

ЛЕКЦИЯ 1

08.02. 2017

Система кровообращения человека

1. Гидродинамическая схема кровеносной системы
2. Условие неразрывности струи для системы кровообращения
3. Вязкость крови. Кровь, как неньютоновская жидкость
4. Методы определения вязкости крови
5. Гемодинамическое сопротивление в системе кровообращения
6. Ламинарное и турбулентное течения крови
7. Роль эластичности сосудов в системе кровообращения

8. Пульсовые волны
9. Распределение давления и скорости кровотока в сосудистой системе
10. Показатели кровообращения: кровяное давление и скорость кровотока
11. Методы определения давления крови. Физические основы метода Короткова
12. Методы определения скорости крови. Трубка Пито
13. Эффект Доплера. Ультразвуковой метод определения скорости кровотока.
14. Механическая работа и мощность сердца

Вопросы, рассмотренные в курсе физики (1 семестр)

ЛЕКЦИЯ 3 19.09.16, ПЗ 5 ЛЕЧ

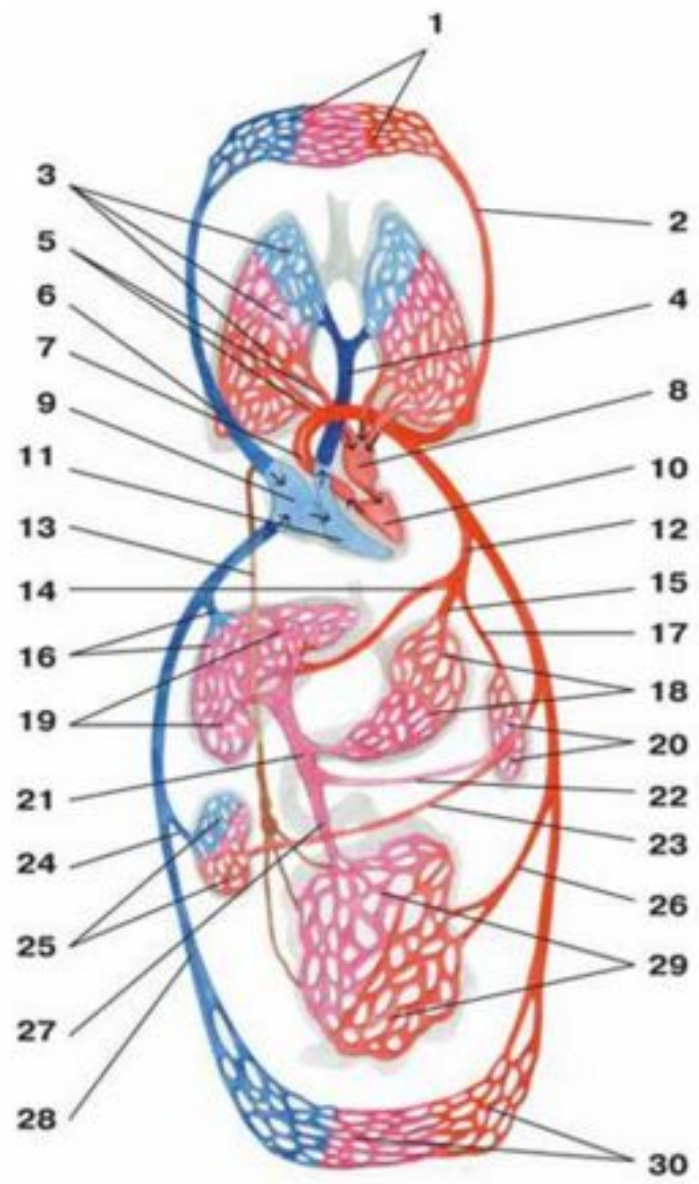
1. Уравнение неразрывности

2. Вязкие жидкости. Методы определения вязкости

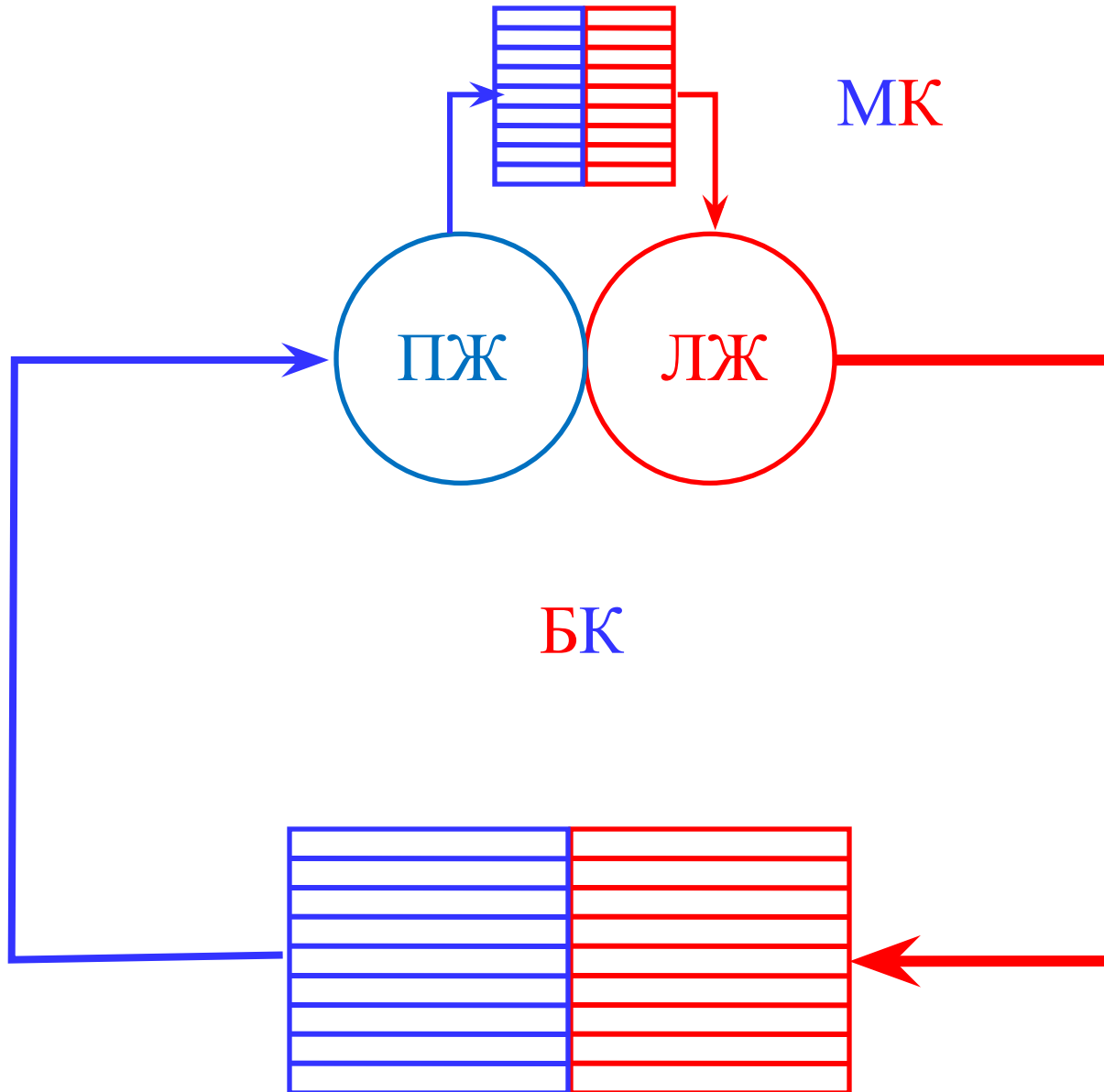
3. Формула Пуазейля. Гидродинамические сопротивления

