

Исследование механического поведения мягких тканей: рост и адаптация сосудов

*Уразова К.М., Ельчинов Е.С., Тимкина Т.Д.,
Беркман Д.А., Щетинина А.В., Ермаков С.Р.,
Сорокина С.А., Бочарова В.А., Никишин
А.П., Вождяева Ю.С., Медведев А.С., Щудро
Т.А.*



ИТМО



**SECHENOV
UNIVERSITY**



Постановка задачи

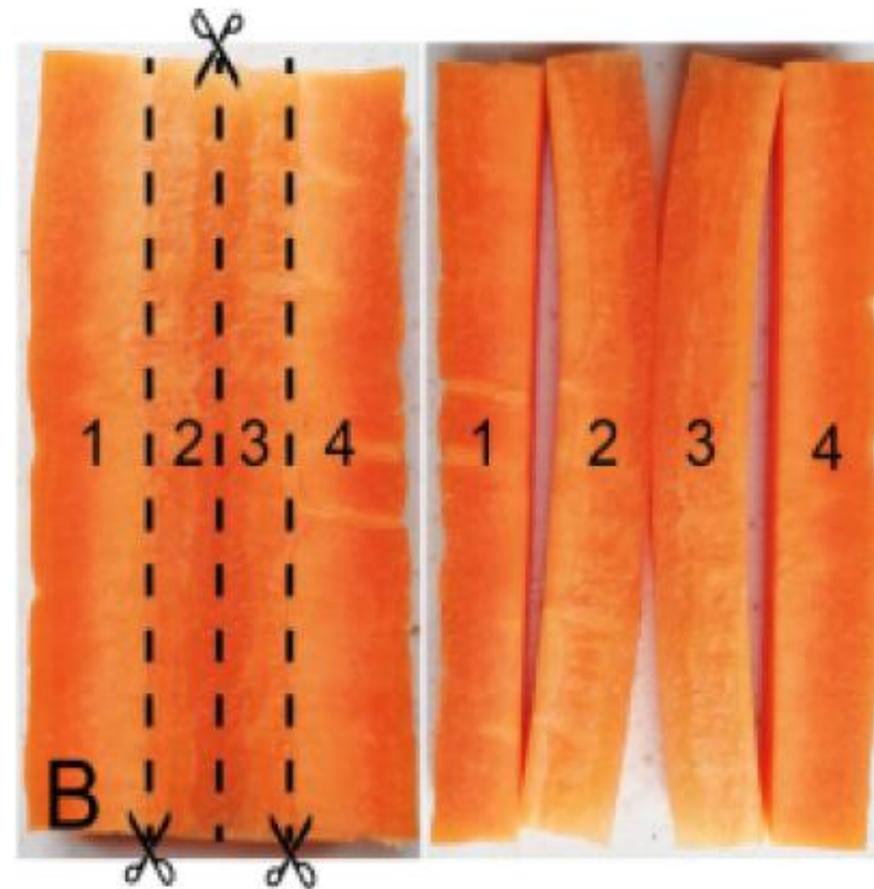
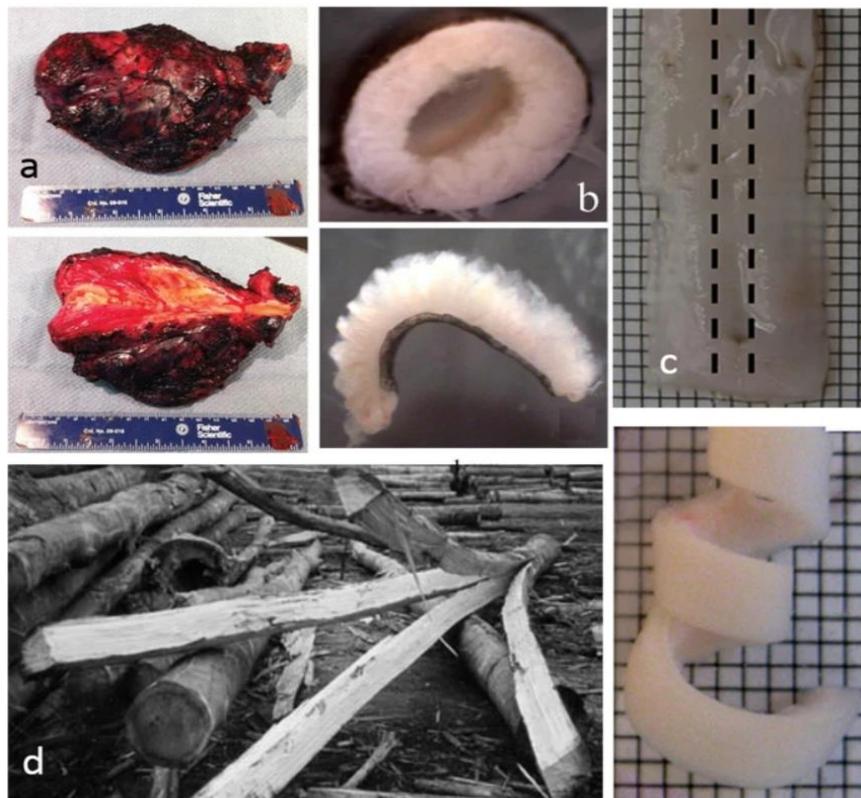
Зачем изучать механическое поведение мягких тканей?

Применение:

1. Предсказание исхода операции + Послеоперационная адаптация, особенно в случае педиатрии
2. Изучение процессов адаптации сосудов к резким изменениям внешних условий
3. Тканеинженерные конструкции

Задача 1.

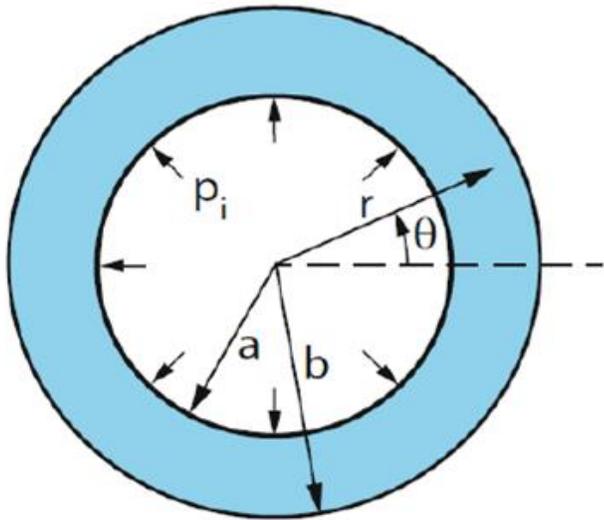
Остаточные напряжения



Проявление остаточных напряжений в экспериментах с разными биоматериалами

Задача 1.

