пермский политех

ПГМУ имени академика Е. А. Вагнера

XIV конференция «Математические модели и численные методы в биологии и медицине»
Москва, ИВМ РАН, 1-3 ноября 2022

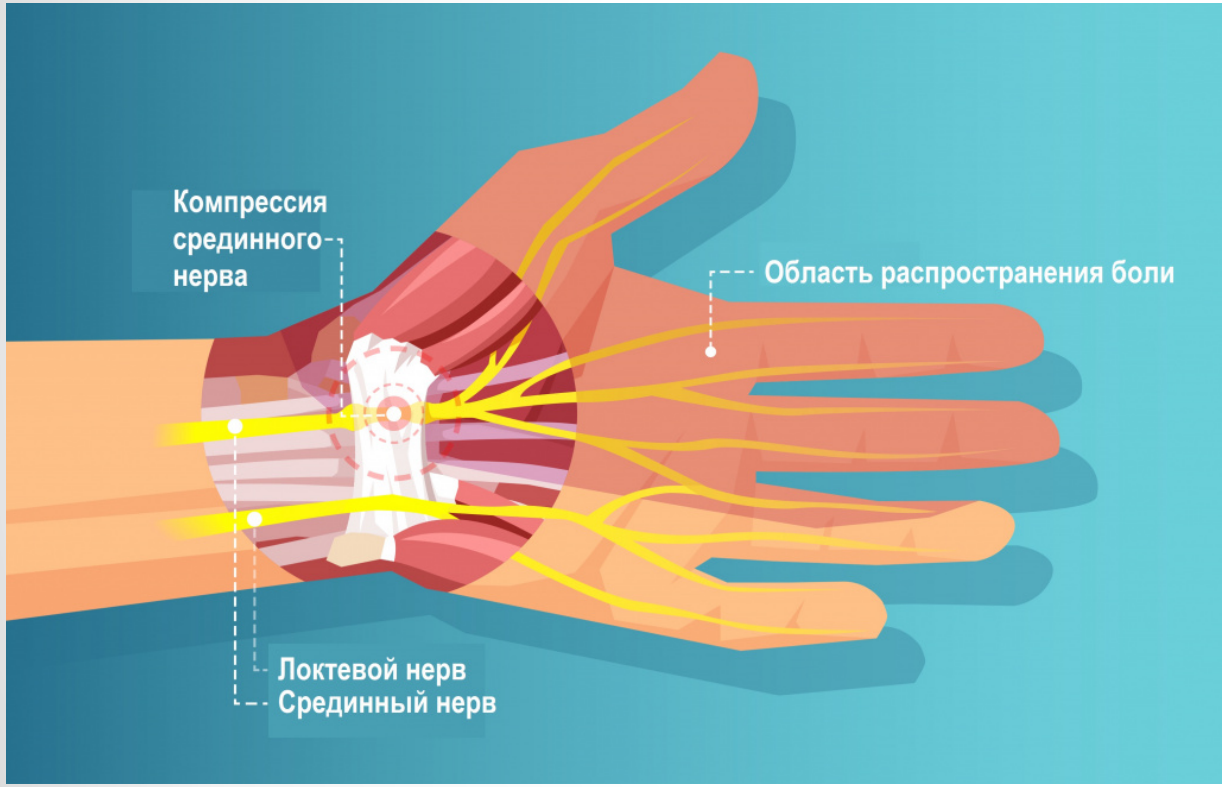
Оценка компрессии срединного нерва, вызванное сгибанием пальцев кисти: In silico моделирование

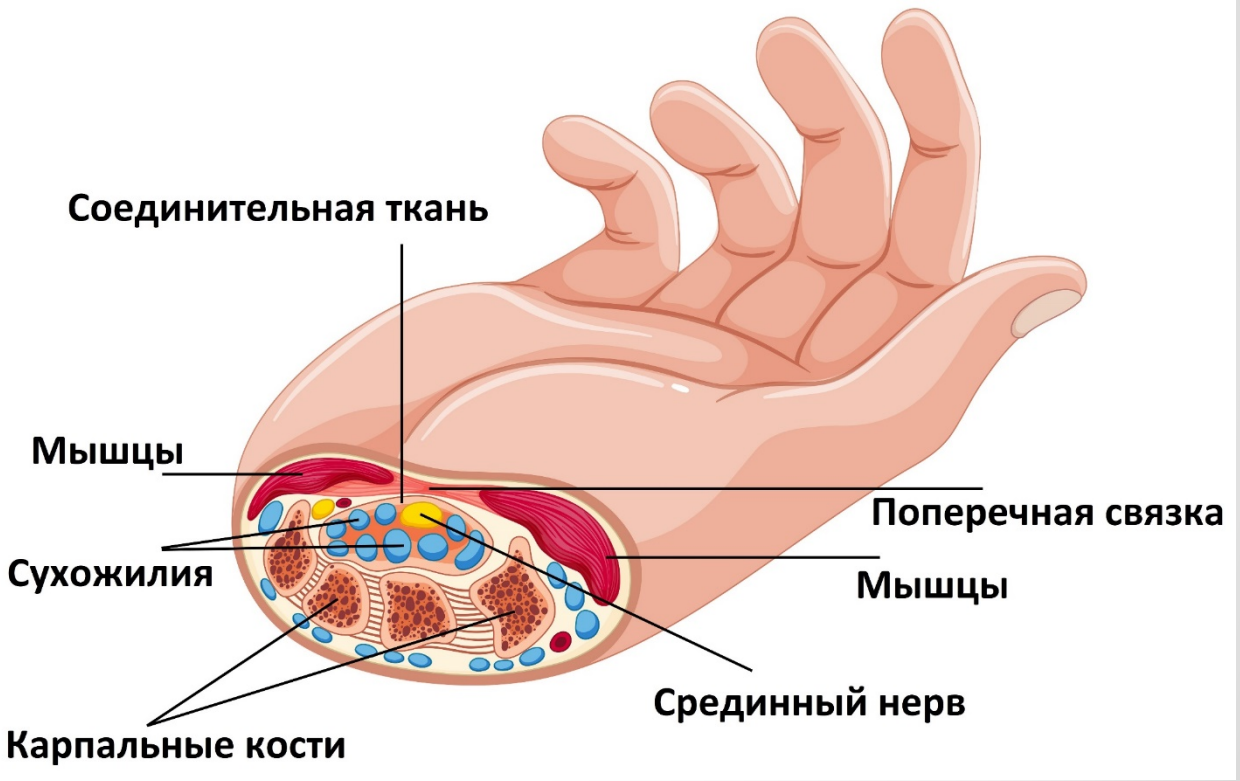
С. Е. Пешин[1] А. Г. Кучумов[1] Ю. В. Каракулова[2]

[1]ПНИПУ, [2]ПГМУ

Москва 2022

Карпальный туннельный синдром
Синдром запястного канала



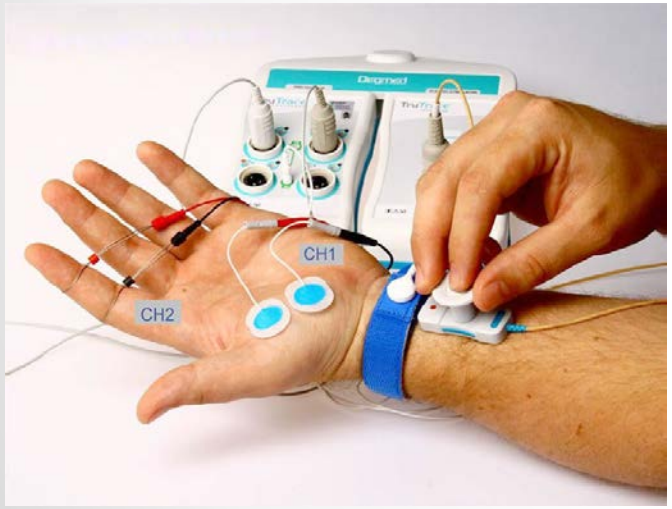


Актуальность

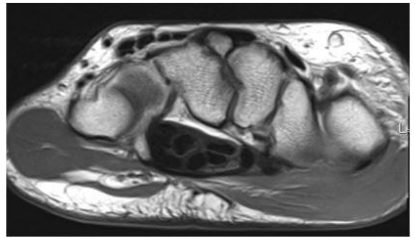
- Чаще страдают лица наиболее трудоспособного возраста – 30-50 лет
- 23–40% всех заболеваний периферической нервной системы
- 50–90% всех туннельных невропатий
- 150 – 276 на 100 тыс. населения
- Заболеваемость среди женщин в 3–6 раз выше

Диагностика

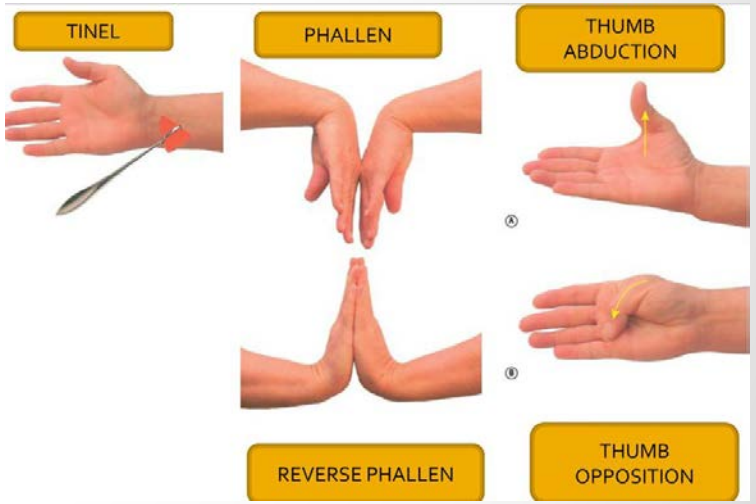
Проводимость



Визуализация



Тесты



Содержательная постановка

- Рассматривается запястный канал, срединный нерв, сухожилия, связки, карпальные кости и фаланги
- Необходимо разработать модель, позволяющую рассчитывать компрессию срединного нерва, при сгибании пальцев для конкретного пациента.

