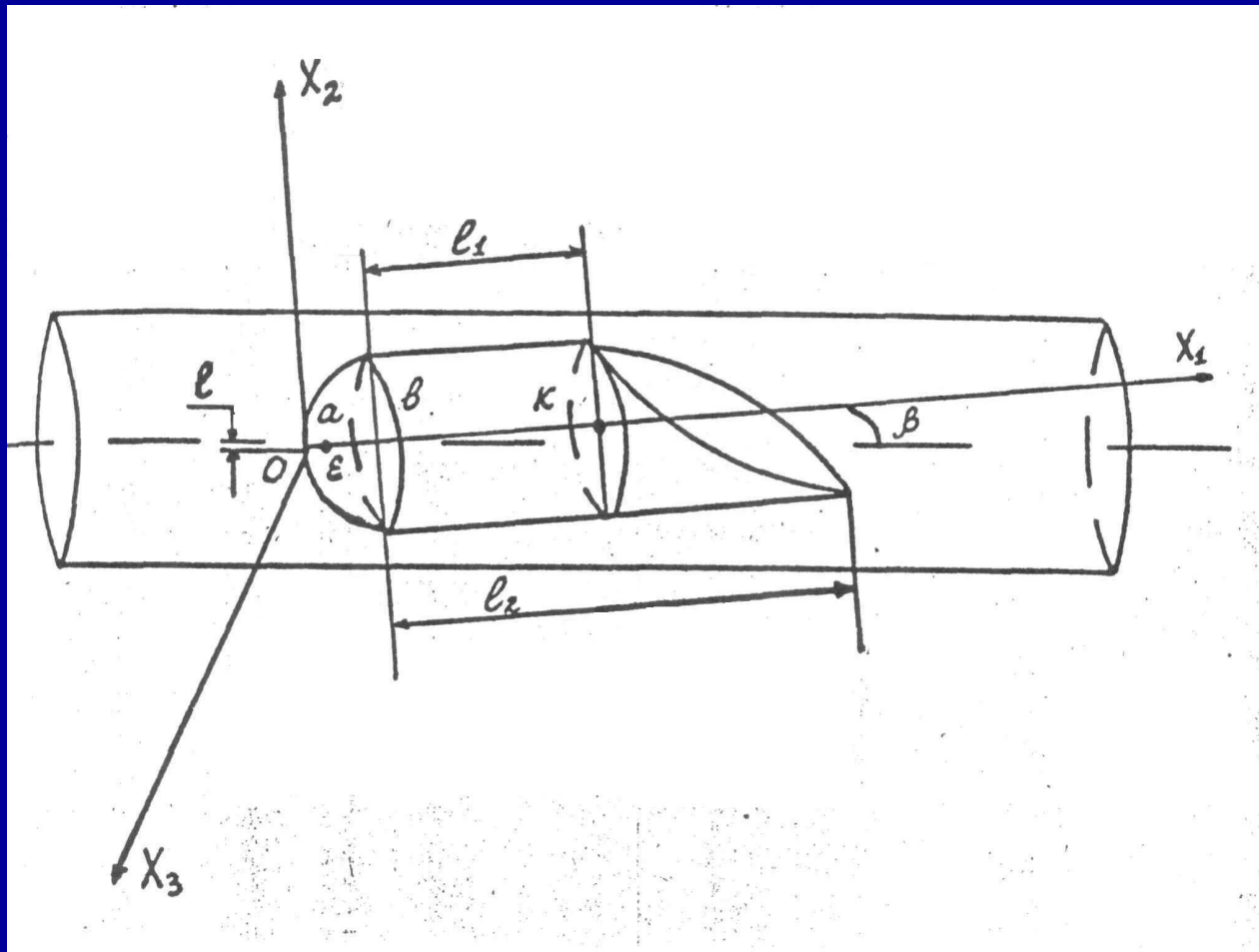


ДВИЖЕНИЕ ЭРИТРОЦИТА В КАПИЛЛЯРЕ

А.В. Копыльцов

Эритроцит в капилляре



Уравнения Рейнольдса для смазочного слоя

$$\frac{\partial P}{\partial X_1} = \frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial u}{\partial r} \right] \quad \frac{\partial P}{\partial \varphi} = \mu \frac{\partial}{\partial r} \left[r \frac{\partial w}{\partial r} \right] \quad \frac{\partial P}{\partial r} = 0$$

$$\frac{\partial w}{\partial \varphi} + \frac{\partial(ru)}{\partial X_1} + \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0$$

