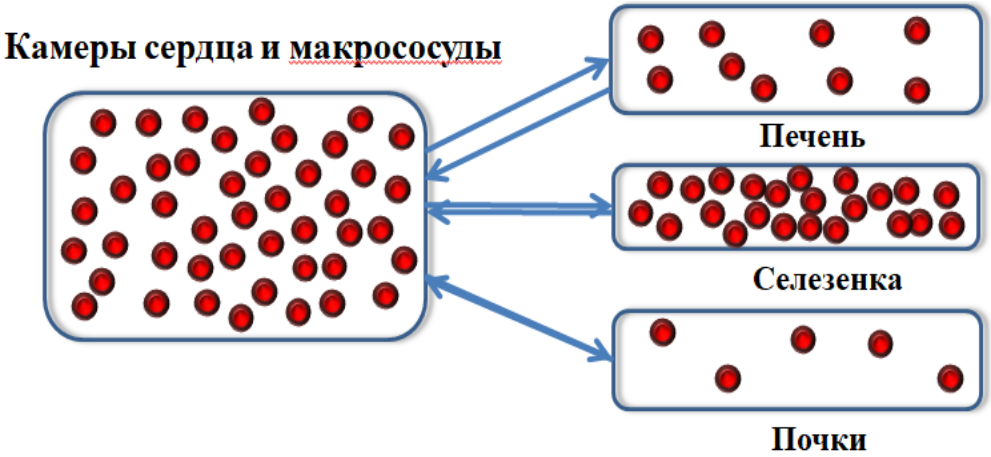
Распределение плазмы и эритроцитов по сердечно-сосудистой системе

[1]КИСЛУХИН В.В., [2]КИСЛУХИНА Е.В.

Цель: Проанализировать один из факторов, определяющих доставку кислорода тканям

[2] -ГБУЗ НИИ СП им. Н.В. Склифосовского ДЗ, Москва, РОССИЯ

Доставка O2: $1.34*Q*Ht_a*HbO_{2a}$ Ht_a – арт. гематокрит



Tissue	Hematocrit	H_t/H_a
Arterial blood (H_a)	0.4	
Spleen	0.82	2.05
Liver	0.41	1.02
Lungs	0.33	0.83
Kidneys	0.15	0.37
Heart	0.22	0.55
Bowel	0.17	0.42
Muscle	0.21	0.53
Brain	0.18	0.45

From Gibson et al. Cl. Inv.1946. Average values for 7 normal dogs. H_t is the tissue hematocrit.

$$Ht_b = \frac{\text{Объём эритроцитов}}{\text{Объём крови}}$$ – гематокрит всего тела