Остаточные напряжения, вызванные неравномерным ростом сосуда



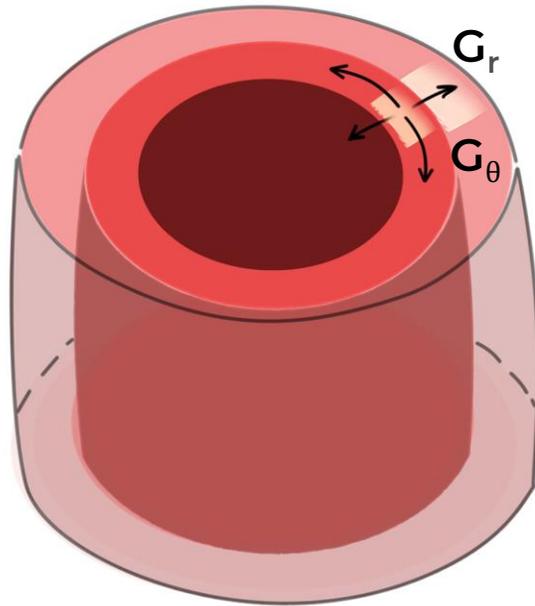
Дано:

a_0, b_0 - радиусы

$p_i = 0$ - давление крови

λ - растяжение

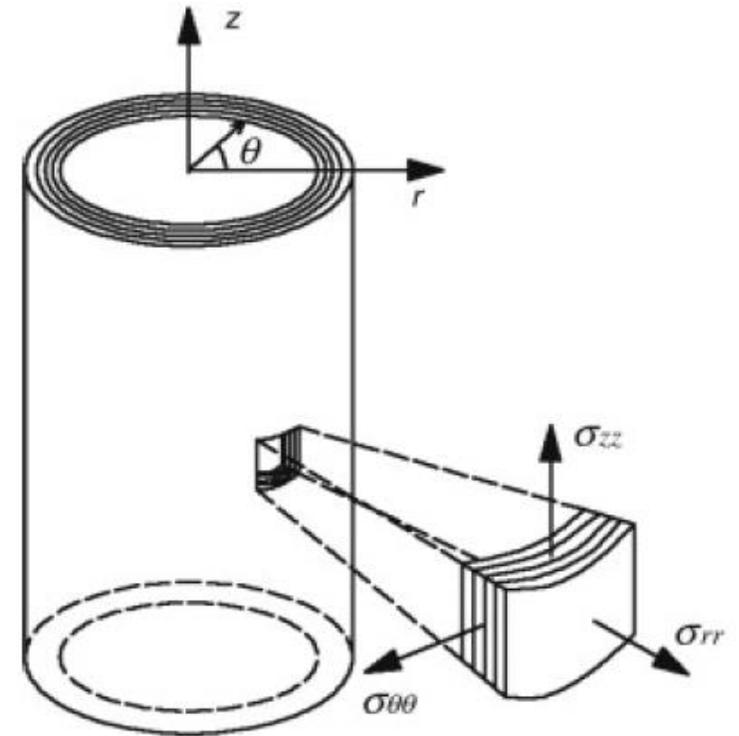
$\psi = \psi(\lambda_r, \lambda_\theta, \lambda_z)$ - потенциал



Найдем:

σ - напряженное состояние

a, b - новая геометрия



Получили систему интегральных уравнений
для нахождения a и λ :

$$\begin{cases} \sigma_r(b) = - \int_a^b (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r) \frac{dr}{r} = 0; \\ \int_a^b (2\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta) r dr = 0; \\ \bar{\sigma}_i(r, a, \lambda). - \text{ задается упругим потенциалом (-> задача N°2)} \end{cases}$$

Решение 1.

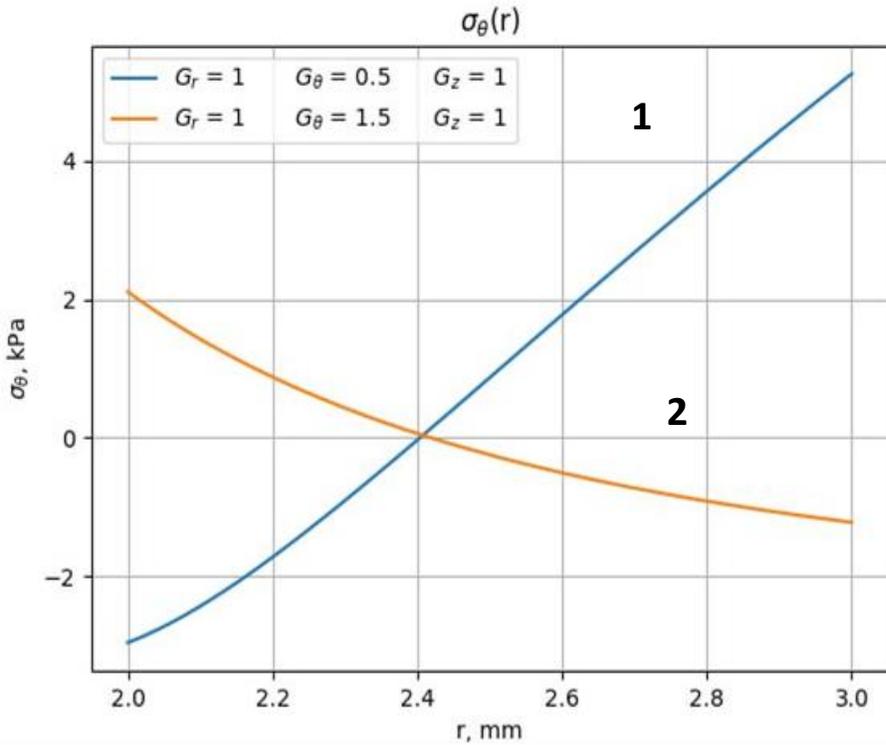
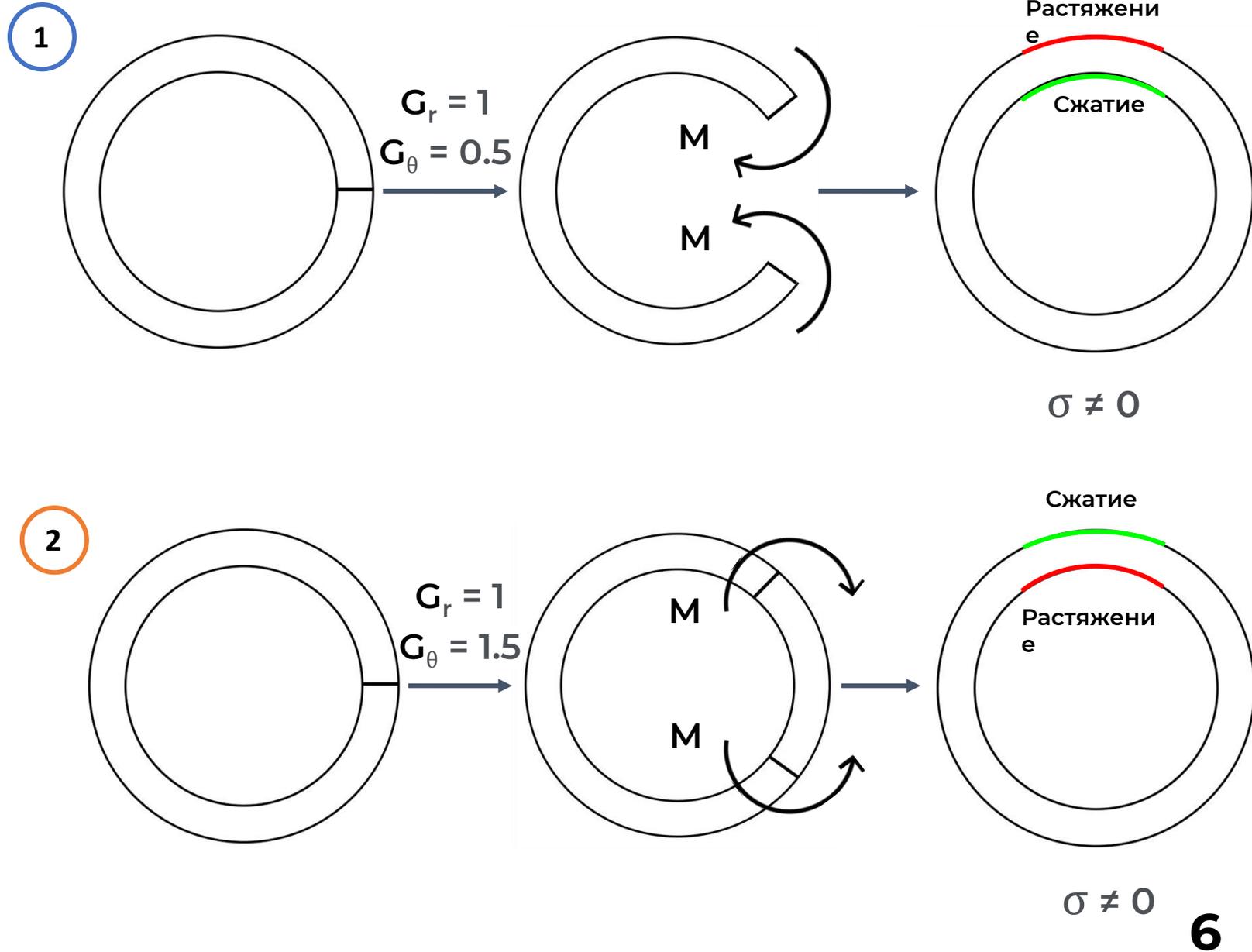