4. Ламинарное и турбулентное течение. Число Рейнольдса

5. Ультразвук. Эффект Доплера



Два контура (большой и малый круги)



Анализ:

1. Два контура – две гидравлические системы с разными гидравлическими сопротивлениями
2. Течение жидкости в контурах происходит за счет работы двух насосов (ЛЖ и ПЖ)

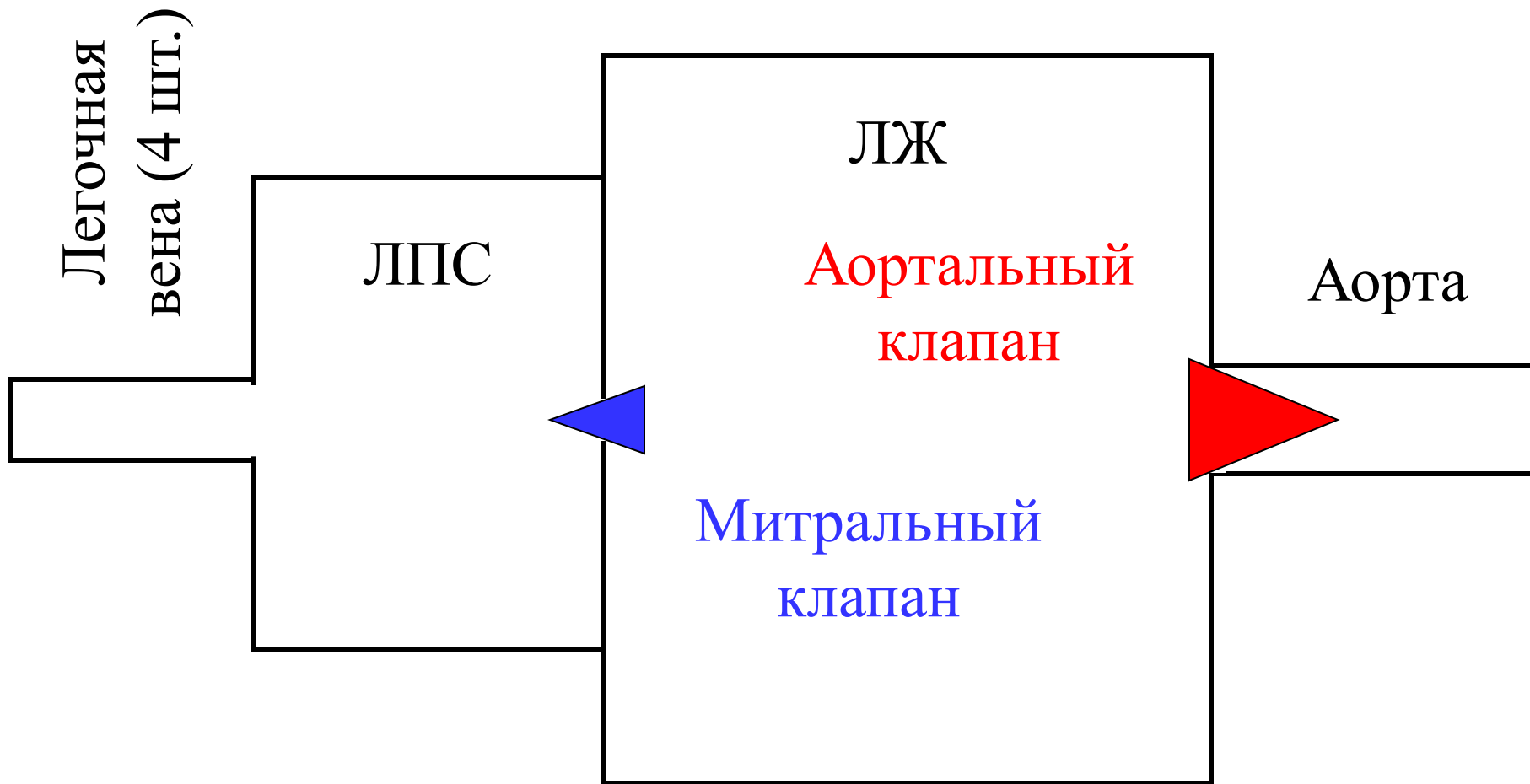
3. Мощности, развиваемые насосами:

