

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

Выпускная квалификационная работа магистра

Выполнил:

студент гр. 5040103/20601

Мухаметова П.А.

Научный руководитель:

доцент ВШТМиМФ, к.х.н.

Низовцев А.В.

Консультант:

инженер ОЭМ,
ПИШ «Цифровой инжиниринг»

Ожгибесова Д.Д.

Объект исследования

Проблема

Основной материал для труб, используемых в транспорте жидкостей, нефти и газа - **сталь**

Внутритрубная **коррозия** и износ

96% всех отказов промышленных трубопроводов

Решение

Применение композиционных материалов

- | | |
|--|--------------------------------------|
| + Малый удельный вес | - Кессонный эффект |
| + Малая теплопроводность | - Абразивный износ |
| + Меньшая шероховатость | - Гигроскопичность |
| + Устойчивость к коррозии и стойкость к агрессивным средам | - Анизотропия и нелинейность свойств |
| + Большой срок эксплуатации | |

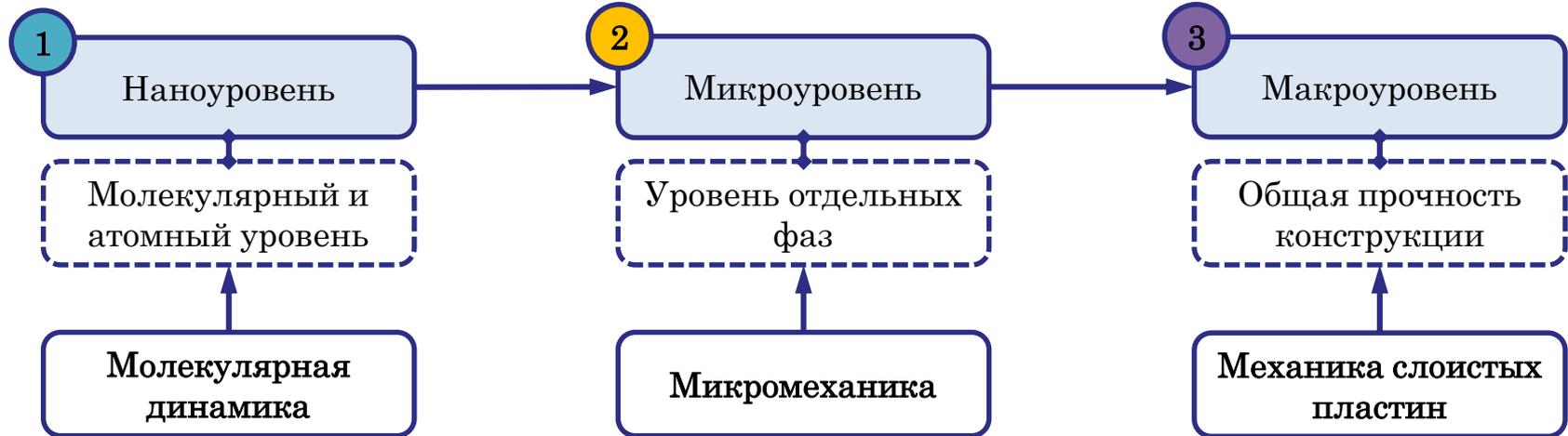
Проектирование
Технологии Цифровых Двойников (ЦД)

Объект исследования и разработки

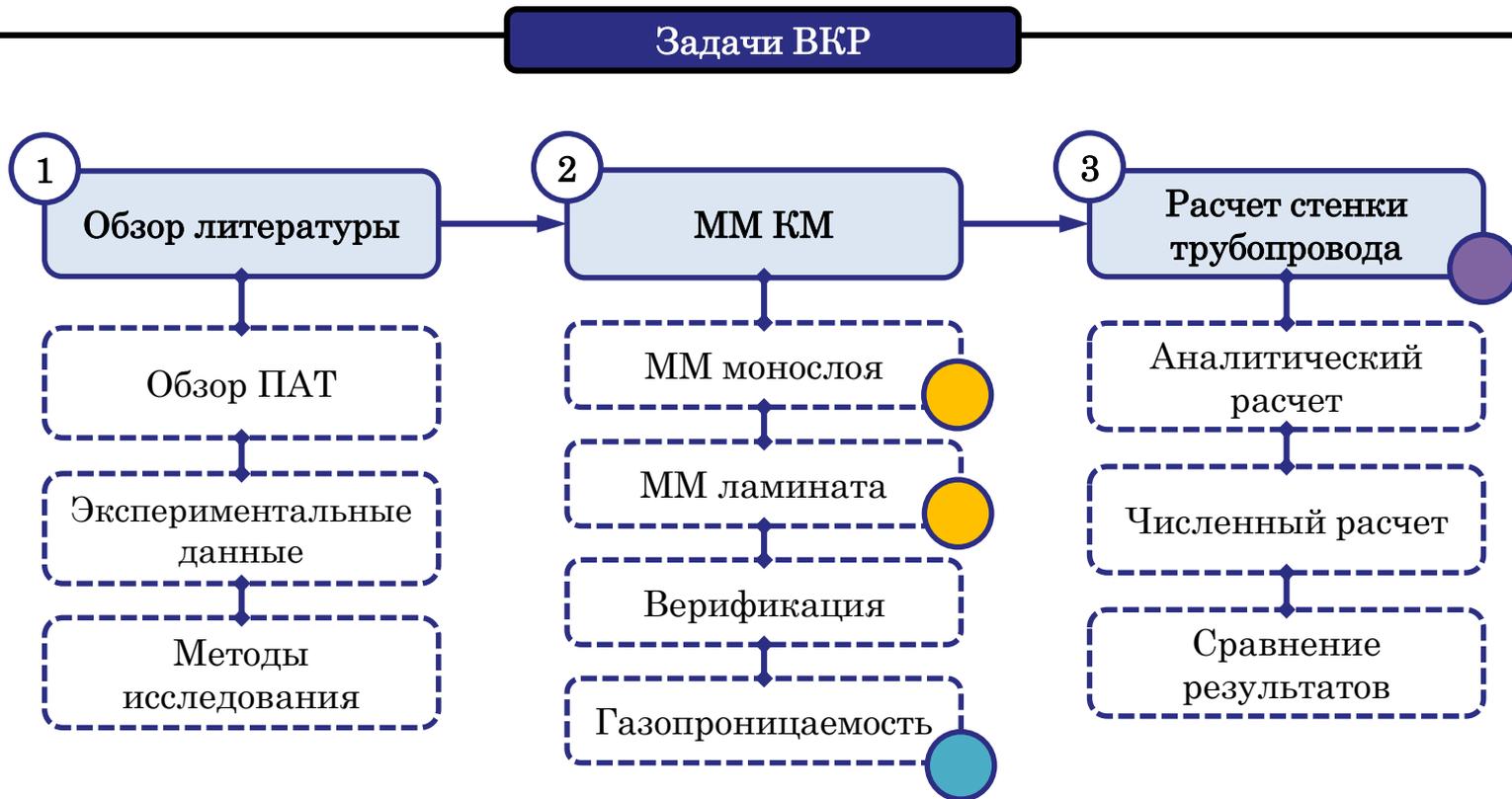
ЦД КМ для ЦДИ, новые пользовательские модели материалов (ММ) для моделирования свойств с учетом различных видов деградаций и особенностей технологических процессов.