График зависимости окружных напряжений от радиуса при разных константах роста: постоянная толщина стенки и увеличение/уменьшение радиуса сосуда



Решение 1.

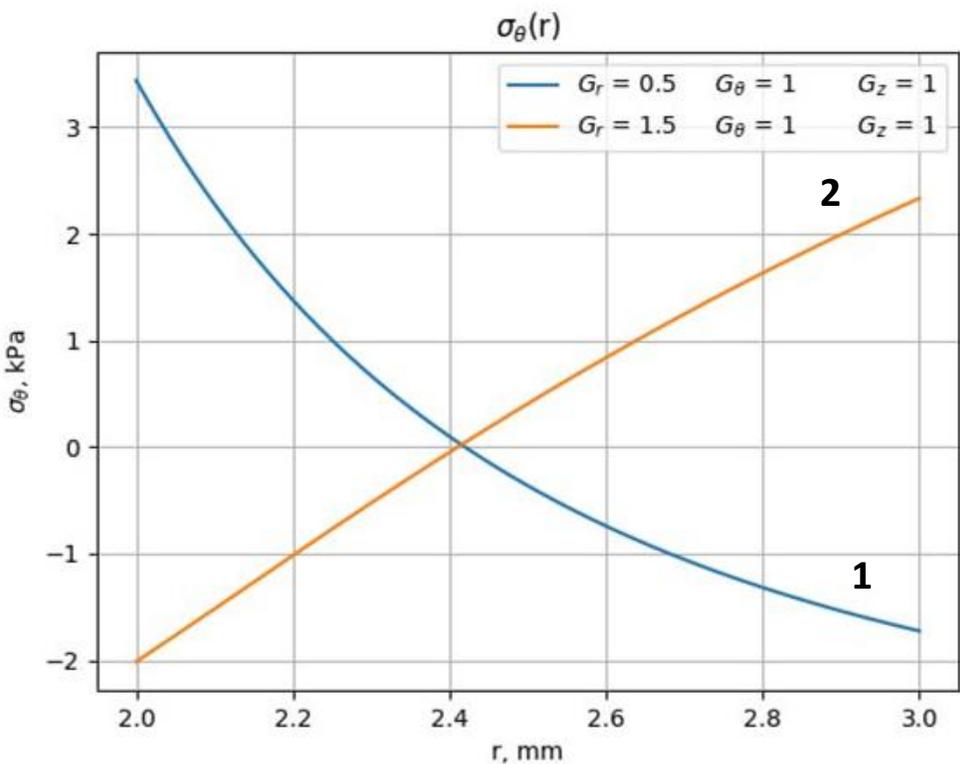
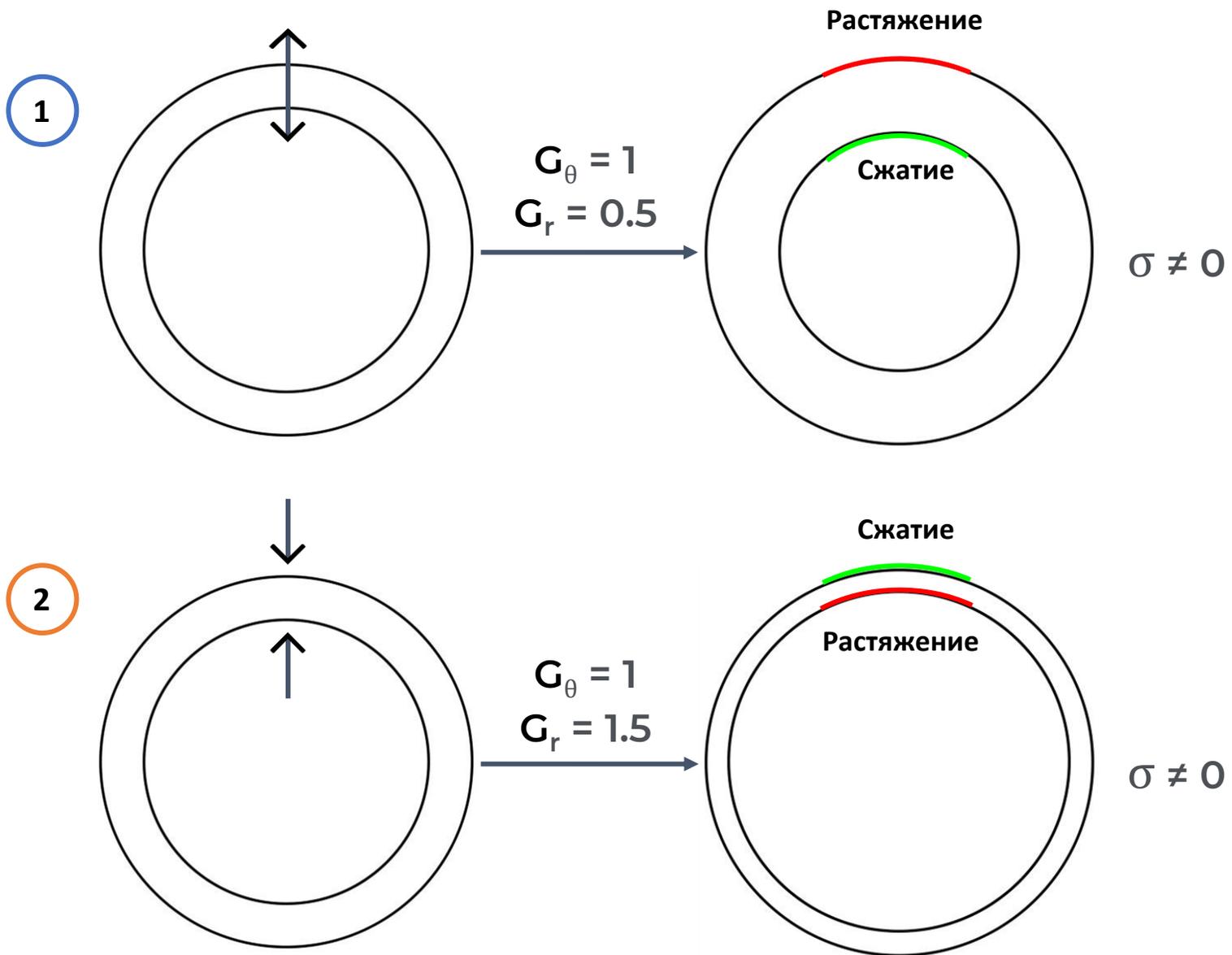
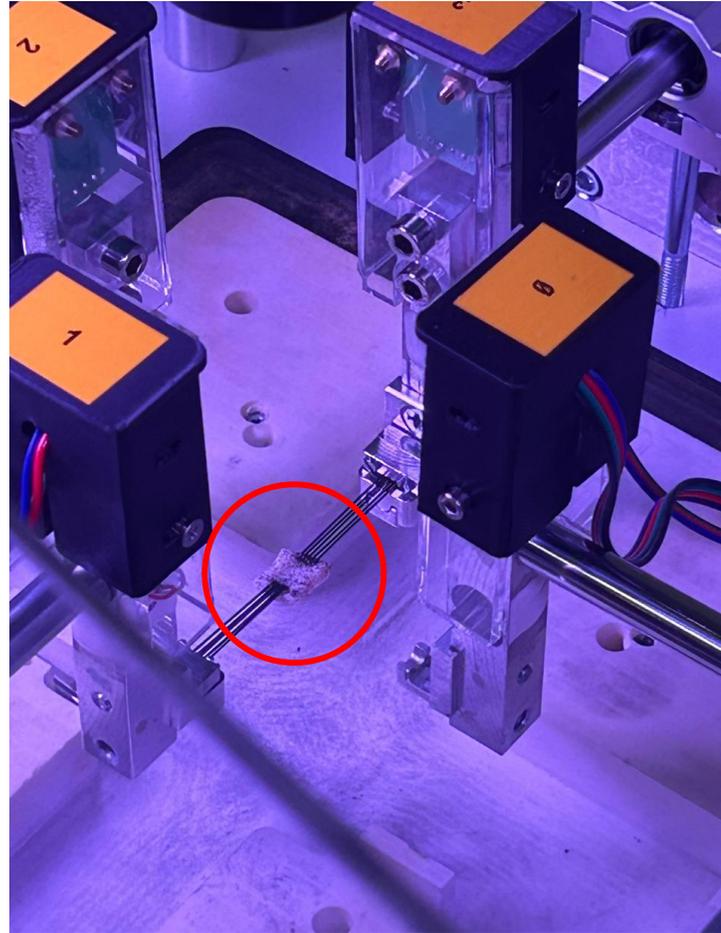