Изотопы: Эр-Cr^{51} и альбумин-I^{131}

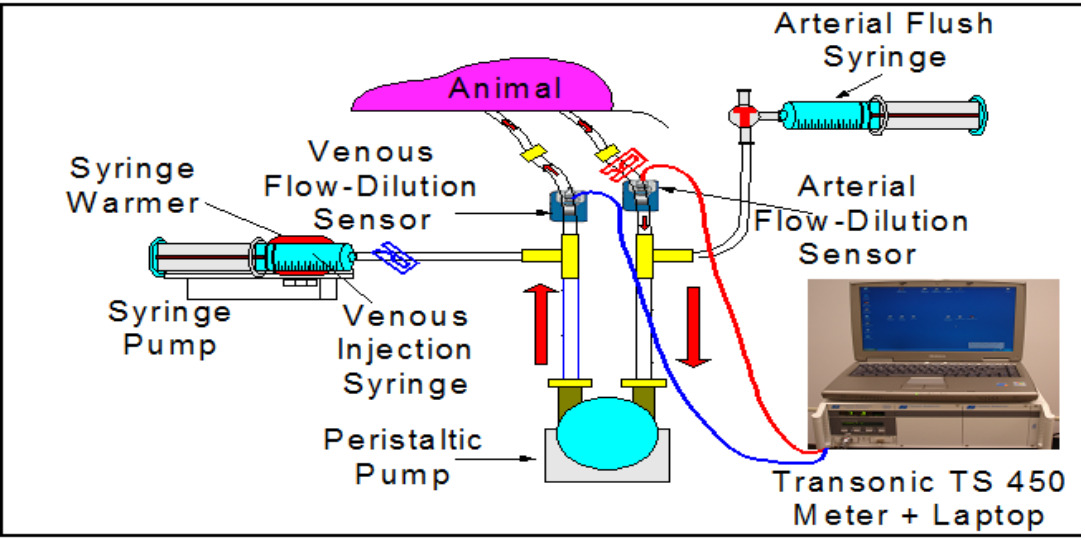
Клеточный фактор

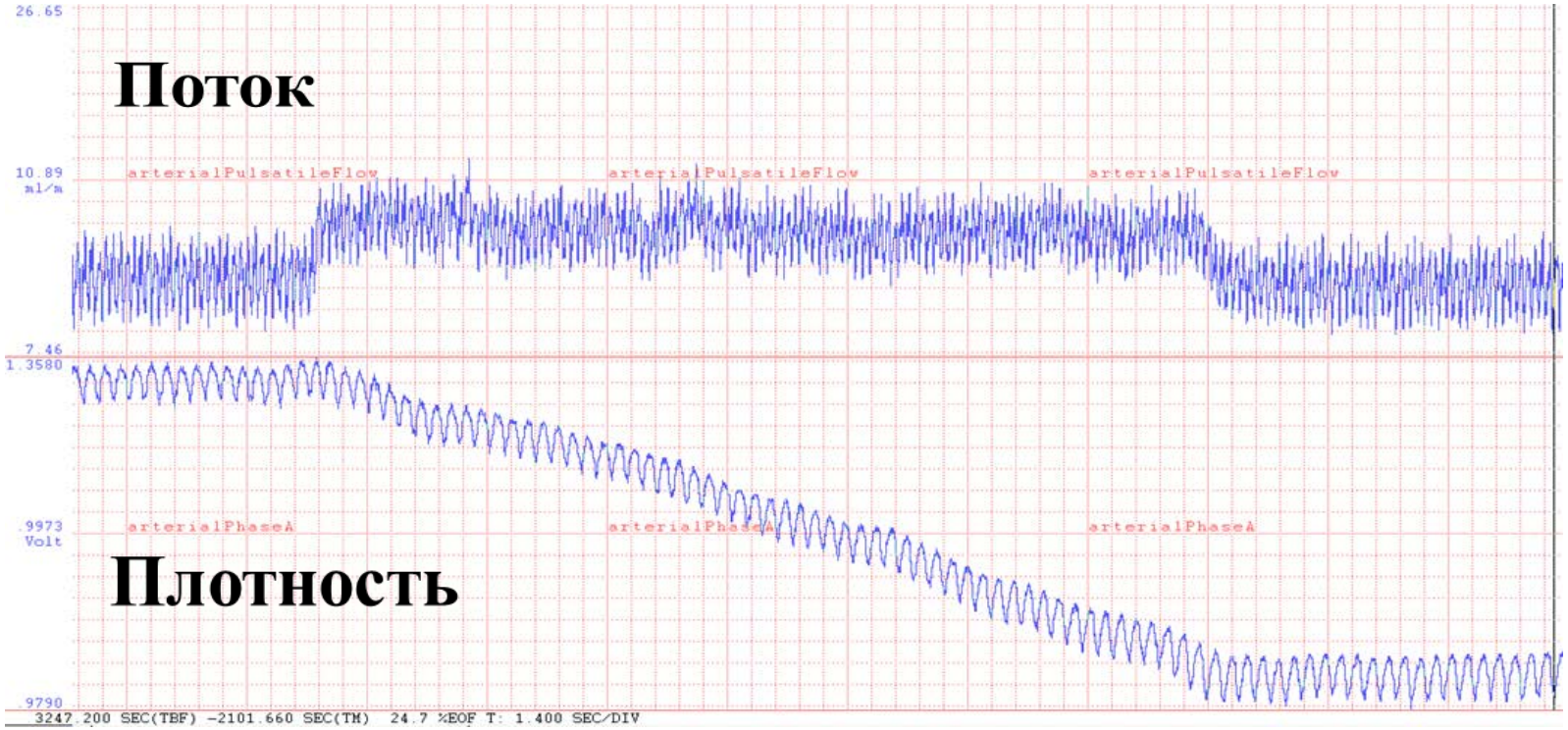
$$КФ = Ht_b/Ht_a$$

$$0.6 < КФ < 1.4$$

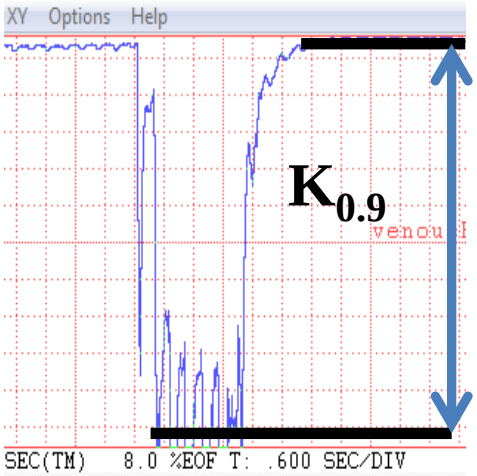
Reference	Number of cases	Hematocrit range	Body/Venous Hematocrit ratio Mean	(S.D.)
Gibson *et al.* (12)	40	38–49	0.906	(0.082)
Reeve and Veall (7)	13	38–47	0.915	(0.012)
Nachman *et al.* (2)	40	26–59	0.895	(0.067)
Berson and Yalow (4)	25	16–72	0.924	(0.040)

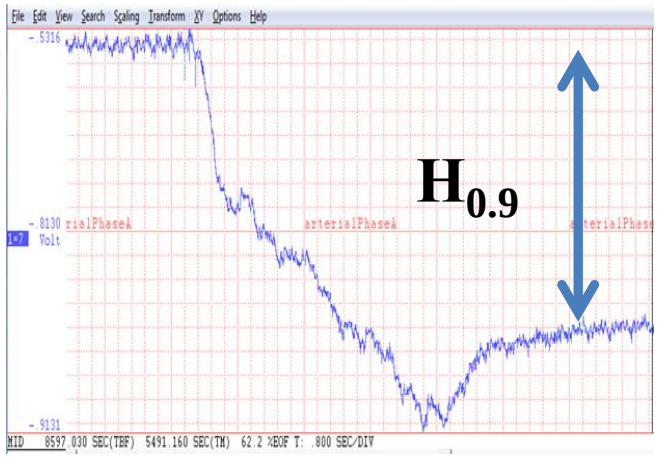
Эксперимент. Кровопотеря

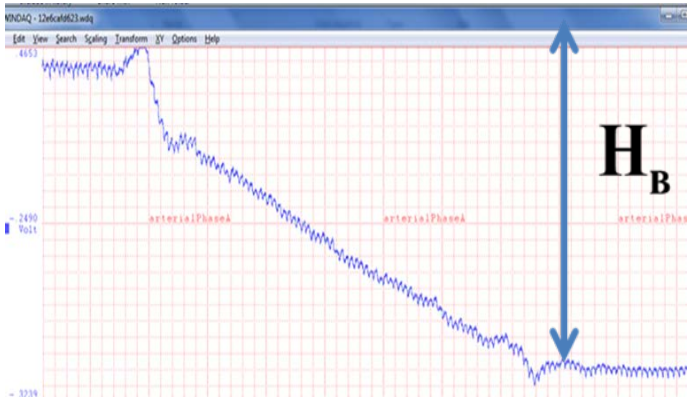




Калибровка крови, инфузия 0.9% NaCl и кровопотеря.







$BV_1 = \alpha \cdot BV$; $N_1 = \mu \cdot N$; $КФ = \alpha/\mu$; $\alpha = f(V)$, $\mu = g(V)$