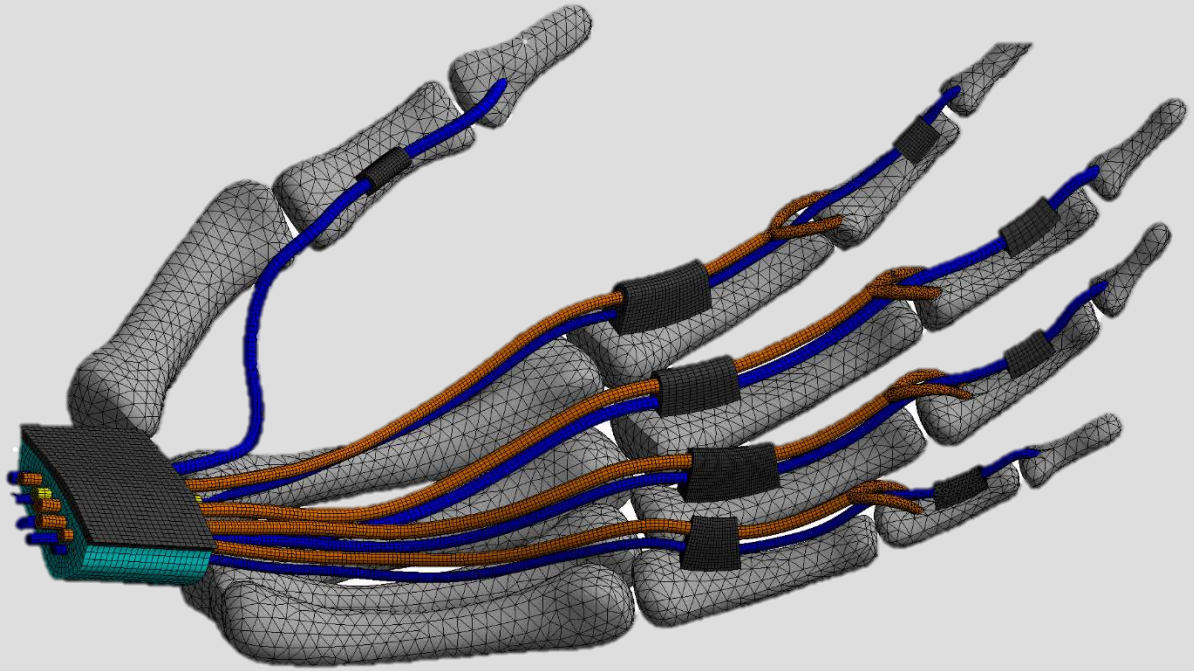
Срединный нерв, связки, сухожилия, соединительная ткань	Гиперупругие (Модель Огдена)
Кости	Упругие

Модель должна позволять:

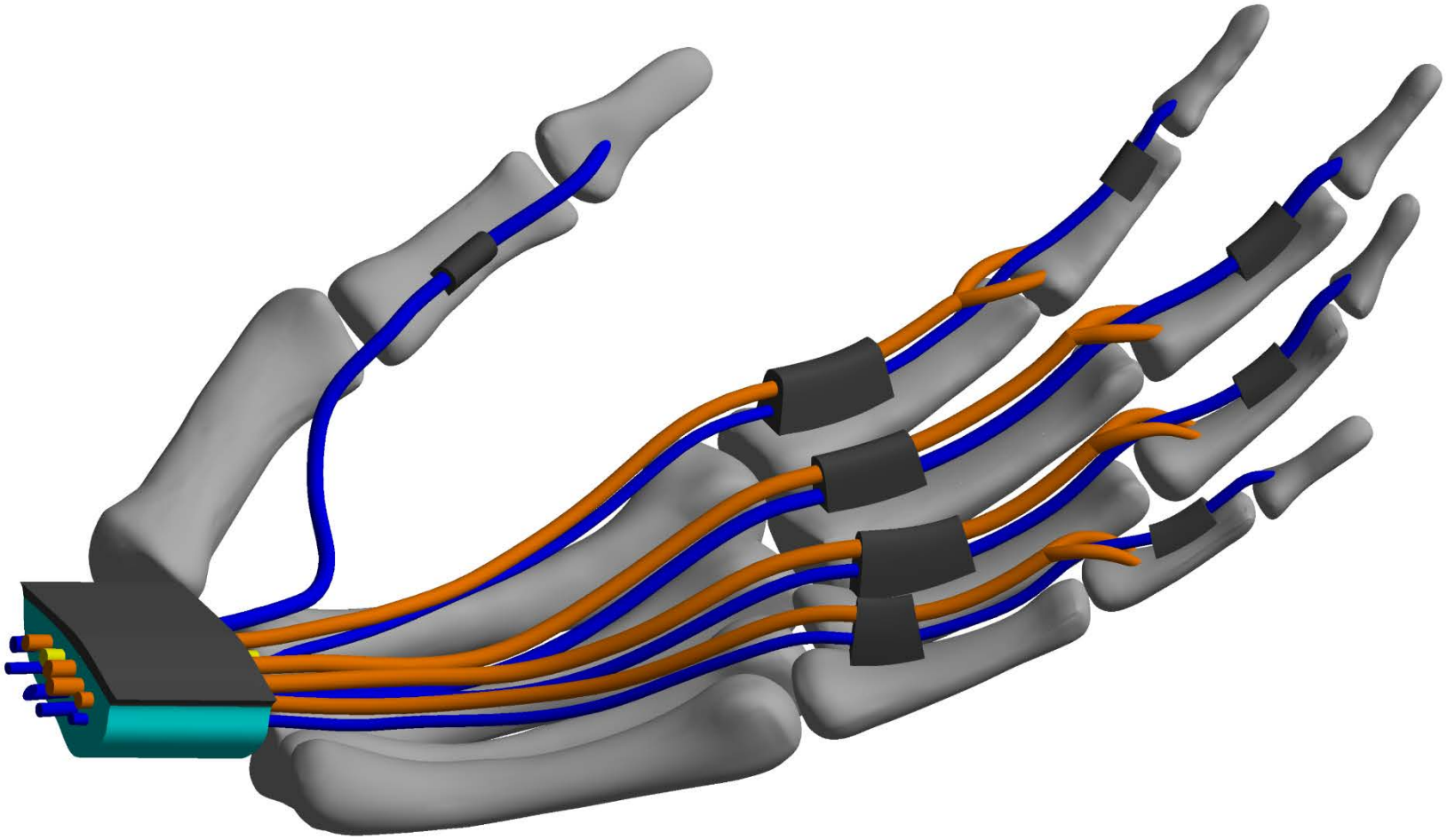
1. Вычислять давление, оказываемое на нерв при сгибании пальца.
2. Учитывать взаимодействие сухожилий, фаланг, карпальных костей, соединительной ткани и связок

Исходные данные:

1. КТ кисти
2. Свойства тканей (литература)
3. Угол поворота фаланг
4. Перемещение сухожилий



Геометрия полученной модели



Костная ткань
Связки
Сухожилия
Срединный нерв
Субсиновиальная соединительная ткань

Математическая постановка задачи

Кости, упругость

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho \ddot{u}_i \quad (1)$$

Мягкие ткани, гиперупругость (Огден)

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right) \quad (3)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}}, \; W = \frac{\mu_i}{\alpha_i}\left(\overline{\lambda_1^{\alpha}} + \overline{\lambda_2^{\alpha}} + \overline{\lambda_3^{\alpha}} - 3\right) \quad (4,5)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}\left(C_{ij} - I_{ij}\right), \quad I_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j \\ 0, & \text{при } i \neq j \end{cases} \quad (6)$$

$$u_i\big|_{\partial V} = u_i^0$$

$$u_i\big|_{t=0} = 0, \; \dot{u}_i\big|_{t=0} = 0$$

W – потенциал энергии деформации

α и μ - гиперупругие коэффициенты

λ_i – три главных относительных удлинения.

Механические свойства тканей

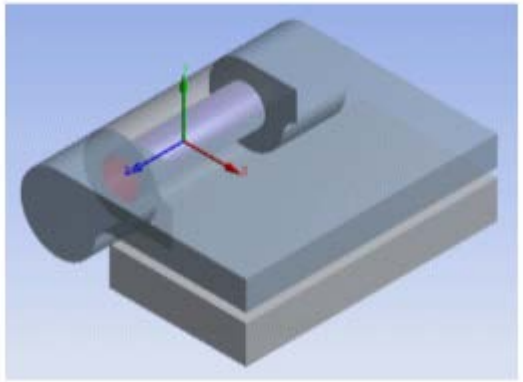
	Гиперупругость		Источник
Ткань	**α**	**μ [Па]**	
Связки	10,9	24 900	Main E.K. et al. *Journal of Biomechanics* (2011)
Сухожилия	8,89	37 600	Main E.K. et al. *Journal of Biomechanics* (2011)
ССТ	4,51	12,5	Matsuura Y. et al. *Journal of Biomechanics* (2016)
Срединный нерв	6,5	12 900	Main E.K. et al. *Journal of Biomechanics* (2011)
	Упругость		
	ν	**E [МПа]**	
Кости	0,3	10 000	Pistoia W. et al. *Bone* (2002)

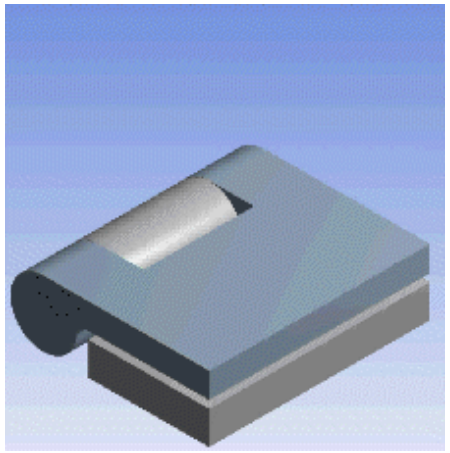
Соединение (*joint*) типа *Revolute*

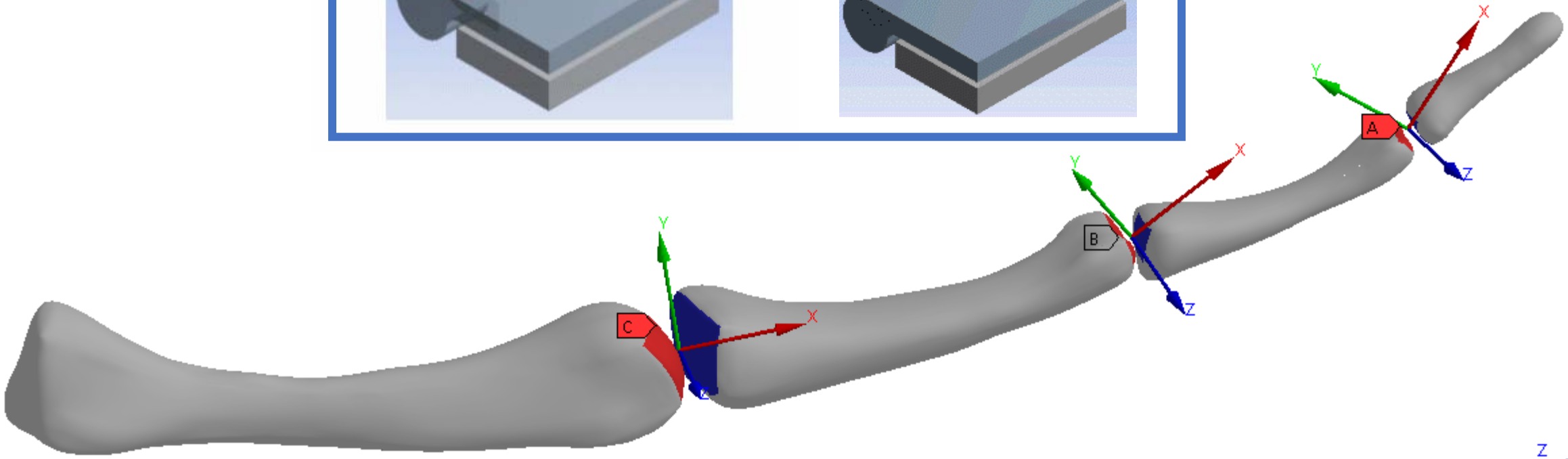
A Revolute - F3\Bone2 To F3\Bone1
B Revolute - F3\Bone3 To F3\Bone2
C Revolute - F3\Bone4 To F3\Bone3

