Перетоки жидкости: ткань-кровь

Кислухина Е.В.[1], Кислухин В.В.

Цель: Проанализировать один из факторов, определяющих доставку кислорода тканям

[1]ГБУЗ НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗ, Москва

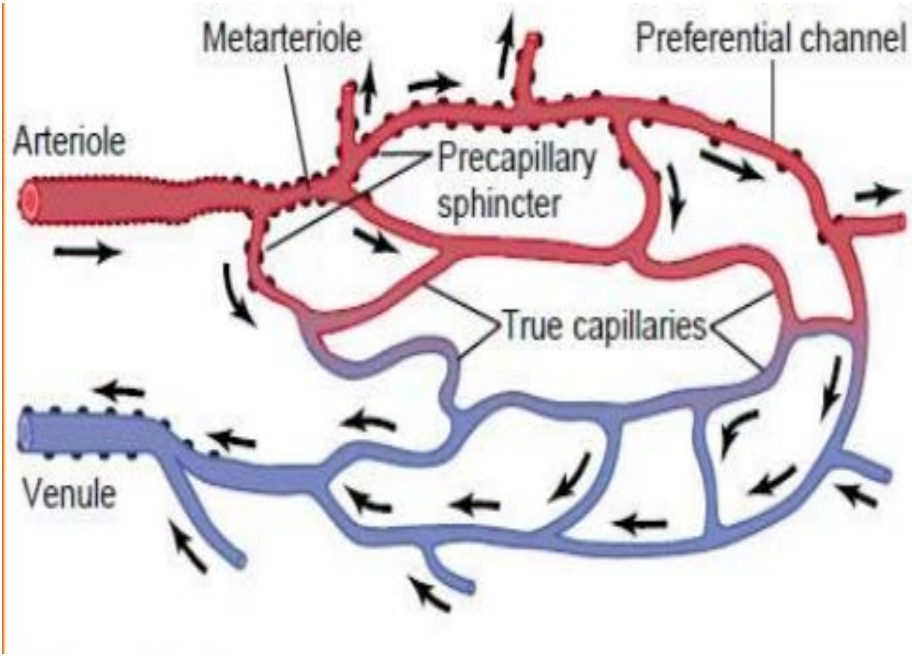
Доставка кислорода, O_2:

$DO_2=1.34*Q*Ht_a*HbO_{2a}$, HbO_{2a} – оксигемоглобин

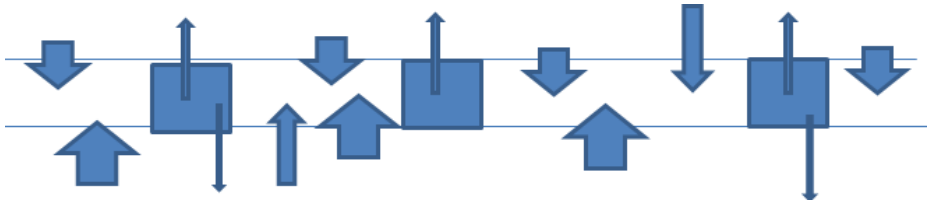
Конвекционный перенос O_2 («разгрузка» HbO_2)

“Соотношение активности пре- и пост-капиллярных сфинктеров влияет на величину капиллярного давления и определяет соотношение между объемом крови и внесосудистой жидкости.” “Circulation of the Blood: men and ideas” (Editors:Fishman, Alfred P., Richards, Dickinson W. first edition 1964)

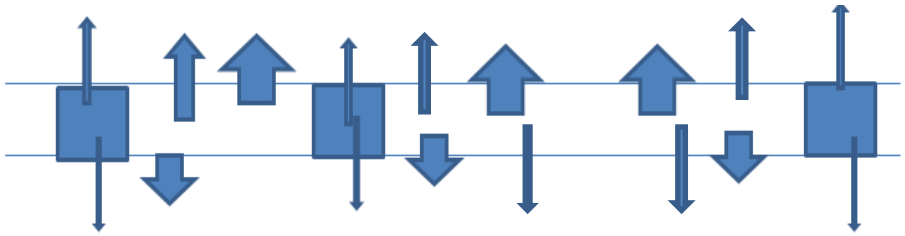
Толстые стрелки – вода;
Тонкие стрелки O_2.