$$P_{\text{лев. ж.}} > P_{\text{пр. ж.}}$$

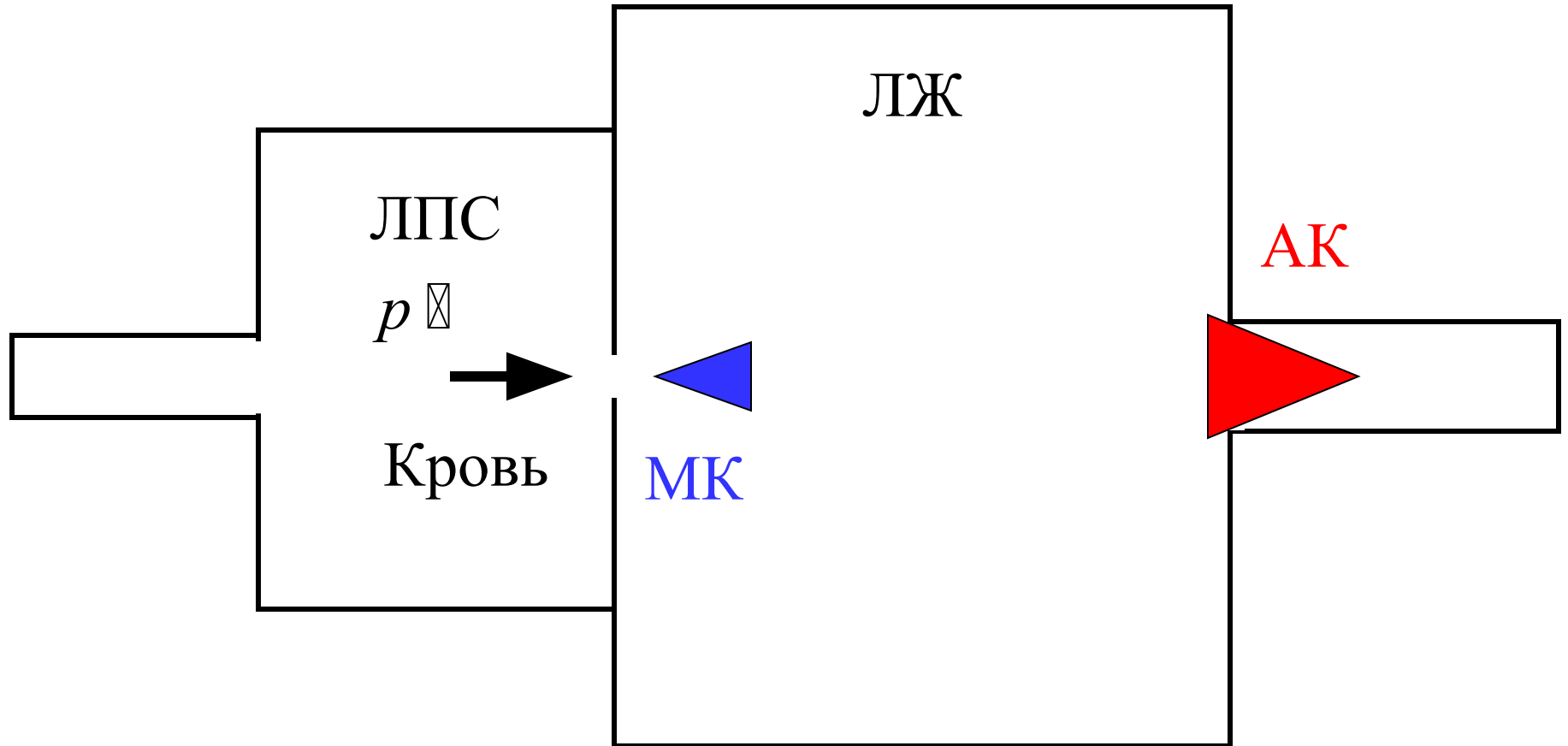
4. Достаточно рассмотреть БК

Деятельность сердца – непрерывная череда, следующих друг за другом циклов

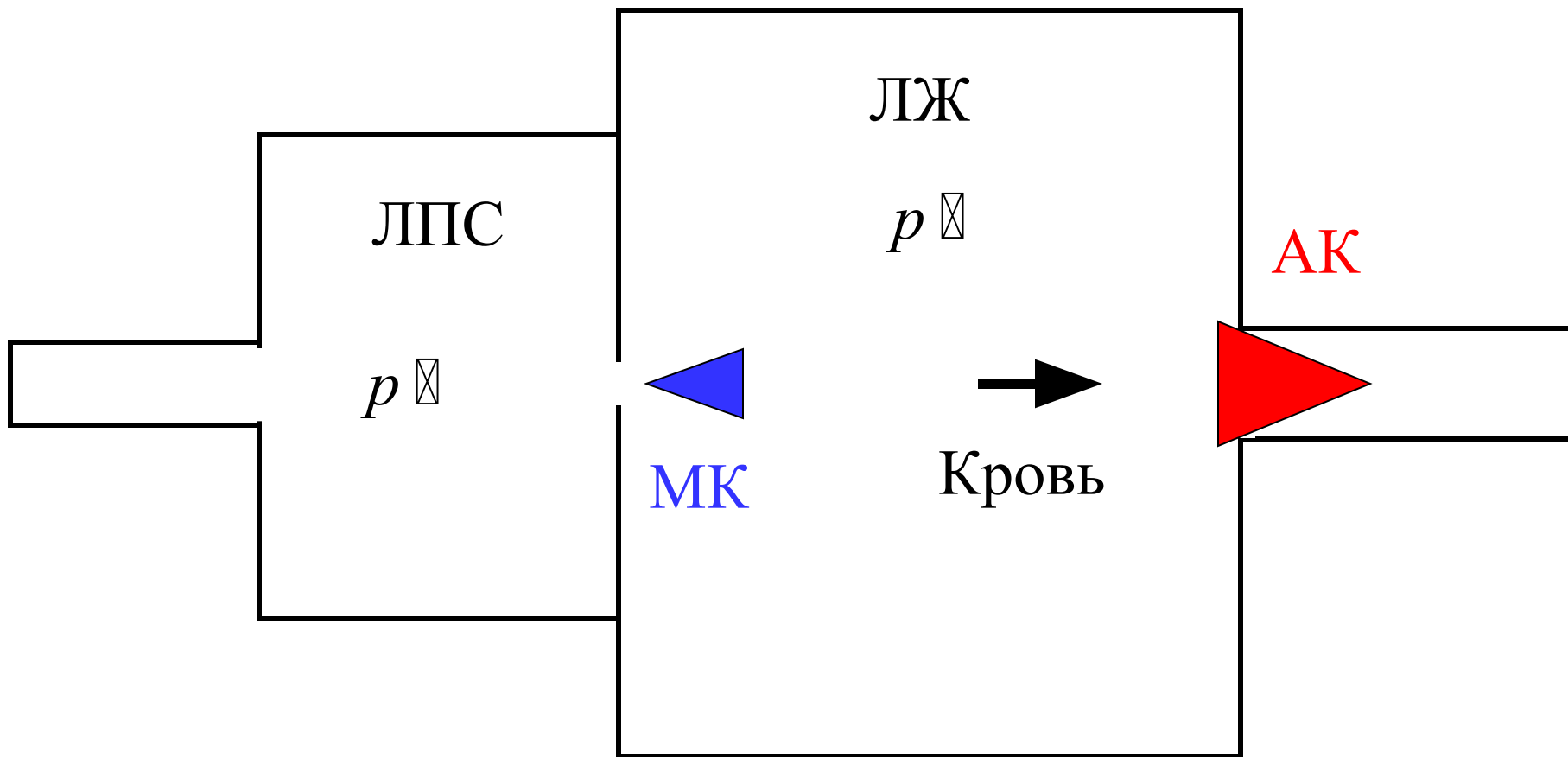