Constrained degrees of freedom:

UX, UY, UZ, ROTX, ROTY

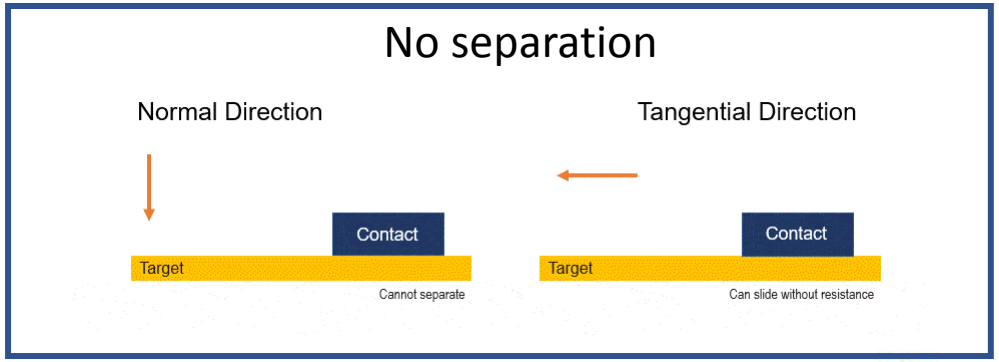


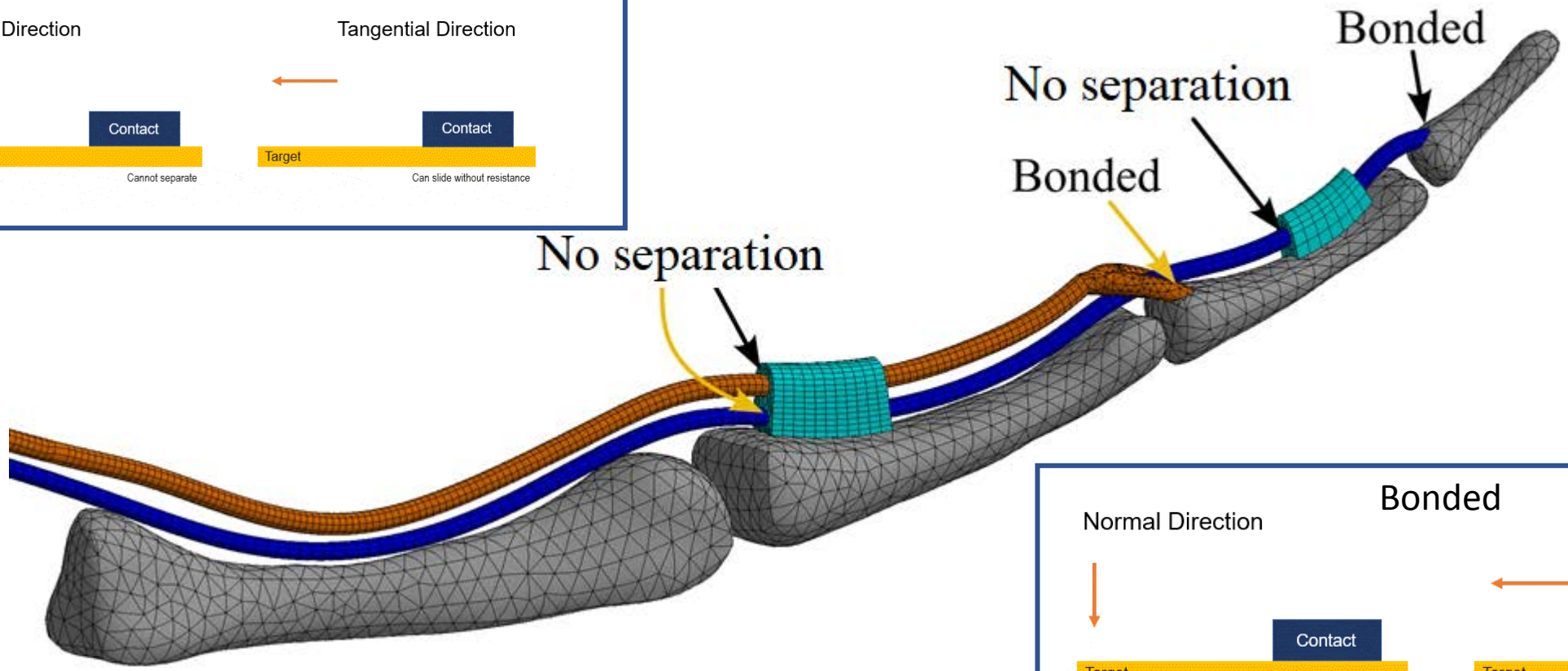


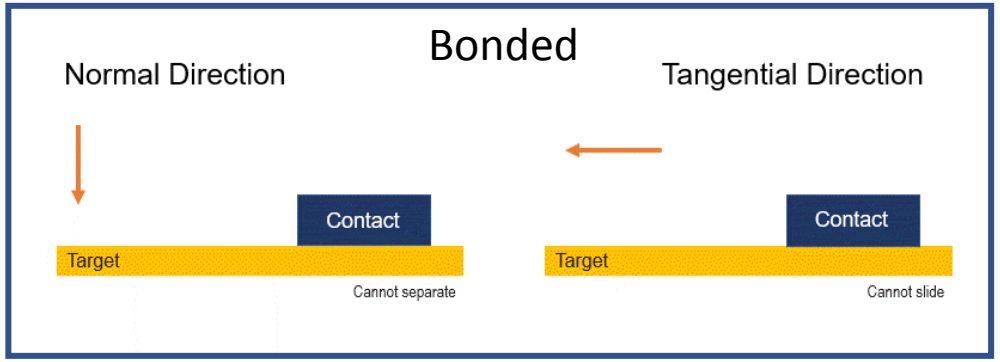


0,00 25,00 50,00 (mm)
12,50 37,50

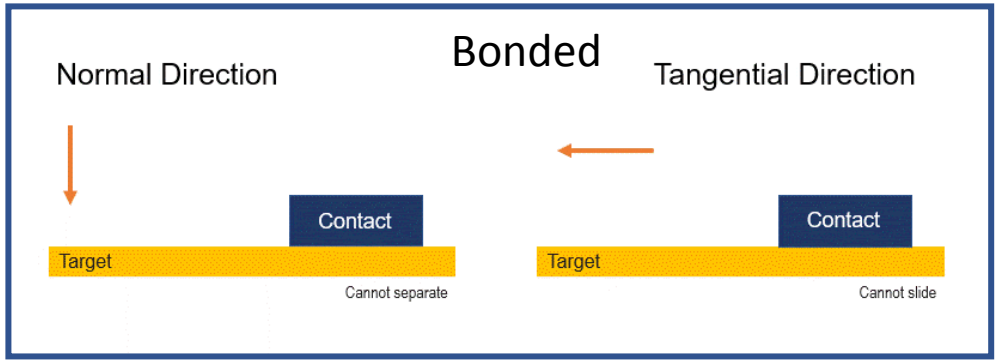
Контактное взаимодействие

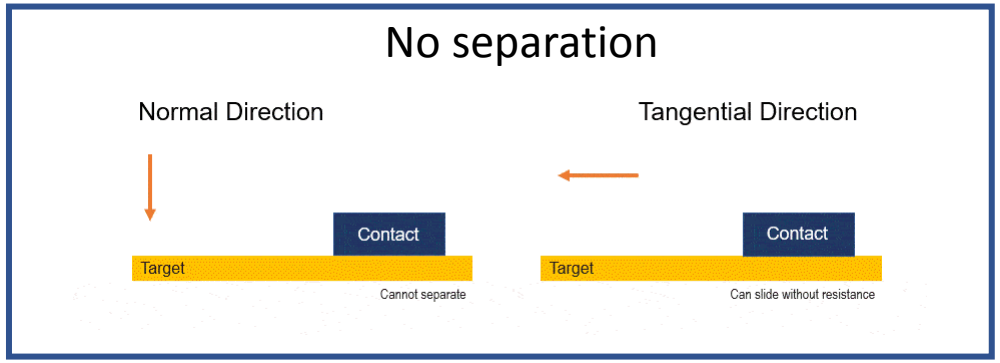


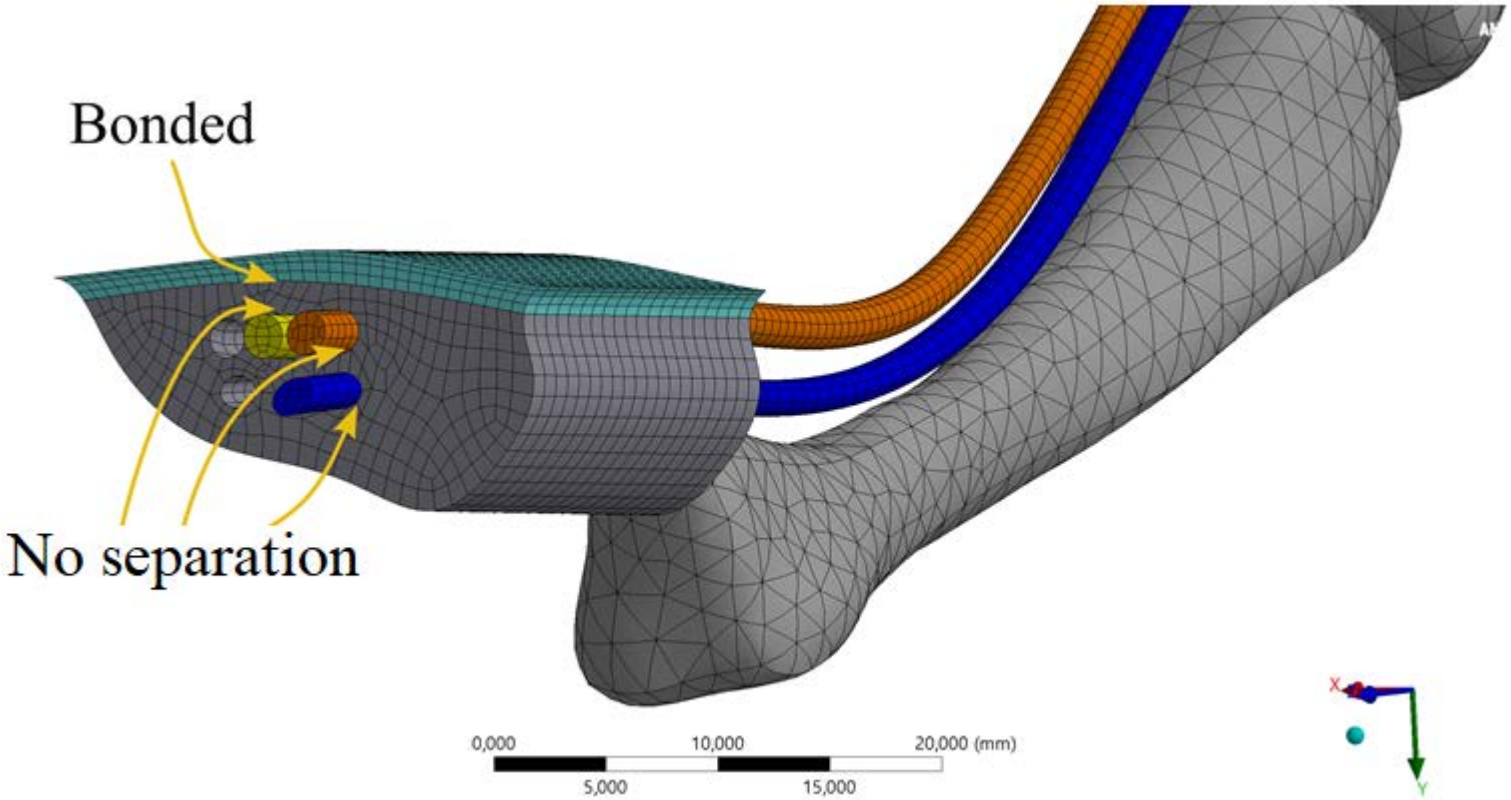