Цель ВКР

Разработка методики расчёта ПКМ для промышленных трубопроводов с учётом их нелинейного поведения, применяя методы микромеханики и молекулярной динамики для анализа взаимодействия, особенностей структуры и свойств используемых материалов.



*ПКМ – полимерные композиционные материалы



*ПАТ – полимерные армированные трубы

Обзор материалов

Матрица

Термопластичные полимеры

Полипропилен,
полиэтилен,
поливинилхлорид и
т.д.

Термореактивные синтетические смолы

Эпоксидные,
фенольные,
полиэфирные и т.д.



Армирование

Армирование волокнами

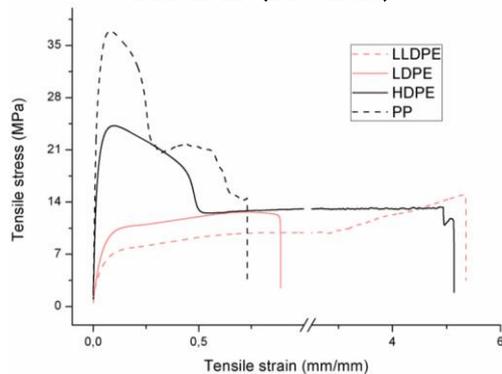
Стеклоанное,
арамидное,
базальтовое,
углеродное и т.д.

Армирование металлическими лентами

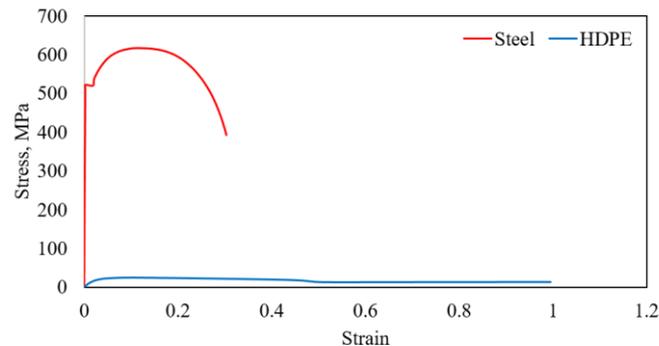
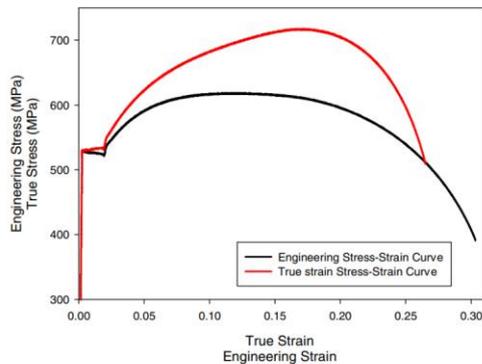
Армирование сетчатым каркасом

Выбор системы материала

HDPE (ПЭВП)



API 5L X65



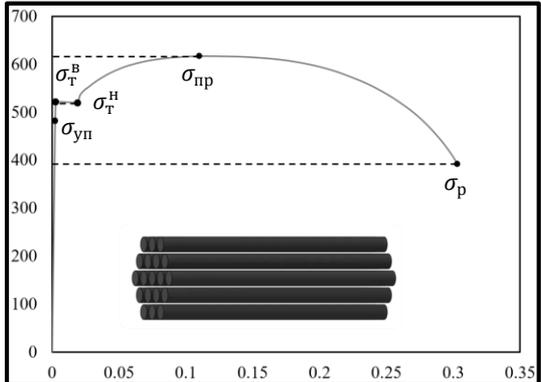
Название параметра	Обозначение	Величина		Размерность
		API 5L X65	HDPE	
Плотность	ρ	7.85	0.97	г/см ³
Модуль упругости	E	211 000	953	МПа
Коэффициент Пуассона	ν	0.3	0.4	-
Прочность на растяжение	S	614	24	МПа