Давление в капилляре 20 мм Hg

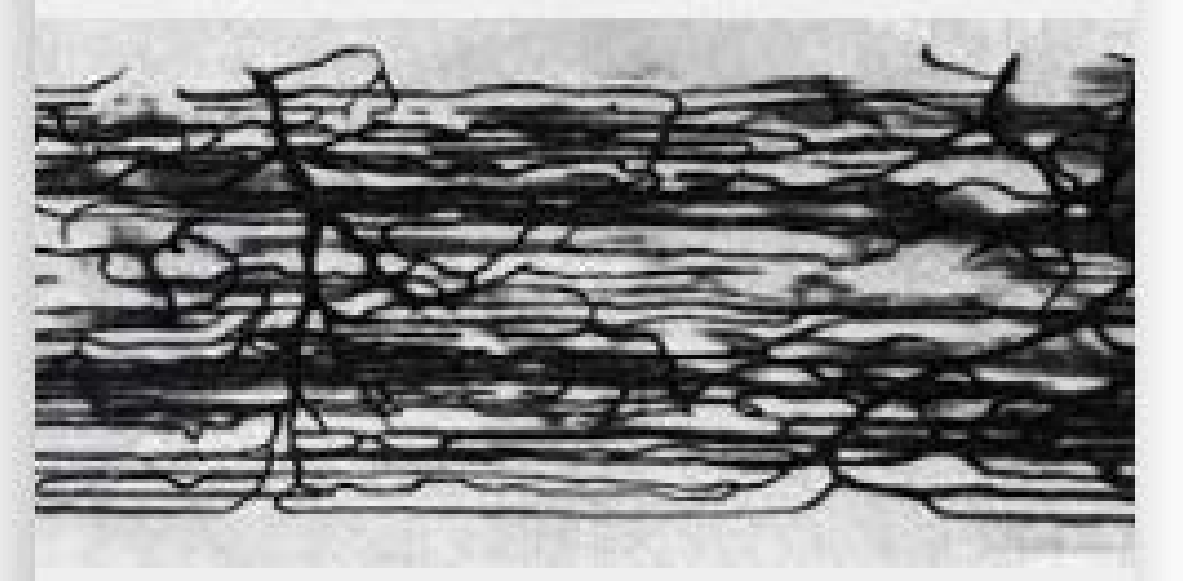


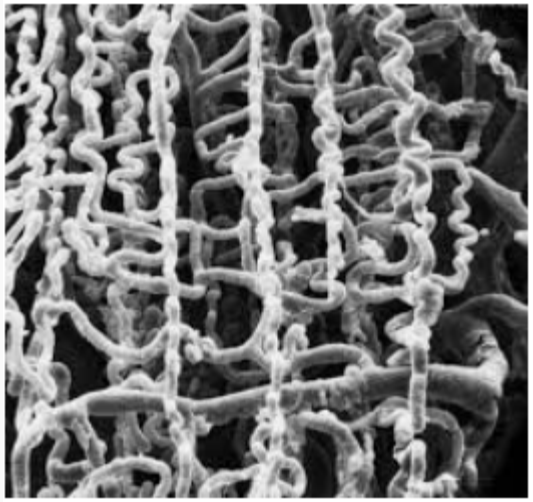
Давление в ткани 25 мм Hg



Давление в капилляре 30 мм Hg

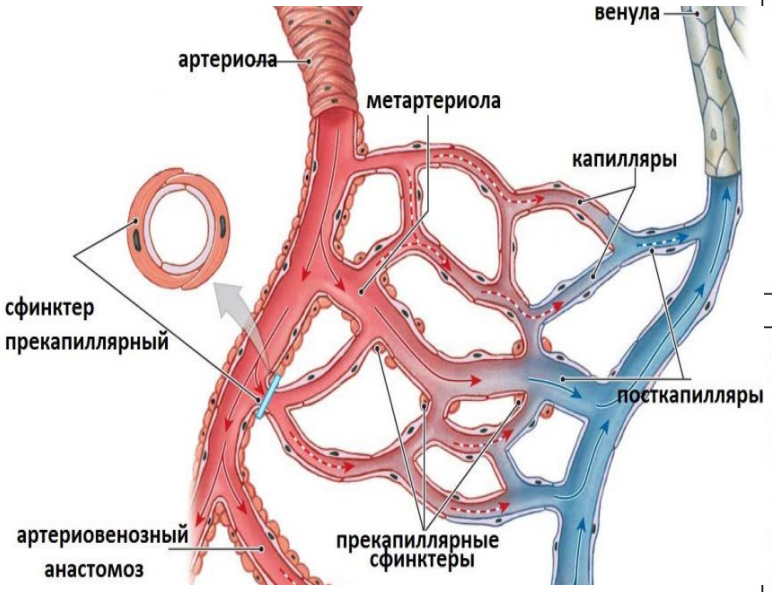
Виды капиллярного русла

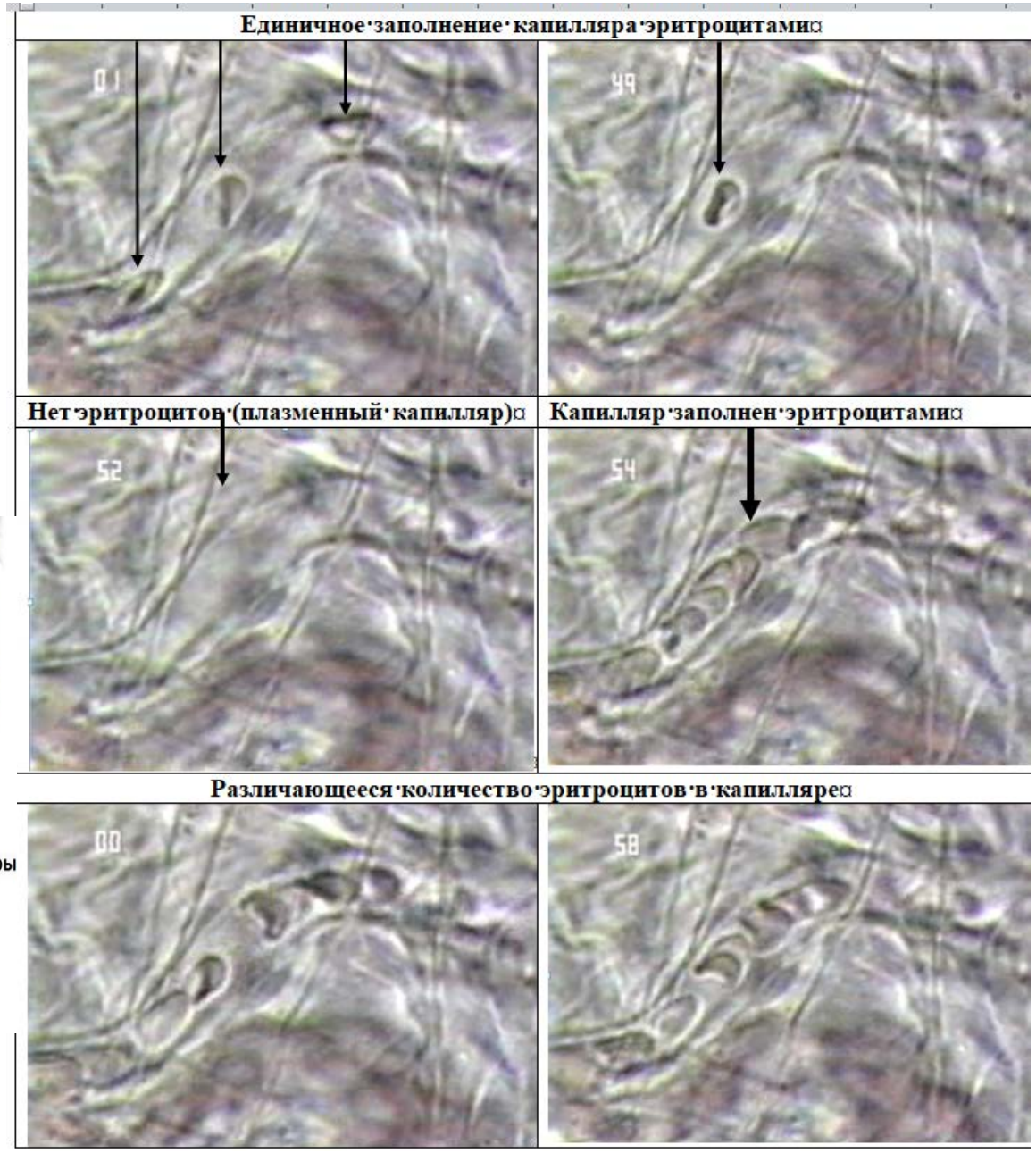




Формирование давления в ткани Стохастическое движение

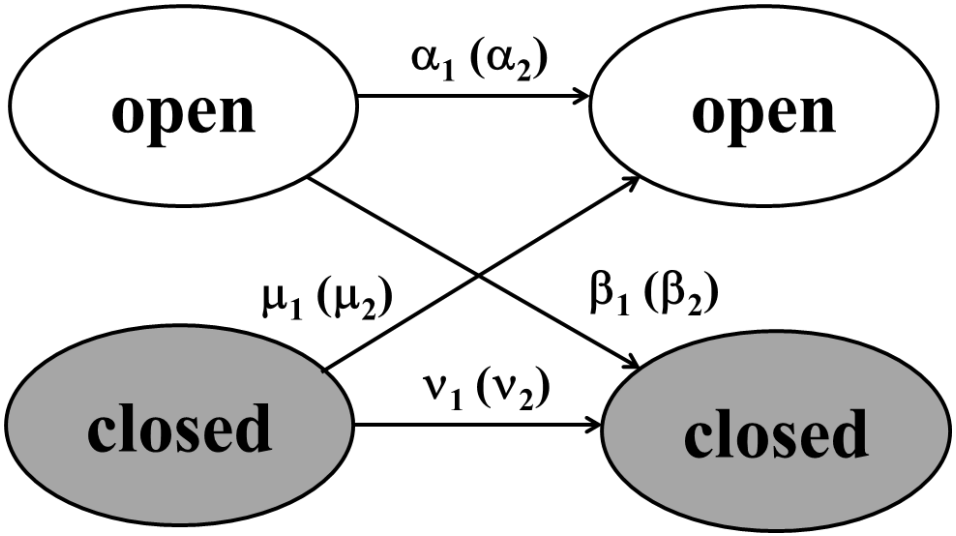
*«Прекапиллярные сфинктеры регулируют **приток** крови. Посткапиллярные сфинктеры регулируют ее **отток**. Давление в ткани выравнивает приток и отток».*
- Клод Бернард

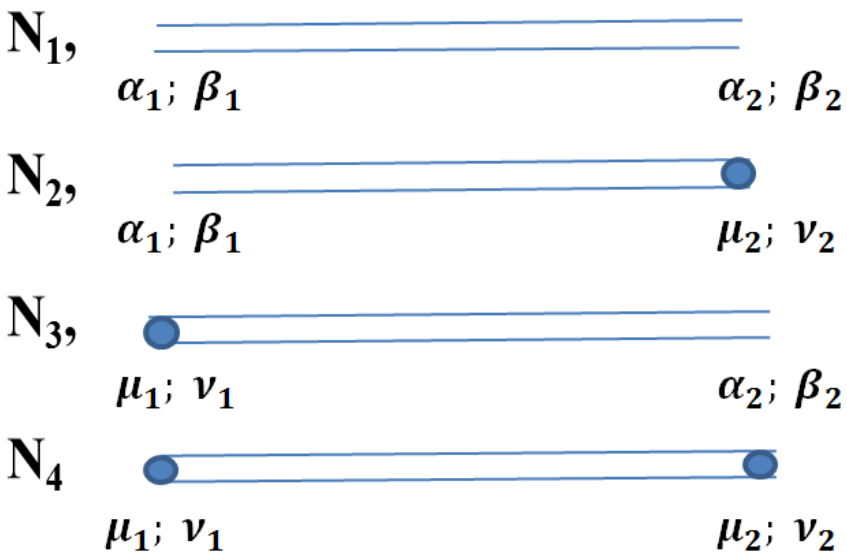




Вероятностное поведение А- и В-сфинктеров.

Крог: «Каждый капилляр должен попеременно открываться и закрываться. И положение открытых капилляров должно непрерывно изменяться, вследствие чего однообразно орошается вся ткань». Москва, 2020 (www.beztabletok.ru)





