

# XVI конференция «Математические модели и численные методы в биологии и медицине»



Marchuk Institute of  
Numerical Mathematics  
of the Russian  
Academy of Sciences



Moscow Center for  
Fundamental and  
Applied Mathematics  
at INM RAS



SECHENOV  
UNIVERSITY  
LIFE SCIENCES



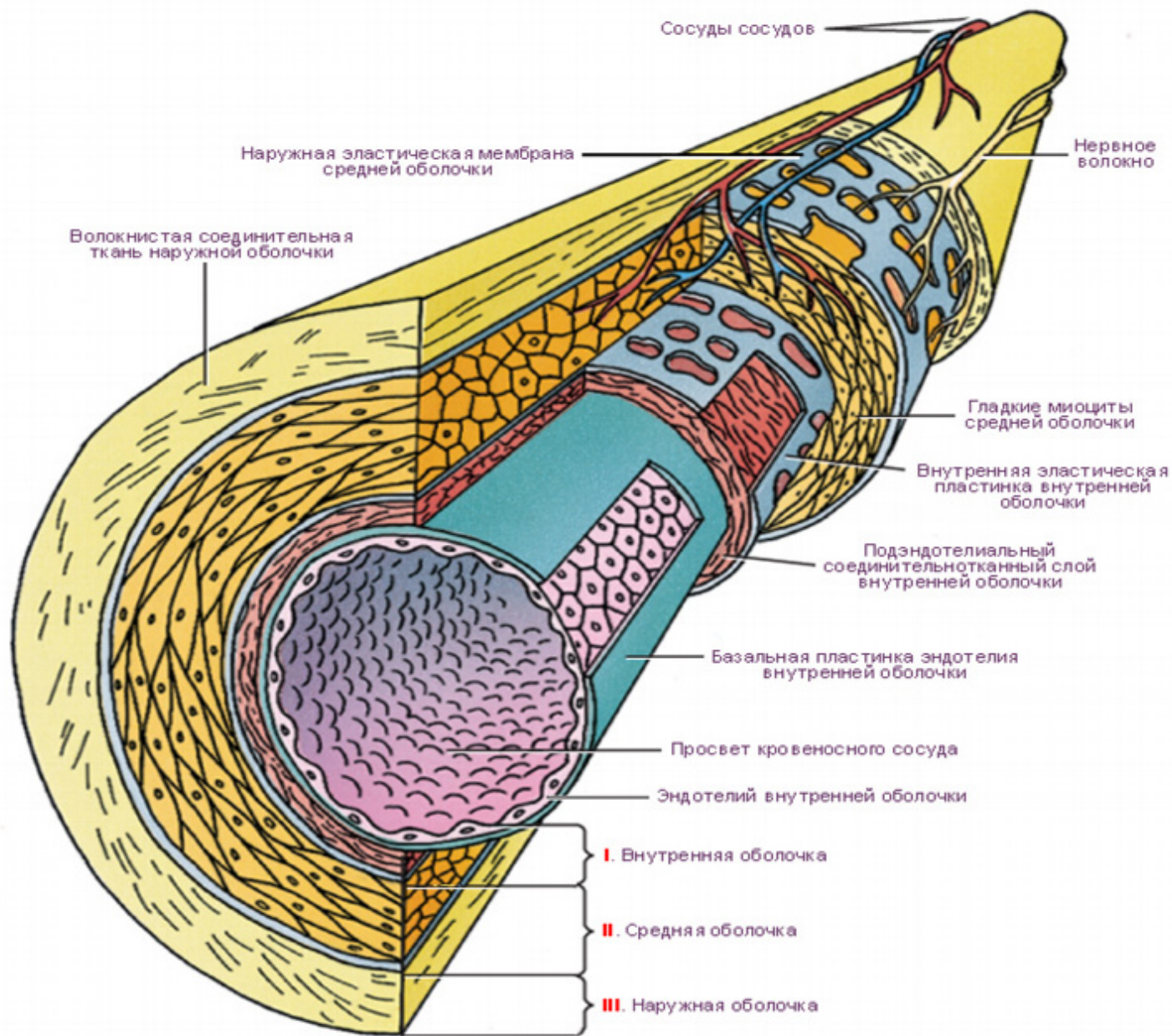
ИНСТИТУТ  
ЦИТОХИМИИ И  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ  
ФАРМАКОЛОГИИ

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕМОДИНАМИКИ НА ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТА КОНЦЕНТРАЦИИ ОКСИДА АЗОТА В МЫШЕЧНОЙ СТЕНКЕ АРТЕРИЙ

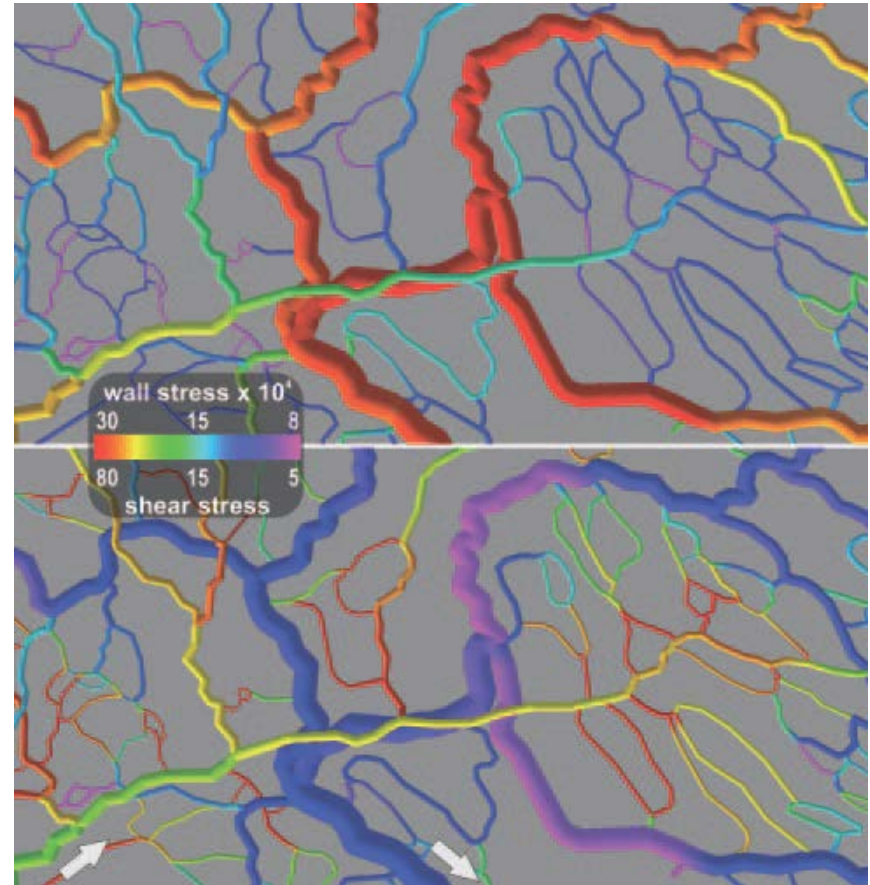
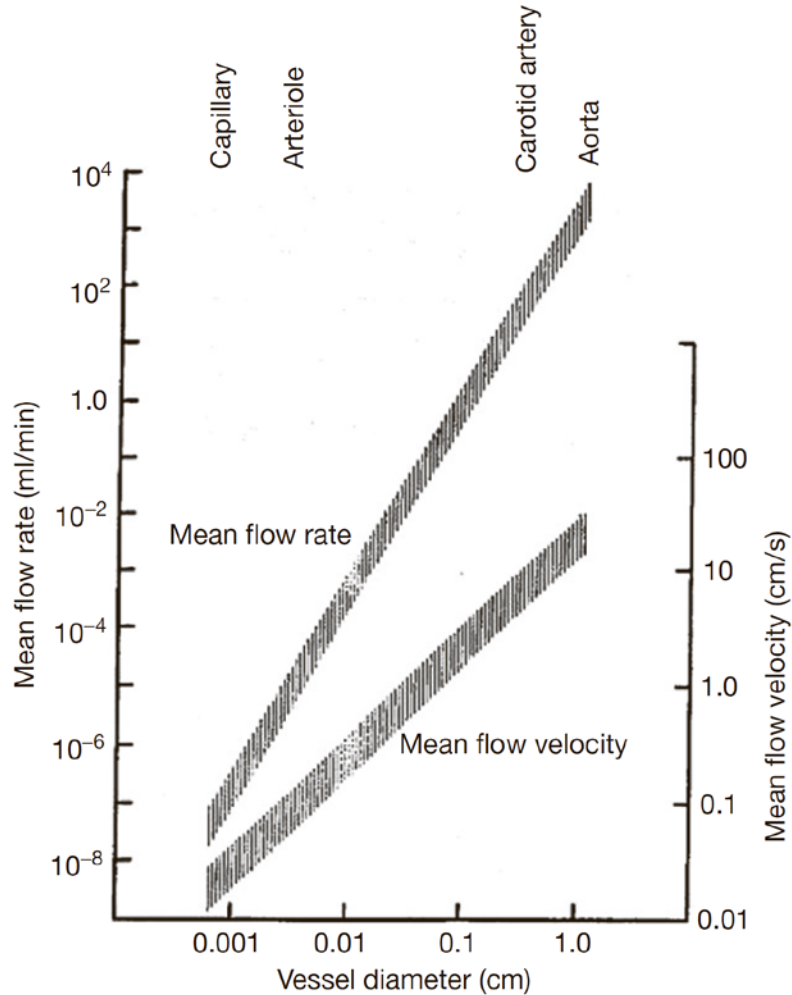
Нарциссов Ярослав Рюрикович