Схема сердечного насоса



1. Систола предсердия $t \approx 0,1$ с $p_{\text{ПС}} \uparrow$

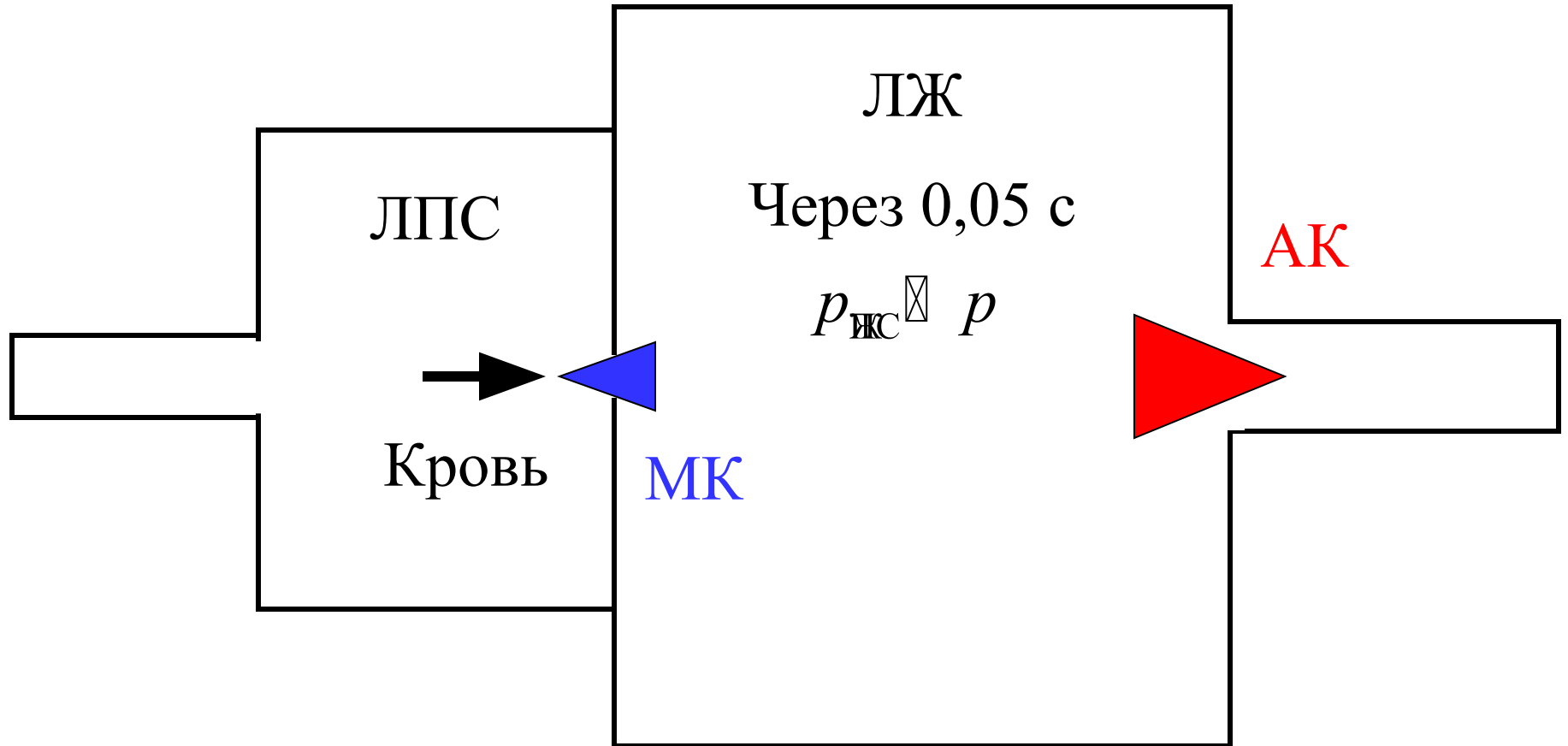


2.Систола желудочка $t \approx 0,3$ с $p_{\text{Ж}} \uparrow$
диастола предсердия $p_{\text{ПС}} \downarrow$