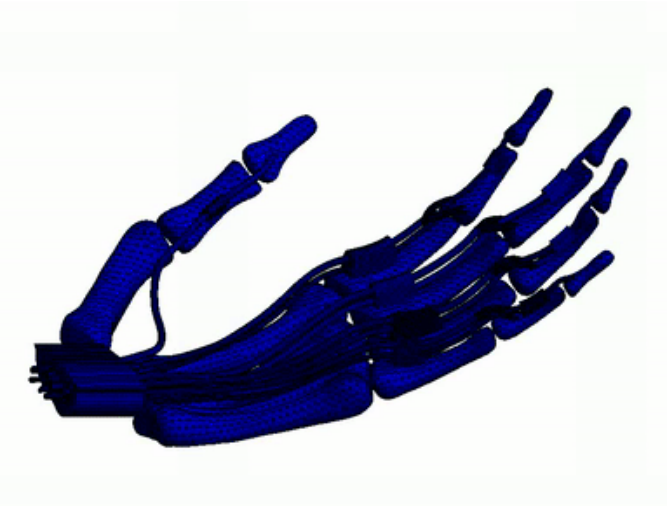
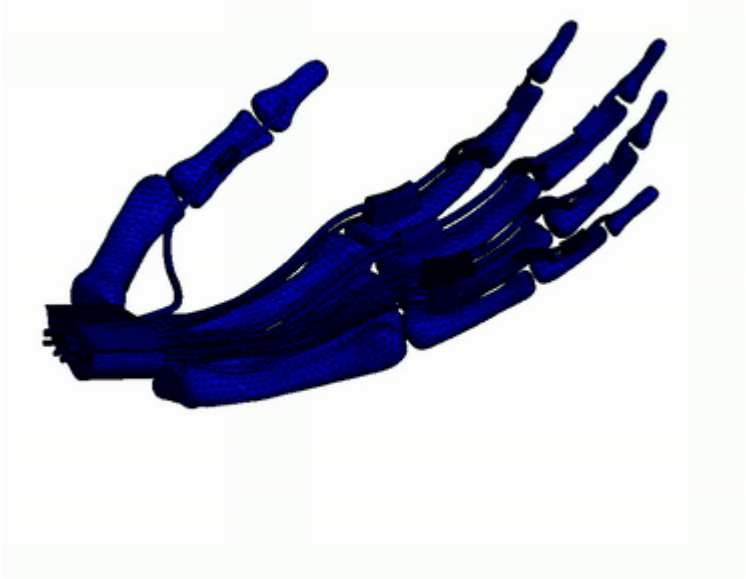
Контактное взаимодействие



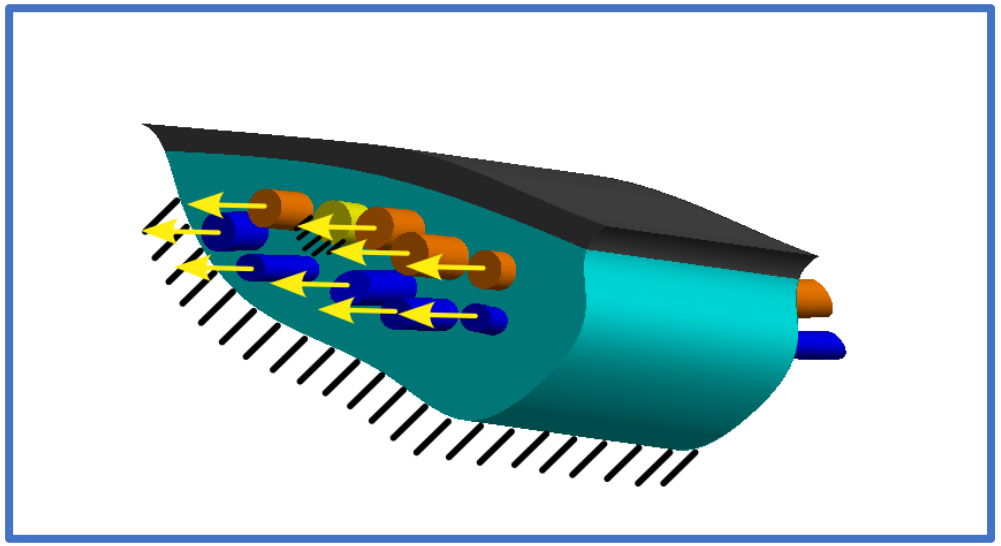


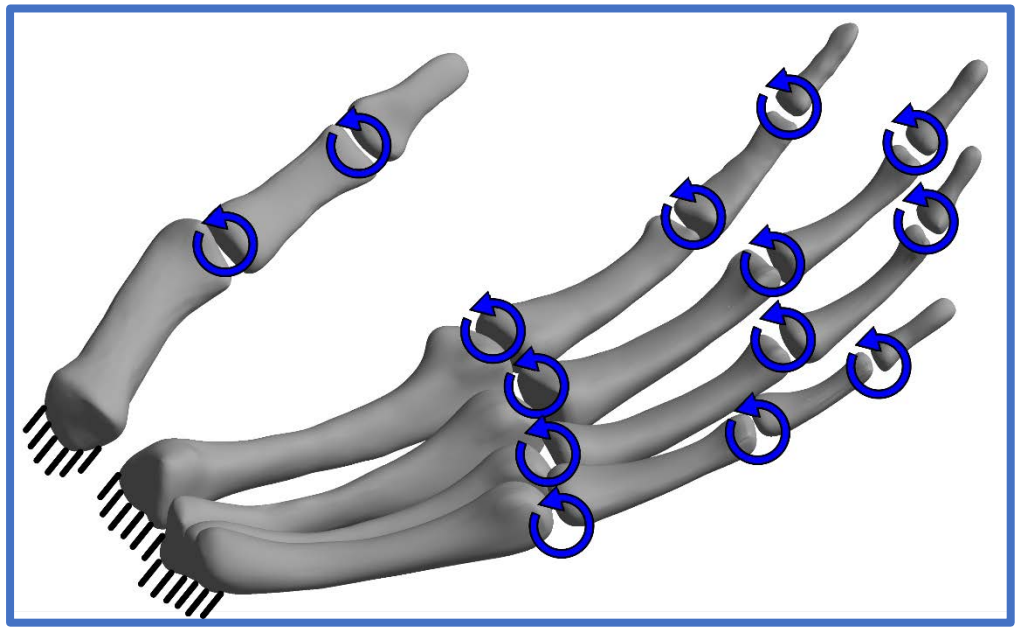


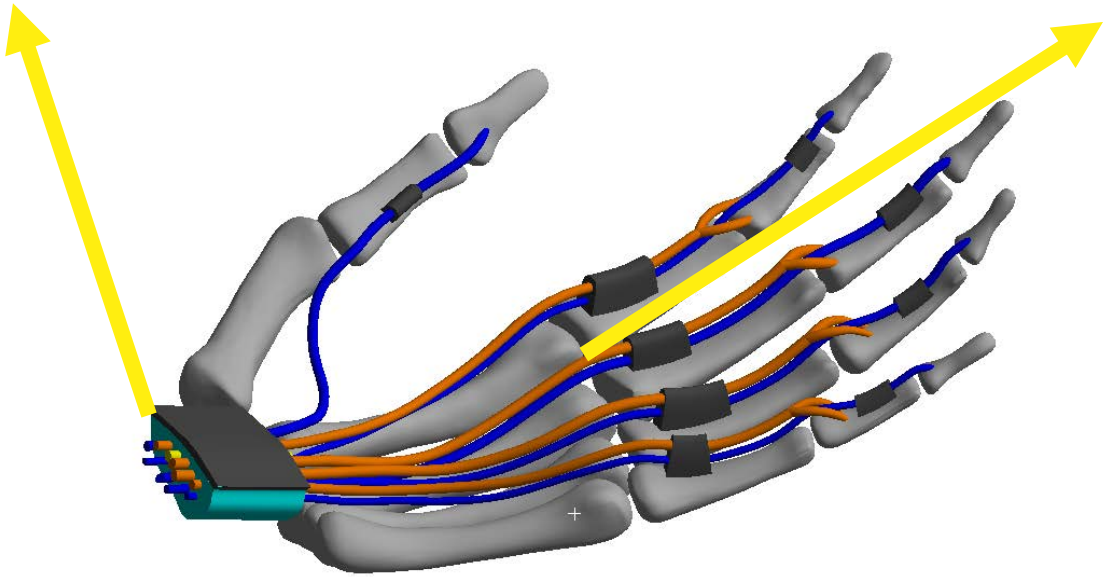
Задачи

Определить компрессию срединного нерва при:		
Задача 1	Задача 2	Задача 3
сгибании пальцев	разгибании кисти	сгибание пальцев и разгибание кисти
		