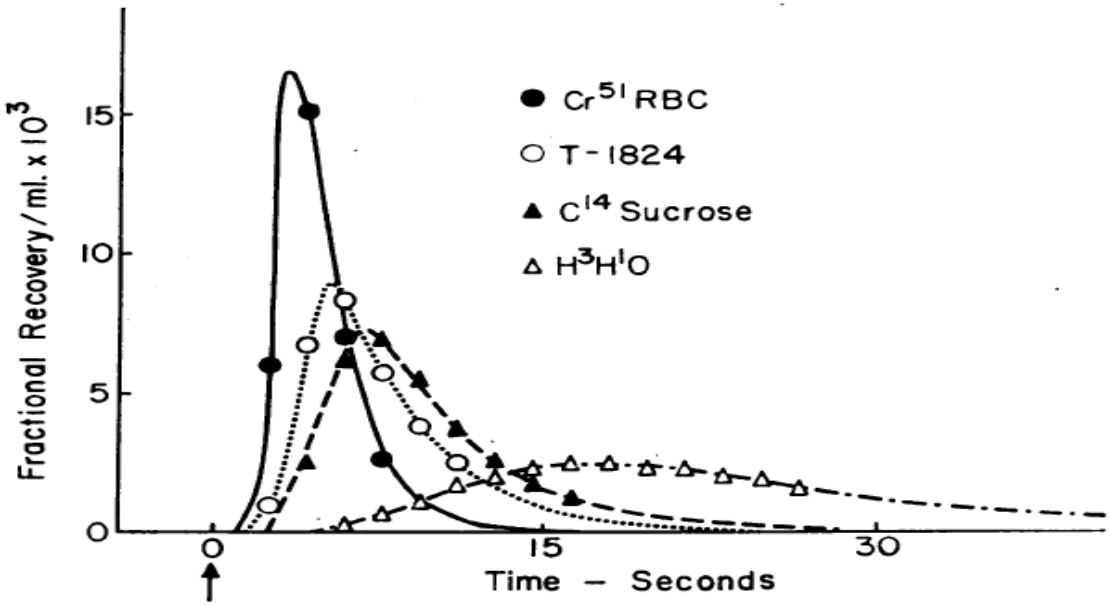
Введение 0.9% NaCl; V_{inj}	Введение Эр-массы; V_{rbc}	Забор крови; V
$Ht_b(V) = Ht_b\left(1 - \frac{V_{inj}}{BV}\right)$	$Ht_b(V) = Ht_b\left(1 + \left(\frac{1}{Ht_b} - 1\right)\frac{V_{rbc}}{BV}\right)$	$Ht_b(V) = Ht_b\left(1 - \left(\frac{Ht_1}{Ht_b} - 1\right)\frac{V}{BV}\right)$
$Ht_1(V) = Ht_1\frac{\mu(V)}{\alpha(V)}\frac{\alpha}{\mu}\left(1 - \frac{V_{inj}}{BV}\right)$	$Ht_1(V) = Ht_1\frac{\mu(V)}{\alpha(V)}\frac{\alpha}{\mu}\left(1 + \left(\frac{1}{Ht_b} - 1\right)\frac{V_{rbc}}{BV}\right)$	$Ht_1(V) = Ht_1\frac{\mu(V)}{\alpha(V)}\frac{\alpha}{\mu}\left(1 - \left(\frac{Ht_1}{Ht_b} - 1\right)\frac{V}{BV}\right)$
$\frac{Ht_1(V_{rbc})}{Ht_1(V_{inj})} = 1 + \frac{1}{Ht_b}\frac{V_{inj}}{BV}$	$\frac{Ht_1(V_{rbc})}{Ht_1(-V)} = \left(\frac{1}{Ht_b} - \frac{Ht_1}{Ht_b}\right)\frac{V}{BV}$	$\frac{Ht_1(V)}{Ht_1(-V_{inj})} = 1 - \frac{Ht_1}{Ht_b}\frac{V}{BV}$
Примем $\frac{\mu(V)}{\alpha(V)}\frac{\alpha}{\mu} \approx 1$ →	$BV = \frac{Ht_1(V) - Ht_1}{Ht_1}V_{inj}$ →	КФ $= \frac{1}{BV}\frac{Ht_1}{Ht_1(-V_{inj}) - Ht_1(V)}$

$$BV = V_{0.9}\frac{K_{0.9}}{H_{0.9}}$$

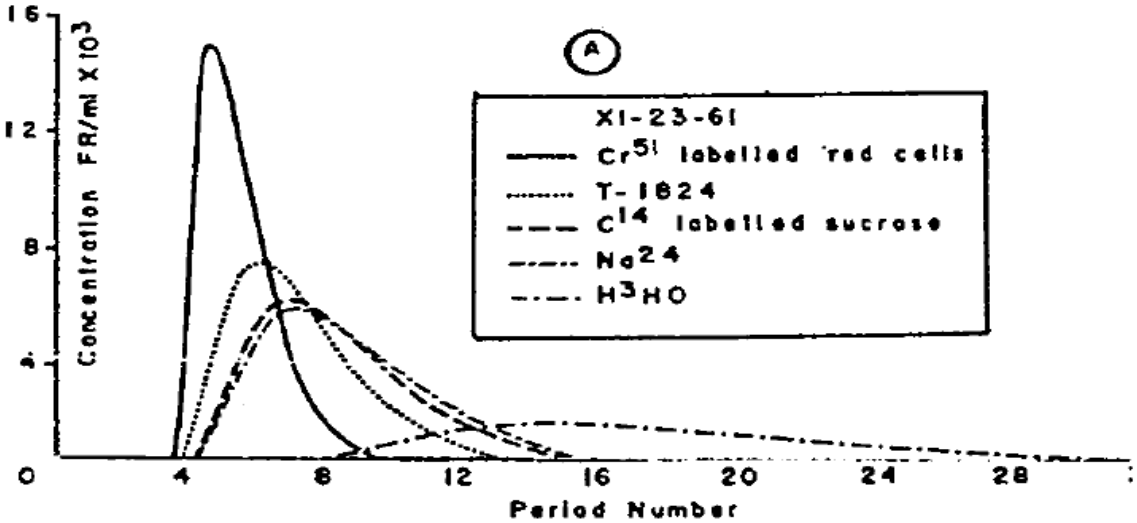
$$КФ = 1 - \frac{H_b}{H_{0.9}}\frac{V_{0.9}}{Withd}$$