$$\begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{pmatrix}(t+1) = \begin{pmatrix} \alpha_1\alpha_2 & \alpha_1\mu_2 & \mu_1\alpha_2 & \mu_1\mu_2 \\ \alpha_1\beta_2 & \alpha_1\nu_2 & \mu_1\beta_2 & \mu_1\nu_2 \\ \beta_1\alpha_2 & \beta_1\mu_2 & \nu_1\alpha_2 & \nu_1\mu_2 \\ \beta_1\beta_2 & \beta_1\nu_2 & \nu_1\beta_2 & \nu_1\nu_2 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \\ N_4 \end{pmatrix}(t)$$

Три вида стабильного состояния

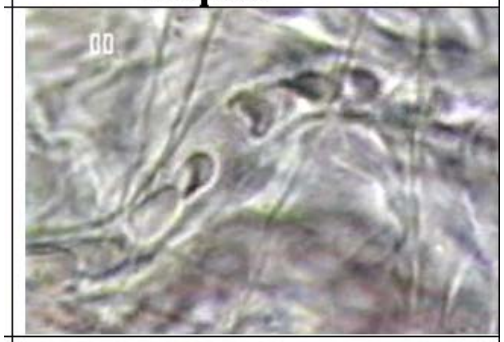
n_a – фракция микрососудов, открытых с артериальной стороны.

n_v – фракция микрососудов, открытых с венозной стороны.

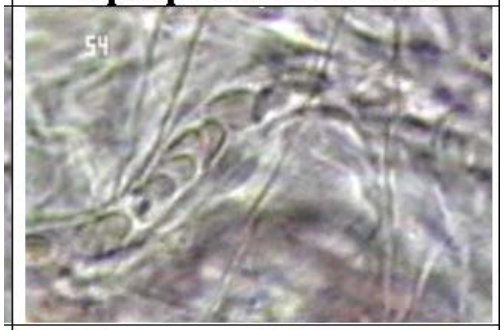
$$n_a = \frac{\mu_1}{\mu_1 + \beta_1}; \qquad n_v = \frac{\mu_2}{\mu_2 + \beta_2}$$

	Распределение	n_a =0.3 n_v =0.3	n_a =0.9 n_v =0.1	n_a =0.1 n_v =0.9
N_1	$n_a n_v$	0.09	0.09	0.09
N_2	$(1-n_v)n_a$	0.18	0.81	0.01
N_3	$(1-n_a)n_v$	0.18	0.01	0.81
N_4	$(1-n_a)(1-np_v)$	0.49	0.09	0.09
Сфинктерная активность		норма	артериальный тип	венозный тип