НИИ цитохимии и молекулярной фармакологии, Москва  
Biomedical Research Group, BiDiPharma GmbH, Siek, Germany

# ОБЩАЯ СТРУКТУРА АРТЕРИЙ РАЗНОГО УРОВНЯ



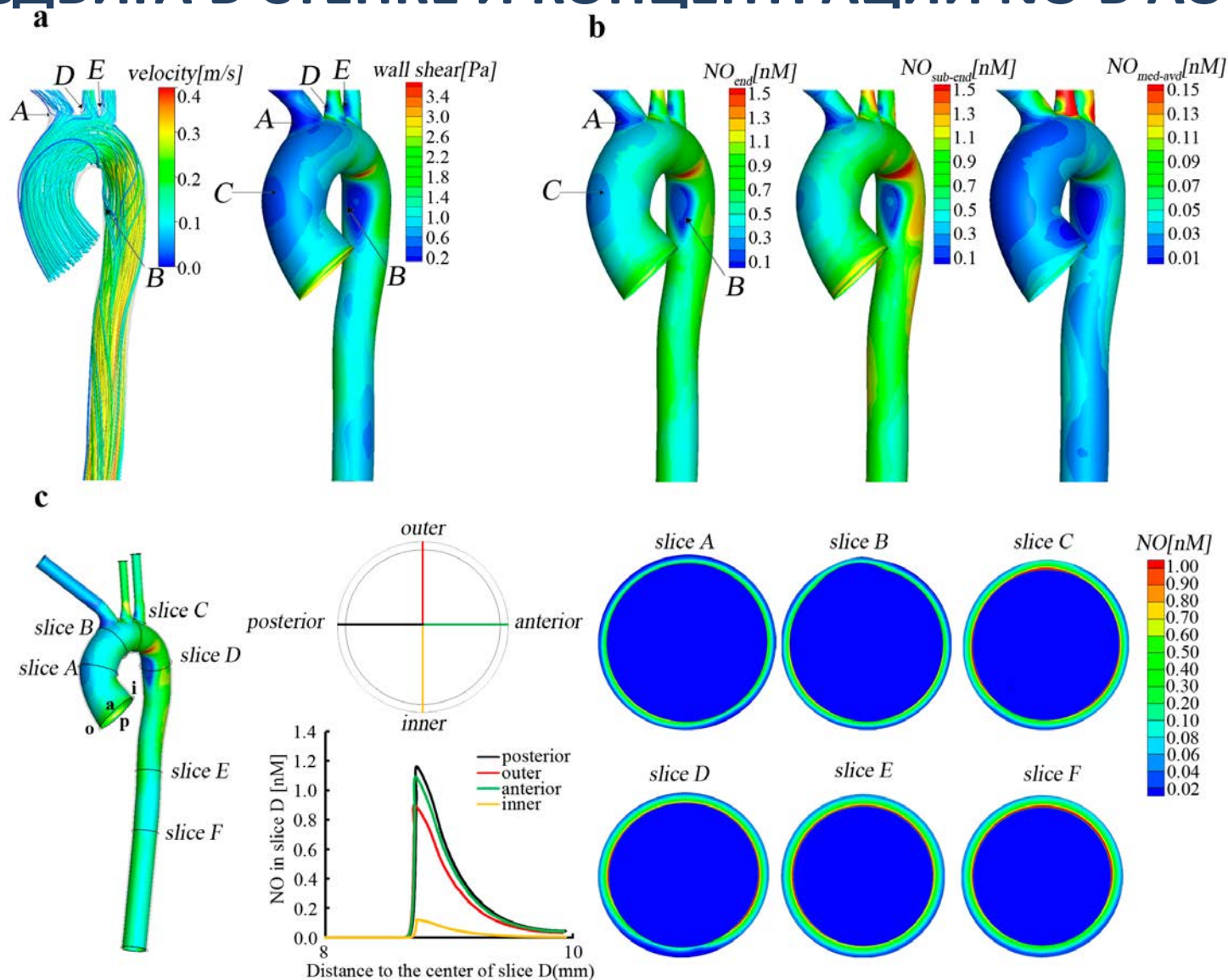
# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ О СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В СОСУДАХ И НАПРЯЖЕНИИ СДВИГА



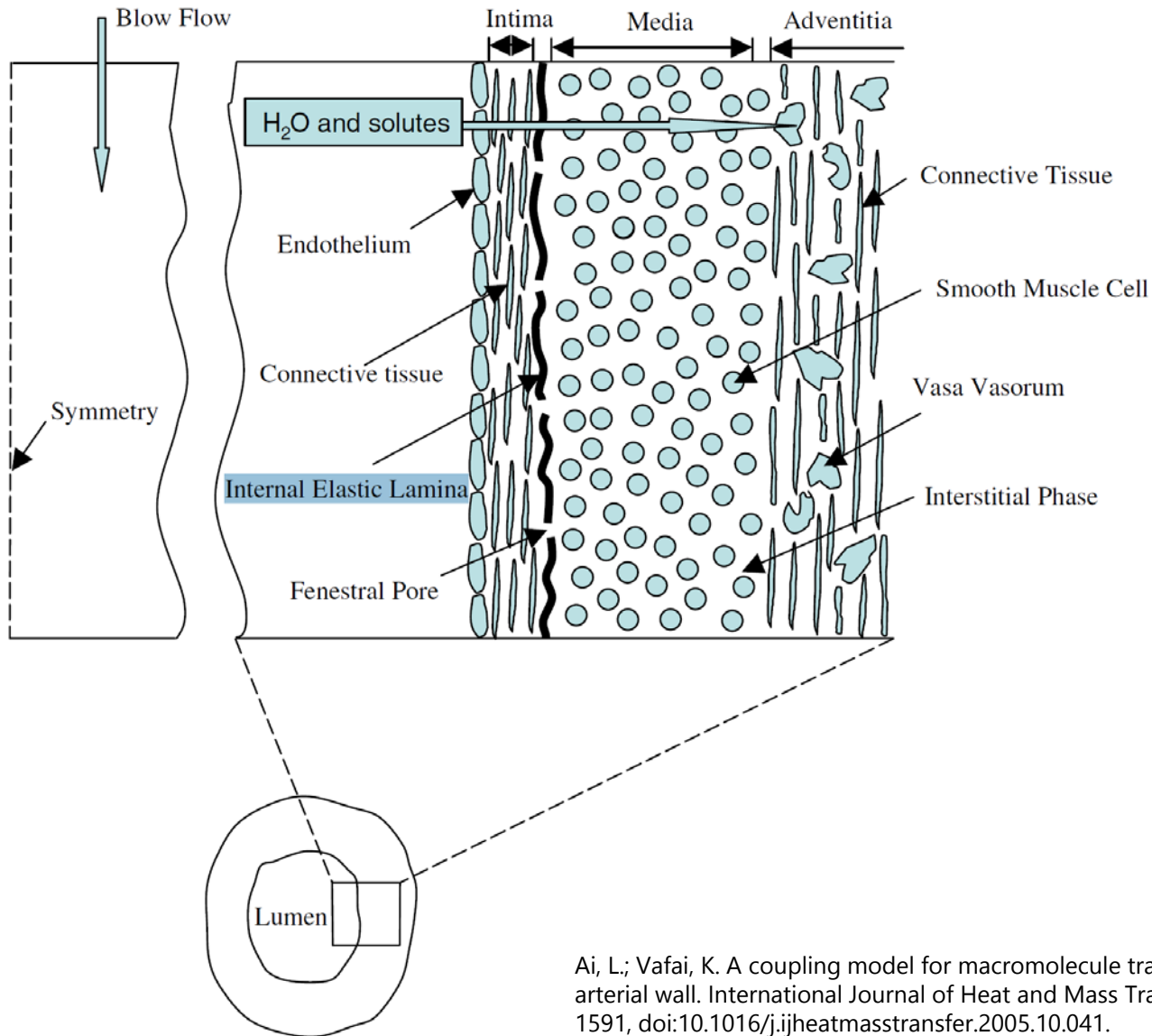
Tamura, T. 5.05 - Blood Flow Measurement. In Comprehensive Biomedical Physics, Brahmé, A., Ed.; Elsevier: Oxford, 2014; pp. 91-105.