Эритроциты проходят микроциркуляцию, почти во всех тканях, быстрее чем плазма

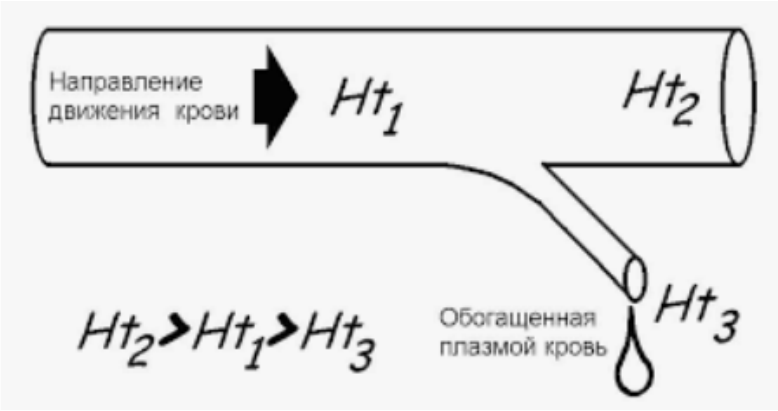
печень

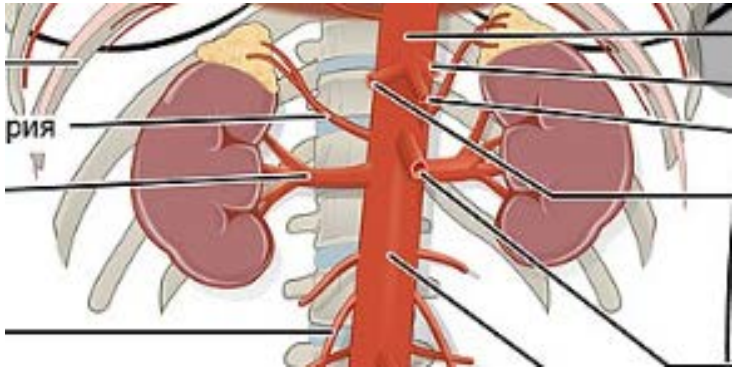


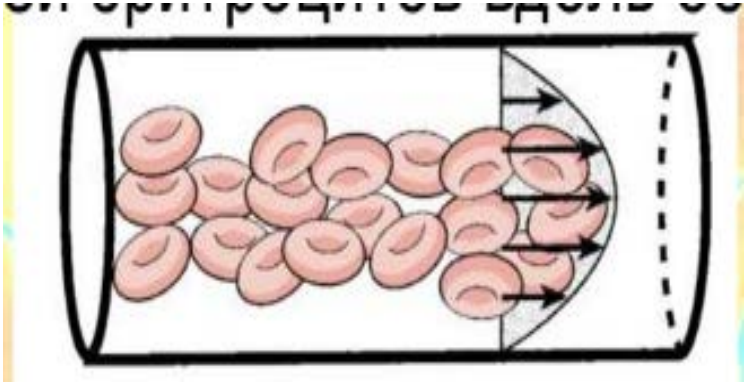
Мышцы ног



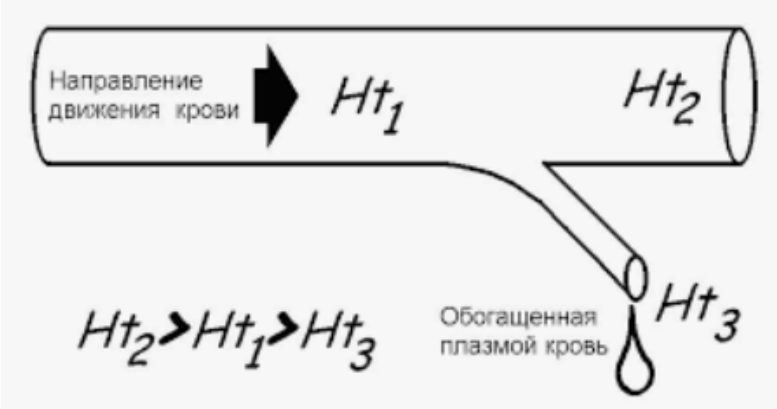
Факторы, формирующие распределение эритроцитов по ССС