График зависимости окружных напряжений от радиуса при разных константах роста: постоянный диаметр и утолщение / утоньшение стенки сосуда

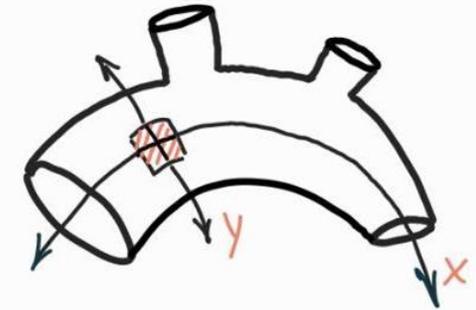


Задача 2.

Экспериментальное исследование



1. Объект исследования: Восходящий отдел аорты крупного рогатого скота

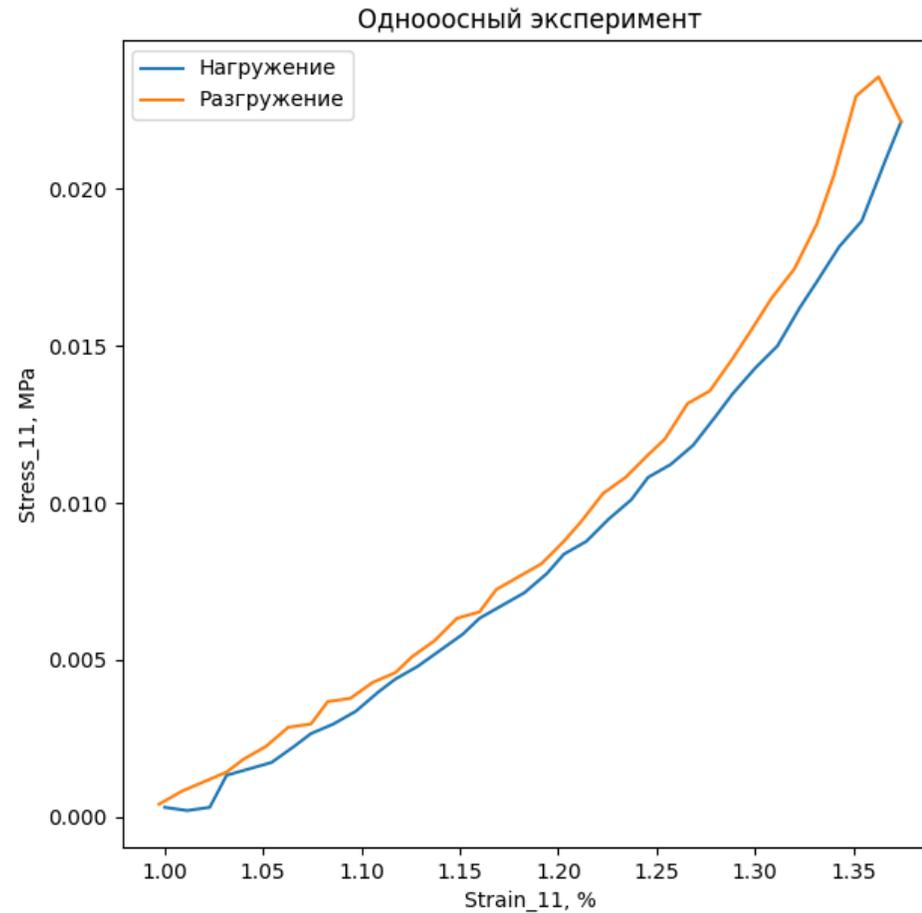


1. Раствор: 1:100 физраствор (неомид 15С) 4°C
1. Условия среды: 20°C
2. Геометрия образца: 7 мм × 7 мм × 1.93 мм
3. Скальпель Н4 лезвие 23
4. Вид растяжения: одноосное и двухосное растяжение, фиксатор грабельного типа, 2D, DIC (метод корреляции цифрового изображения)

