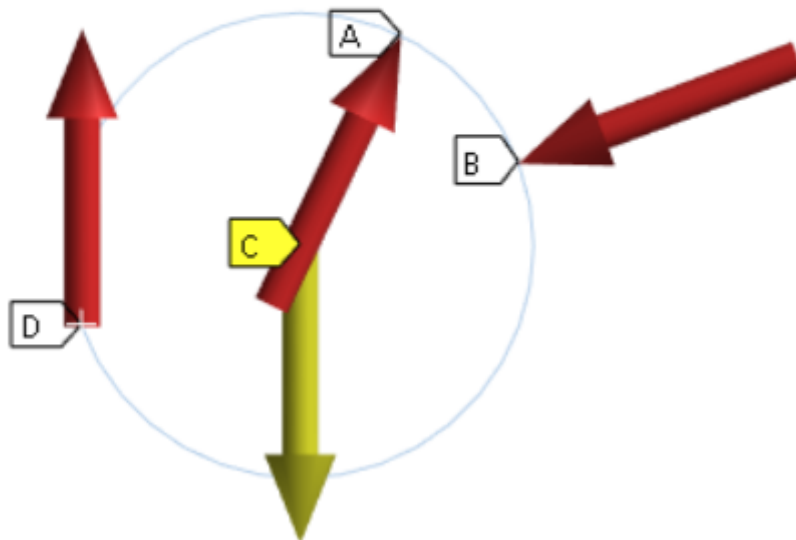


Рисунок 29. Нагрузки на трубу.

Для расчетов были использованы следующие формулы:

– уравнение Менделеева-Клапейрона

$$PV = \frac{M}{m}RT, \quad (4.1)$$

где  $M$  – молярная масса,

$P$  – давление газа,

$T$  – температура,

$V$  – объем,

$R$  – газовая постоянная;

– формула для гидростатического давления

$$P = \rho gh, \quad (4.2)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости

$g$  – ускорение свободного падения

$h$  – глубина, на которой определяется давление;

– формула для расчета объема цилиндра

$$V = \pi r^2 h, \quad (4.3)$$



где

$V$  – объём цилиндра;

$r$  – радиус основания цилиндра;

$h$  – высота цилиндра;

$\pi$  – математическая константа, приблизительно равная 3,14.

Для вычисления нагрузок были использованы следующие допущения:

– в качестве наполнителя трубы предполагается метан, поэтому молярная масса берется как 16 г/моль;

– референсом для используемых давлений служит Северный поток-2, а точнее его участки около Дании, для которого характерно нахождение на глубине 30 метров и рабочее давление 11,5 МПа.

## 4.2. Результаты расчетов

В данной части работы в качестве результатов могут быть рассмотрены поля напряжений, коэффициент запаса прочности для конструкции и результат теста на потерю устойчивости, представленные на рисунках 30-32 соответственно.

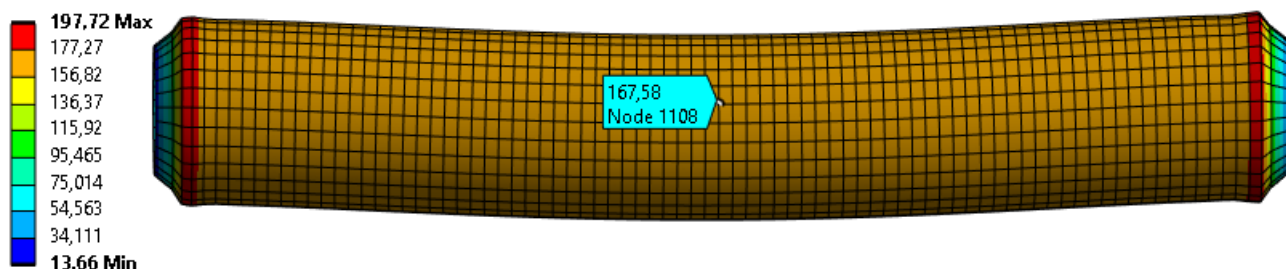


Рисунок 30. Напряжения в трубе, МПа.