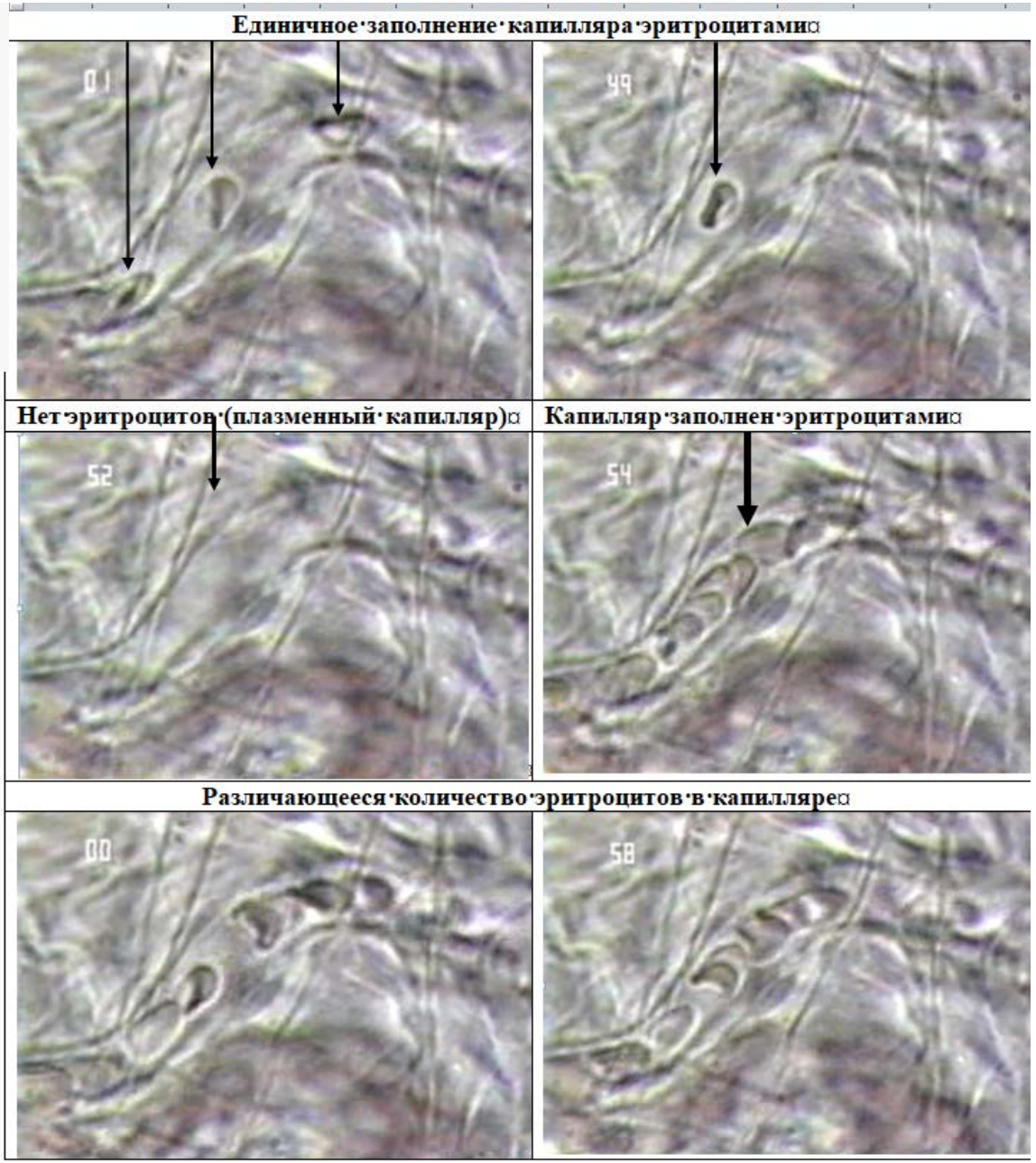




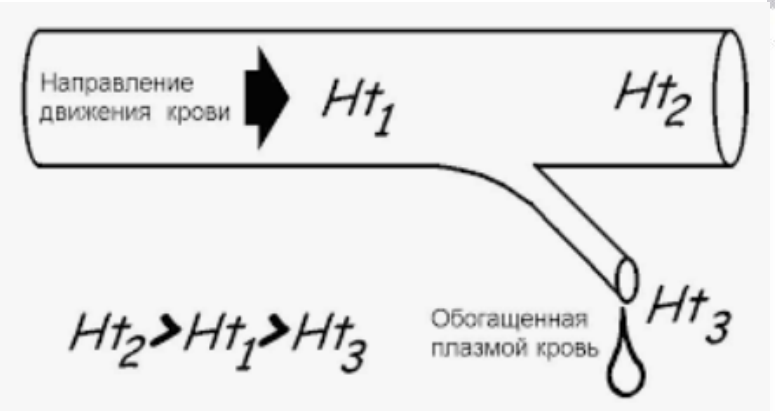


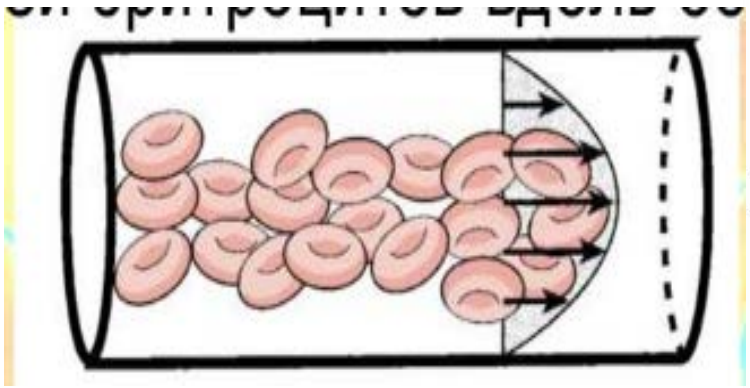
Факторы, формирующие распределение эритроцитов по ССС



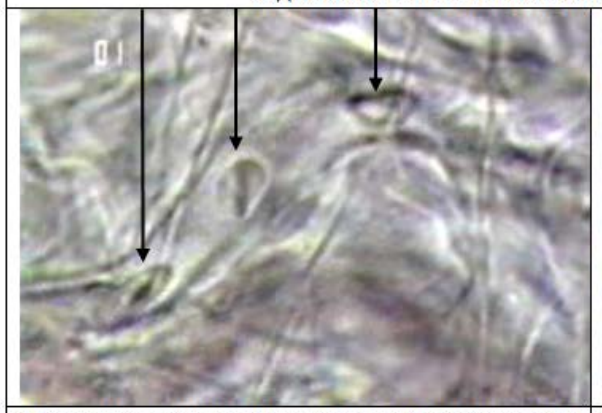


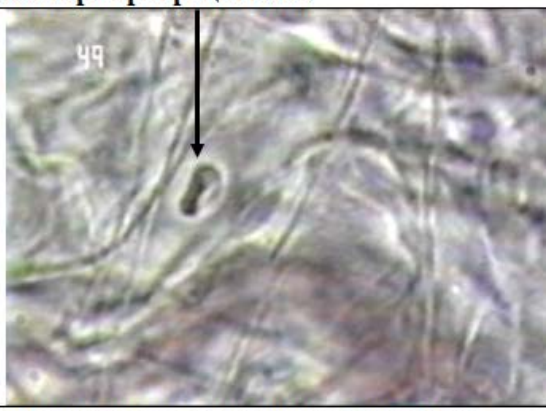
Факторы, формирующие распределение эритроцитов по ССС



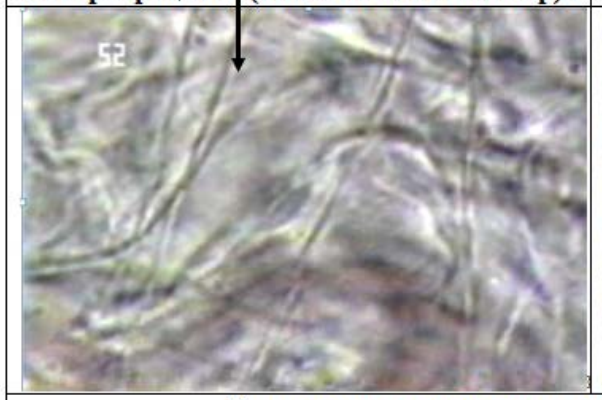


Единичное заполнение капилляра эритроцитами

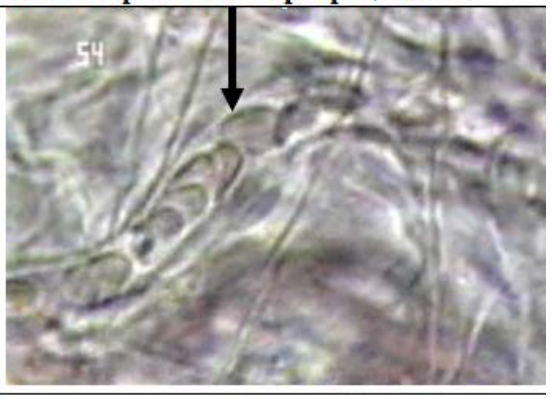




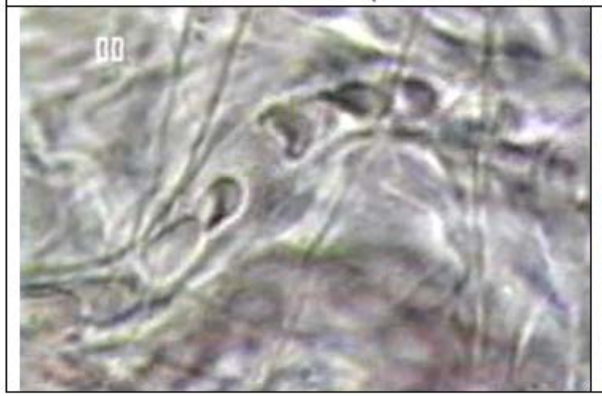
Нет эритроцитов (плазменный капилляр)