Двухосная растягивающая машина (биостенд)

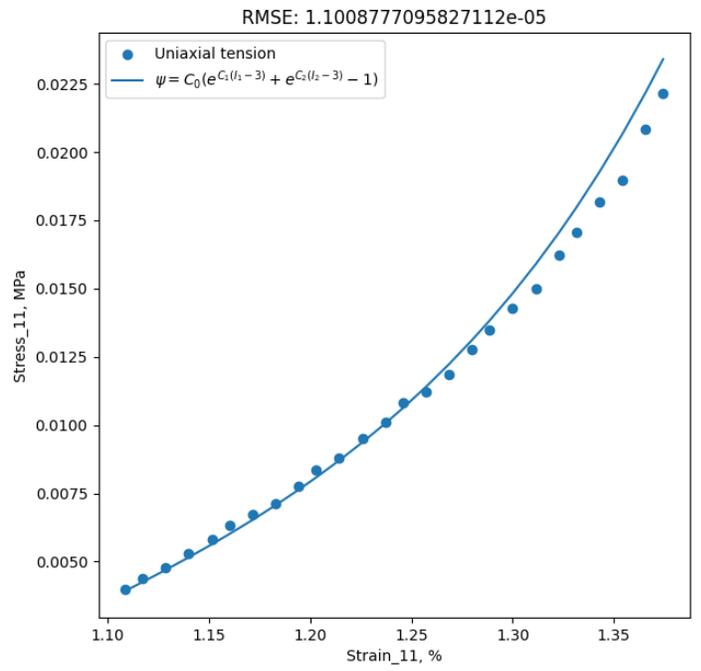
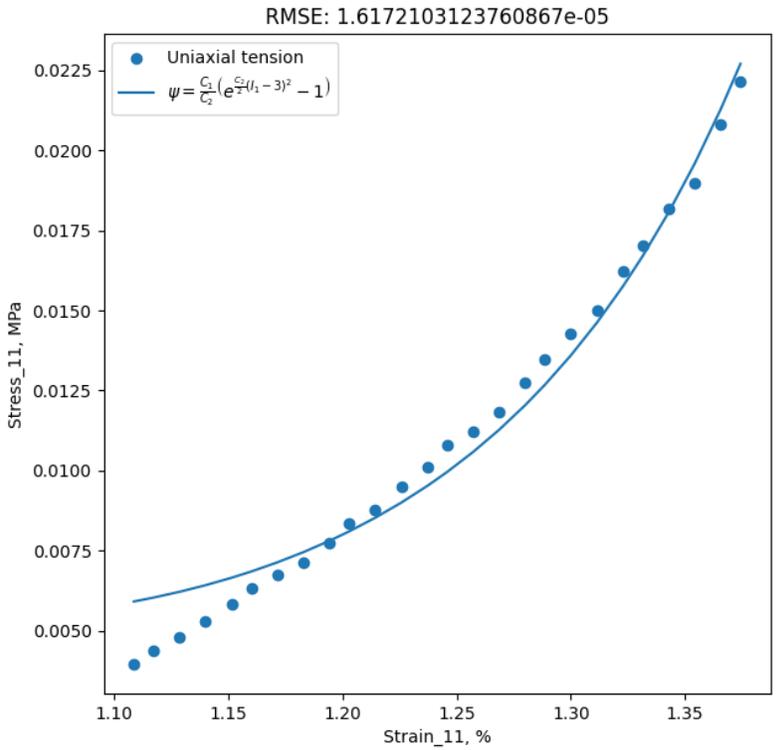
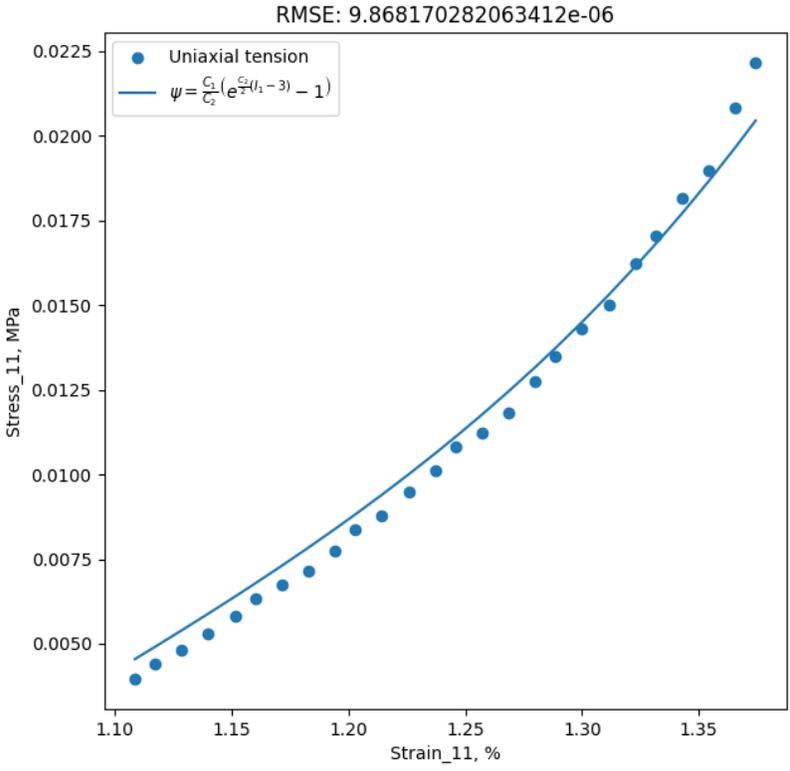
Решение 2.