Выбор системы материала

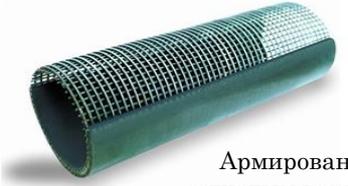


Армирование металлическими лентами

Армирующая фаза:
сталь

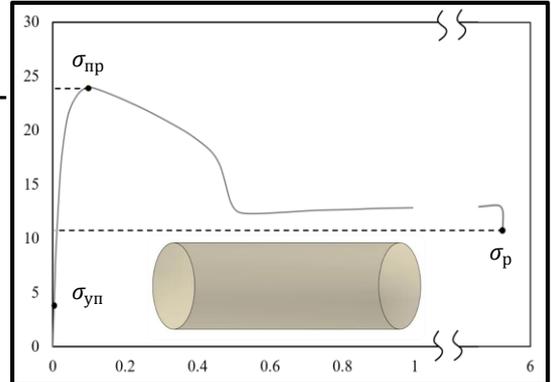


- $E_f(+)$
- $E_f(-)$
- G_f
- $S_f(+)$
- $S_f(-)$
- τ_f

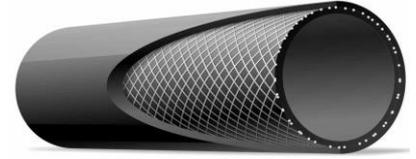


Армирование сетчатым каркасом

Матричная фаза:
полиэтилен (ПЭ) высокой плотности



- $E_m(+)$
- $E_m(-)$
- G_m
- $S_m(+)$
- $S_m(-)$
- τ_m



Армирование проволокой

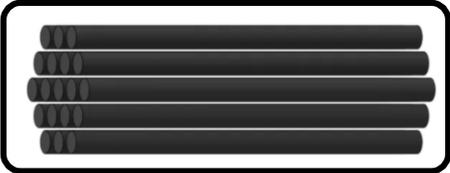
Композиционный материал
(КМ)



- $E_{11}(+)$
- $E_{22}(+)$
- $E_{11}(-)$
- $E_{22}(-)$
- G_{12}
- $S_{11}(+)$
- $S_{22}(+)$
- $S_{11}(-)$
- $S_{22}(-)$
- S_{12}

Исходные данные

Армирующая фаза

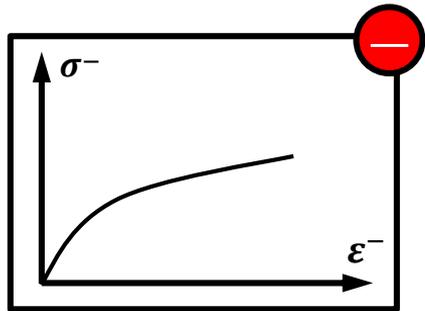


- $E_f(+)$
- $E_f(-)$
- G_f
- $S_f(+)$
- $S_f(-)$
- τ_f

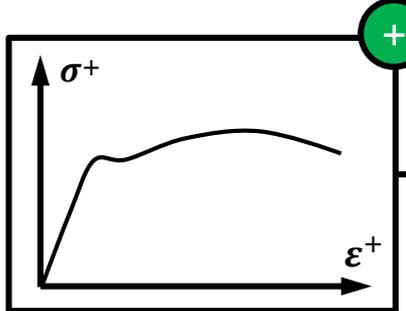
Матричная фаза



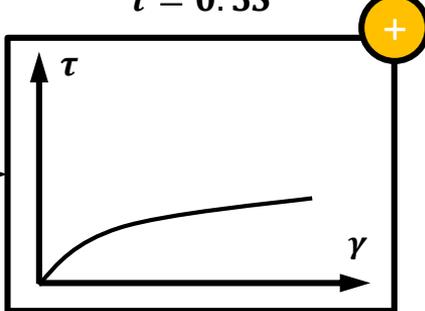
- $E_m(+)$
- $E_m(-)$
- G_m
- $S_m(+)$
- $S_m(-)$
- τ_m



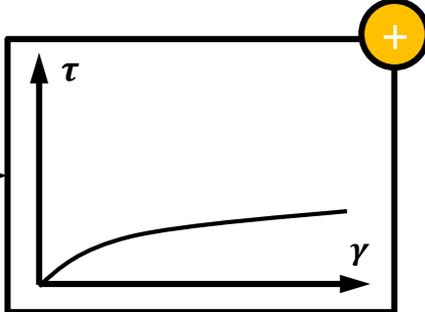
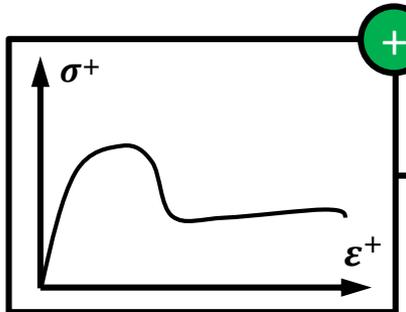
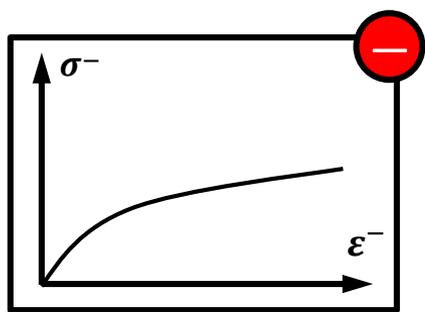
а)



б)



в)



Диаграммы деформирования:

а) при сжатии; б) при растяжении; в) при сдвиге

Микромеханика

Модели микромеханики

Rule of Mixture (ROM)

Modified Rule of Mixture (MROM)

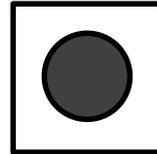
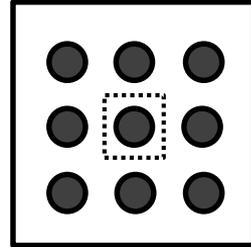
Halpin-Tsai

Chamis

Hill-Hashin-Christenses-Lo

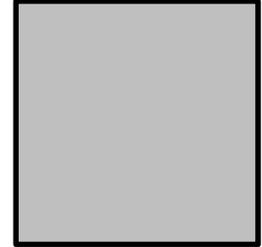
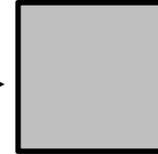
Mori-Tanaka