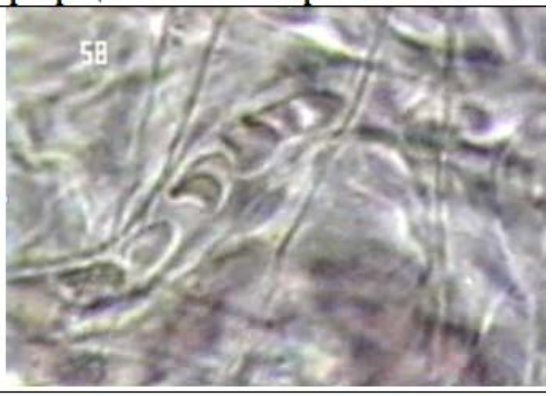


Капилляр заполнен эритроцитами

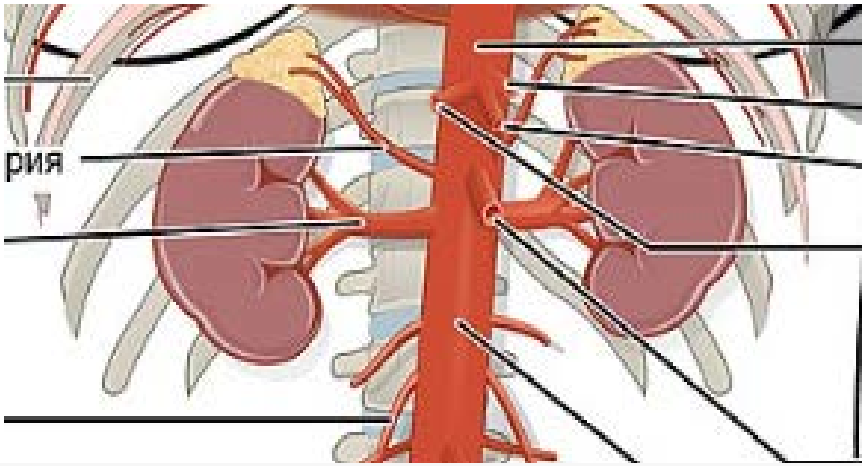


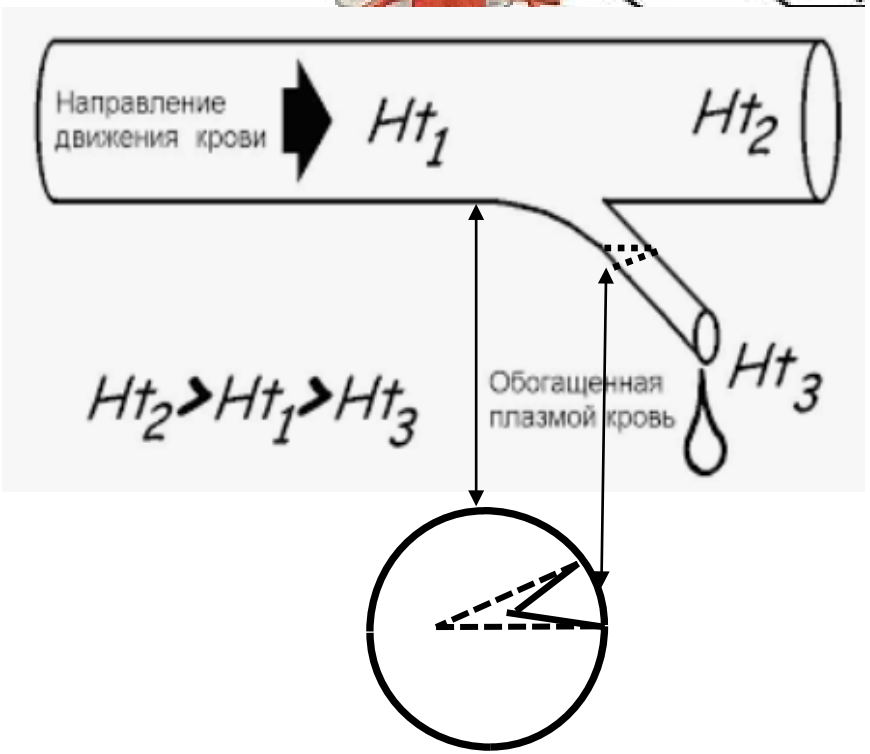
Различающееся количество эритроцитов в капилляре