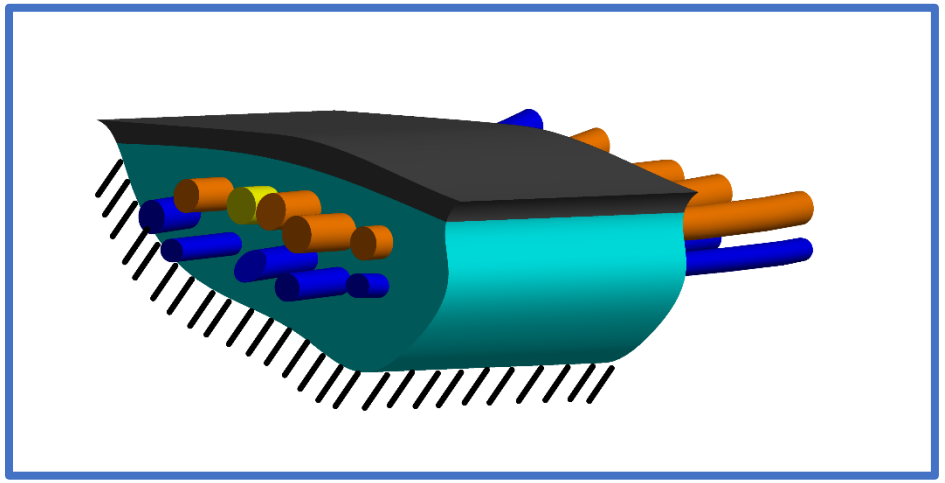
Граничные условия (Задача 1)

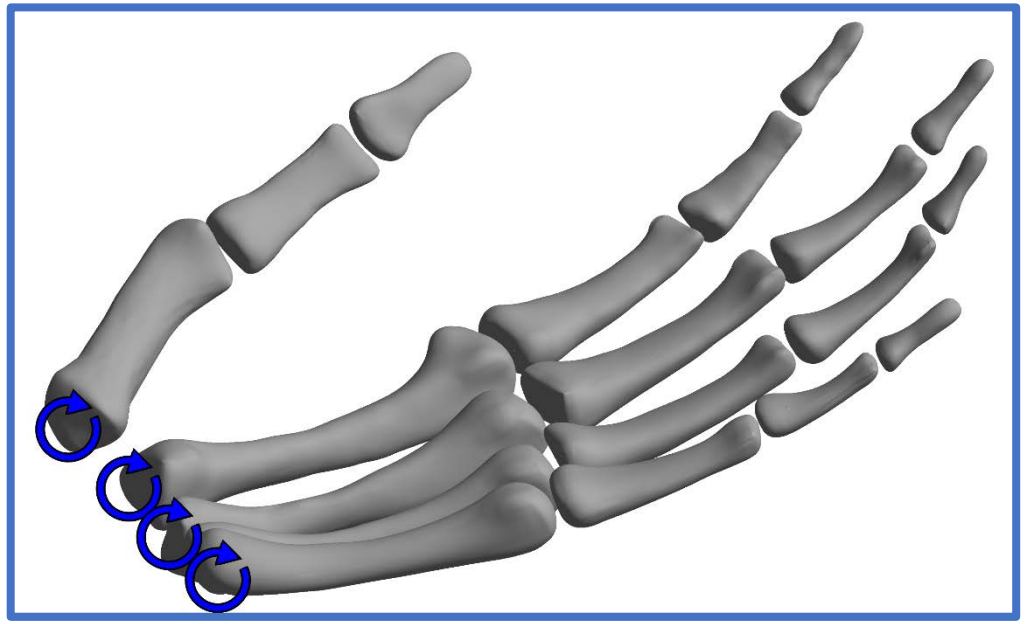


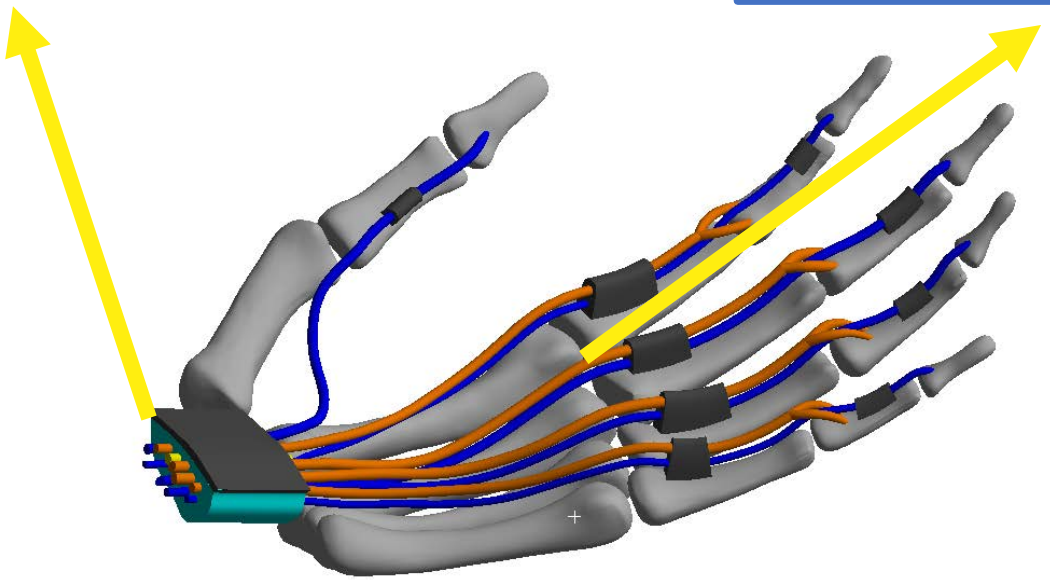




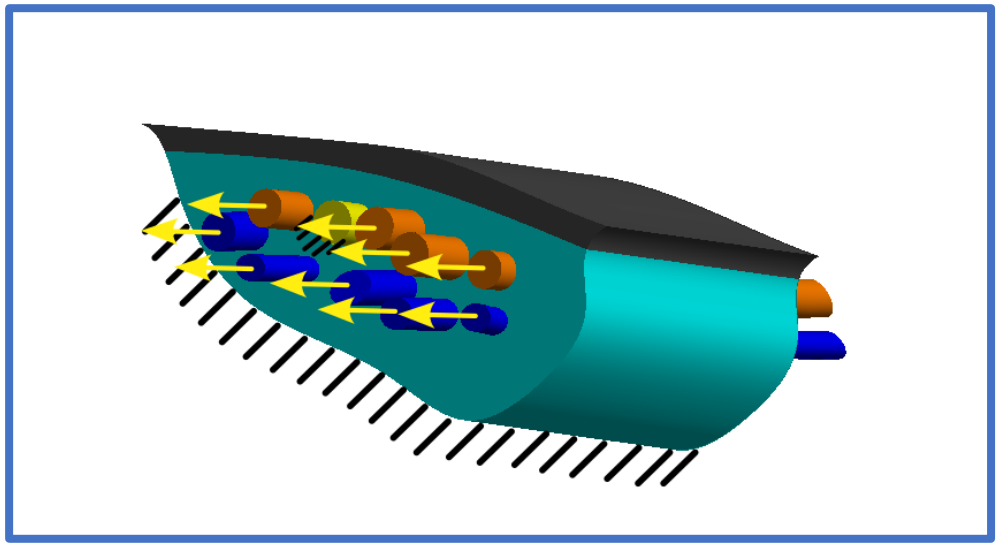
Граничные условия (Задача 2)