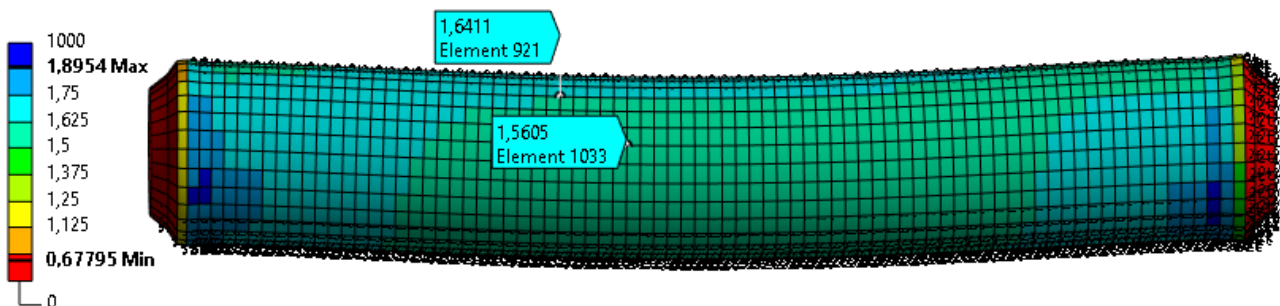


Рисунок 31. Коэффициент запаса.

Load Multiplier (Linear): 14,676  
Unit: mm

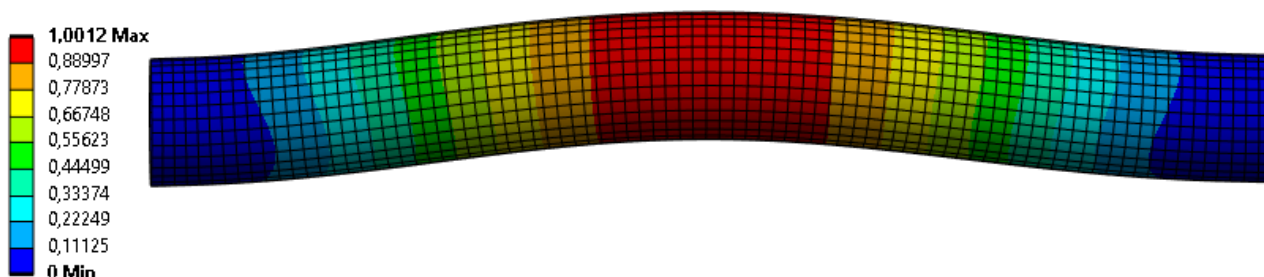


Рисунок 32. Поле перемещений, мм.

Как видно на рисунках, на удалении от граничных условий, зоны вблизи от которых исключаются из рассмотрения при оценке результата напряжения составляю 167,58 МПа, коэффициент запаса по прочности составляет 1,5 и более, а коэффициент запаса для потери устойчивости составляет 14,68.

### 4.3 Поиск оптимального расстояния между опорами

Согласно учебному пособию «Конструктивные и технологические особенности строительства подводных трубопроводов» [7], существует 4 типа конструкций подводных трубопроводов на основании расположения трубы относительно дна, представленные на рисунке 33.