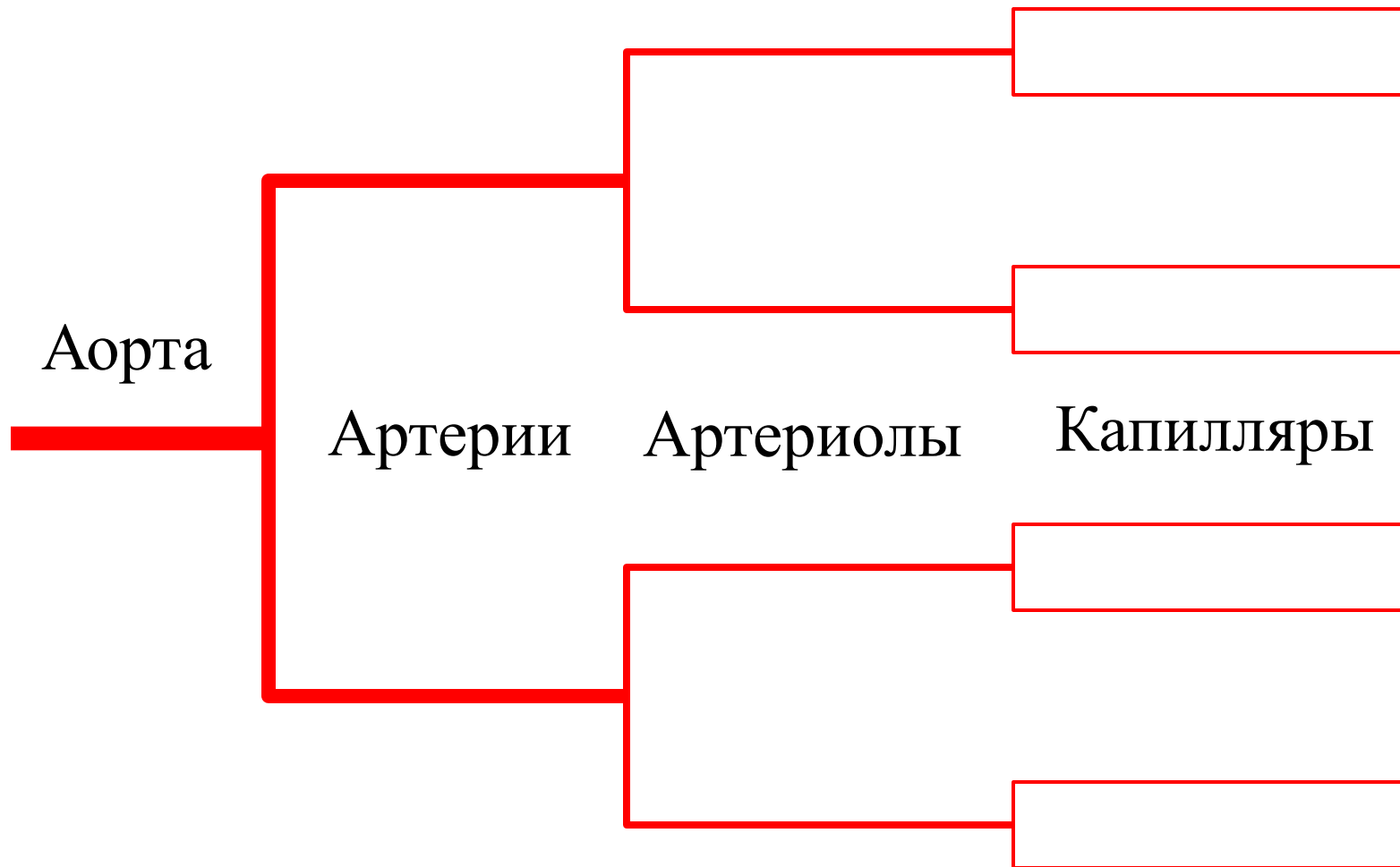


3. Диастола желудочка $t \approx 0,4$ с

В первый момент диастолы



«Размотка» кровеносной системы



Ограничения:

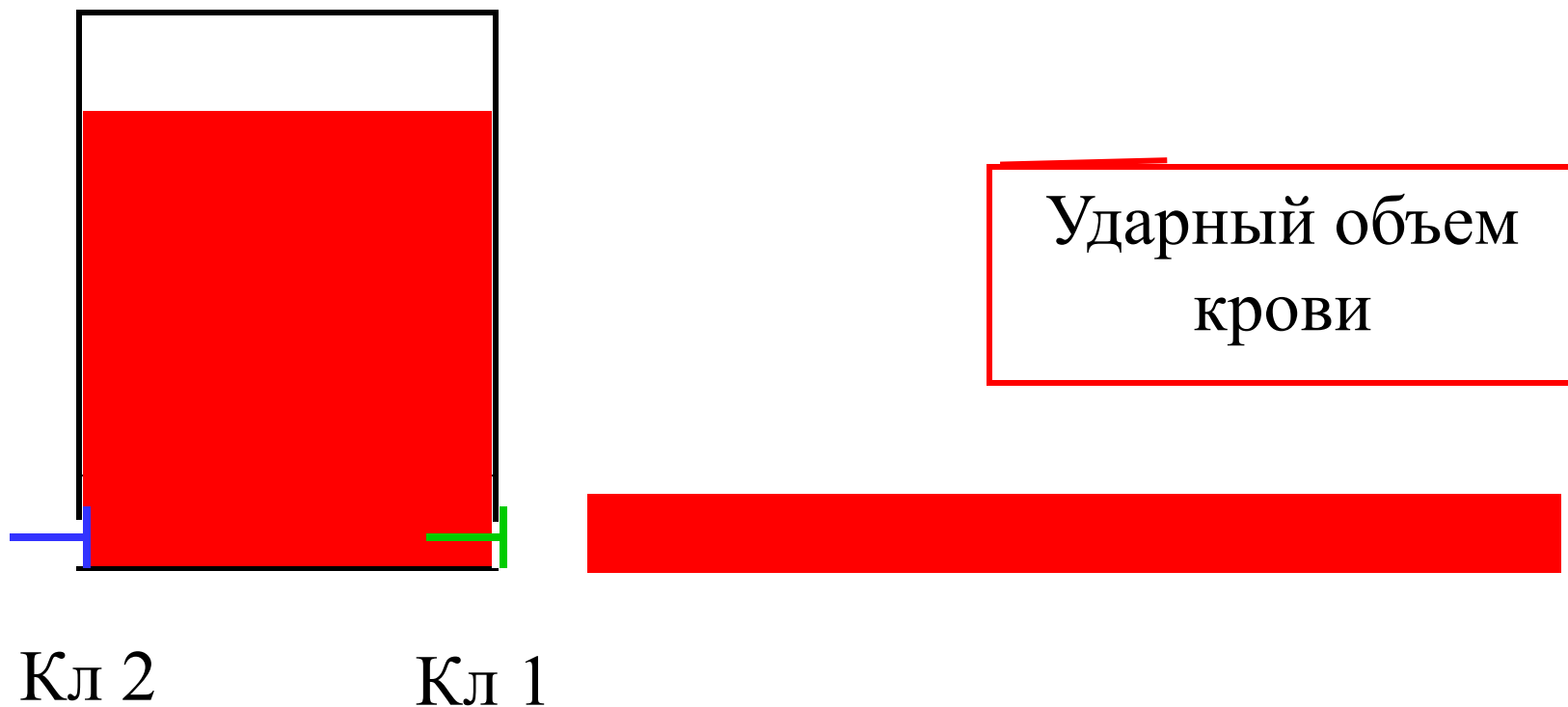
1. Стенки сосудов не жесткие, но эластичные
2. Кровь – высокомолекулярная, неньютоновская