Pries, A.R.; Reglin, B.; Secomb, T.W. Remodeling of blood vessels: Responses of diameter and wall thickness to hemodynamic and metabolic stimuli. Hypertension 2005, 46, 725-731, doi:10.1161/01.HYP.0000184428.16429.be.

# НЕРАВНОМЕРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА В СТЕНКЕ И КОНЦЕНТРАЦИИ NO В АОРТЕ



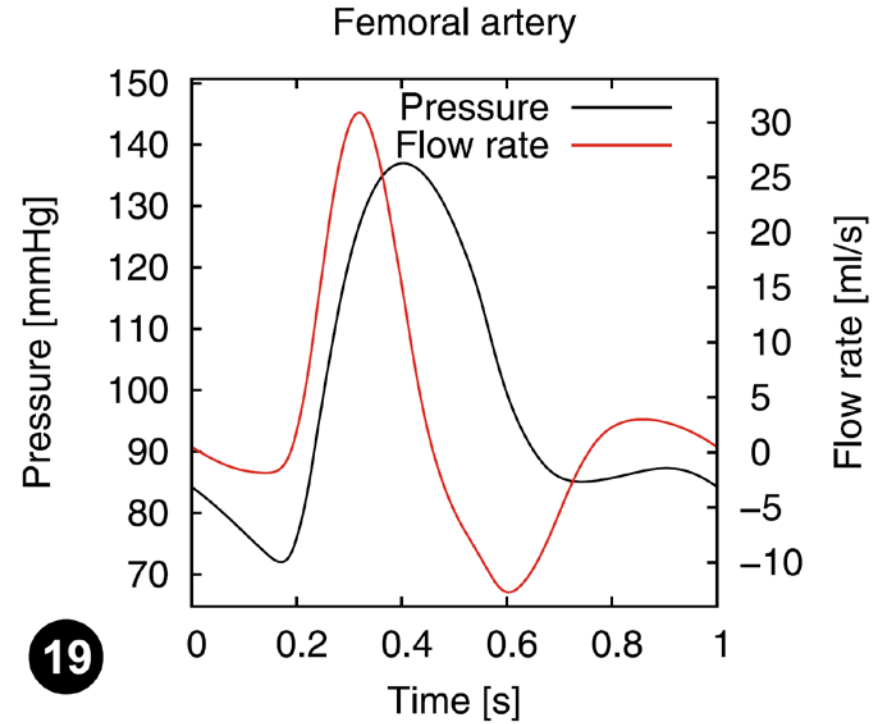
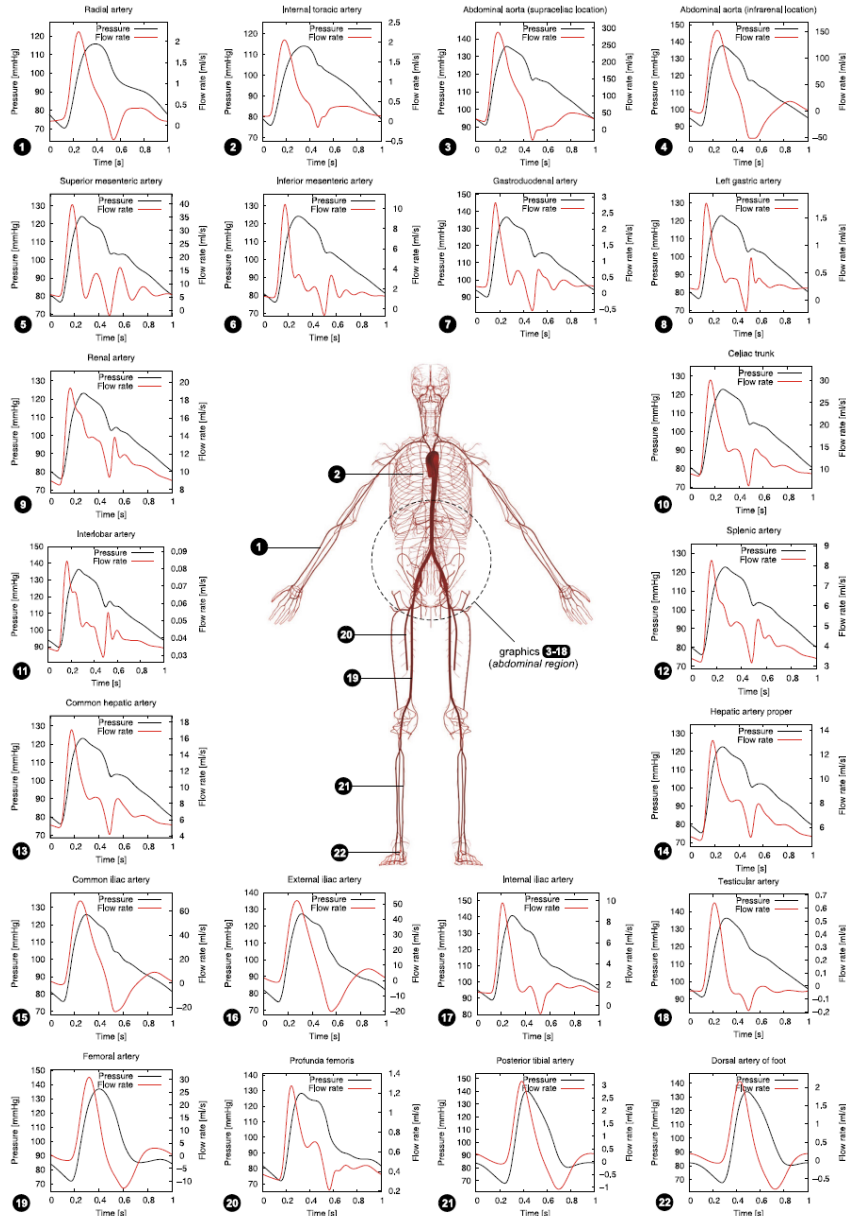
# СХЕМАТИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ТРАНСПОРТА В СТЕНКЕ СОСУДА



Cross-Section of Blood Vessel Wall

Ai, L.; Vafai, K. A coupling model for macromolecule transport in a stenosed arterial wall. International Journal of Heat and Mass Transfer 2006, 49, 1568-1591, doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.10.041.