Одноосное растяжение



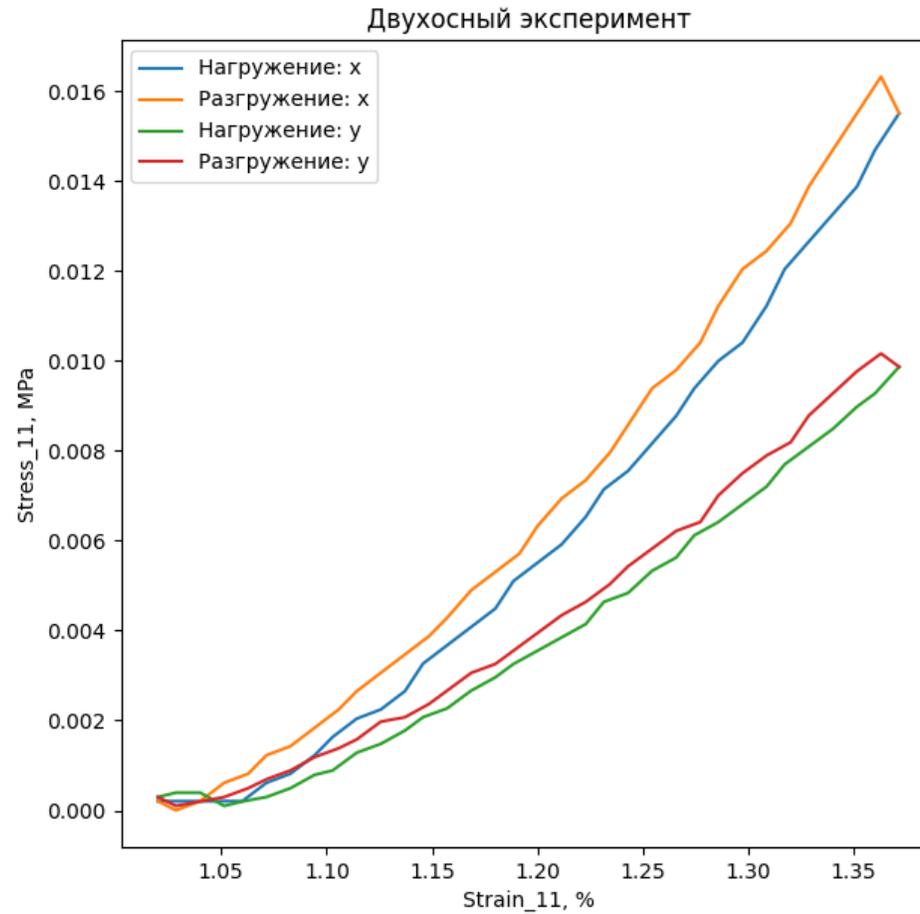
Решение 2.

Предсказания по одноосному эксперименту



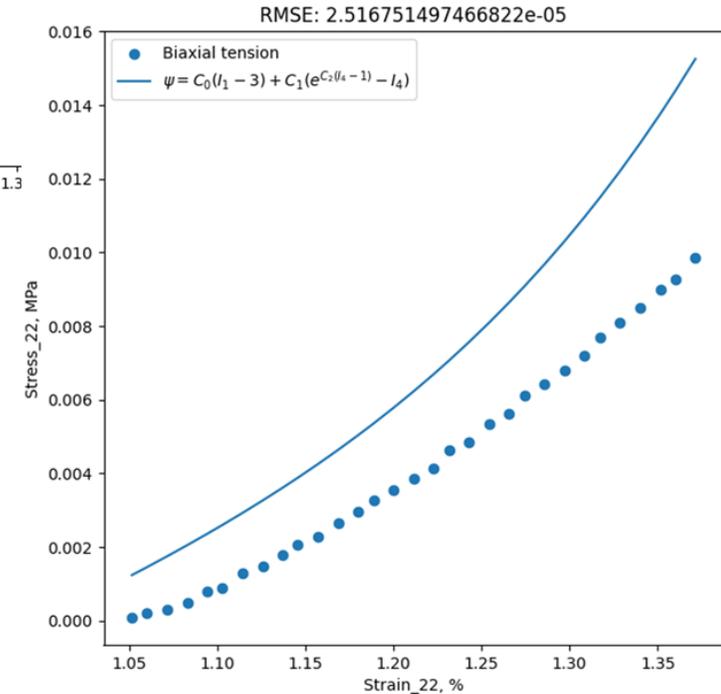
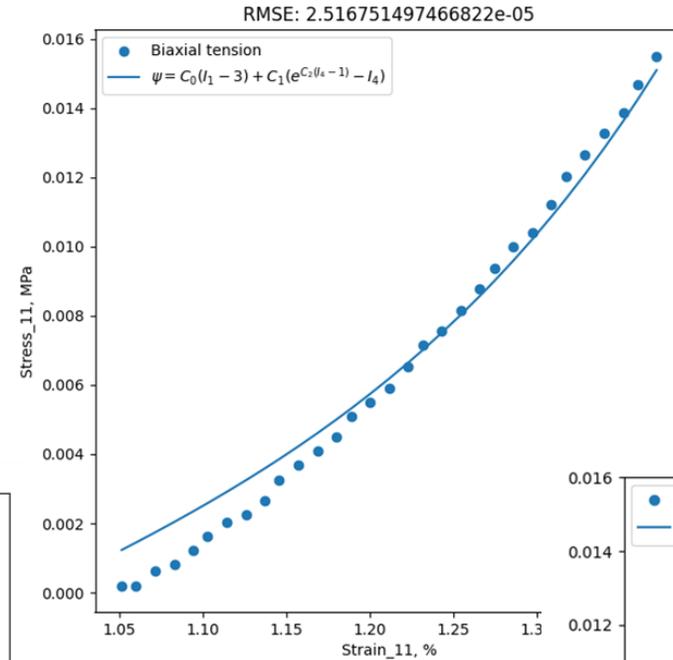
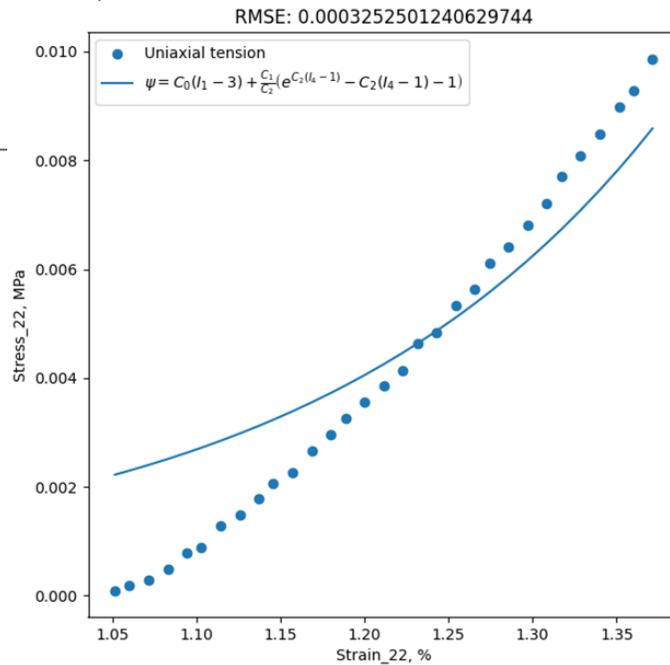
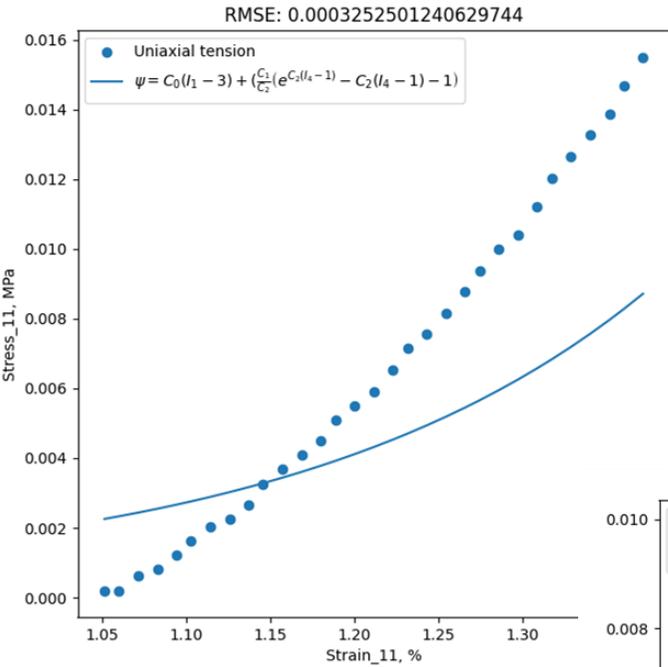
Решение 2.