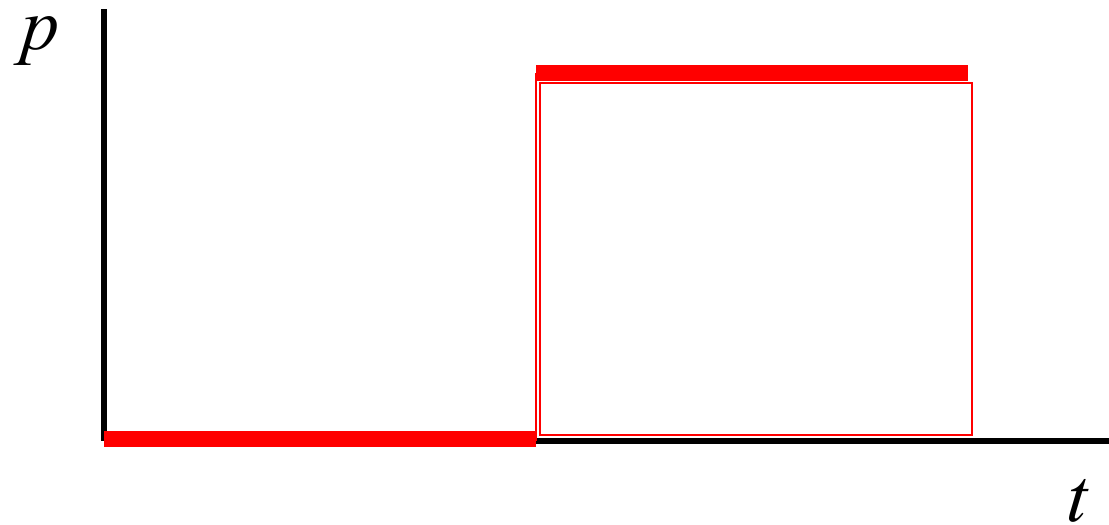
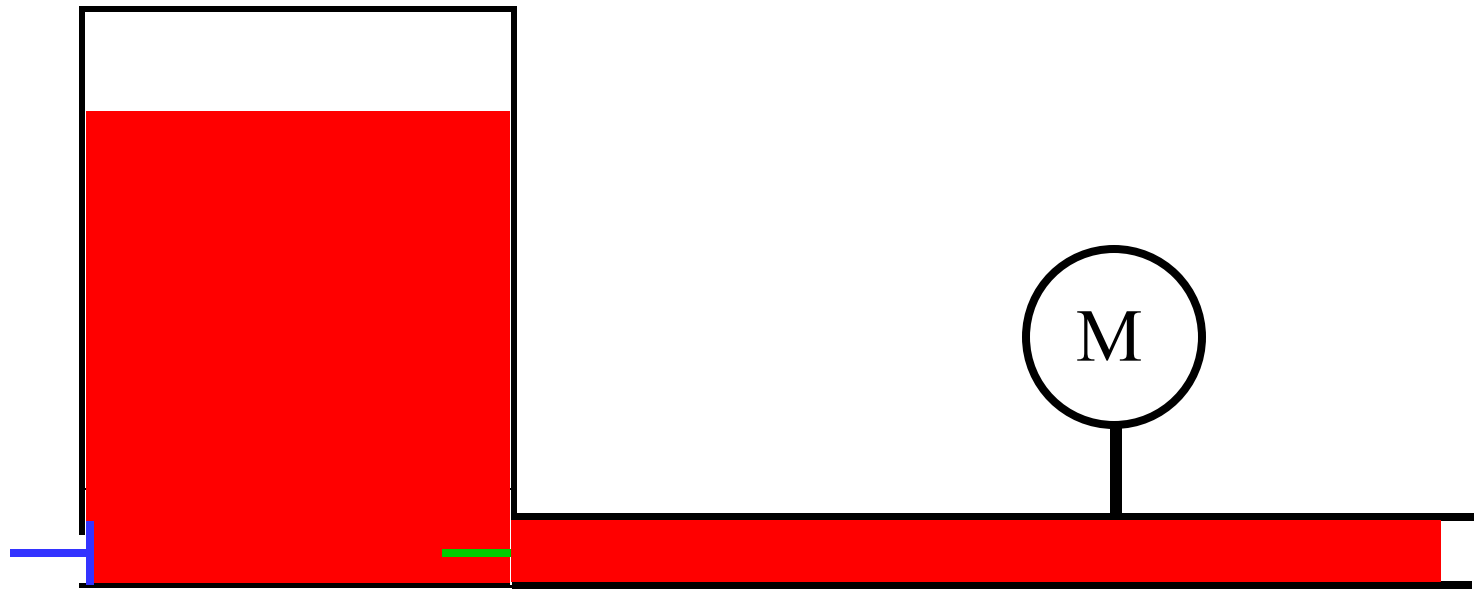
жидкость