# ДАННЫЕ О ДАВЛЕНИИ И ПОТОКЕ В РАЗЛИЧНЫХ АРТЕРИЯХ

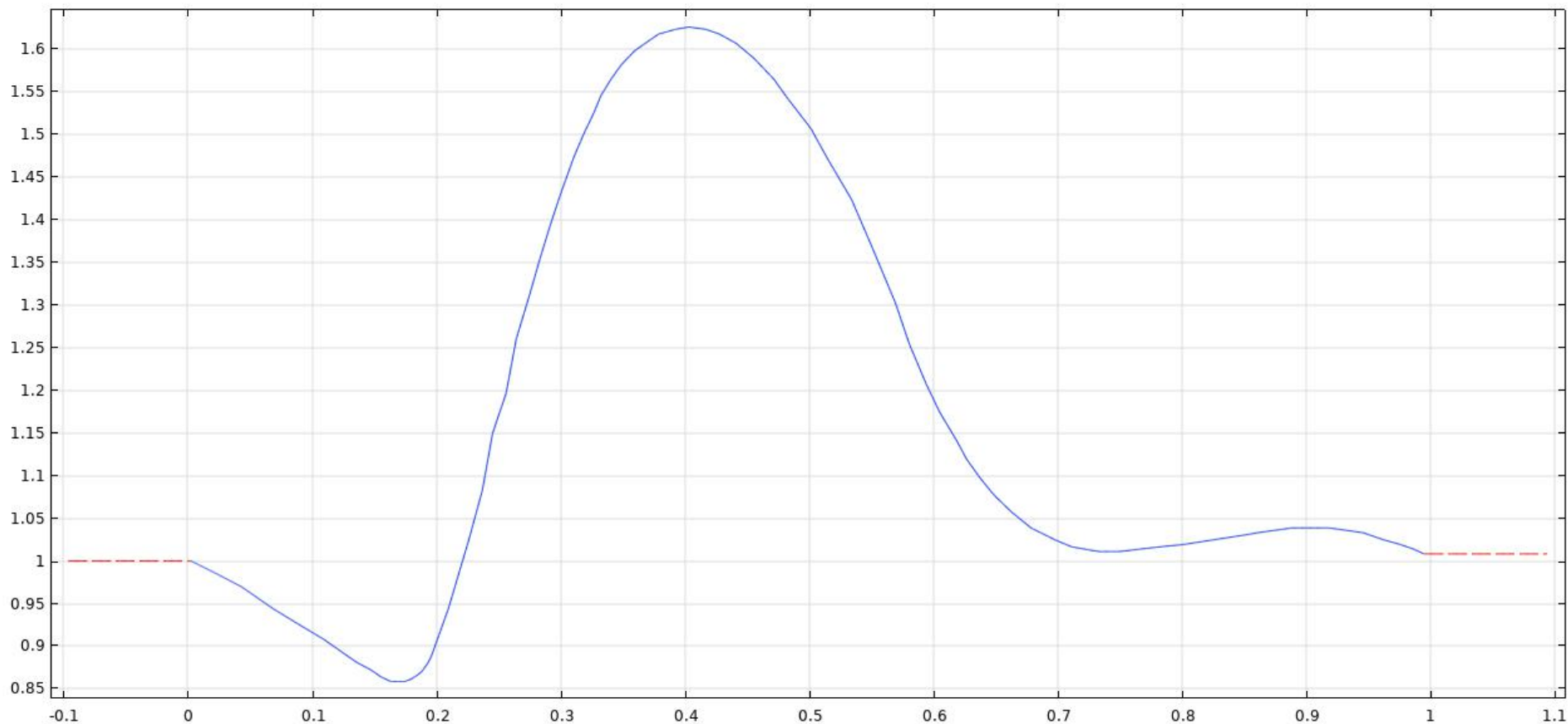


19

$$\frac{h}{R_o} = ae^{(bR_o)} + ce^{(dR_o)}, \quad (7)$$

with  $a = 0.2802$ ,  $b = -5.053 \text{ 1/cm}$ ,  $c = 0.1324$  and  $d = -0.1114 \text{ 1/cm}$ .

# ФУНКЦИЯ, УПРАВЛЯЮЩАЯ ВХОДНЫМ/ВЫХОДНЫМ ДАВЛЕНИЕМ В КРОВОТОКЕ АРТЕРИИ



# МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \nabla \left( \mu (|\dot{\gamma}|) \left( \nabla \vec{u} + \left( \nabla \vec{u} \right)^T \right) \right);$$

$$\dot{\gamma} = 2\varepsilon = \nabla \vec{u} + \left( \nabla \vec{u} \right)^T, \quad |\dot{\gamma}| = \sqrt{2(\varepsilon : \varepsilon)};$$

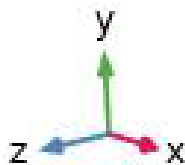
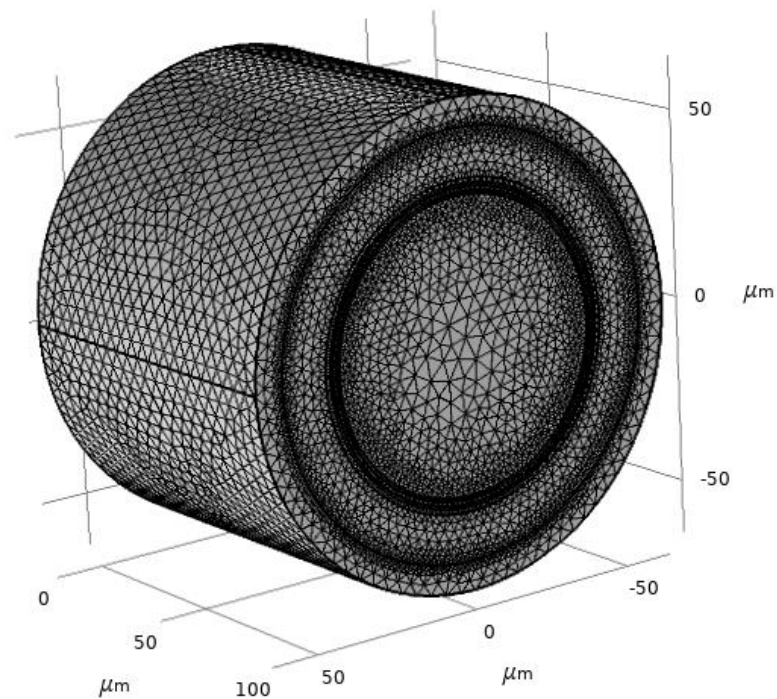
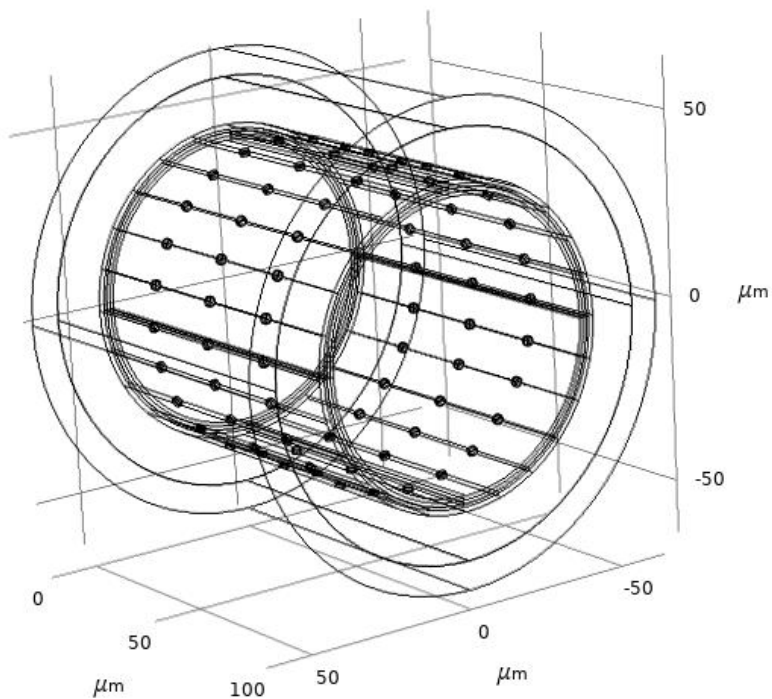
$$\nabla \vec{u} = 0;$$

$$\mu (|\dot{\gamma}|) = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) \left[ 1 + (\lambda \dot{\gamma})^2 \right]^{(n-1)/2}$$

$$\frac{\partial c(\vec{r}, t)}{\partial t} = \nabla \cdot (\mathbf{D} \cdot \nabla c(\vec{r}, t)) - \vec{u} \cdot \nabla c(\vec{r}, t) + f_{con}(c(\vec{r}, t), \vec{r});$$