Граничные условия

$$\begin{array}{lll} u = W_1 & w = 0 & \text{при } r = R \\ u = U_1 & w = 0 & \text{при } r = R + h \end{array}$$

Кинематические условия

$$v = \frac{w}{r} \frac{\partial r}{\partial \varphi} + u \frac{\partial r}{\partial X_1}$$

Решение уравнений Рейнольдса

$$u = \frac{1}{4\mu} \frac{\partial P}{\partial X_1} \left[r^2 - R^2 - \frac{\ln(r/R)(h^2 + 2Rh)}{\ln(1 + h/R)} \right] + W_1 + (U_1 - W_1) \frac{\ln(r/R)}{\ln(1 + h/R)}$$

$$w = \frac{1}{\mu} \frac{\partial P}{\partial \varphi} \left[r - R - h \frac{\ln(r/R)}{\ln(1 + h/R)} \right]$$

Решение уравнений Рейнольдса

$$A_1 \frac{\partial^2 P}{\partial X_1^2} + A_2 \frac{\partial P}{\partial X_1} + A_3 \frac{\partial^2 P}{\partial \varphi^2} + A_4 \frac{\partial P}{\partial \varphi} + A_5 = 0$$

Параметры

- Диаметр капилляра (D)
 - Вязкость плазмы (μ)
 - Объем (V) эритроцита
 - Площадь поверхности (S) эритроцита
-
- Форма эритроцита (a, b, V, S)
 - Положение в капилляре (l, β)
 - Частота вращения мембраны (f)

Условия

Мембрана:

- Сумма приложенных сил равна нулю.
- Частота вращения - постоянная.

Эритроцит:

- Сумма приложенных сил равна нулю.
- Сумма моментов равна нулю.
- Эритроцит - несжимаемое твердое деформируемое тело с постоянными V и S .

Средние значения параметров

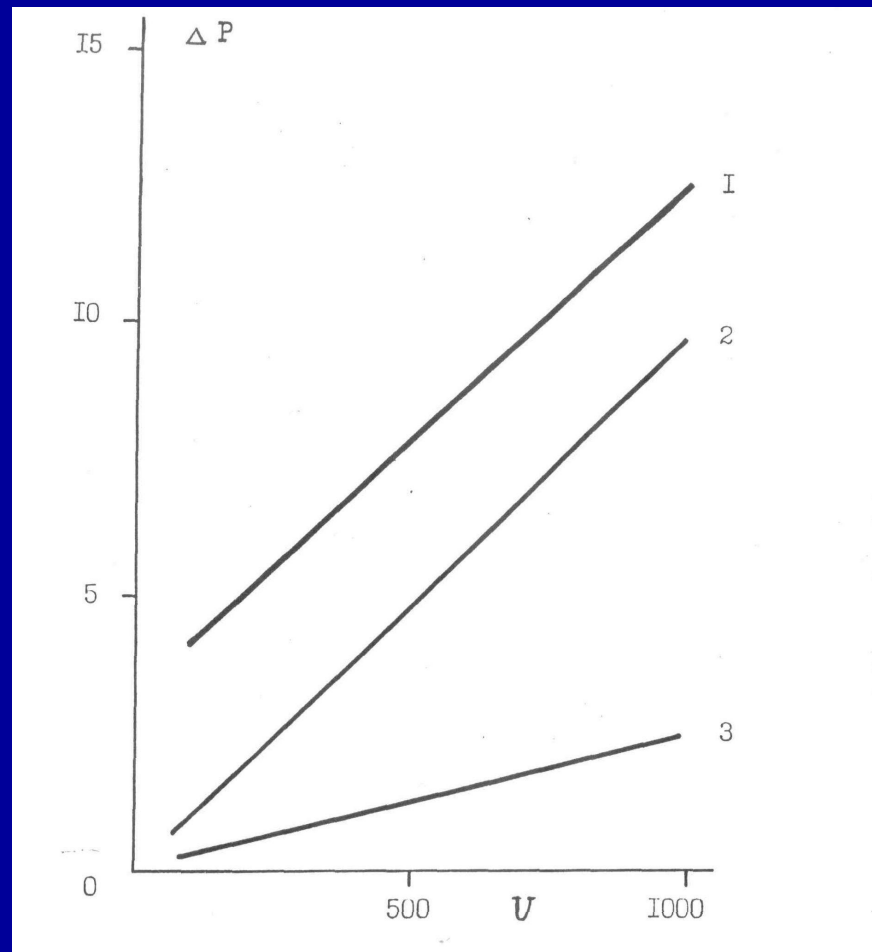
- Вязкость плазмы 1-2 сПз
- Скорость эритроцитов 0,3-1,0 мм/с
- Диаметр капилляров 3-10 мкм
- Длина капилляров 50-1000 мкм
- Гематокрит в капиллярах 0-20 %
- Объем эритроцита 80-110 мкм³
- Площадь поверхности 120-150 мкм²