~~$$R_{\Gamma} = \frac{8\eta l}{\pi r R^4}$$~~

$$Q \approx \frac{P_1 - P_2}{R_{\Gamma}}$$

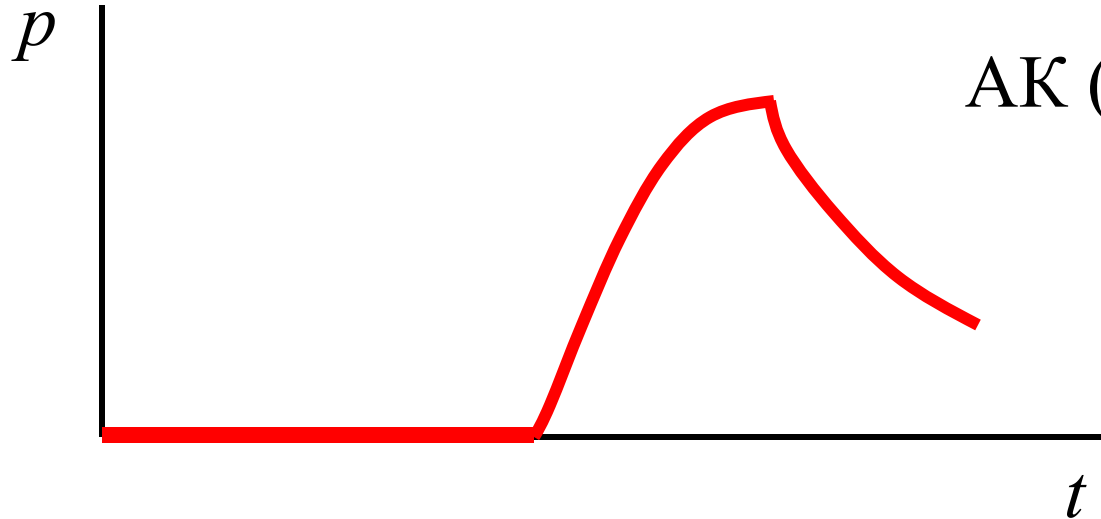
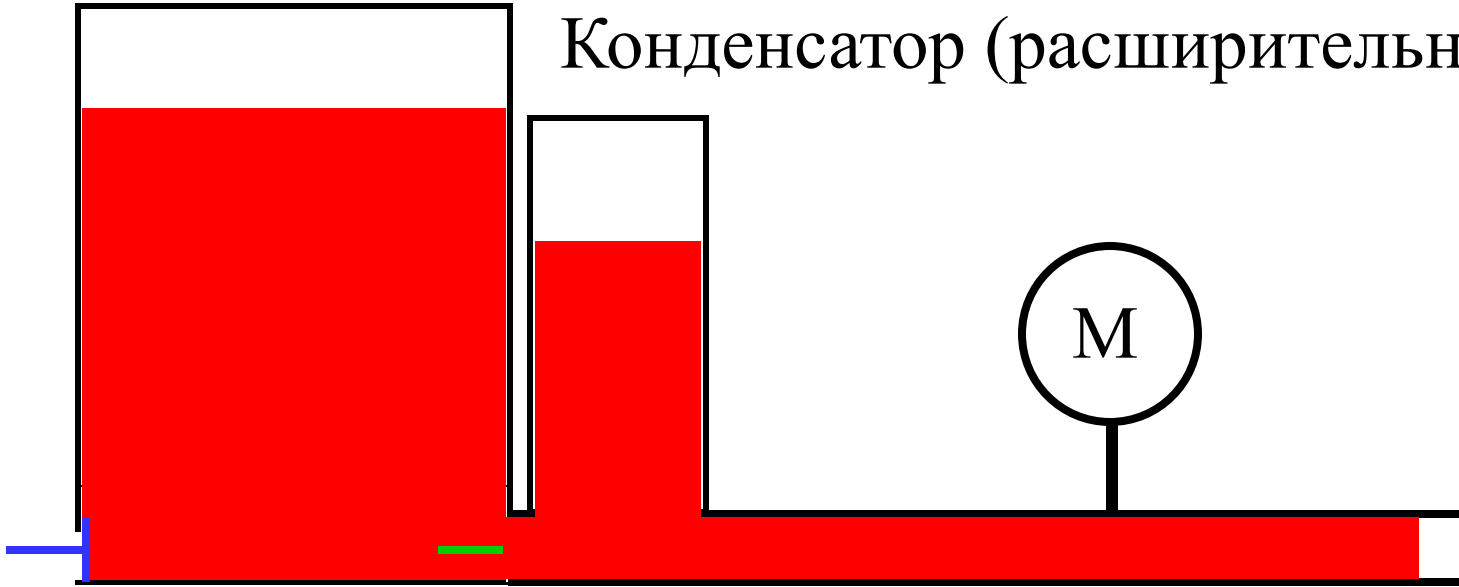
Гидродинамическая модель кровеносной системы Франка





$S \sim$ ударному
объему крови

Конденсатор (расширительный бачок)