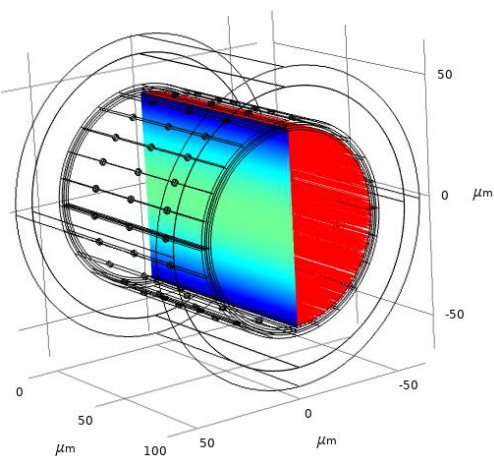


# ЦИФРОВОЙ ФАНТОМ АРТЕРИИ С УЧЕТОМ АНАТОМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СТЕНКИ СОСУДА

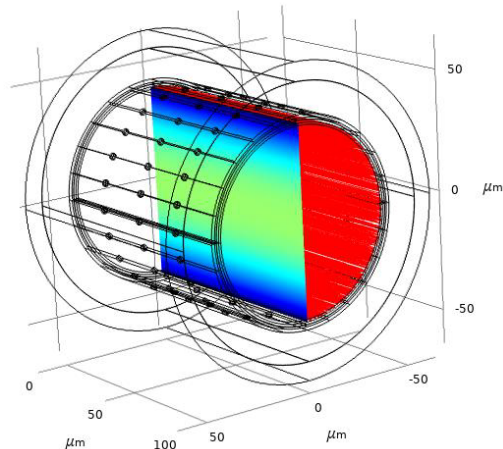


# ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В АРТЕРИИ

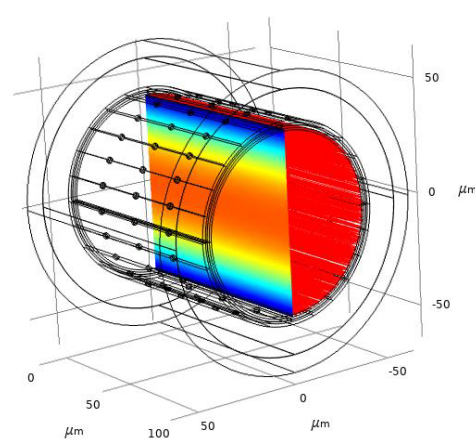
**t = 0,1 с**



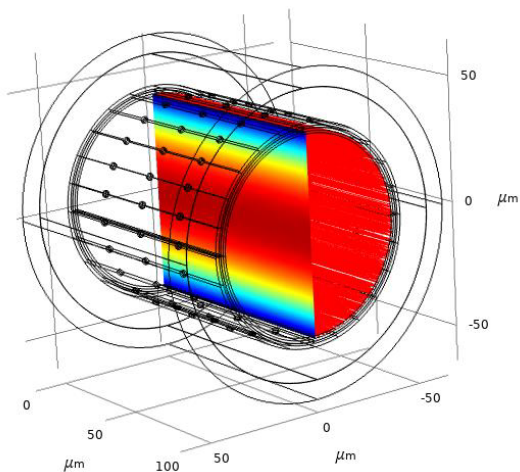
**t = 0,2 с**



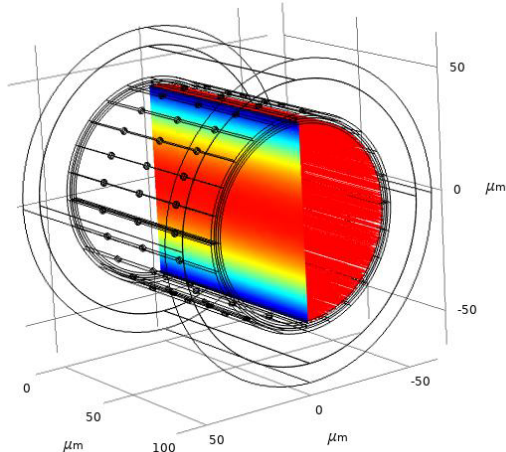
**t = 0,3 с**



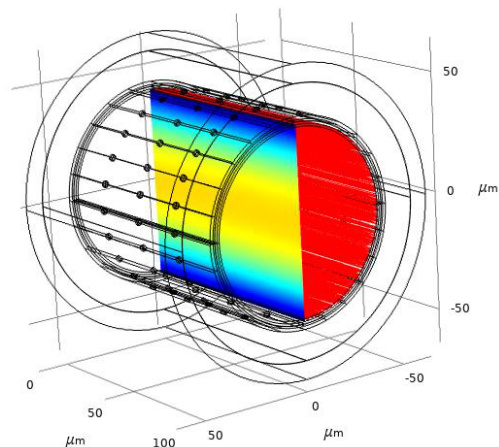
**t = 0,4 с**



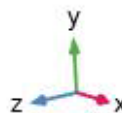
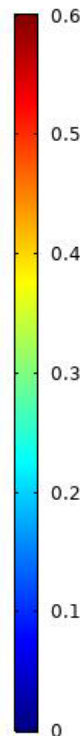
**t = 0,5 с**