Разность давлений

$$\Delta P = \frac{32\mu U}{D} \left[\frac{1}{D \alpha} + \frac{V^2}{S^3} + \frac{\beta E}{\mu f + \gamma} \right]$$

Зависимость разности давлений (Н/м²) на концах эритроцита от U (мкм/с).

1 – Lighthill, 2 – Secomb, 3 – Копыльцов



Постоянство V и S является причиной

- несимметричности формы и положения эритроцита в капилляре,
- перекатывания мембраны эритроцита по капилляру,
- снижения сопротивления продвижению эритроцита на 10-20%.

Мембрана эритроцита
вращается с некоторой частотой,
увеличение которой приводит к:

- Снижению величины сопротивления оказываемого эритроциту на 10-20%.
- Понижению вероятности разрушения мембраны эритроцита при прохождении его по узким капиллярам.
- Ускорению отдачи эритроцитом кислорода окружающим тканям.
- Изменению поля скоростей плазмы в окрестности эритроцита.

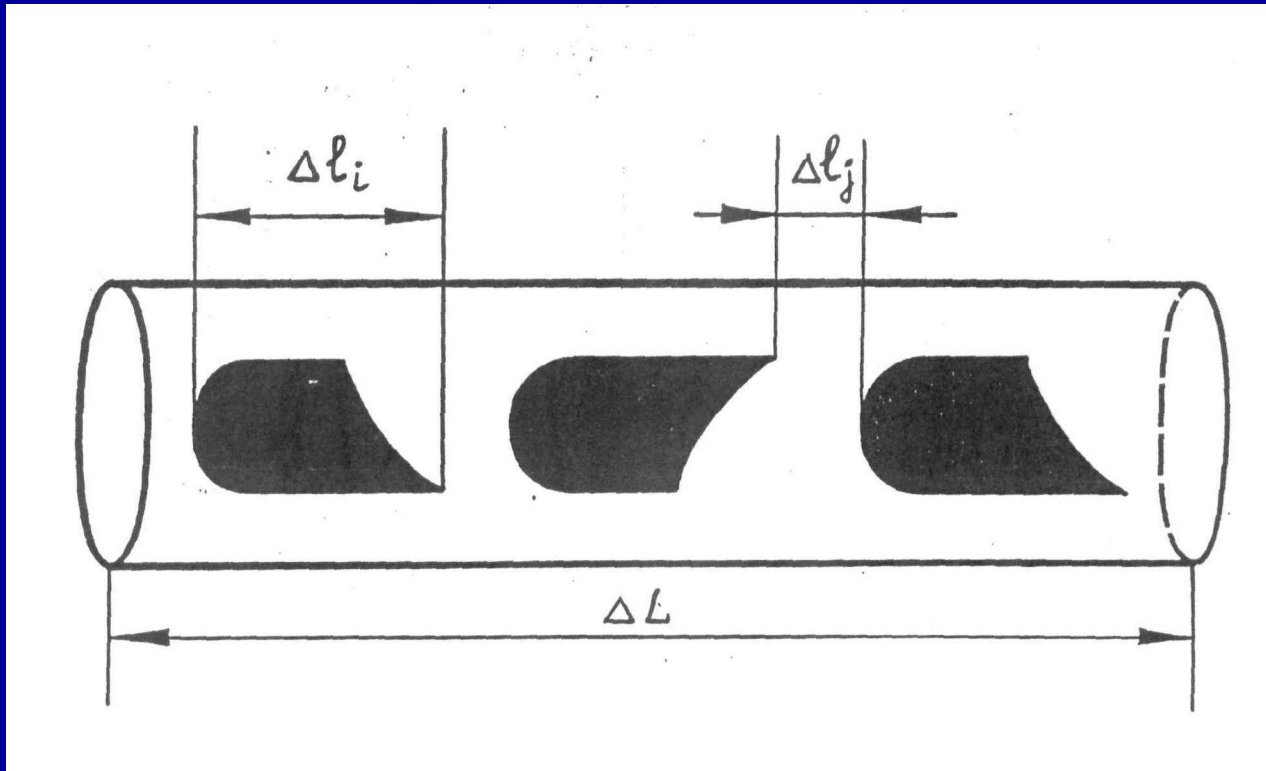
Построена 3-мерная модель эритроцита,
учитывающая:

объем, площадь поверхности, упругие
характеристики эритроцита, вязкость
плазмы и его содержимого

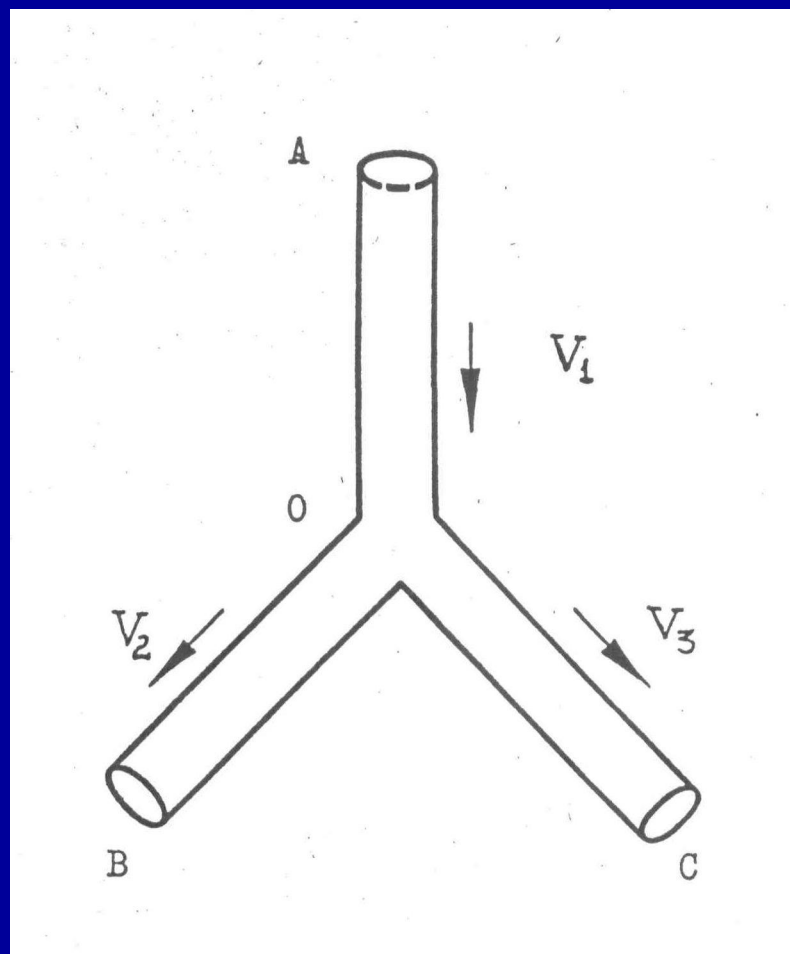
и позволяющая описать:

форму и положение эритроцита в
капилляре, а также его перемещение по
капилляру и движение мембраны
эритроцита.