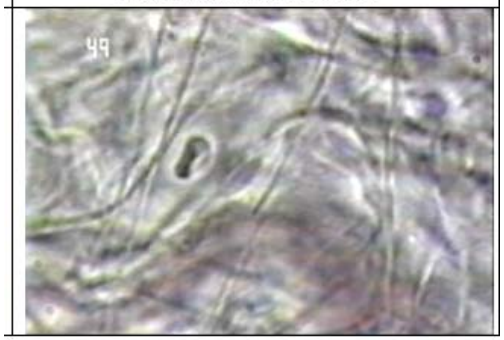
Норма



Артериальный тип

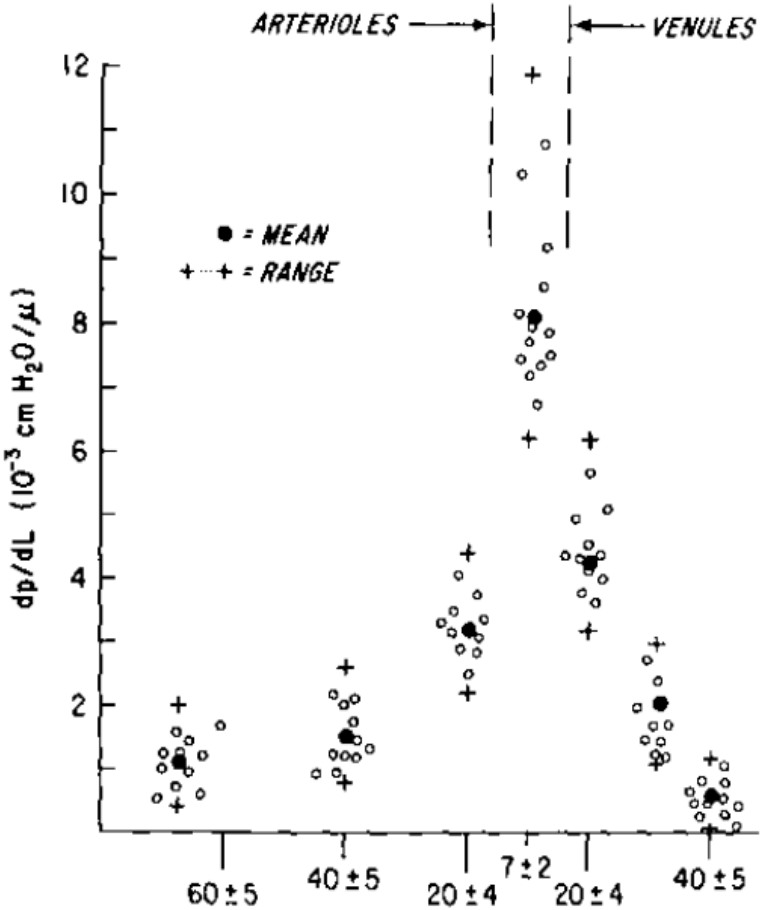


Венозный тип

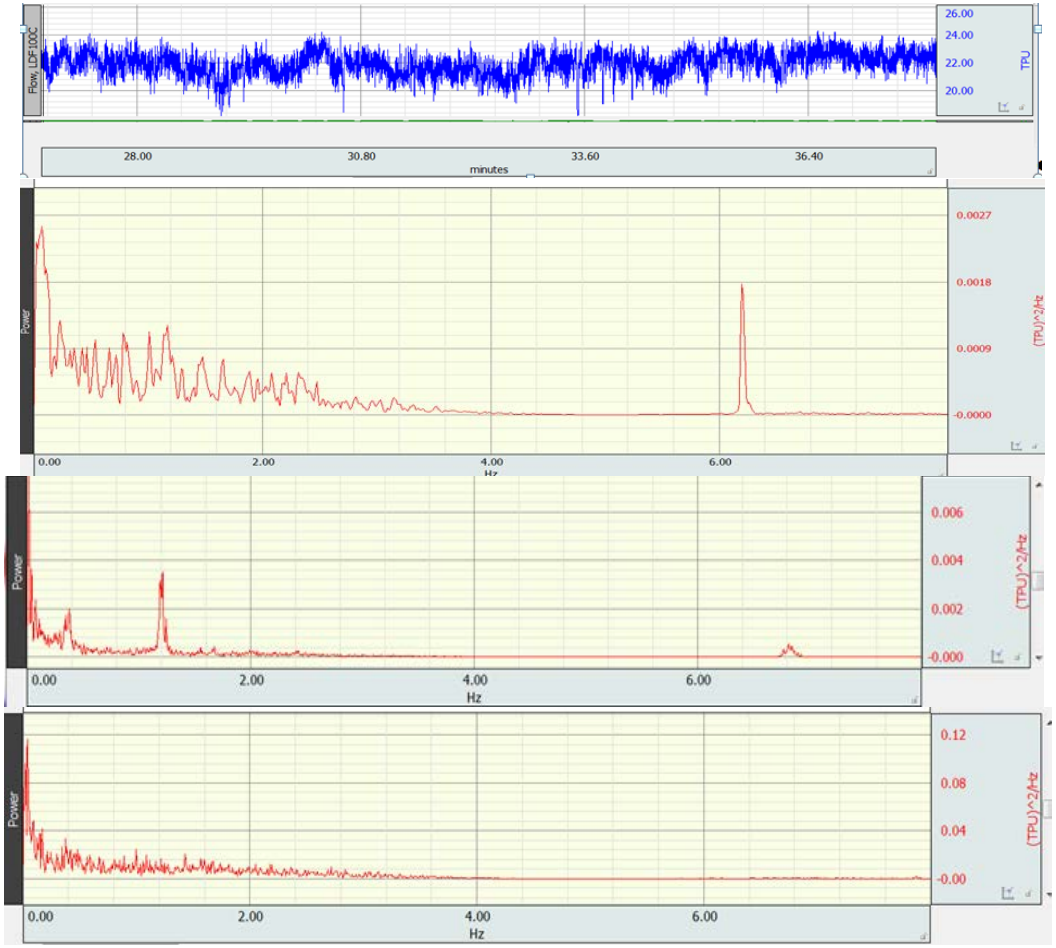


Circulation Research, Vol. XXXIV, June 1974

Zweifach BW Analysis of pressure distribution in vascular bed in cat mesentery

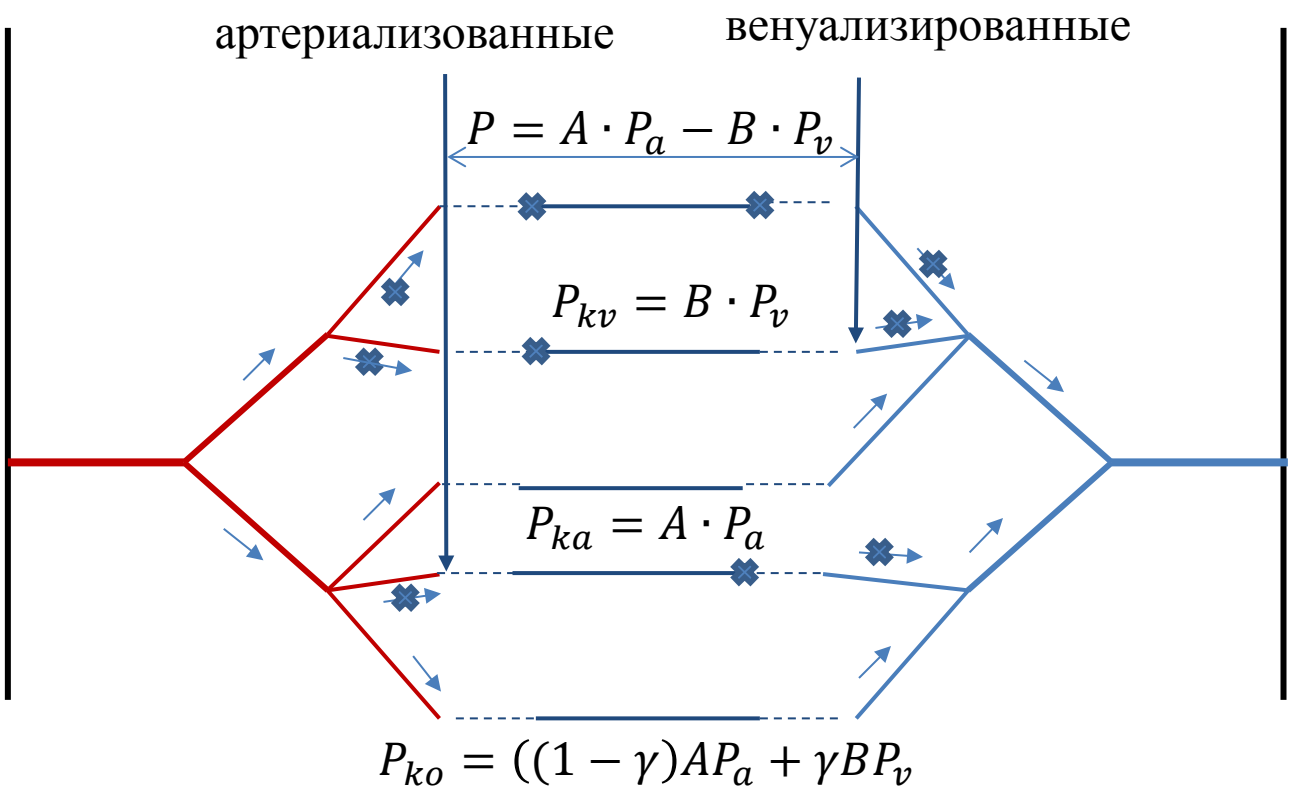


Recording of LDF from brain surface of rat



На капилляре длиной 500 мкм падение давления (а-в) до 2-3 мм. рт. ст.