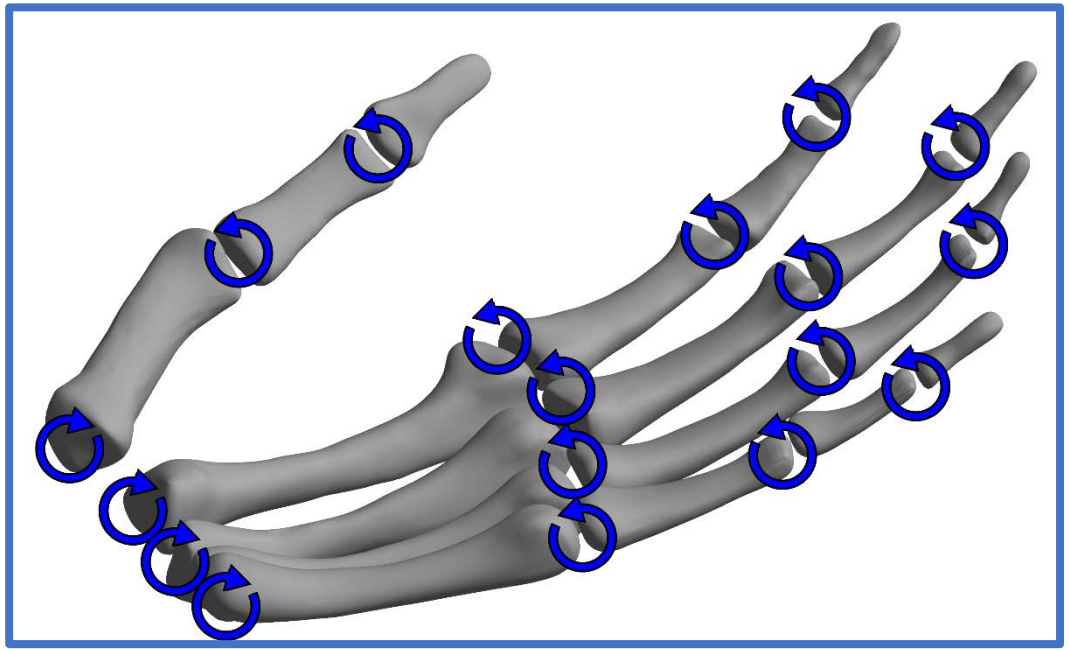


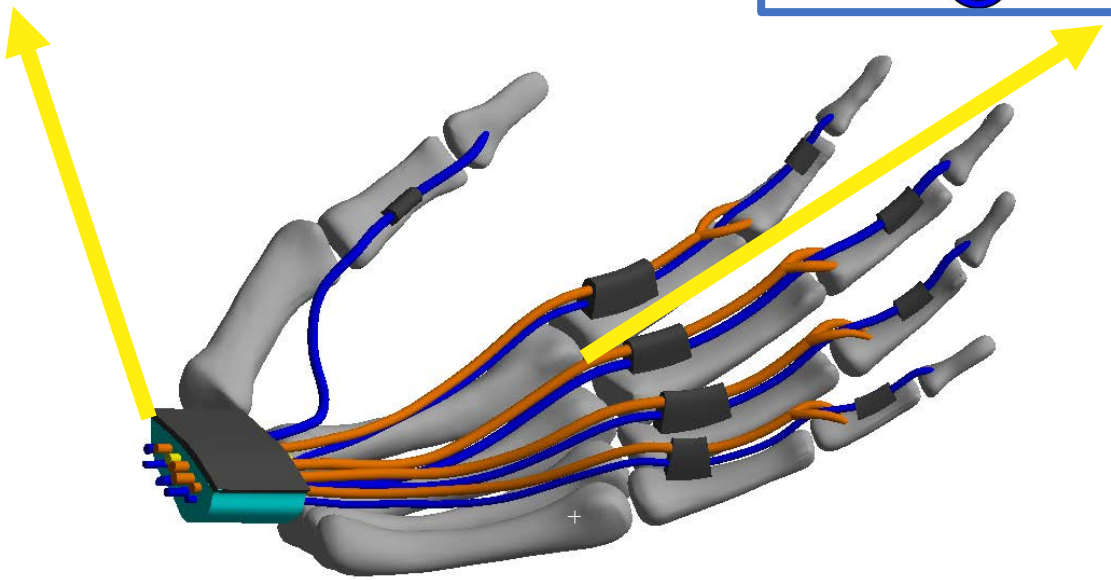




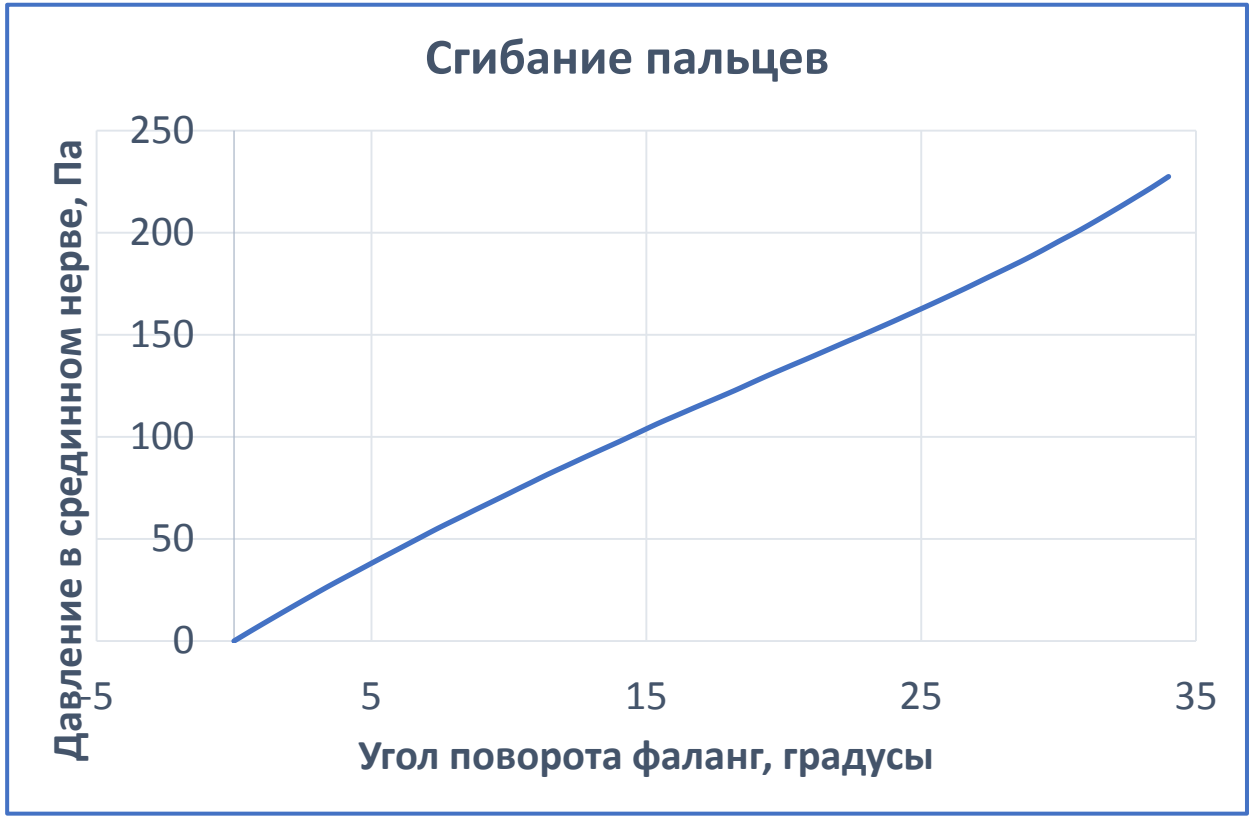
Граничные условия (Задача 3)