**t = 0,6 с**

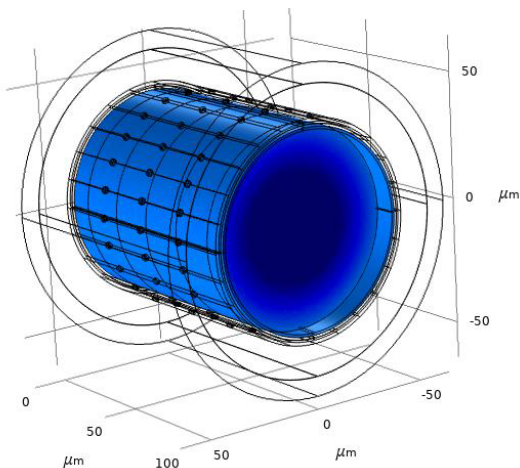


cm/s

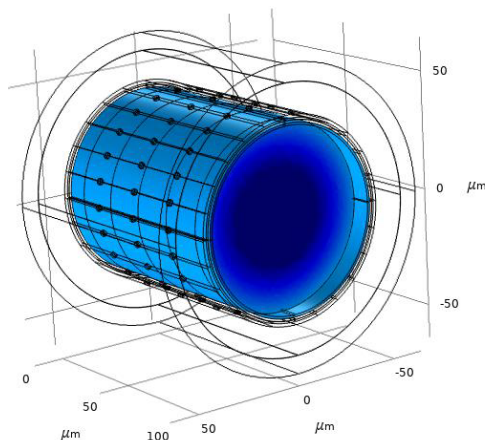


# ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ СДВИГА В ПОЛОСТИ СОСУДА И У ЕГО СТЕНКИ

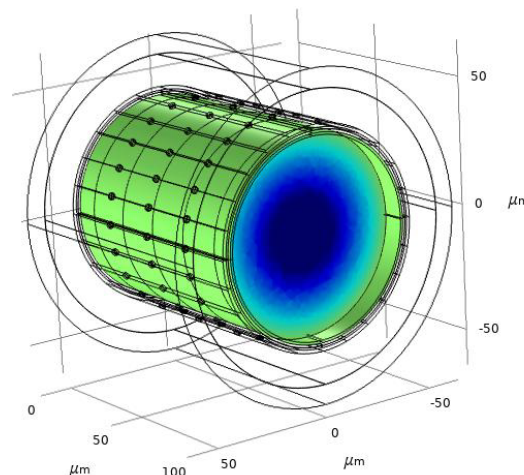
**t = 0,1 с**



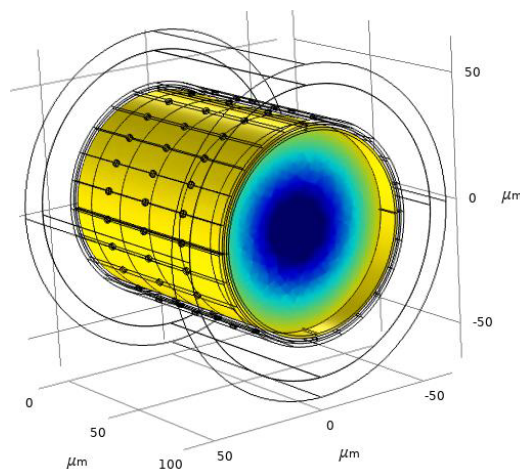
**t = 0,2 с**



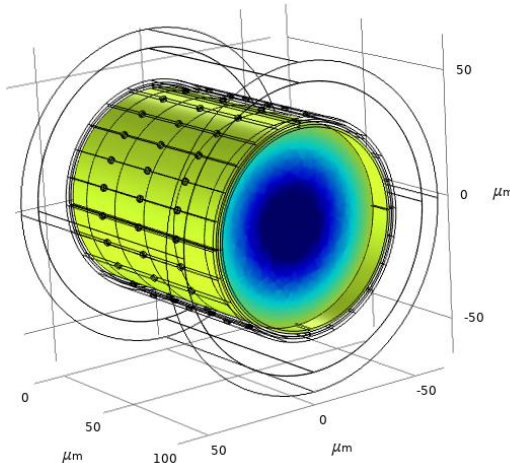
**t = 0,3 с**



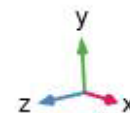
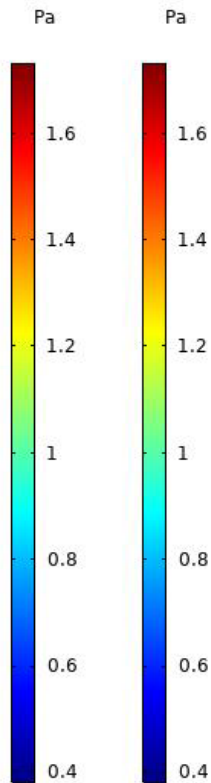
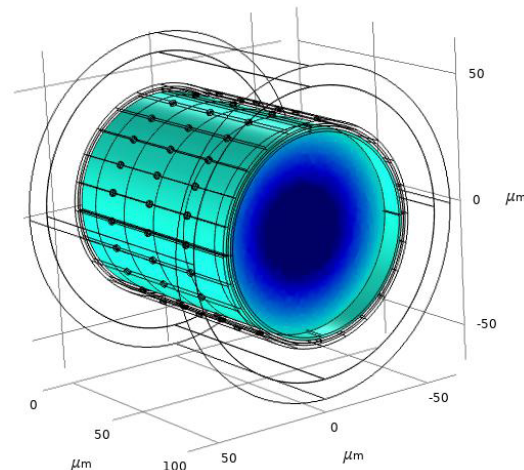
**t = 0,4 с**



**t = 0,5 с**

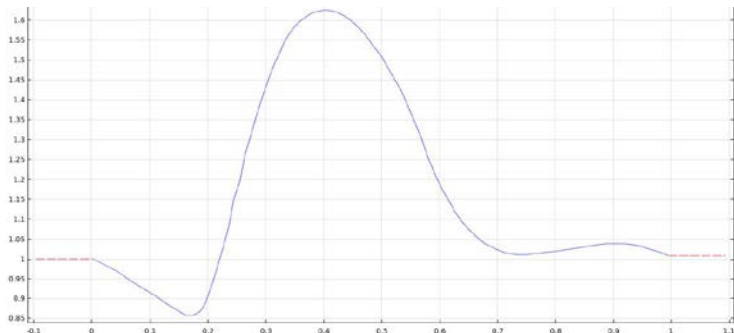
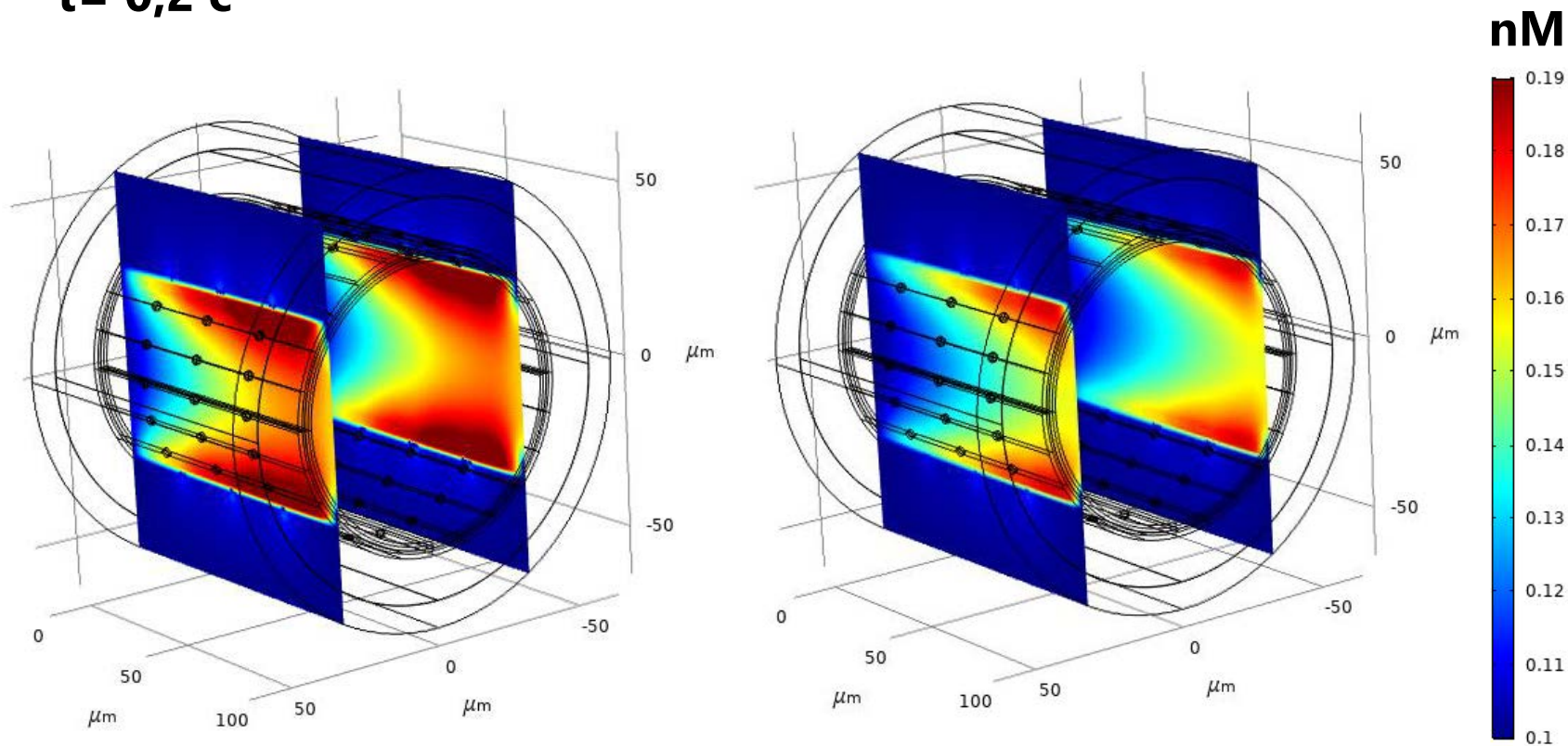


**t = 0,6 с**

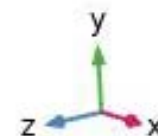


# КОНЦЕНТРАЦИЯ ОКСИДА АЗОТА В СОСУДЕ ПРИ УСЛОВИИ НАЛИЧИЯ (СЛЕВА) И ОТСУТСТВИЯ (СПРАВА) РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В ПРОСВЕТЕ АРТЕРИИ