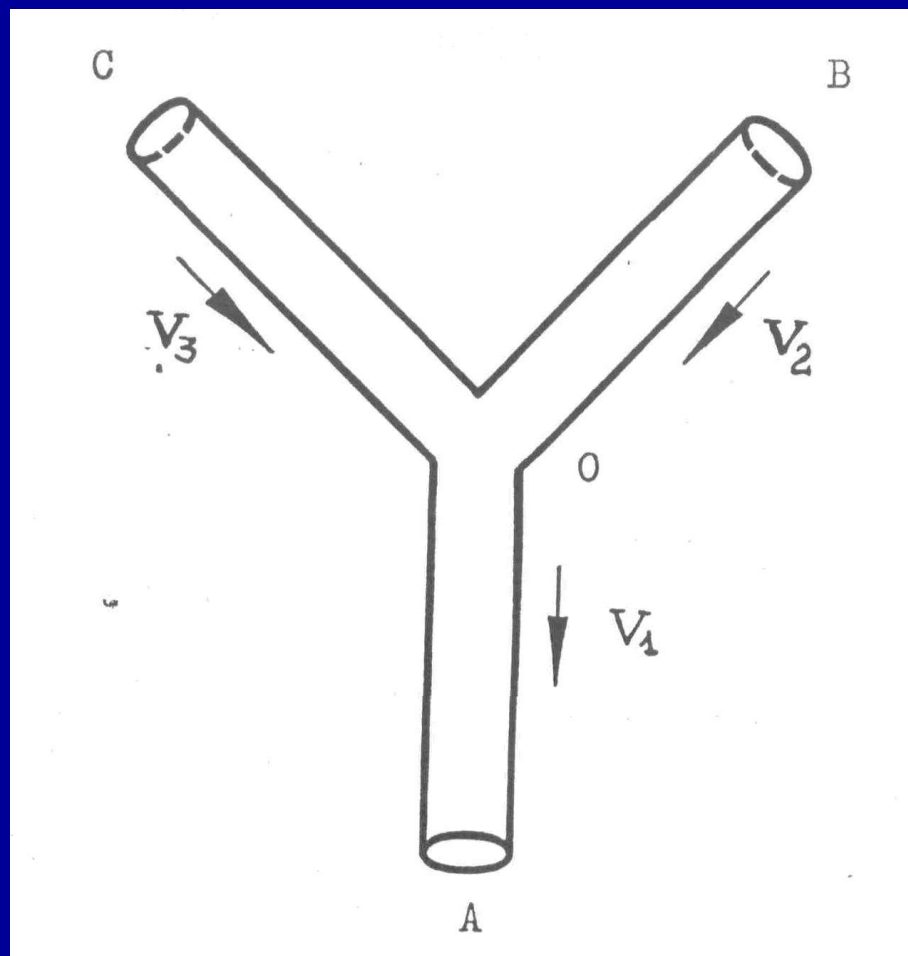
Последовательность эритроцитов в капилляре