Bridging model



RVE

Гомогенизация



ROM



$$V(f) + V(m) = V$$

$$V_f = \frac{v(f)}{V} = \frac{A(f)}{A} \cdot \text{объемная доля армирующего компонента}$$

ROM

Продольные свойства



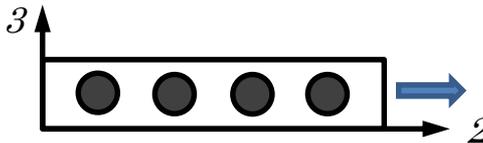
Гипотеза: $\varepsilon_{11} = \varepsilon_f = \varepsilon_m$

$$\sigma_{11} = V_f \cdot \sigma_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

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

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

Поперечные свойства



Гипотеза: $\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m$

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

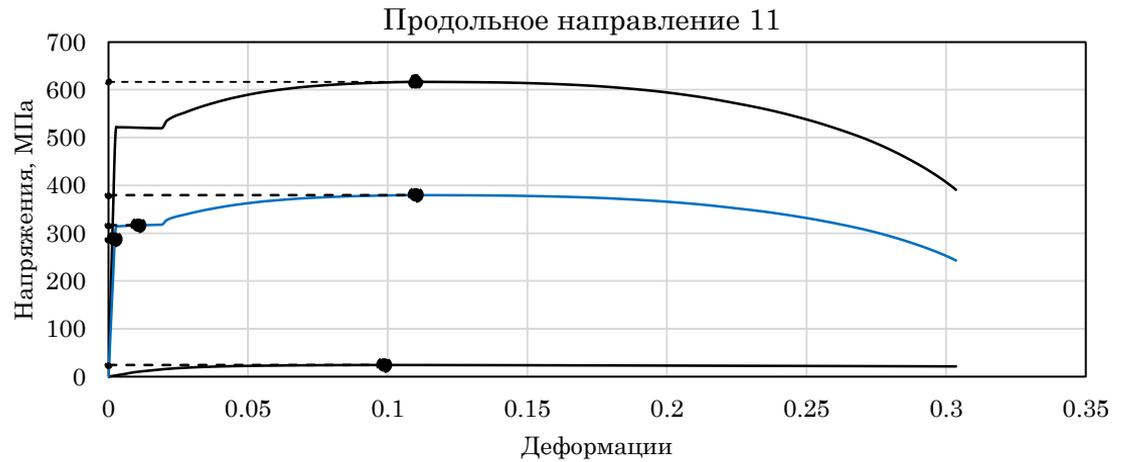
Сдвиговые свойства



Гипотеза: $\tau_{12} = \tau_f = \tau_m$

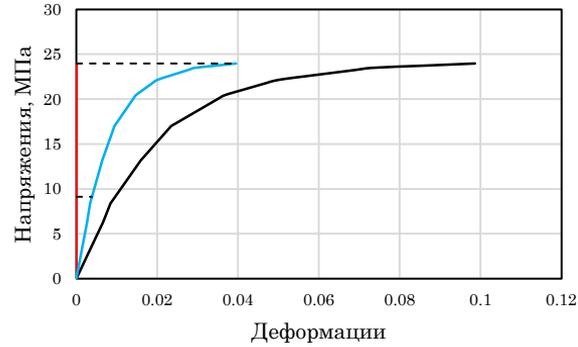
$$G_{12} = \frac{G_m \cdot G_f}{V_f \cdot G_m + (1 - V_f) \cdot G_f}$$

ROM

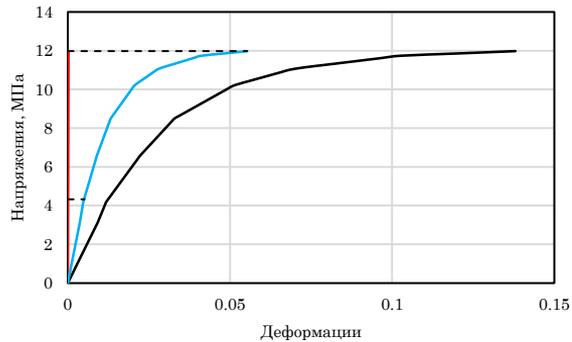


Поперечное направление 22

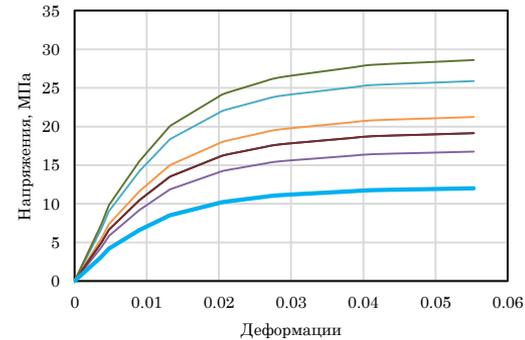
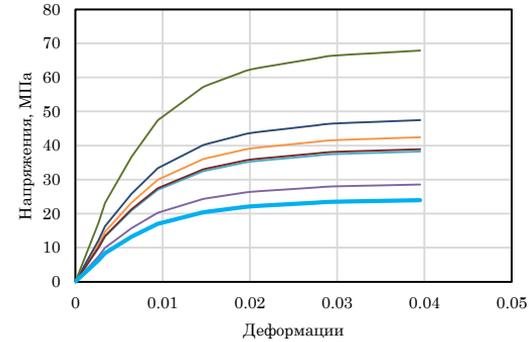
ROM