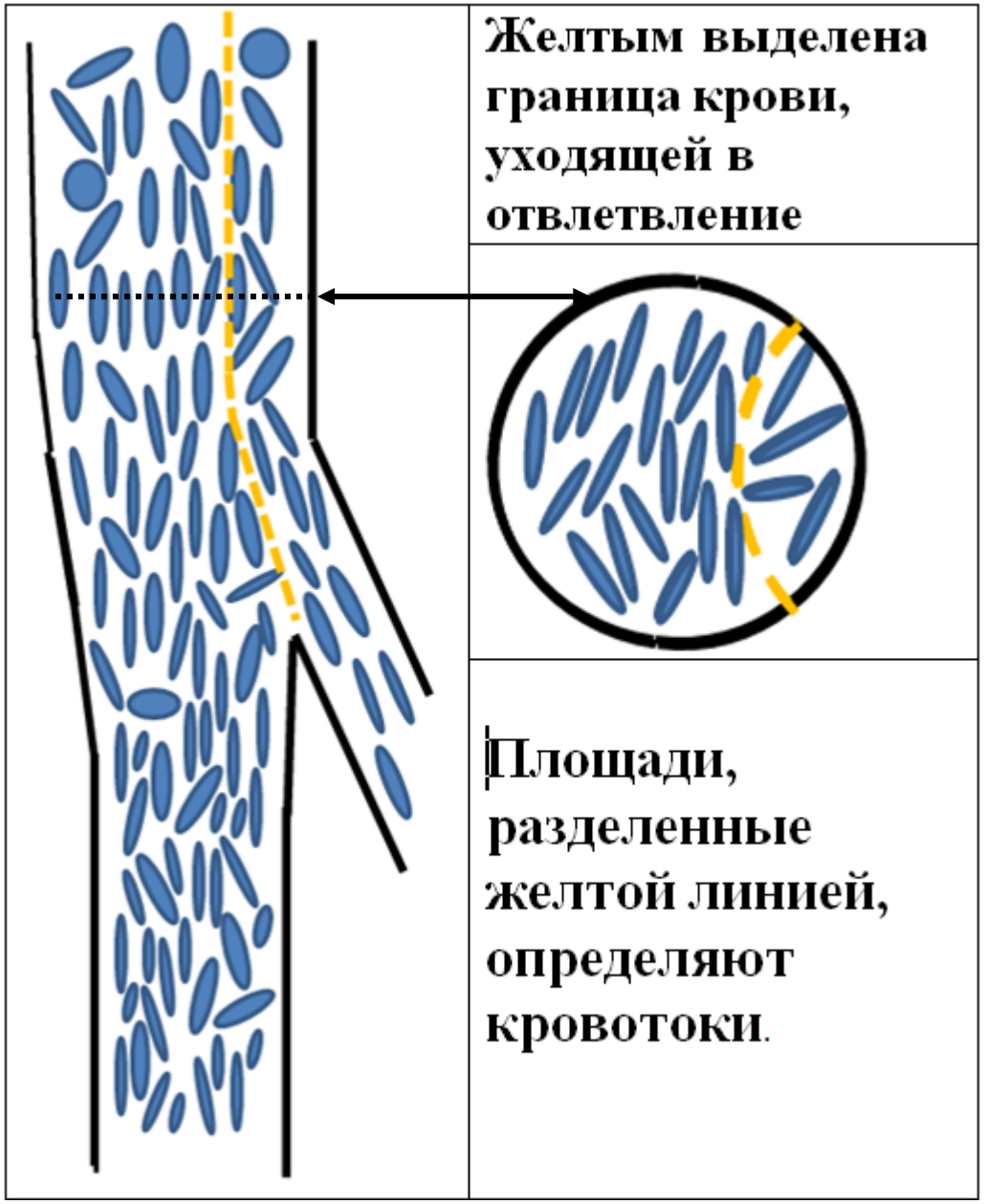




Факторы, формирующие распределение эритроцитов по ССС

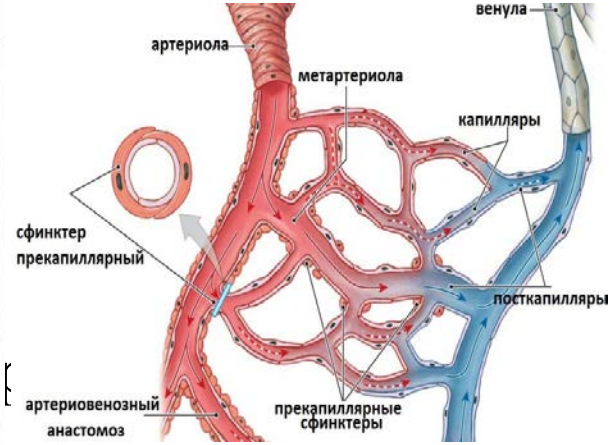


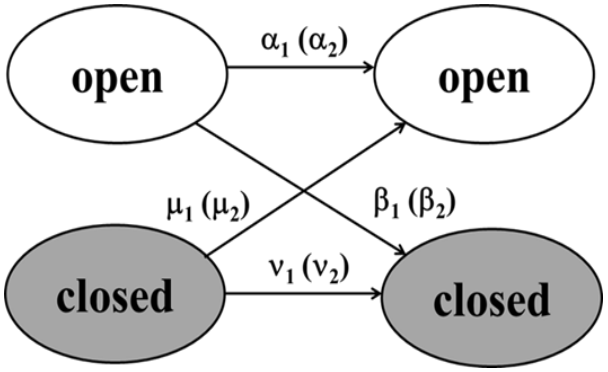




“Соотношение активности пре- и пост-капиллярных сфинктеров влияет на величину капиллярного давления и находясь под контролем местных и центральных факторов, определяет соотношение между объемом крови и внесосудистой жидкости.”

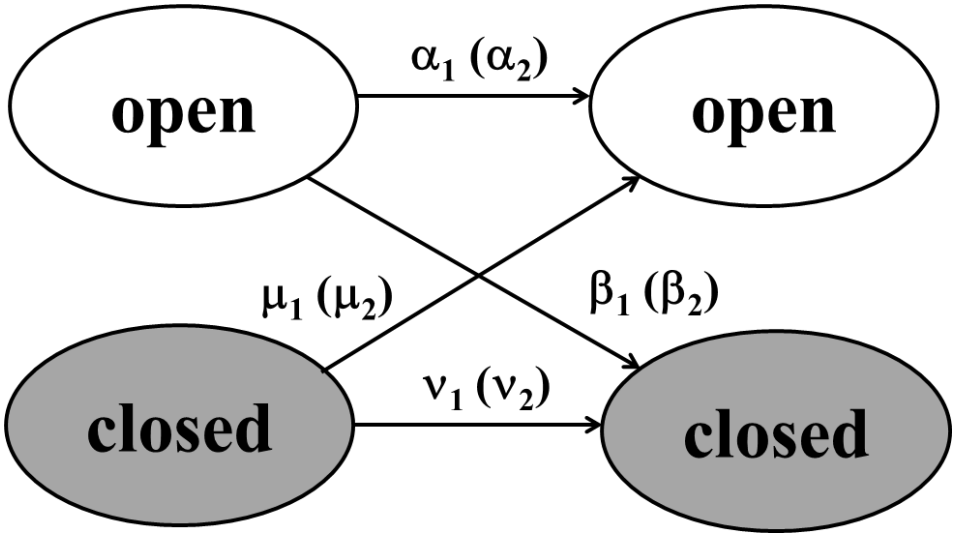
“Circulation of the Blood: men and ideas” (Editors:Fishman, Alfred P., Richards, Dickinson W. first edition 1964)