$t = 0,2 \text{ с}$

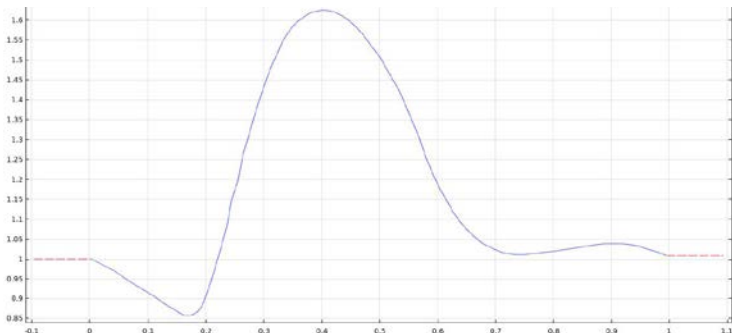
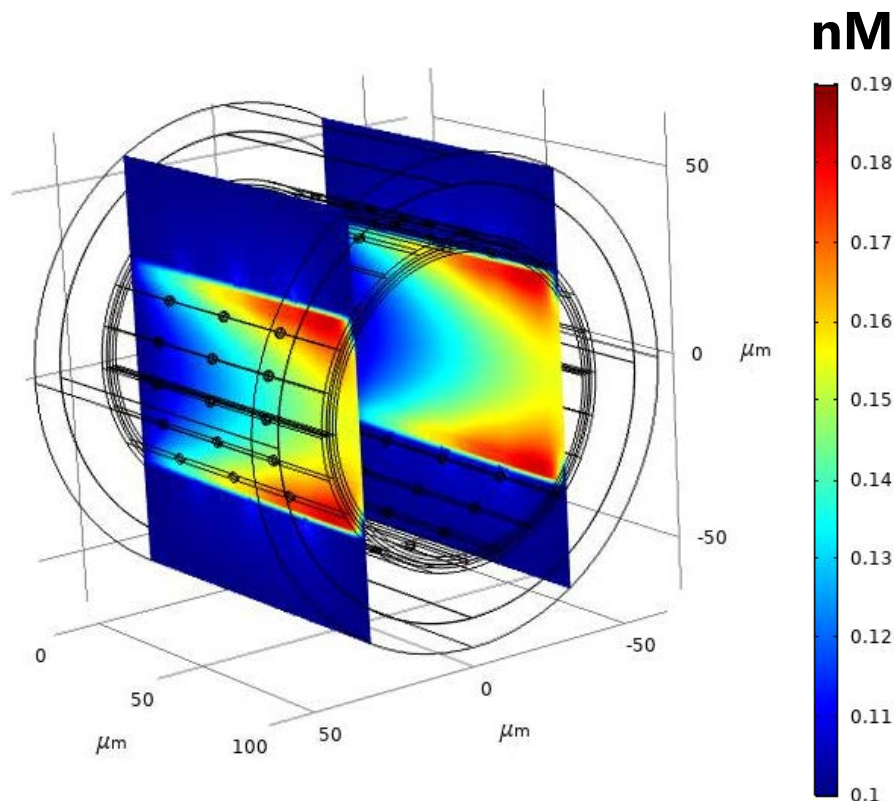
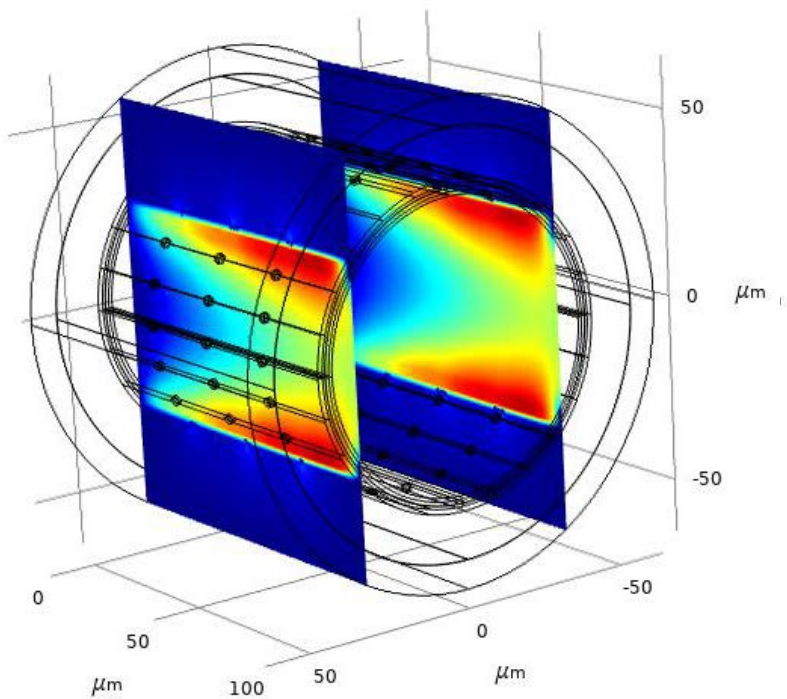


$\vec{V} = \text{const}$

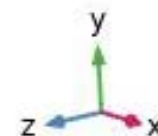


# КОНЦЕНТРАЦИЯ ОКСИДА АЗОТА В СОСУДЕ ПРИ УСЛОВИИ НАЛИЧИЯ (СЛЕВА) И ОТСУТСТВИЯ (СПРАВА) РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ ТЕЧЕНИЯ КРОВИ В ПРОСВЕТЕ АРТЕРИИ

$t = 0,4 \text{ c}$

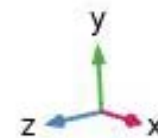
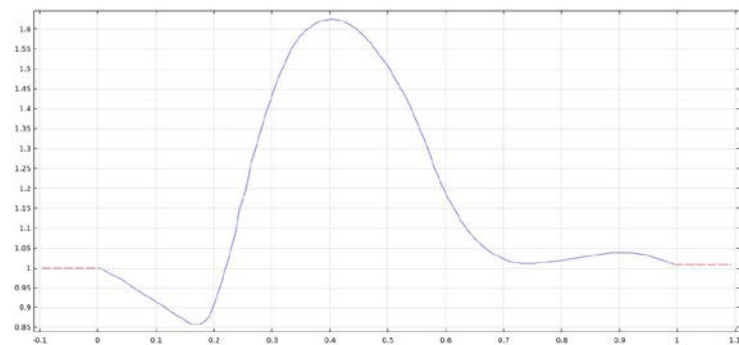
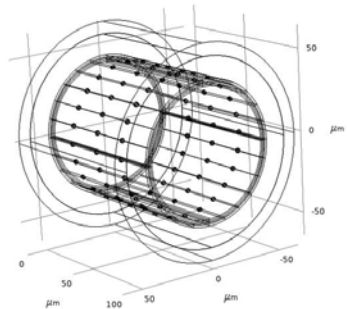
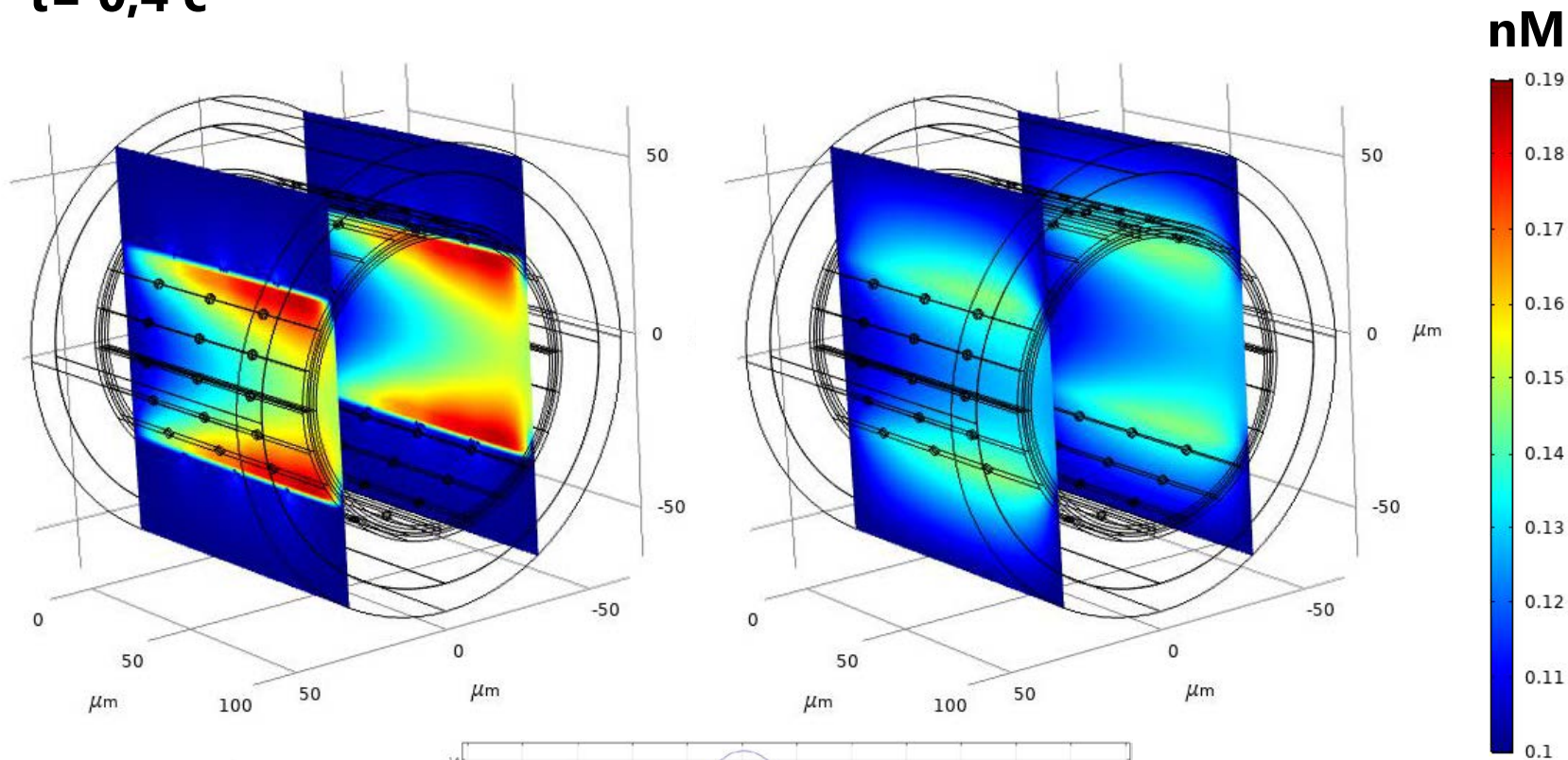