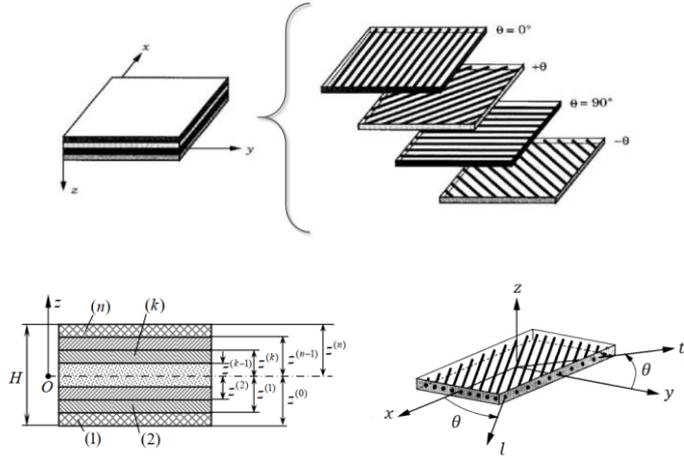
Сдвиговое направление 12



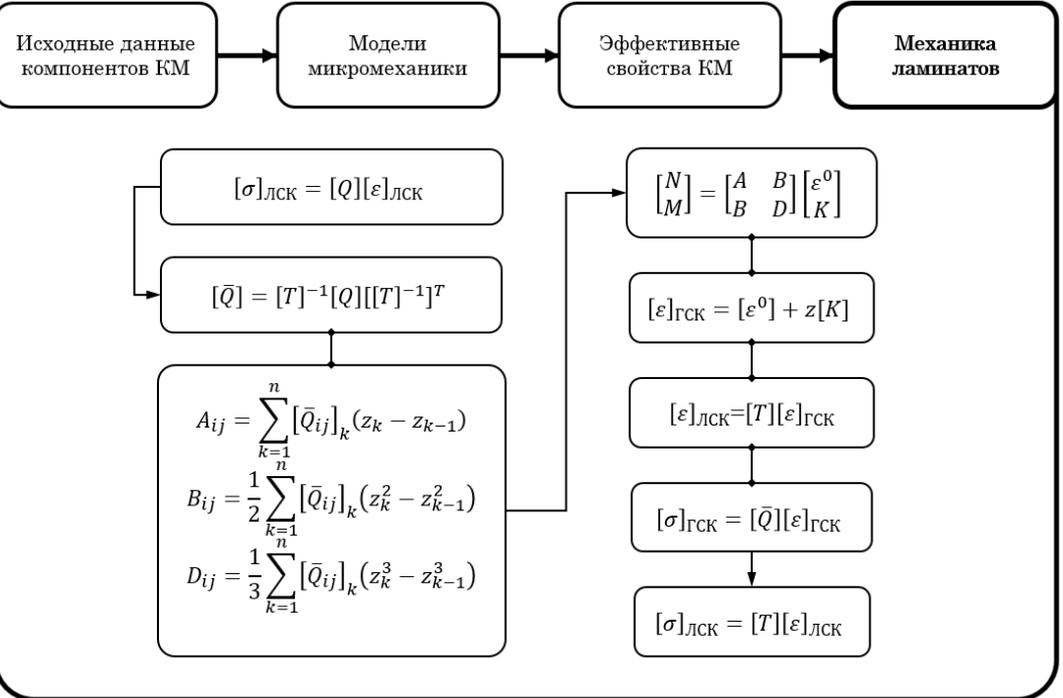
Другие модели микромеханики



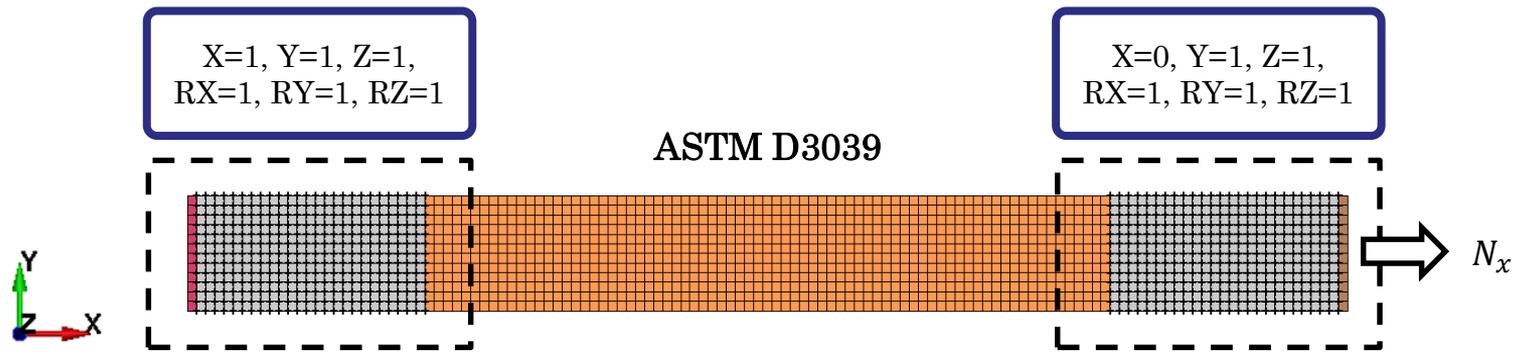
Механика ламинатов



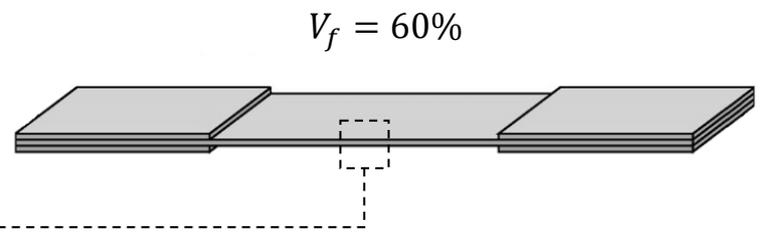
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_l}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} & \frac{\nu_{lt}E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} & 0 \\ \frac{\nu_{lt}E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} & \frac{E_t}{1 - \nu_{lt}\nu_{tl}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{lt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix}$$