Двухосное растяжение



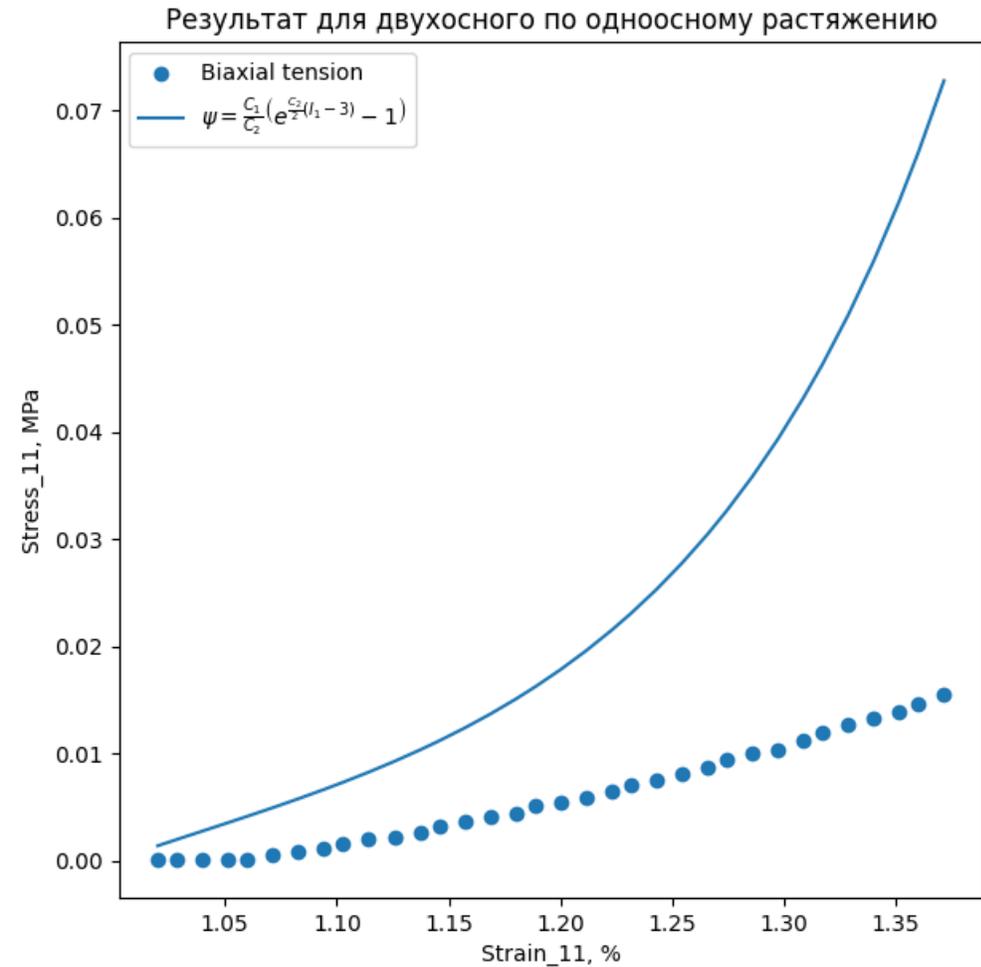
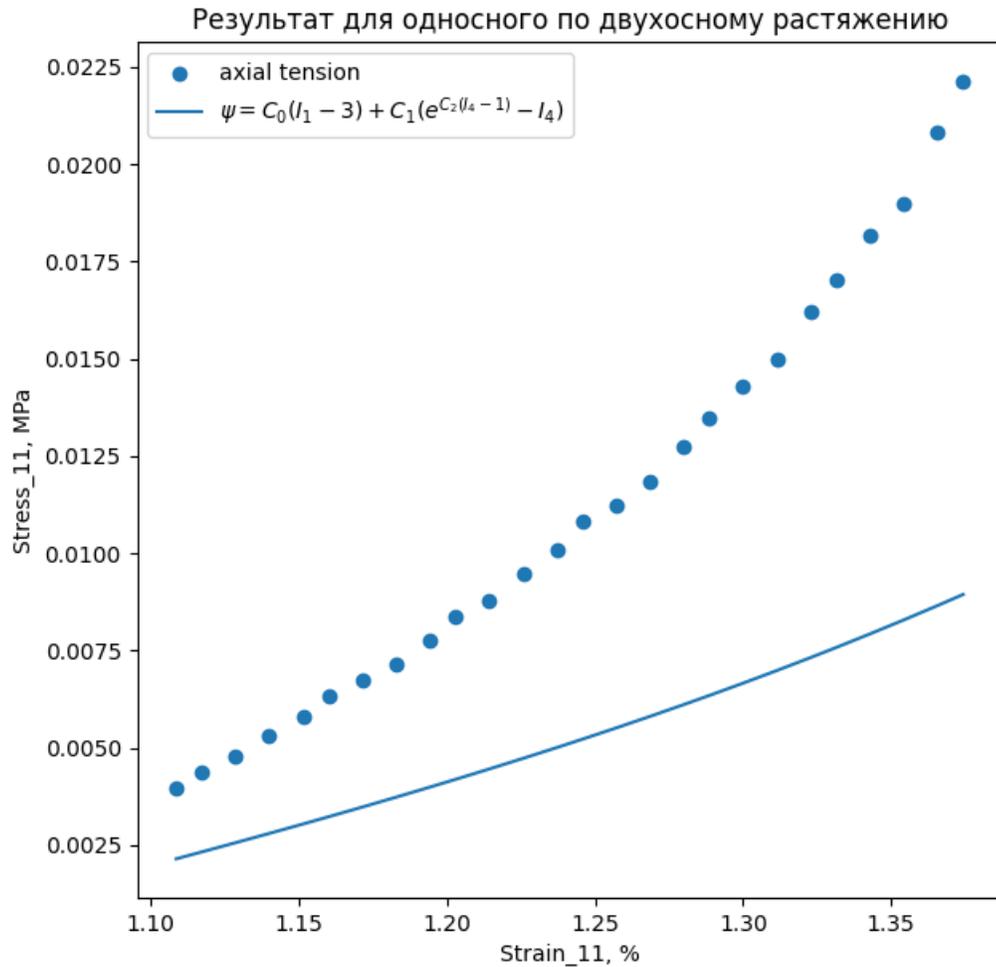
Решение 2.

Предсказания по двухосному эксперименту



Решение 2.

Результаты: подгонка



Задача 3.