Артерия P_a **Давление, которое передается в капилляры** Вена P_v



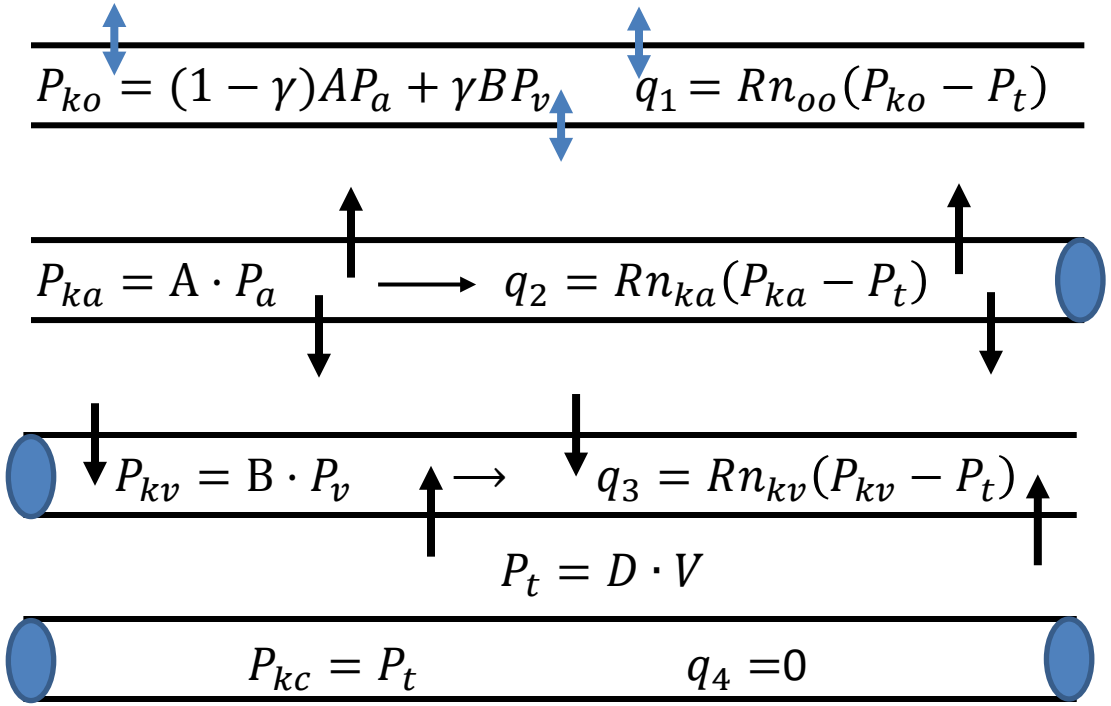
Разбиваем P на две части с помощью множителя γ: γP и (1- γ)P

Уравнения

Ткань

$$V(n) = V(n-1) + q_1(n) + q_2(n) + q_3(n) + q_4(n)$$

$$P_t = D \cdot V$$



- открытые капилляры

- артериализированные

- венуализированные

- полностью закрытые

Ткань

В стационарных условиях:

V = const, или $q_1+q_2+q_3 = 0$

$$\begin{pmatrix} q_1(1+R\cdot n_{oo}\cdot D) & R\cdot n_{oo}\cdot D\cdot q_2 & R\cdot n_{oo}\cdot D\cdot q_3 \\ R\cdot n_{ka}\cdot D\cdot q_1 & q_2(1+R\cdot n_{ka}\cdot D) & R\cdot n_{ka}\cdot D\cdot q_3 \\ R\cdot n_{kv}\cdot D\cdot q_1 & R\cdot n_{kv}\cdot D\cdot q_2 & q_3(1+R\cdot n_{kv}\cdot D) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R\cdot n_{oo}\cdot(P_{ko}-D\cdot V) \\ R\cdot n_{ka}\cdot(P_{ka}-D\cdot V) \\ R\cdot n_{kv}\cdot(P_{kv}-D\cdot V) \end{pmatrix}$$

$$q_1 = R\cdot n_{oo}(P_{ko}-D\cdot(V+q_1+q_2+q_3)) = R\cdot n_{oo}(P_{ko}-D\cdot V)$$

$$q_2 = R\cdot n_{ka}(P_{ka}-D\cdot(V+q_1+q_2+q_3)) = R\cdot n_{ka}(P_{ka}-D\cdot V)$$

$$q_3 = R\cdot n_{kv}(P_{kv}-D\cdot(V+q_1+q_2+q_3)) = R\cdot n_{kv}(P_{kv}-D\cdot V)$$

$$V = \frac{n_{oo}P_{ko}+n_{ka}P_{ka}+n_{kv}P_{kv}}{D\cdot(n_{oo}+n_{ka}+n_{kv})}$$

Параметры модели

Параметр	Формула	Значение
P_a		100
P_v		5
D		0,24
A		0,5
B		2,2
γ		0,3-0,7
R		0,01
P_{ka}	$A \cdot P_a$	50
P_{kv}	$B \cdot P_v$	11
P_{ko}	$(1-\gamma)A \cdot P_a + \gamma B \cdot P_v$	7,1
V	$\frac{n_{oo}P_{ko} + n_{ka}P_{ka} + n_{kv}P_{kv}}{D \cdot (n_{oo} + n_{ka} + n_{kv})}$	0,5

Эксперимент

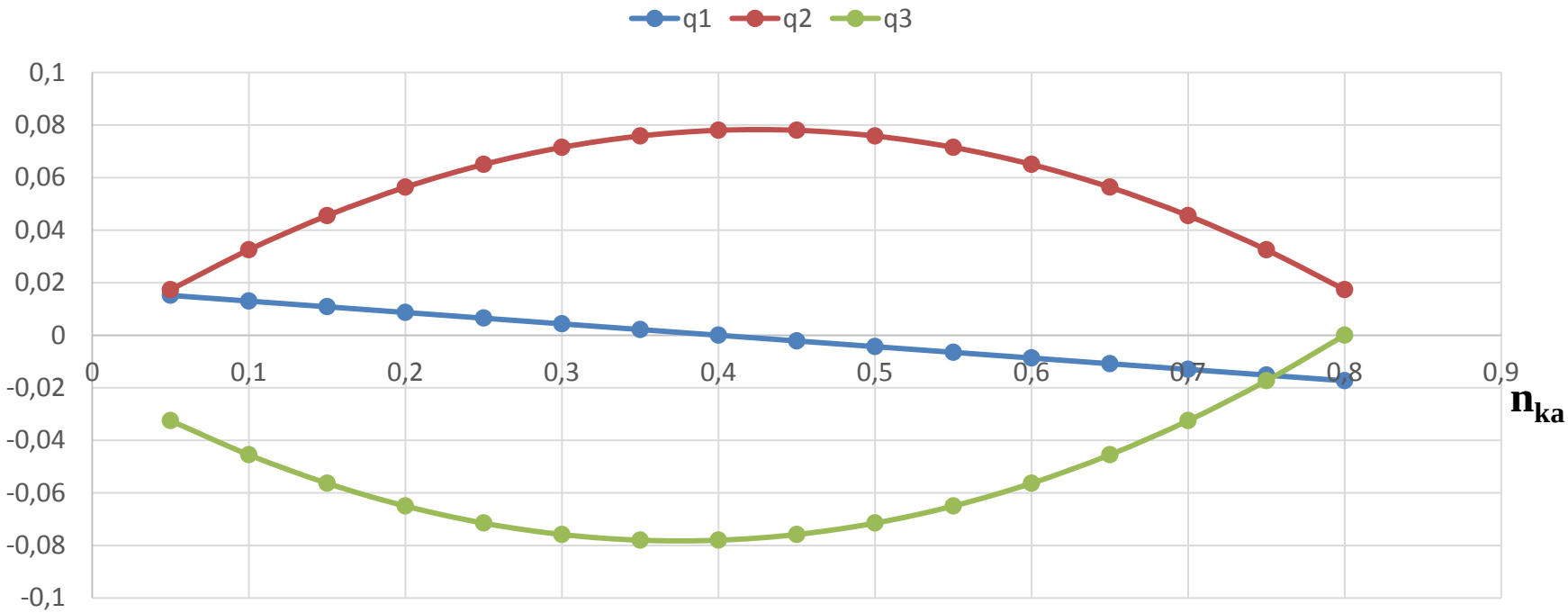
$$q_1 = R \cdot n_o \cdot P \cdot [n \cdot (1-\gamma) - n_{ka}]$$

$$q_2 = R \cdot n_a \cdot P \cdot [\gamma \cdot n_{oo} + n - n_{ka}]$$

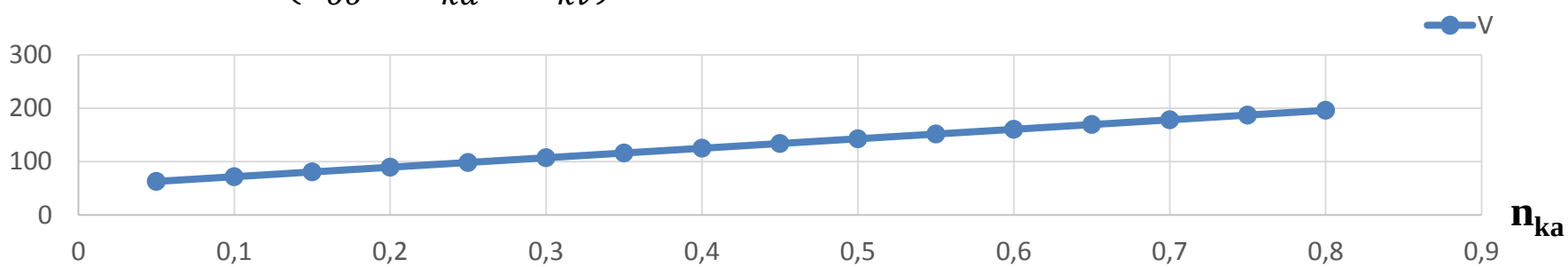
$$q_3 = - R \cdot n_v \cdot P \cdot [(n_{oo} \cdot (1-\gamma) + n_{ka}]$$

$$q_1 + q_2 + q_3 = 0$$

$$n = n_{ka} + n_{kv}$$



$$V = \frac{n_{oo} P_{ko} + n_{ka} P_{ka} + n_{kv} P_{kv}}{D \cdot (n_{oo} + n_{ka} + n_{kv})}$$