Численный расчет

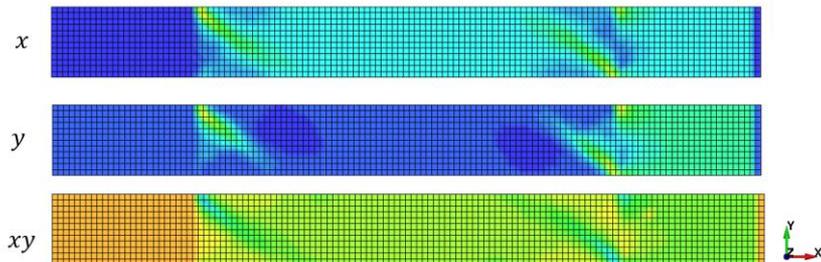


+35
-35
-35
+35

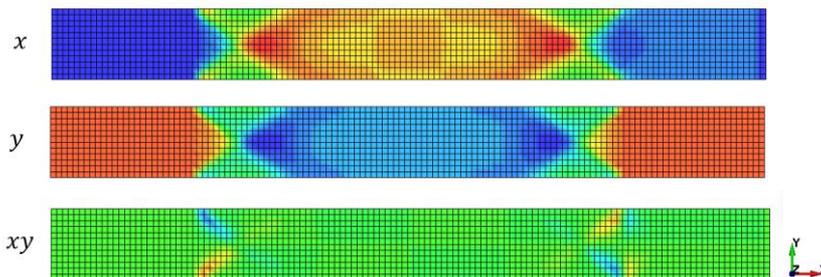


Результаты

Распределение поля напряжений



Распределение поля деформаций



Параметр	Размерность	Величина		Δ, %
		Аналит.	Числ.	
σ_x^{+35}	МПа	0.2247500000	0.2246575000	0.04
σ_y^{+35}	МПа	0.0000000000	0.0007575308	0.00
τ_{xy}^{+35}	МПа	0.1352616655	0.1353132188	0.04
ε_x^{+35}	мм/мм	0.0000268985	0.0000267269	0.64
ε_y^{+35}	мм/мм	-0.0000477772	-0.0000474240	0.74
γ_{xy}^{+35}	мм/мм	0.0000000000	-0.0000000003	0.00

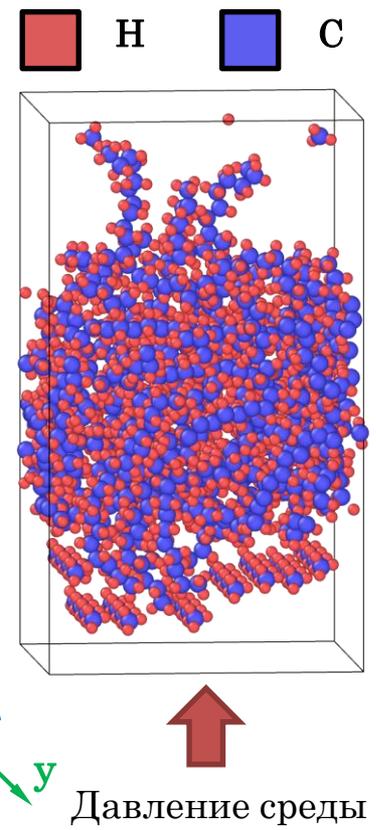
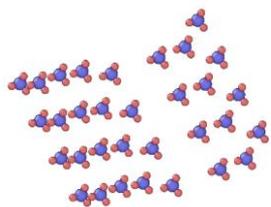
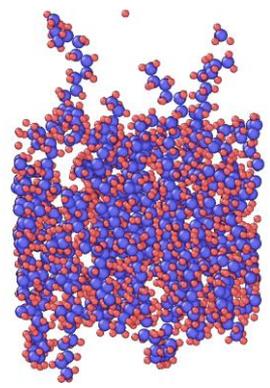
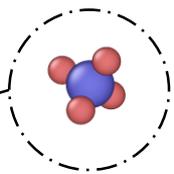
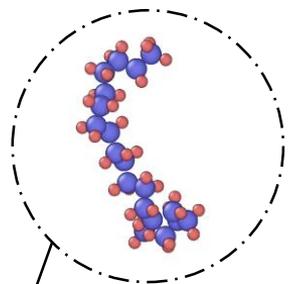
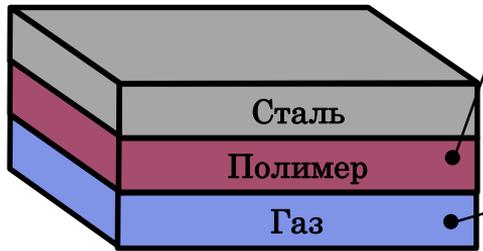
ГСК

Параметр	Размерность	Величина		Δ, %
		Аналит.	Числ.	
σ_1^{+35}	МПа	0.2779139026	0.2781495000	0.08
σ_2^{+35}	МПа	-0.0531639026	-0.0527344883	0.81
τ_{12}^{+35}	МПа	-0.0593357440	-0.0589186445	0.71
ε_1^{+35}	мм/мм	0.0000023310	0.0000023317	0.03
ε_2^{+35}	мм/мм	-0.0000232096	-0.0000230288	0.78
γ_{12}^{+35}	мм/мм	-0.0000701722	-0.0000696792	0.70