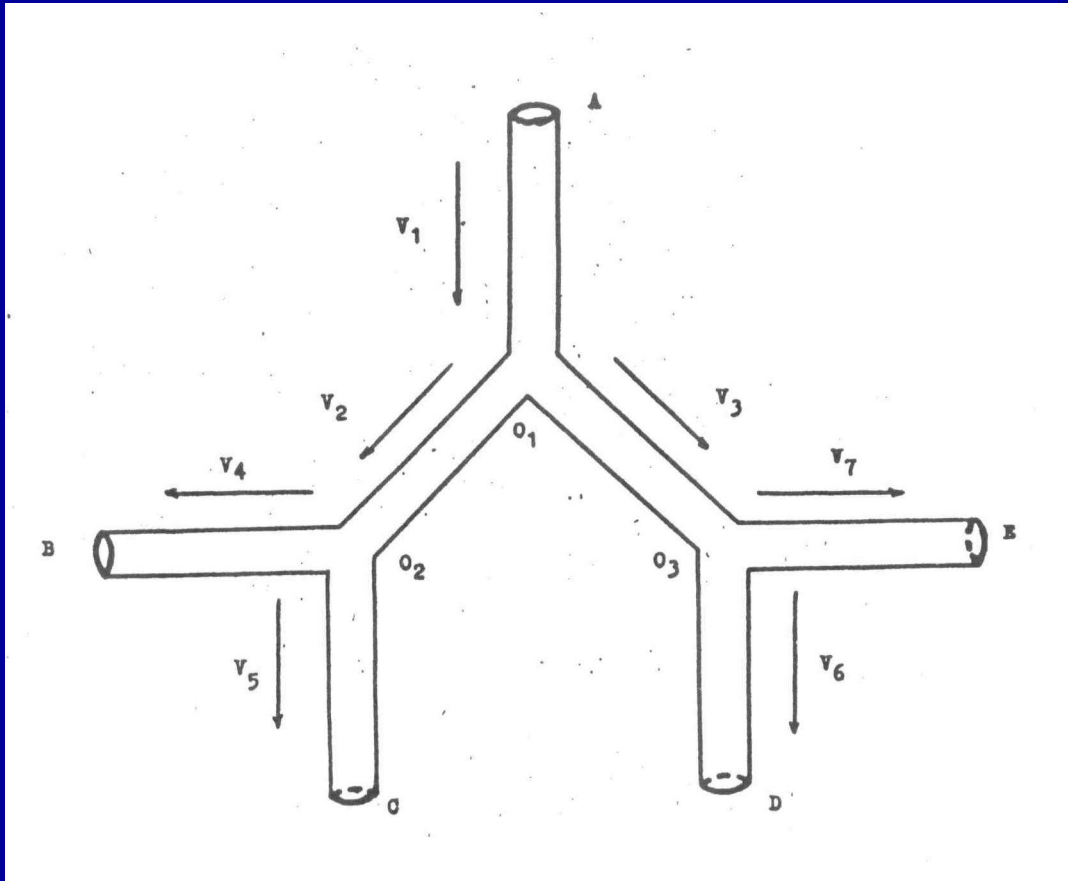
Тройник



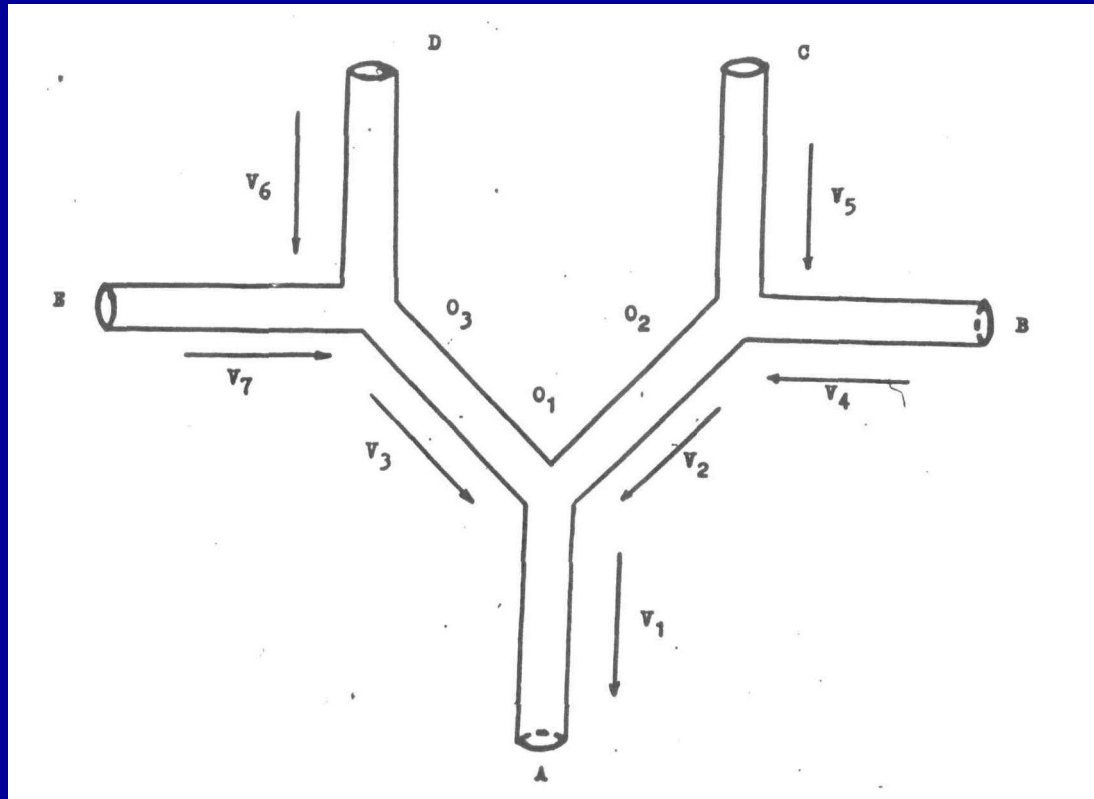
Тройник



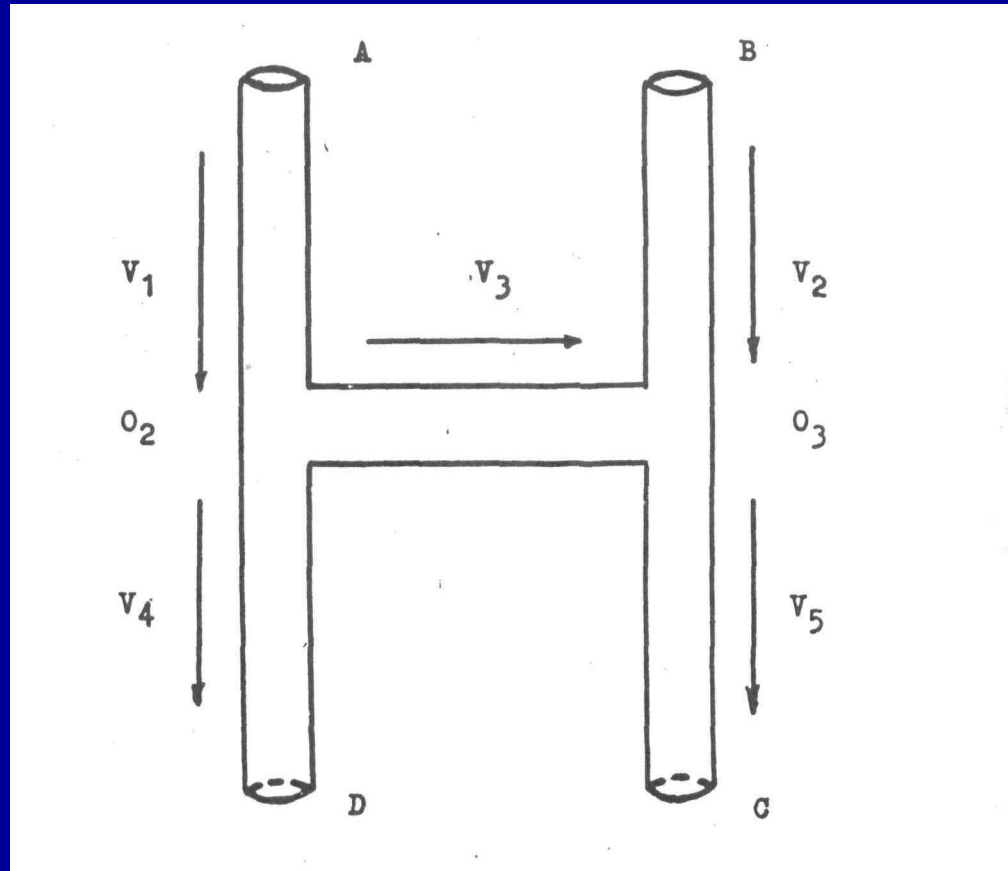
Капиллярная сеть



Капиллярная сеть



Капиллярная сеть



Разность давлений

$$\Delta P = \frac{32\mu U}{D} \left[\frac{L}{D\alpha} + \frac{V^2}{S^3} + \frac{\beta E n}{\mu f + \gamma} \right]$$

$$\Delta P = \frac{32\mu UL}{D} \left[\frac{1}{D\alpha} + \frac{V}{S^3} \frac{\beta E}{\mu f + \gamma} \frac{\pi D^2 H}{4} \right]$$

$$\Delta P = \frac{32\mu UL}{D} \left[\frac{1}{D\alpha} + \frac{V^2}{S^3} \frac{\beta E}{\mu f + \gamma} \frac{1}{U\zeta} \right]$$

Кажущаяся вязкость крови

$$\zeta_a = \frac{\pi r^2 \Delta P}{8Ql}$$

Нормированная вязкость крови

$$\zeta_n = 1 + \frac{al\mu}{D\Delta P\xi}$$

Сравнительный анализ влияния ΔP , ζ , D , L , V и S на кровотоки

При увеличении ζ , D , S и уменьшении V скорость кровотока растёт, а амплитуда ее колебаний убывает.

При увеличении ΔP или уменьшении L скорость и амплитуда ее колебаний увеличиваются.

Сравнительный анализ влияния ΔP , ζ , D , L , V и S на кровотоки

В порядке убывания влияния на кровотоки основные параметры располагаются в следующей последовательности:

ΔP , D , S , V , L , ζ .

СПАСИБО