Зависимость перетока ткань-кровь для функционирующих капилляров

$$q_1 = R \cdot n_{oo}(P_{ko} - D \cdot V)$$

Условие $q_1 = 0$:

$$n_{kv}(P_{ko} - P_{kv}) = n_{ka}(P_{ka} - P_{ko})$$

Надо отметить, что давления обеспечивает, в основном, сердце, а распределение капилляров - вазомоции (микроциркуляция).

$$\frac{n_{kv}}{n_{ka}} = \frac{AP_a - ((1-\gamma)AP_a + \gamma BP_v)}{(1-\gamma)AP_a + \gamma BP_v - BP_v} = \frac{1-\gamma}{\gamma}$$

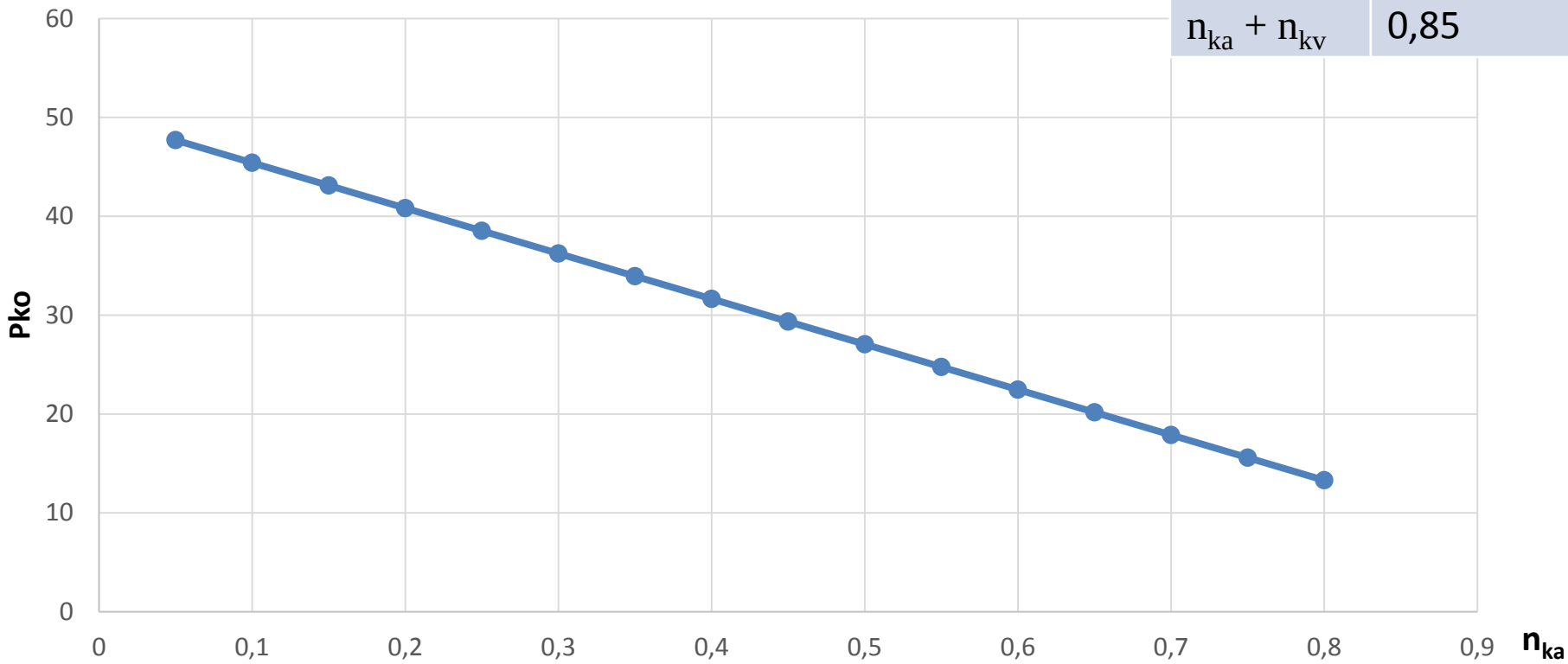
Первый эксперимент: «микроциркуляторный»:

Меняем n_{ka} и находим P_{ko}, которое удовлетворяет уравнению

$$n_{kv}(P_{ko} - P_{kv}) = n_{ka}(P_{ka} - P_{ko})$$

$$n_{kv} + n_{ka} = \text{const}$$

A	0,5
B	2,2
P_a	100
P_v	5
$n_{ka} + n_{kv}$	0,85



$$P_{ko} = (1 - \gamma)AP_a + \gamma BP_v$$

Второй эксперимент: «гемодинамический»