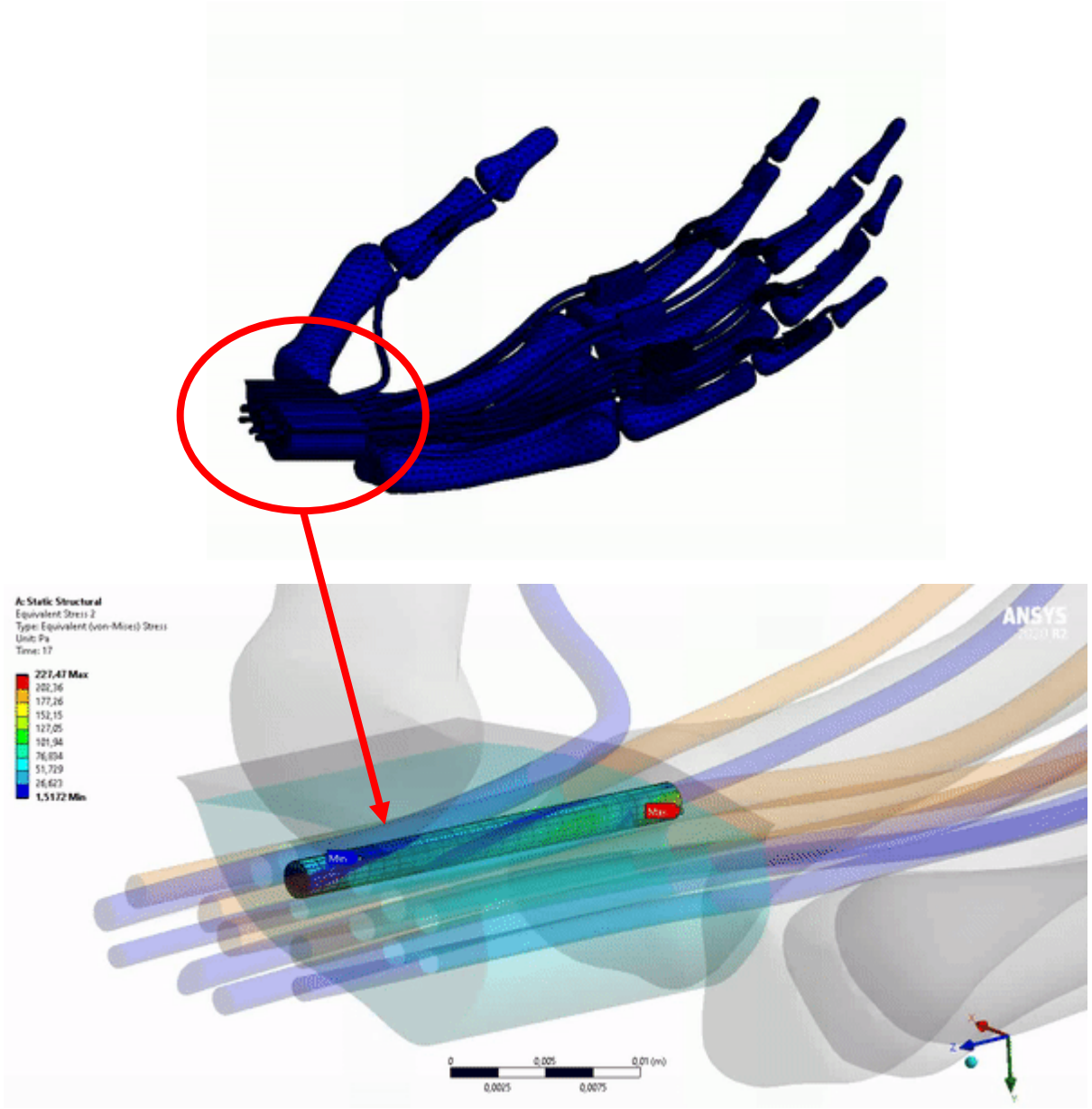




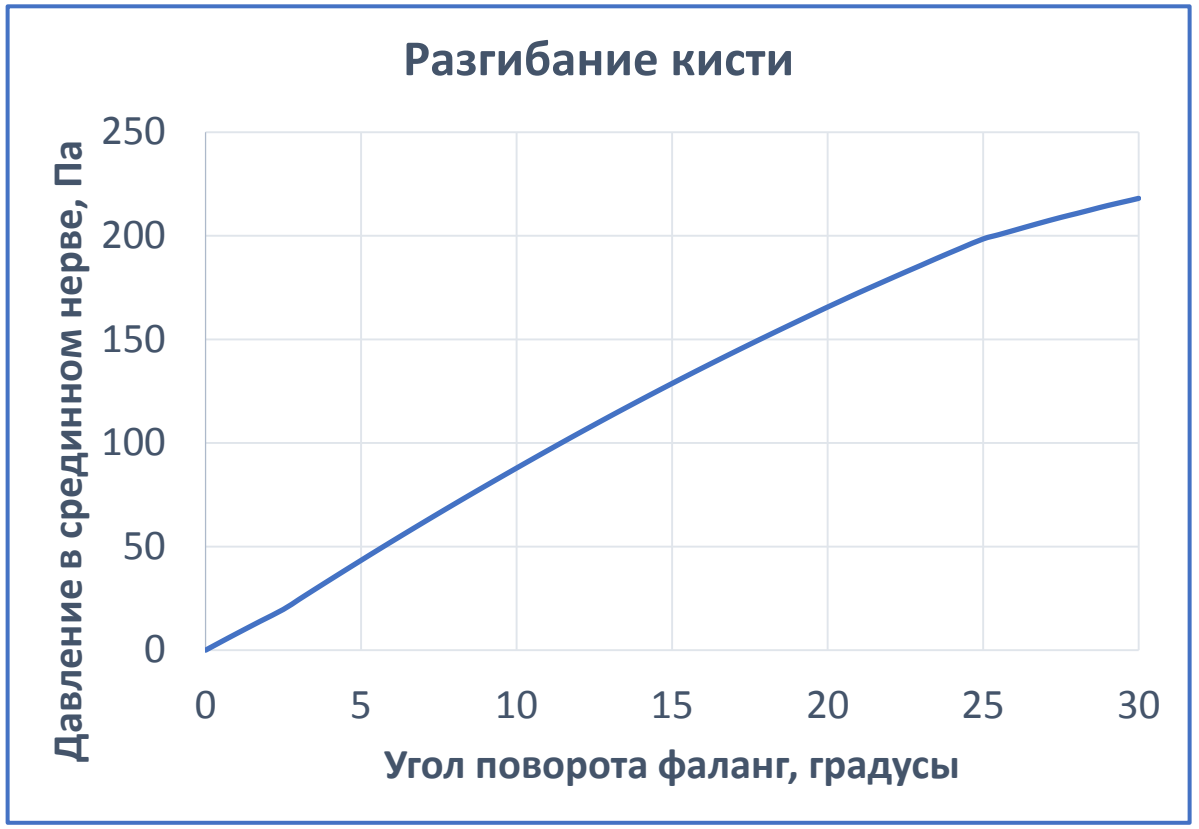


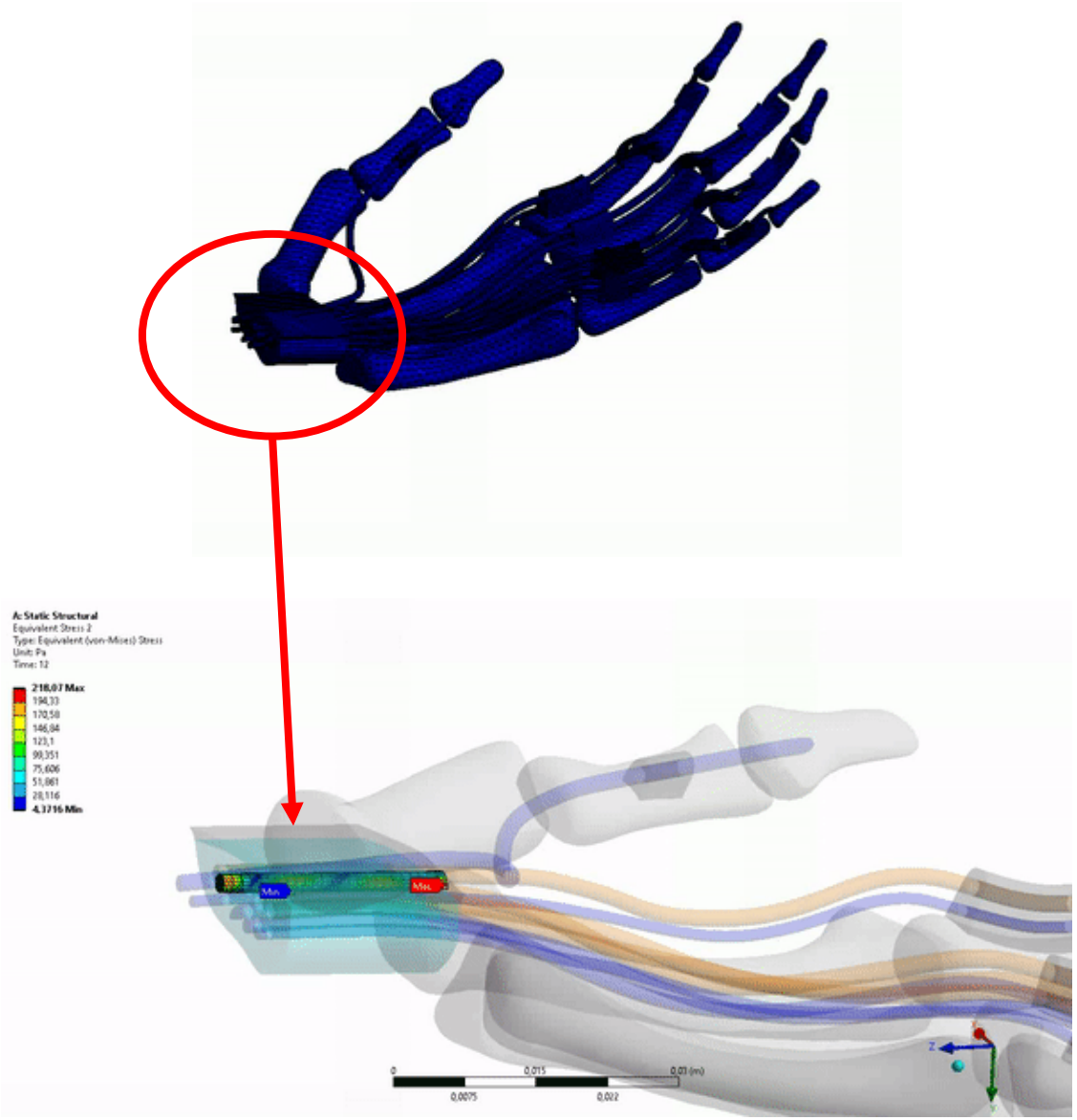
Компрессия срединного нерва при сгибании пальцев
Задача 1



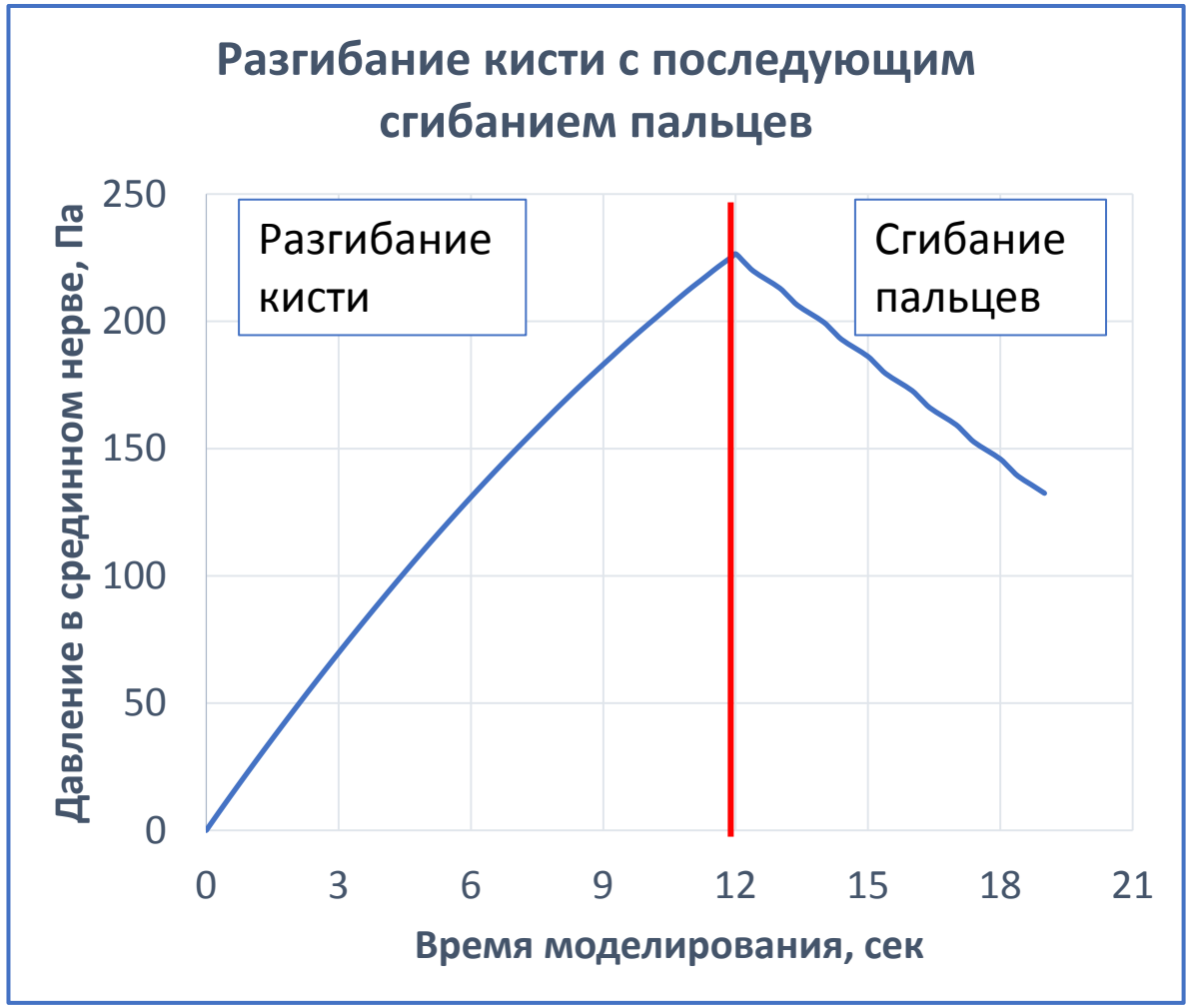


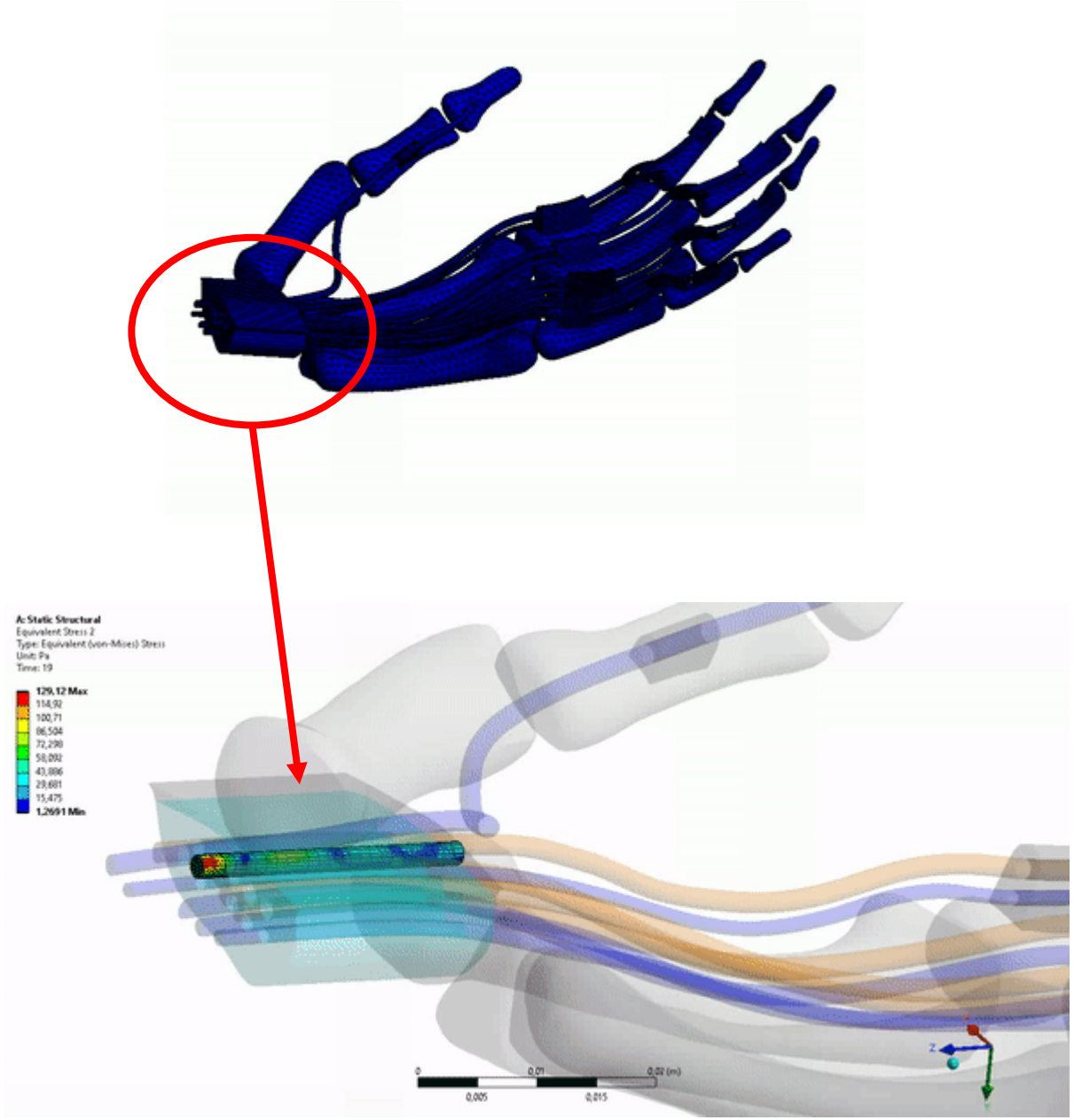
Компрессия срединного нерва при разгибании кисти
Задача 2