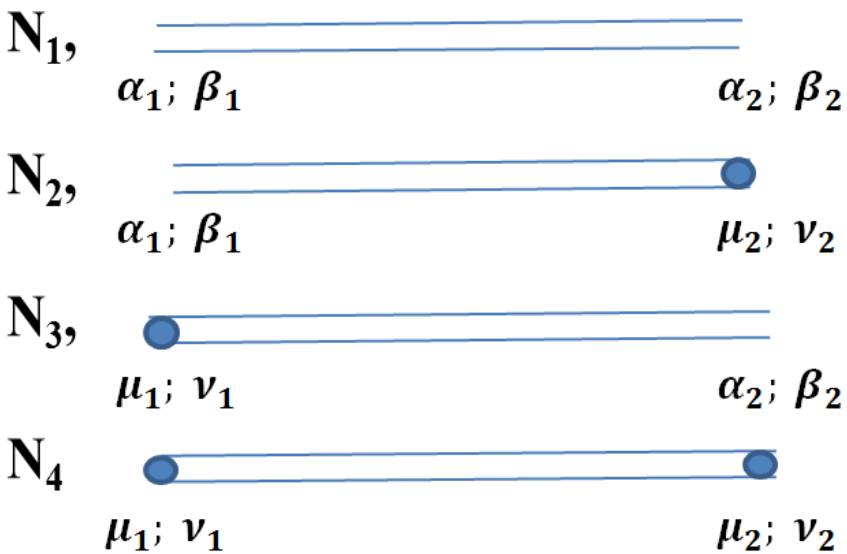




Вероятностное поведение А- и В-сфинктеров.

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)





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

Виды стационарных распределений

	Тип капилляра	$p_а$ =0.3 $p_в$ =0.3	$p_а$ =0.9 $p_в$ =0.1	$p_а$ =0.1 $p_в$ =0.9
N_{oo}	<открытые> = $N\, p_а p_в$	0.09	0.09	0.09
N_{oc}	<артериальный> = $N\,(1-p_в)p_а$	0.18	0.81	0.01
N_{co}	<венозный> = $N\,(1-p_а)p_в$	0.18	0.01	0.81
N_{cc}	<закрытые> = $N\,(1-p_а)(1-p_в)$	0.49	0.09	0.09

Где $p_а = \dfrac{\mu_1}{\beta_1 + \mu_1}$; $p_в = \dfrac{\mu_2}{\beta_2 + \mu_2}$

$p_а$ – фракция открытых капилляров на артериальной стороне

$p_в$ - фракция открытых капилляров на венозной стороне

Площадь поперечного сечения в микрососудах

Из книги К. Каро, Т. Педли, Р. Шротер, У. Сид «Механика кровообращения», 1981. Фрагмент Таблицы 1, стр. 12

Нормальные значения параметров сердечно-сосудистой системы собак. Там, где это возможно, приведены приблизительные средние значения, а ниже – диапазоны значений.

Тип сосуда	Полная площадь поперечного сечения сосудов каждого уровня, см^2	Скорость крови (пиковое значение), см*с-1
Артериолы	125	0,78 0,5-1,0
Капилляры	600	0,07 0,02-0,17
Венулы	570	0,35 0,2-0,5

Из книги П. Джонсон «Периферическое кровообращение», 1982. Таблицы 1 (фрагмент), стр. 15

Тип сосуда	Суммарная площадь поперечного сечения, мм^2
Артериолы	$1,5*10^4$
Капилляры	$1,8*10^4$
Посткапиллярные венулы	$2,5*10^5$
Венулы	$3,7*10^5$

Площадь поперечного сечения в микрососудах

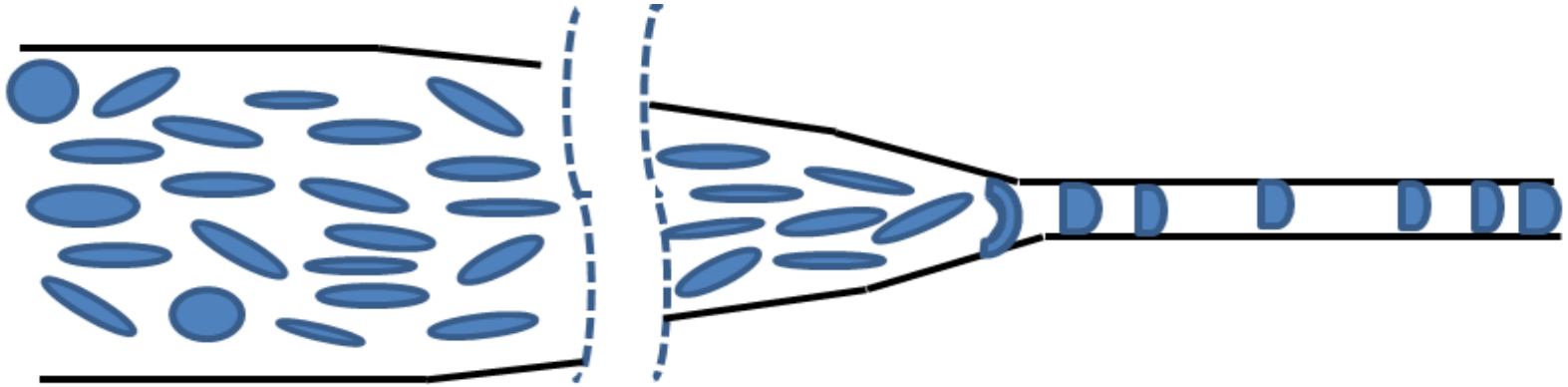
Из книги К. Каро, Т. Педли, Р. Шротер, У. Сид «Механика кровообращения», 1981. Фрагмент Таблицы 1, стр. 12

Нормальные значения параметров сердечно-сосудистой системы собак. Там, где это возможно, приведены приблизительные средние значения, а ниже – диапазоны значений.

Тип сосуда	Полная площадь поперечного сечения сосудов каждого уровня, см^2	Скорость крови (пиковое значение), см*с-1
Артериолы	125	0,78 0,5-1,0
Капилляры	600	0,07 0,02-0,17
Венулы	570	0,35 0,2-0,5

Из книги П. Джонсон «Периферическое кровообращение», 1982. Таблицы 1 (фрагмент), стр. 15

Тип сосуда	Суммарная площадь поперечного сечения, мм^2
Артериолы	$1,5*10^4$
Капилляры	$1,8*10^4$
Посткапиллярные венулы	$2,5*10^5$
Венулы	$3,7*10^5$



Выводы:

Концентрацию эритроцитов в микрососудах определяют два фактора:

1. **Угол отхождения питающей артерии от основного сосуда (аорта)**
2. **Вазомоторная активность пре и пост капиллярных сфинктеров.**

Быстрое прохождение эритроцитами МКЦ определяется:

1. **Эффектом Фареуса-Линдквиста.**
2. **Сужением площади поперечного сечения от артериол к капиллярам**