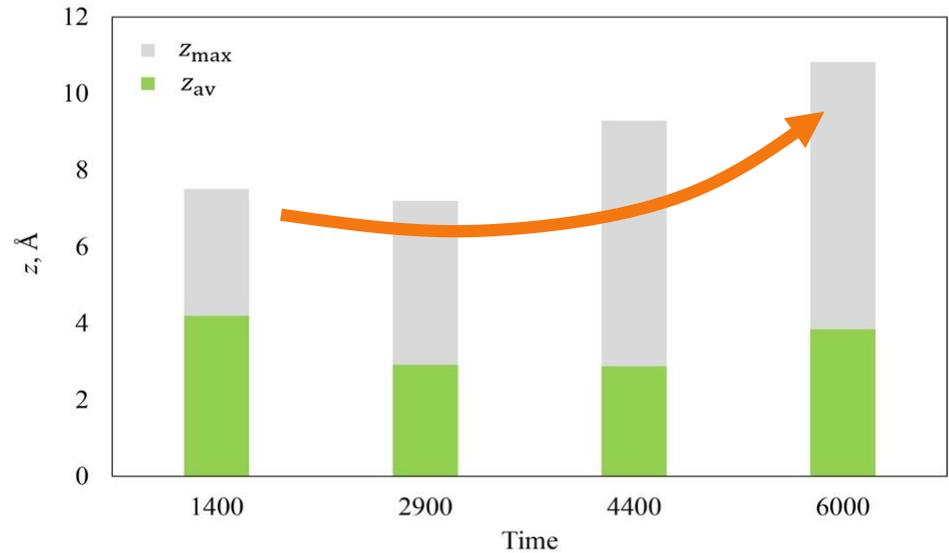
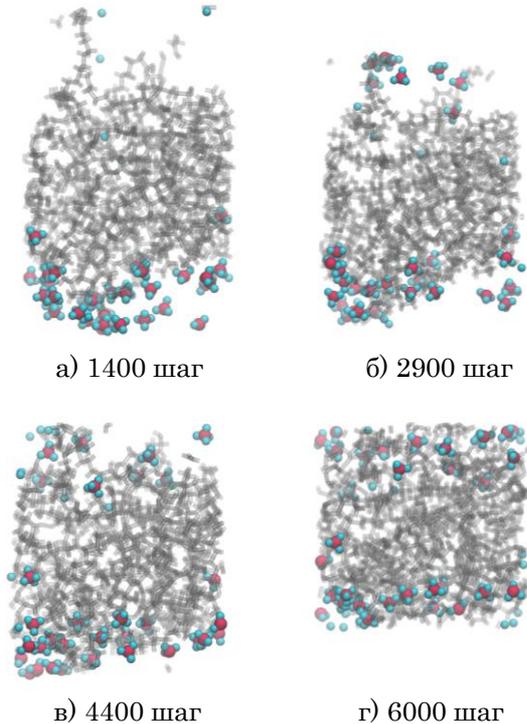
ЛСК

Молекулярная динамика

- Температурные режимы: от 250 до 500 К с шагом 50~К
- Прикладываемая постоянная скорость деформации равна -0.0003 за каждую фемтосекунду



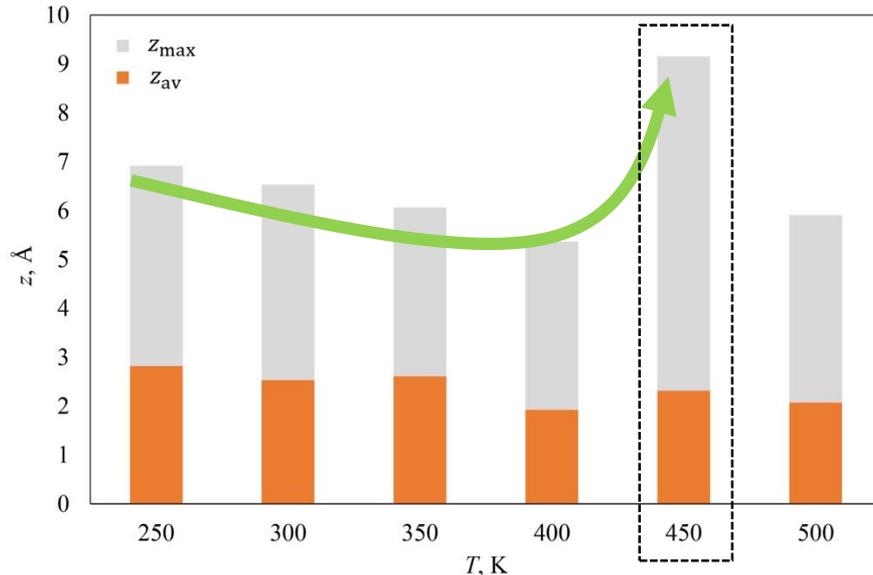
Молекулярная динамика



Зависимость глубины проникновения молекул метана внутрь полиэтилена при выдержке при 350 К до сжатия ПЭ

z_{av} – средняя глубина проникновения молекул,
 z_{max} – максимальное расстояние, на которое проникла молекула CH_4

Молекулярная динамика



Итоговая глубина проникновения молекул метана внутрь ПЭ при выдержке при различных температурах

- Плотность ПЭ до начала сжатия составляет 0.74 г/м^3 . После сжатия до 60% от начального объема ячейки плотность полиэтилена равна 1.06 г/м^3 .
- При воздействии внешнего сжимающего фактора макромолекулы ПЭ способны заполнять свободное пространство между собой, перераспределяясь и изменяя свою конфигурацию, что затрудняет дальнейшее проникновение молекул метана.
- При температуре 450 может потребоваться увеличение толщины стенки, поскольку наличие дефекта в полимерном слое может привести к ускоренному накоплению газа между стенками.

Выводы

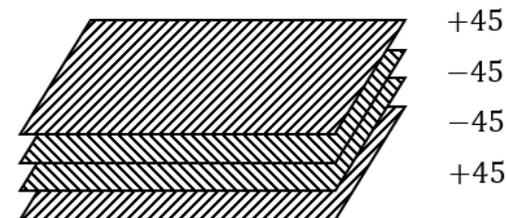
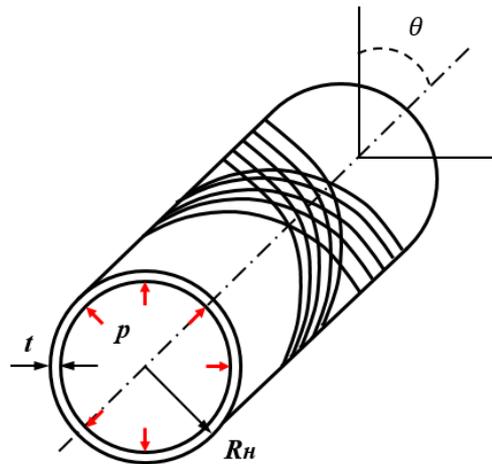
Постановка задачи