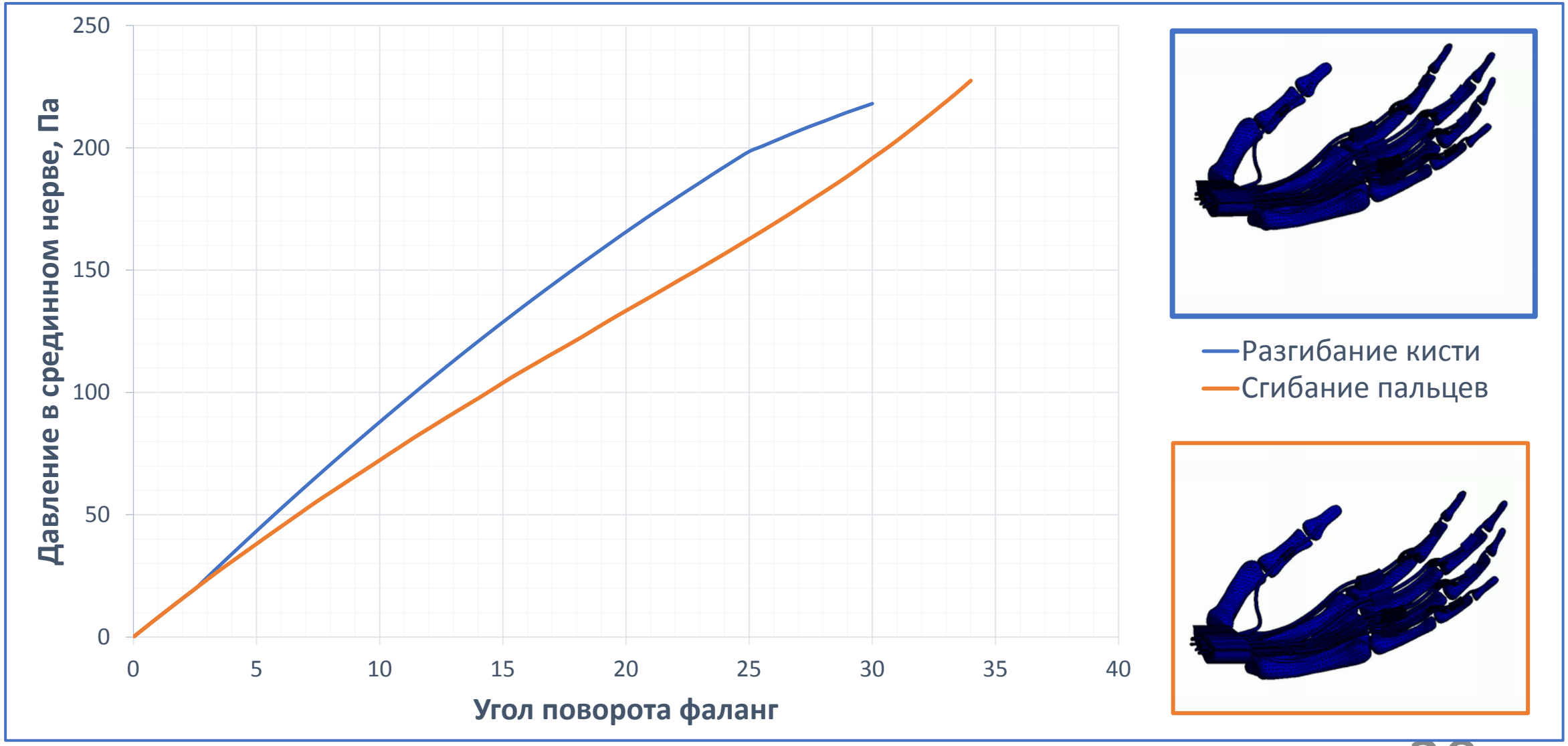


Компрессия срединного нерва при разгибании кисти и сгибании пальцев
Задача 3





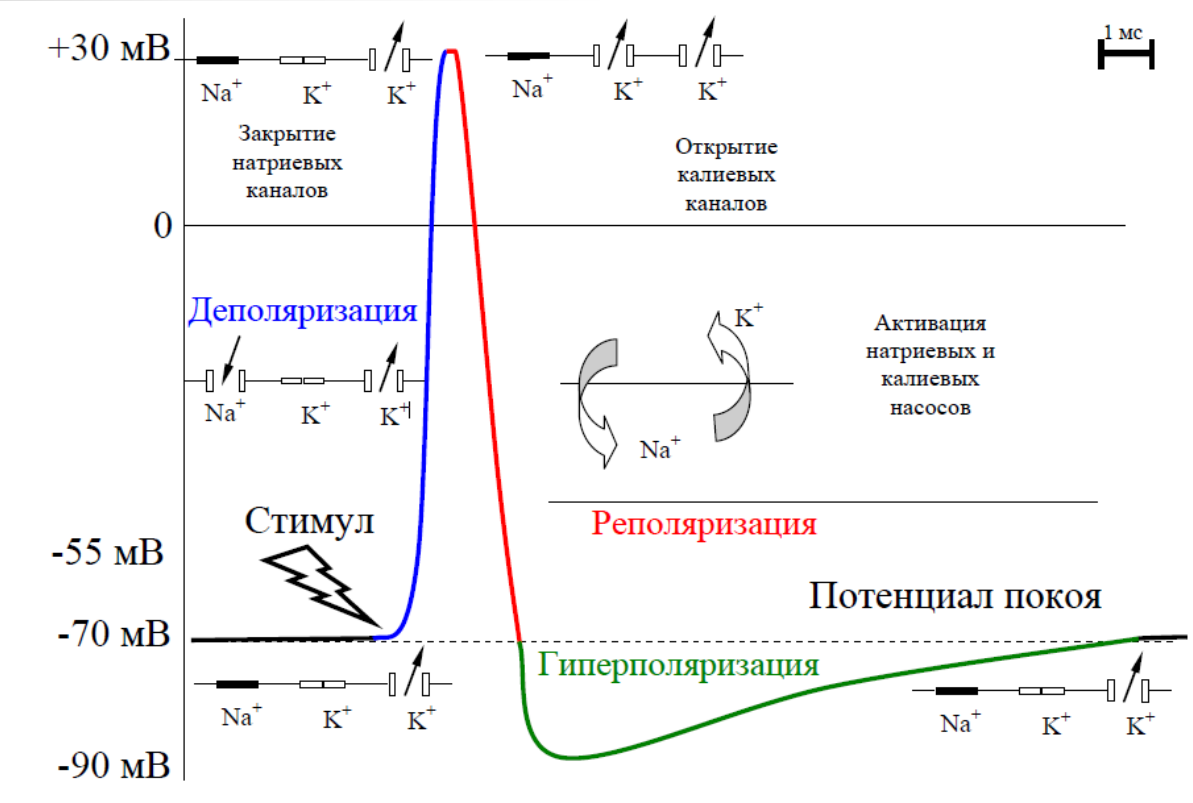
Сравнение компрессии при разгибании кисти и сгибании пальцев

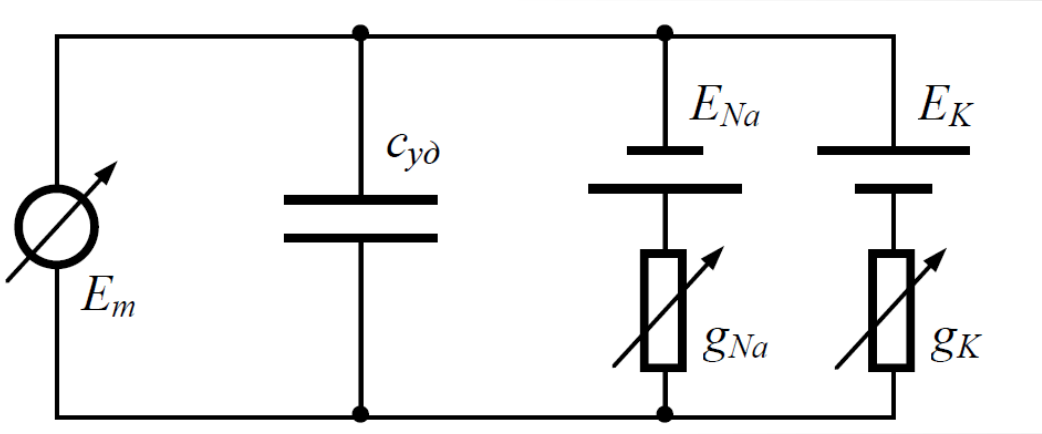


Выводы

- Сгибание пальцев и разгибание кисти приводит к давлению в нерве до 220 Па.
- Скорость повышения давления в запястном канале при разгибании кисти выше, чем при сгибании пальцев
- Разгибание кисти с последующим сгибанием пальцев приводит к уменьшению давления в запястном канале.

Далее – применение модели проводимости Ходжкина – Хакскли





$$\frac{dE_m}{dt} = \frac{1}{c_{уд}}(i_K + i_{Na}),$$

$$i_K = g_k(E_k - E_m),$$

$$i_{Na} = g_{Na}(E_{Na} - E_m),$$

$$E_m = \frac{E_k + \frac{g_{Na}}{g_k}E_{Na}}{1 + \frac{g_{Na}}{g_k}},$$

$$g_k = G_k n^4,$$

$$g_{Na} = G_{Na} m^3 h,$$

$$\frac{dn}{dt} = \alpha_n(1-n) - \beta_n n,$$

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m(1-m) - \beta_m m,$$

$$\frac{dh}{dt} = \alpha_h(1-h) - \beta_h h,$$

пермский политех

ПГМУ имени академика Е. А. Вагнера

Спасибо за внимание!

Автор доклада:
Савелий Евгеньевич Пешин
E-mail: Sapeshin@yandex.ru
Тел. +7 951 958 68 82