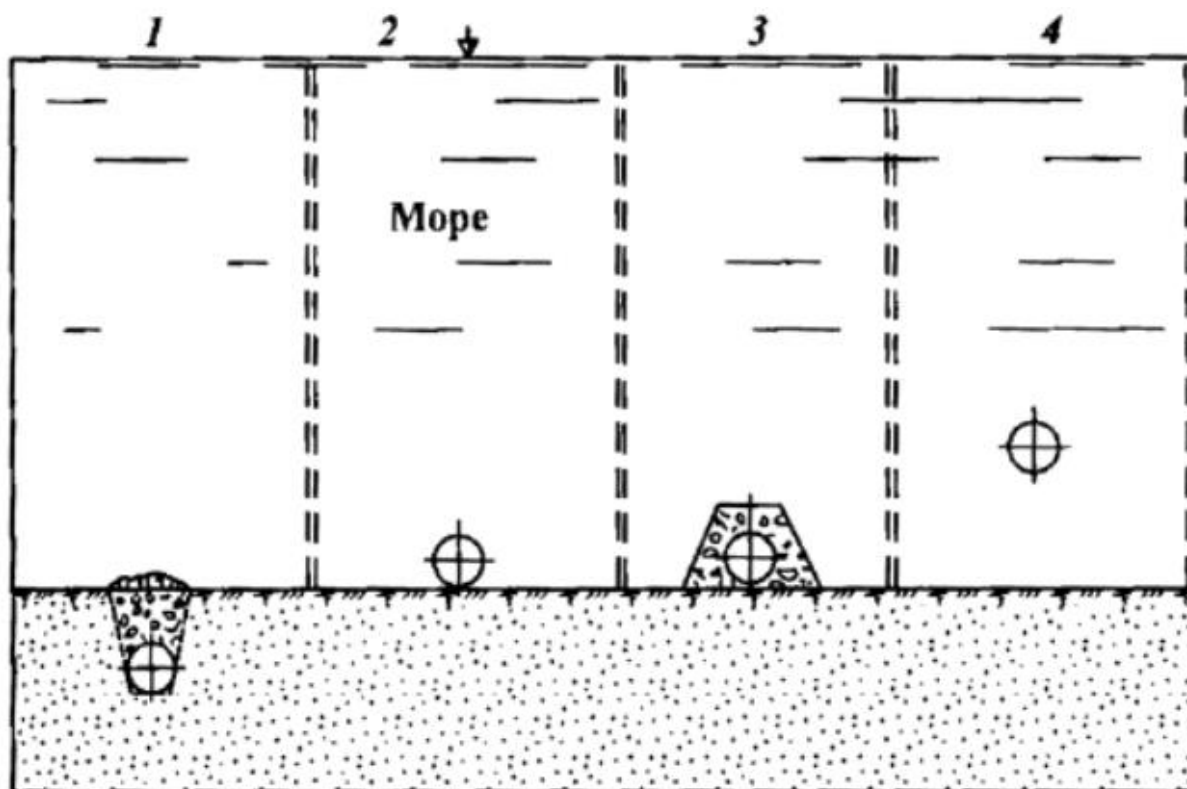


Рисунок 33. Схема положений подводного трубопровода: 1 — заглубленный в грунт; 2 — на дне; 3 — в обваловке на дне; 4 — в воде.

Граничные условия, рассматриваемые в данной работе, наиболее приближены к схеме 4, так как не рассматривается реакция грунта. В связи с этим появляется дополнительный параметр, влияние которого нам необходимо оценить: расстояние между опорными элементами. Расположение опорных элементов показано на рисунке 34.

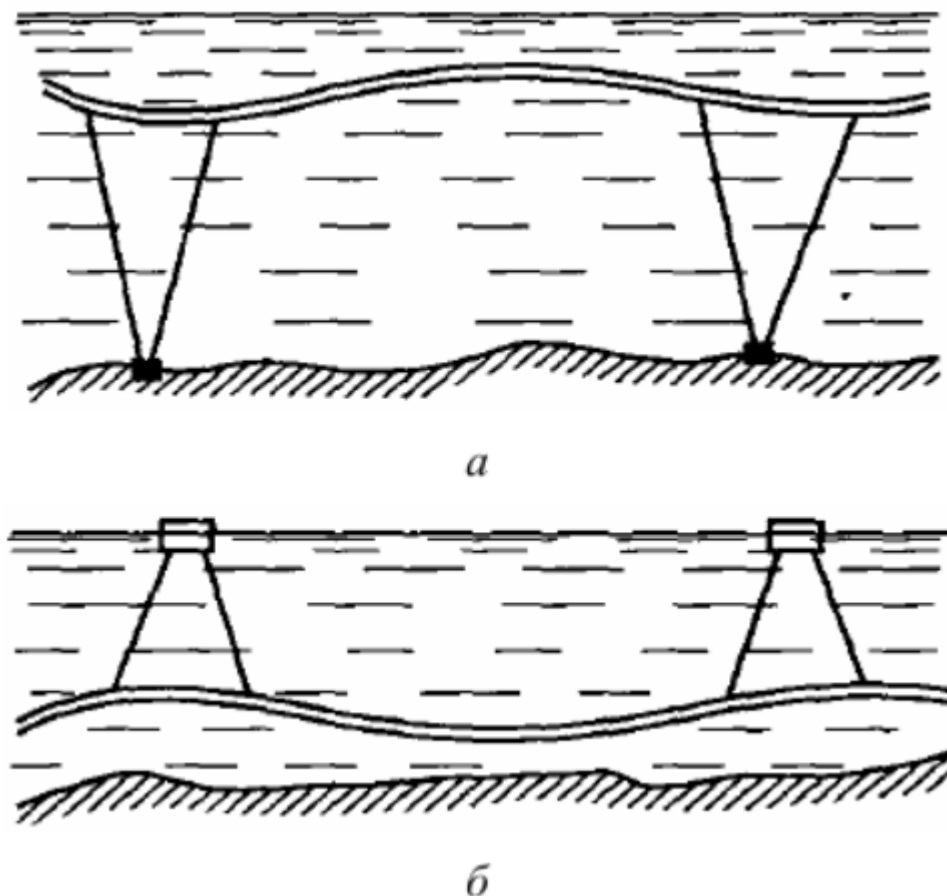


Рисунок 34. Схема подвешенного трубопровода: а — опорные устройства опираются на дно; б — опорные устройства плавают на поверхности воды.