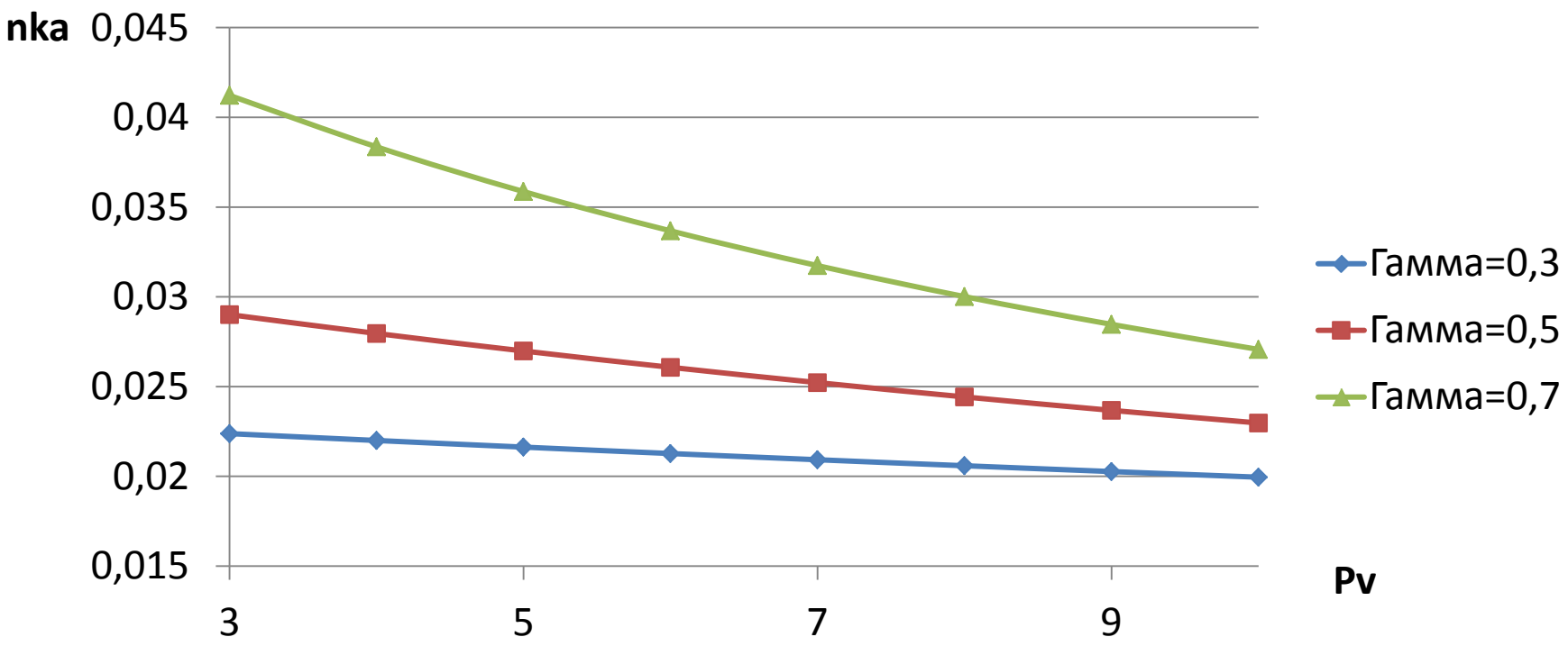
$$n_{kv}(P_{ko} - P_{kv}) = n_{ka}(P_{ka} - P_{ko})$$

$$n_{kv} + n_{ka} = \text{const}$$

A	0,5
B	2,2
P_a	100
P_v	3-10
$n_{ka} + n_{kv}$	0,85
гамма	0,3-0,5

I) меняем $\mathbf{P_v}$

строим зависимость n_{ka} от этих параметров



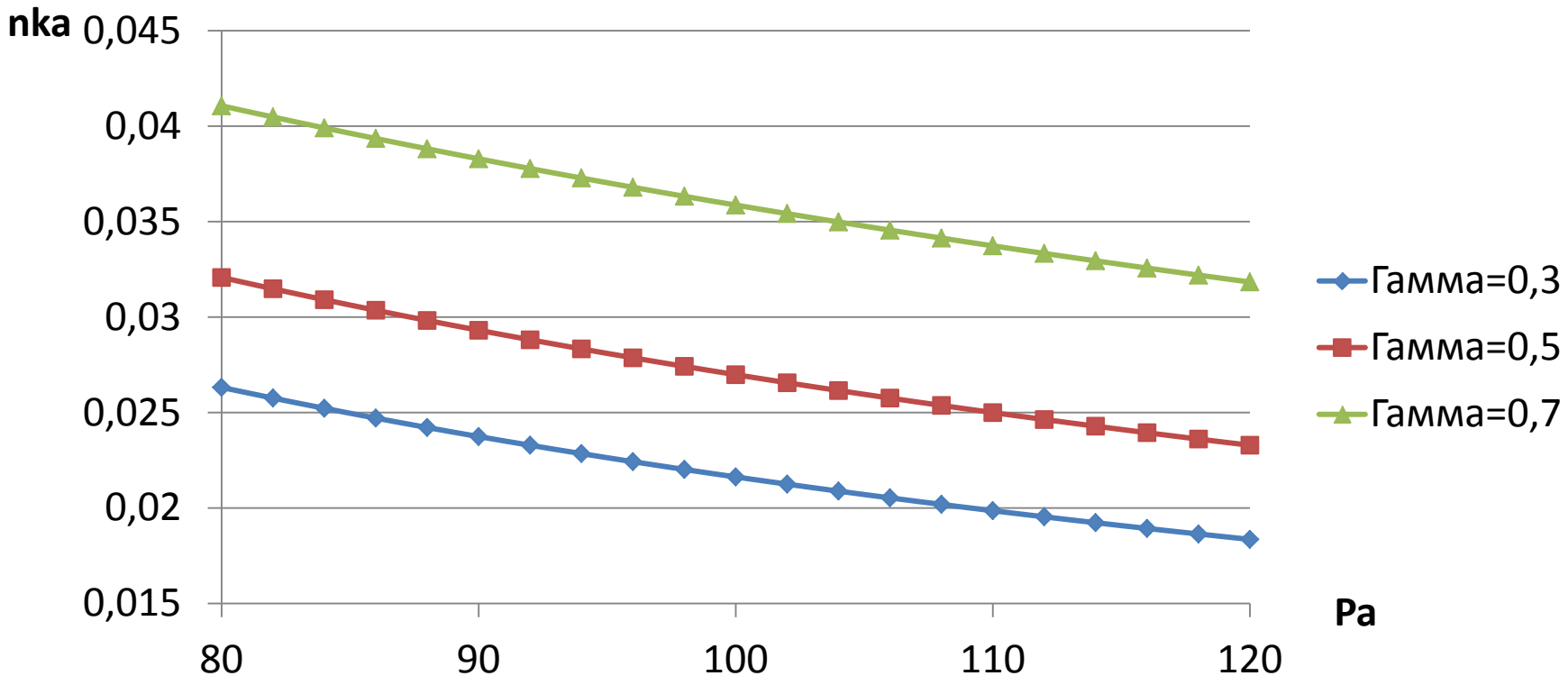
«Гемодинамический» эксперимент, вторая часть

$$n_{kv}(P_{ko} - P_{kv}) = n_{ka}(P_{ka} - P_{ko})$$

$$n_{kv} + n_{ka} = \text{const}$$

A	0,5
B	2,2
P_a	80-120
P_v	5
$n_{ka} + n_{kv}$	0,85
гамма	0,3-0,5

II) меняем $\mathbf{P_a}$ и строим зависимость n_{ka} от этих параметров



Выводы:

Приведена модель перемещения воды ткань-кровь.

Модель предлагает в качестве причины затруднения доставки веществ, как нарушения вазомоторной активности, так и влияние центральной гемодинамики (сердца)

Эти нарушения могут быть причиной снижения снабжения ткани субстратами, осуществляемого конвекцией