$\vec{V} = \text{const}$



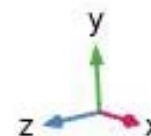
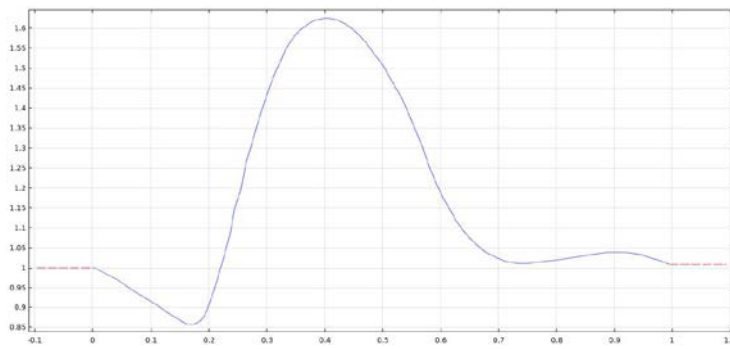
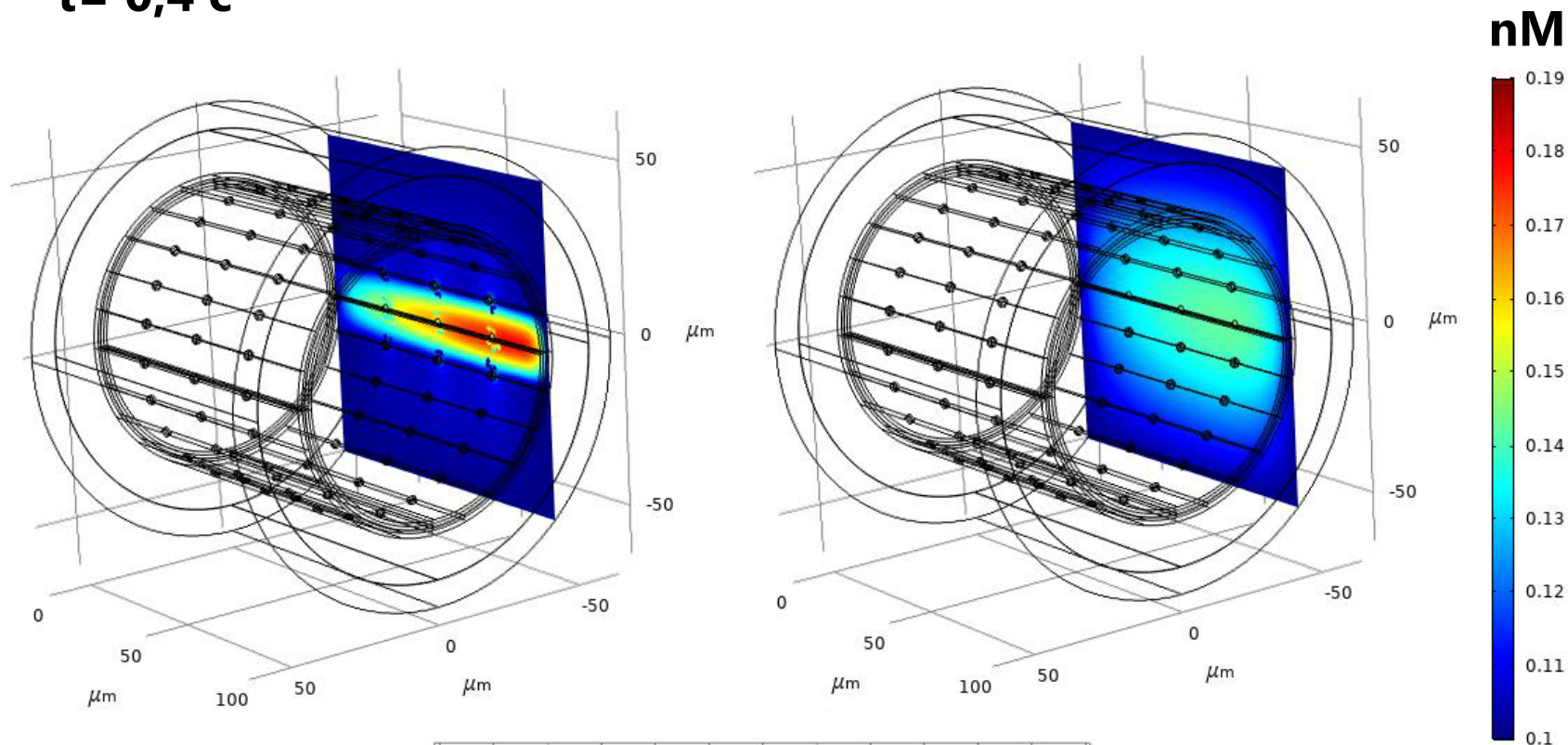
# КОНЦЕНТРАЦИЯ ОКСИДА АЗОТА В СОСУДЕ ПРИ УСЛОВИИ НАЛИЧИЯ (СЛЕВА) И ОТСУТСТВИЯ (СПРАВА) БАРЬЕРНОЙ ФУНКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭЛАСТИЧНОЙ МЕМБРАНЫ

$t = 0,4 \text{ c}$



# КОНЦЕНТРАЦИЯ ОКСИДА АЗОТА В СОСУДЕ ПРИ УСЛОВИИ НАЛИЧИЯ (СЛЕВА) И ОТСУТСТВИЯ (СПРАВА) БАРЬЕРНОЙ ФУНКЦИИ ВНУТРЕННЕЙ ЭЛАСТИЧНОЙ МЕМБРАНЫ

$t = 0,4 \text{ c}$



# ВЫВОДЫ

- Разработана модель виртуального 3D фантома артерии с учетом анатомической структуры ее стенки. Полученная модель может быть использована как для оценки динамики кровотока и реакции-диффузии в стенке.
- На основе численного решения уравнения Навье –Стокса получено распределение скоростей в просвете сосуда и напряжения сдвига у стенки.
- На примере оксида азота показано, что распределение скоростей течения крови в артерии оказывает влияние на формирования градиента концентрации данного метаболита.
- Барьерная функция внутренней эластичной мембраны оказывает существенное влияние на формирование градиента оксида азота в мышечной стенке артерии.



# БЛАГОДАРНОСТИ

Biomedical Research Group, BiDiPharma GmbH, Siek, Germany.

НИИ цитохимии и молекулярной фармакологии, Москва Россия.

И.П. Серая

Е.В. Машковцева



**INSTITUTE**  
OF CYTOCHEMISTRY  
AND MOLECULAR  
PHARMACOLOGY

[yn\\_brg@icmph.org](mailto:yn_brg@icmph.org)

**БЛАГОДАРЮ ЗА ВНИМАНИЕ!**