Данное исследование необходимо, так как чем меньше опор используется, тем дешевле обходится строительство такого трубопровода.

В рассматриваемой модели трубы в местах контакта опорных элементов и трубопровода задается жесткая заделка трубы.

Для вычисления максимального допустимого расстояния между опорами проводится построение графиков зависимости коэффициентов запаса на прочность и потерю устойчивости от длины трубы. Результаты исследования представлены на рисунке 35 и в таблице 5.

Согласно стандарту [15] допустимые коэффициенты запаса для газопроводов для обоих тестов равняются 1,1.

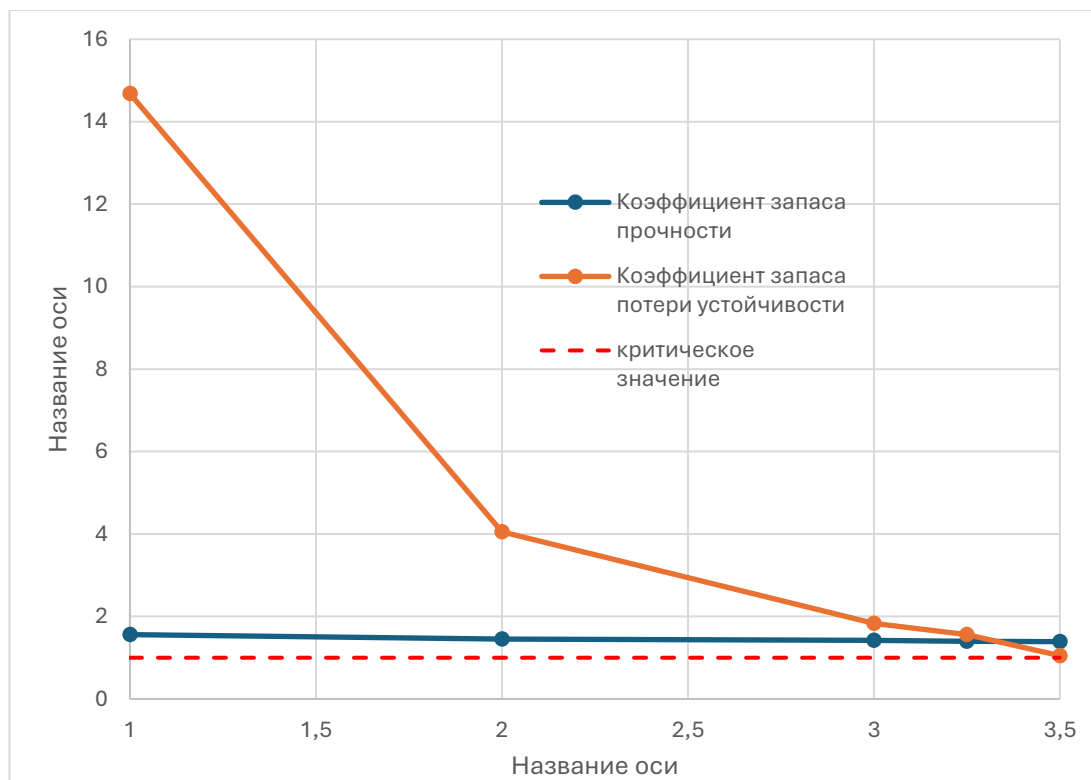


Рисунок 35. Коэффициенты запаса.

Таблица 5.

Зависимость коэффициентов запаса от длины трубы.

Длина трубы, м	Коэффициент запаса прочности	Коэффициент запаса потери устойчивости
1	1,56	14,68
2	1,45	4,05
3	1,42	1,83
3,25	1,4	1,56
3,5	1,39	1,05

#### 4.4 Анализ результатов

Как мы видим из графиков и таблицы труба, исследуемая в данной работе, справляется с нагрузками, пока ее длина не достигает критического значения, при котором полученный коэффициент запаса на смятие не удовлетворяет

требованиям стандарта, снижение данного коэффициента происходит стремительно, в отличие от снижения запаса по прочности.