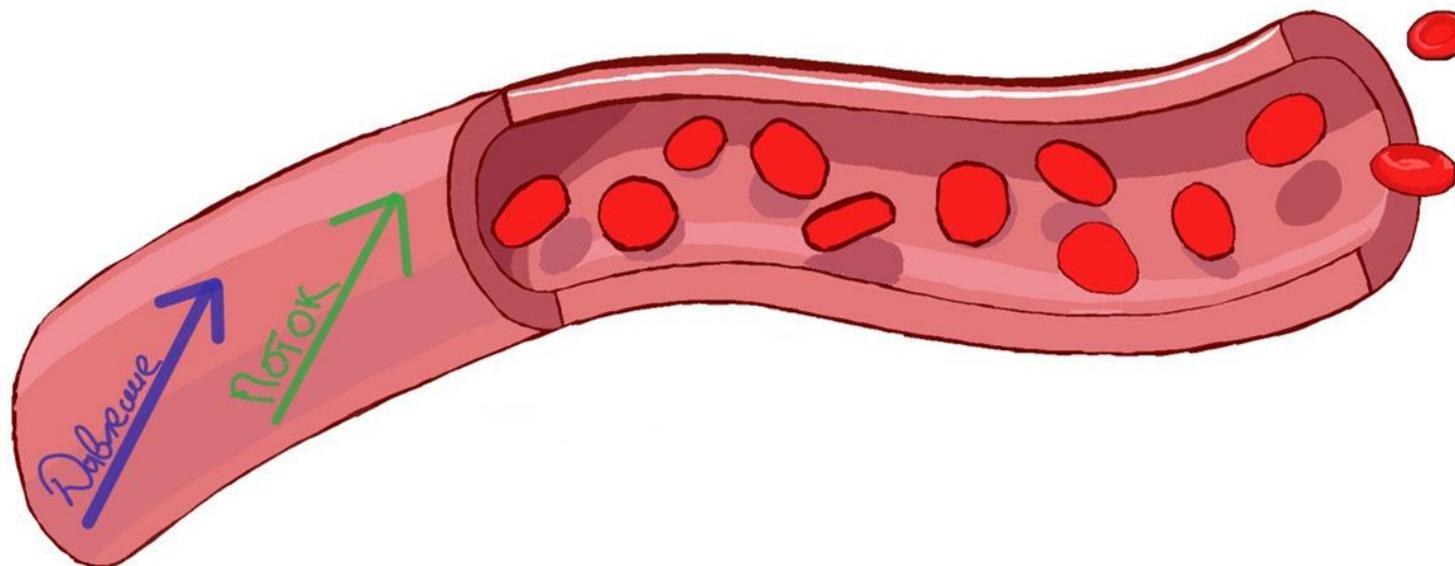
Адаптация и рост артерии

При взрослении: Q
 P_{bl}

Q_m →
 P_m →

$$P_{bl}(t) = P_m(1 - e^{-\beta P t}) + \Delta P_{bl}(1 - e^{-\beta t})H(t - t_1)$$

$$Q(t) = Q_m(1 - e^{-\beta Q t}) + \Delta Q(1 - e^{-\beta t})H(t - t_1)$$



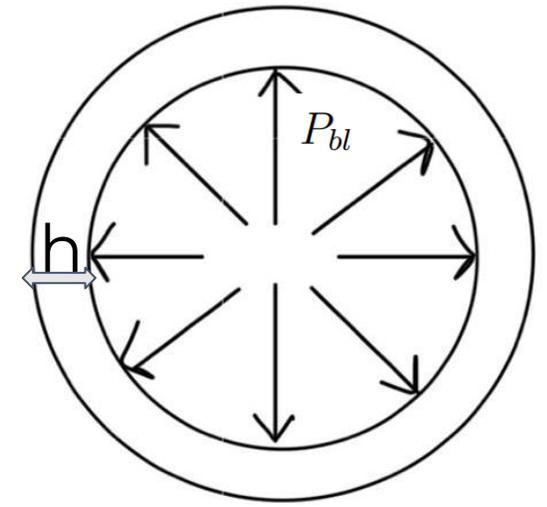
Задача 3.

Адаптация и рост артерии

Законы роста:

$$\dot{G}_r = c_r(\hat{\sigma}_\theta - \hat{\sigma}_{\theta 0})G_r \quad P_{bl} \text{ постоянно повышено} \longrightarrow h \uparrow$$

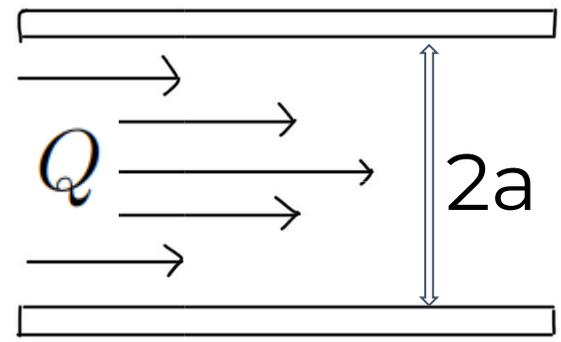
$$\Rightarrow \hat{\sigma}_\theta(t) \longrightarrow \hat{\sigma}_{\theta 0}$$



$$\dot{G}_\theta = c_\tau(\hat{\tau} - \hat{\tau}_0)G_\theta + c_\theta(\hat{\sigma}_\theta - \hat{\sigma}_{\theta 0})G_\theta$$

$$Q \uparrow \longrightarrow a \uparrow$$

$$\Rightarrow \hat{\tau}(t) \longrightarrow \hat{\tau}_0$$



- Нахождение a и λ^* :

$$\begin{cases} \int_a^b (\bar{\sigma}_\theta - \bar{\sigma}_r) \frac{dr}{r} = P_{bl}(t), \\ \int_a^b (2\bar{\sigma}_z - \bar{\sigma}_r - \bar{\sigma}_\theta) r dr = 0 \end{cases}$$

- Нахождение решения задачи:

$$a(t)/h(t), a(t)/a_0, \hat{\sigma}_\theta(t), \hat{\tau}(t), t \in [0, 40]; \sigma_\theta(R) \text{ при } t = 1, 5, 20$$

- * Интегральные уравнения решались с помощью замены на квадратурную формулу Котеса:

$$\int_a^b f(x) dx \approx \frac{h}{3} \left[f(x_0) + 2 \sum_{j=1}^{N/2-1} f(x_{2j}) + 4 \sum_{j=1}^{N/2} f(x_{2j-1}) + f(x_N) \right]$$

ИТОГИ

1. В результате решения первой задачи были найдены остаточные напряжения, вызванные неравномерным ростом сосуда при постоянном росте
2. Был проведён расчёт остаточных напряжений с учётом давления крови и законов роста
3. Были найдены упругие потенциалы для двух экспериментов. Потенциалы не совпадают, поскольку второй эксперимент был равно-двуосный

Для решения прикладных задач необходимо усложнение модели (учет материала, геометрии и др.)

Спасибо за внимание!

Команда:

Уразова К.М.

Ельчинов Е.С.

Тимкина Т.Д.

Беркман Д.А.

Щетинина А.В.

Ермаков С.Р.

Сорокина С.А.

Бочарова В.А.

Никишин А.П.

Вождаева Ю.С.

Медведев А.С.

Щудро Т.А.