Толщина $t = 0.018$ м

Наружный радиус $R_H = 0.108$ м

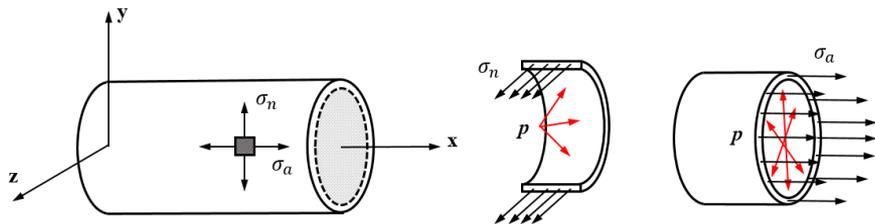
Симметричная укладка $\pm\theta = 45^\circ$

Рабочее давление $p = 1.6$ МПа



Согласно ГОСТ Р 59910-2021 конструкция армирующего слоя должна обеспечивать коэффициент запаса прочности трубы не менее 2.

Аналитический расчет



Окружные напряжения:

$$\sigma_n = \frac{pR_H}{t}$$

Силовые факторы:

$$N_y = \sigma_n t = pR_H$$

Продольные напряжения:

$$\sigma_a = \frac{pR_H}{2t}$$

$$N_x = \sigma_a t = \frac{pR_H}{2}$$

Критерий Цая-Хилла:

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

$$S_1 = \begin{cases} S_1^T, & \text{при } \sigma_1 > 0 \\ S_1^C, & \text{при } \sigma_1 < 0 \end{cases} \quad S_2 = \begin{cases} S_2^T, & \text{при } \sigma_2 > 0 \\ S_2^C, & \text{при } \sigma_2 < 0 \end{cases}$$

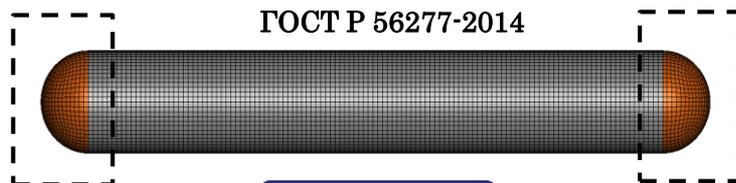
Критерий max деформаций:

$$R_{11} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_1 > 0 \\ -\frac{\varepsilon_1}{X_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_1 < 0 \end{cases}, \quad R_{22} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_2}{Y_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_2 > 0 \\ -\frac{\varepsilon_2}{Y_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_2 < 0 \end{cases}$$

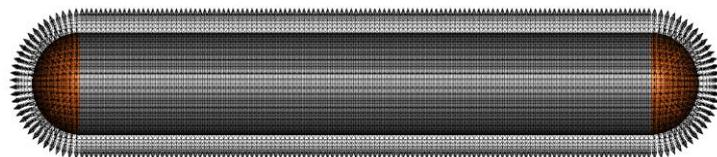
$$R_{12} = \begin{cases} +\frac{\varepsilon_{12}}{S_\varepsilon^T}, & \text{при } \varepsilon_{12} > 0 \\ -\frac{\varepsilon_{12}}{S_\varepsilon^C}, & \text{при } \varepsilon_{12} < 0 \end{cases}$$

Численный расчет

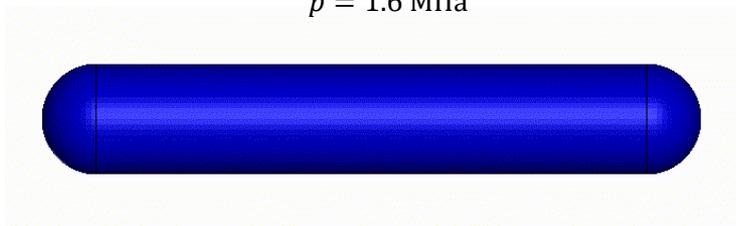
ГОСТ Р 56277-2014



R=0, T=0, Z=1,
RR=1, RT=1, RZ=1



$p = 1.6$ МПа



Параметр	Размерность	Величина		$\Delta, \%$
		Аналит.	Числ.	
σ_x	МПа	4.400000	4.408197	0.19
σ_y	МПа	8.775000	8.787094	0.14
τ_{xy}	МПа	6.268472	6.281697	0.21
ε_x	мм/мм	-0.001193	-0.001200	0.61
ε_y	мм/мм	0.001394	0.001398	0.31
γ_{xy}	мм/мм	0.000000	-1.23784E-07	0.00

ГСК

Параметр	Размерность	Величина		$\Delta, \%$
		Аналит.	Числ.	
σ_1	МПа	12.855972	12.862803	0.05
σ_2	МПа	0.319028	0.318949	0.02
τ_{12}	МПа	2.187500	2.200139	0.58
ε_1	мм/мм	0.000100	0.000101	0.12
ε_2	мм/мм	0.000100	0.000101	0.45
γ_{12}	мм/мм	0.002587	0.002599	0.44

ЛСК

Запас $R_{22} = 36, f = 3$

Итоги

- Проведен обзор существующих труб из КМ с полимерной матрицей, используемых на практике в настоящее время
- Построена ММ монослоя с учетом нелинейного поведения компонент системы
- Методом молекулярной динамики исследовано взаимодействия метана с ПЭ покрытием
- Разработана ММ КМ, которая прошла верификацию в программе конечно-элементного анализа LS-DYNA с погрешностью меньше 1%
- Произведен расчет стенки нефтепровода из КМ под действием внутреннего давления
- Выбранная укладка отвечает требованиям по запасу прочности согласно ГОСТ Р 59910-2021



ФИЗМЕХ
Физико-механический
институт

Высшая школа
теоретической механики
и математической физики

Спасибо за внимание!