Максимальная длина трубы, при которой полученные результаты удовлетворяю норме, составляет 3,25 метра, что значительно меньше, чем стандартное значения для труб, используемых на сегодняшний день, для которых длины начинаются приблизительно от 6 метров. [7]

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы было проведено исследование труб из композитных материалов для применения в рамках магистральных подводных трубопроводов. Для этого были решены следующие задачи:

- изучение основных свойств композитных материалов, их типов и принципа расчетов их свойств;
- создание модели материала, близкого по свойствам к композитным материалам, используемым на сегодняшний день для производства труб;
- выявление общих закономерностей в поведении материала, изучение влияния ориентации слоев композитного материала на прочностные изделия, созданные из него, выбор оптимального угла намотки для тестируемой модели;
- изучение нормативной документации, для определения перечня нагрузок для подводных труб;
- проведение расчетов НДС, получение коэффициентов запаса для прочности и потери устойчивости;
- выполнение анализов полученных результатов и оценка максимальной допустимой длины трубы из композитного материала.

На основании данных, полученных в ходе данной работы, можно сделать выводы, что полученная модель трубы способна выдерживать рассматриваемые нагрузки при уменьшенном расстоянии между опорами.

Однако множество нагрузок, связанных с местностью, где проложена труба, например, таких как волновые нагрузки, воздействие судов, вероятное обледенение, а также с воздействием остальных частей системы трубопровода рассмотрены не были, в связи со сложностью получения данных об этих нагрузках, и шириной диапазона их значений.

Таким образом для подтверждения возможности применения труб, подобных исследуемых в данной работе необходимо проведение дальнейших исследований.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Андреева, А. В.: Основы физикохимии и технологии композитов; учеб. пособие / А. В. Андреева - М.: ИПРЖР, 2001. – 192 с.
2. Багмутов В. П., Белов А. А., Столярчук А. С.: Элементы расчетов на устойчивость; учеб. пособие/ «Волгоградский государственный технический университет», 2010 – 56 с.
3. Калашников А. М.: Моделирование и анализ объектов с контролируемой микроструктурой композитных конструкционных материалов Ч.1; учебное текстовое электронное издание локального распространения/ Издательство ОмГТУ, 2021 – 112 с
4. Карпиловский В.С.: Метод конечных элементов и задачи теории. – Киев: «Софія А», 2022. – 275 с.
5. Скворцов, Ю.В.: Механика композиционных материалов; конспект лекций по дисциплине / Ю.В. Скворцов, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», 2013 – 94 с.
6. Скворцов Ю. В., Глушков С. В.: Использование МКЭ-пакета ANSYS для решения задач механики деформируемого твёрдого тела; Интерактивное мультимедийное пособие, «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», 2011 – 16 с.
7. Томарева, И. А.: Конструктивные и технологические особенности строительства подводных трубопроводов; учеб. пособие / И. А. Томарева, «Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет», 2014 – 113 с.
8. Мирзоев Дилижан Аллахверди оглы, Ибрагимов Искандер Энверович, Архипова Оксана: «Инновационные технологии подводной добычи углеводородов на шельфе Арктики»; журнал «Neftegaz.RU» №8, 2012



9. Назаров В.И., Григорьев Г.А., Краснов О.С., Медведева Л.В.: экономическая оценка углеводородной сырьевой базы арктического шельфа России; журнал «Нефтегазовая геология» №9, 2021
10. Ощепков М.: Однонаправленные стеклопластики. Часть 1. Классификация. Низкая степень армирования; журнал «Композитный мир» №2, 2019
11. Смородова О.В., Костарева С.Н., Байков И.Р., Башарова Л.Р.: Эффективность композитных трубопроводов для газотранспортных систем; Сетевое издание «Нефтегазовое дело», №1 2019
12. Engin Aktaş, Serkan Kangal, Osman Kartav, Metin Tanoglu, H. Seçil Artem; Investigation of interlayer hybridization effect on burst pressure performance of composite overwrapped pressure vessels with load-sharing metallic liner – Journal of Composite Materials 54, 2019
13. Saiaf Bin Rayhan, Md Mazedur Rahman: Modeling elastic properties of unidirectional composite materials using Ansys Material Designer, Procedia Structural Integrity 28 1892–1900, 2020
14. Tamer Ali Sebaey: Design of Oil and Gas Composite Pipes for Energy Production Mechanical Design and Production Dept., Faculty of Engineering, Zagazig University, Energy Procedia 162 146–155, 2019
15. Морской стандарт DNV-OS-F101 подводные трубопроводные системы СТО Газпром 2-3.7-050-2006 (DNV-OS-F101)