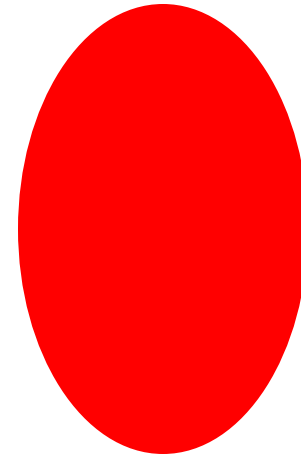
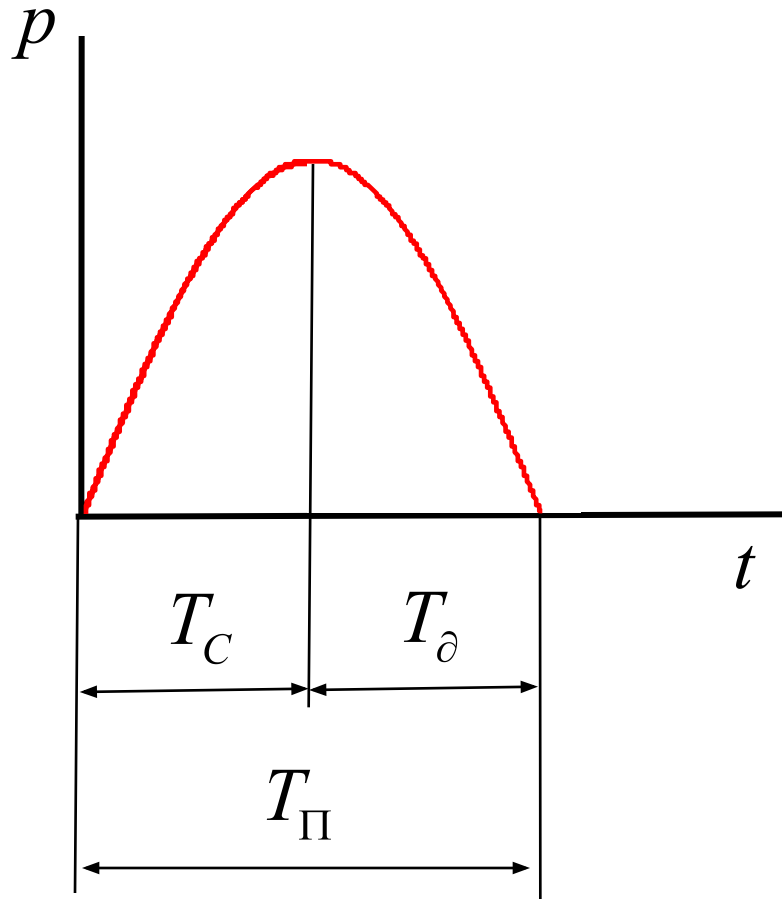


АК (Кл 1) закрыт

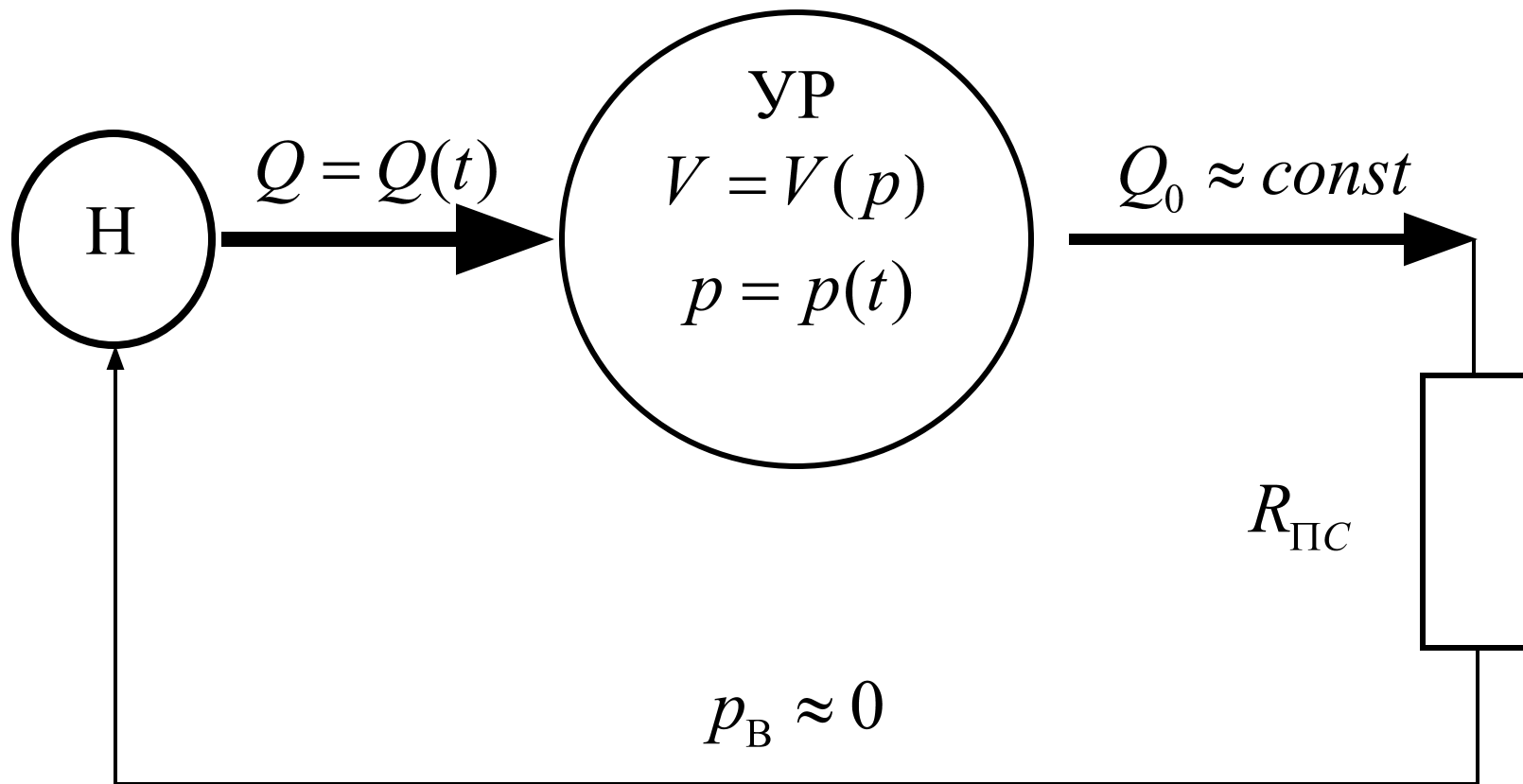
Упругий резервуар – «конденсатор» крови

Во время систолы увеличивает свой объем $V_0 \rightarrow V_{\max}$

Во время диастолы уменьшает свой объем $V_{\max} \rightarrow V_0$



Артериальная часть системы кровообращения



$$V = V_0 + kp$$

$$\frac{dV}{dt} = k \frac{dp}{dt}$$

Условие неразрывности (сохранения объема):

$$Q = \frac{dV}{dt} + Q_0$$

$$Q_0 = \frac{p - p_B}{R_{\text{ПС}}} = \frac{p}{R_{\text{ПС}}}$$

$$Q = k \frac{dp}{dt} + \frac{p}{R_{\text{ПЦ}}} \times dt$$

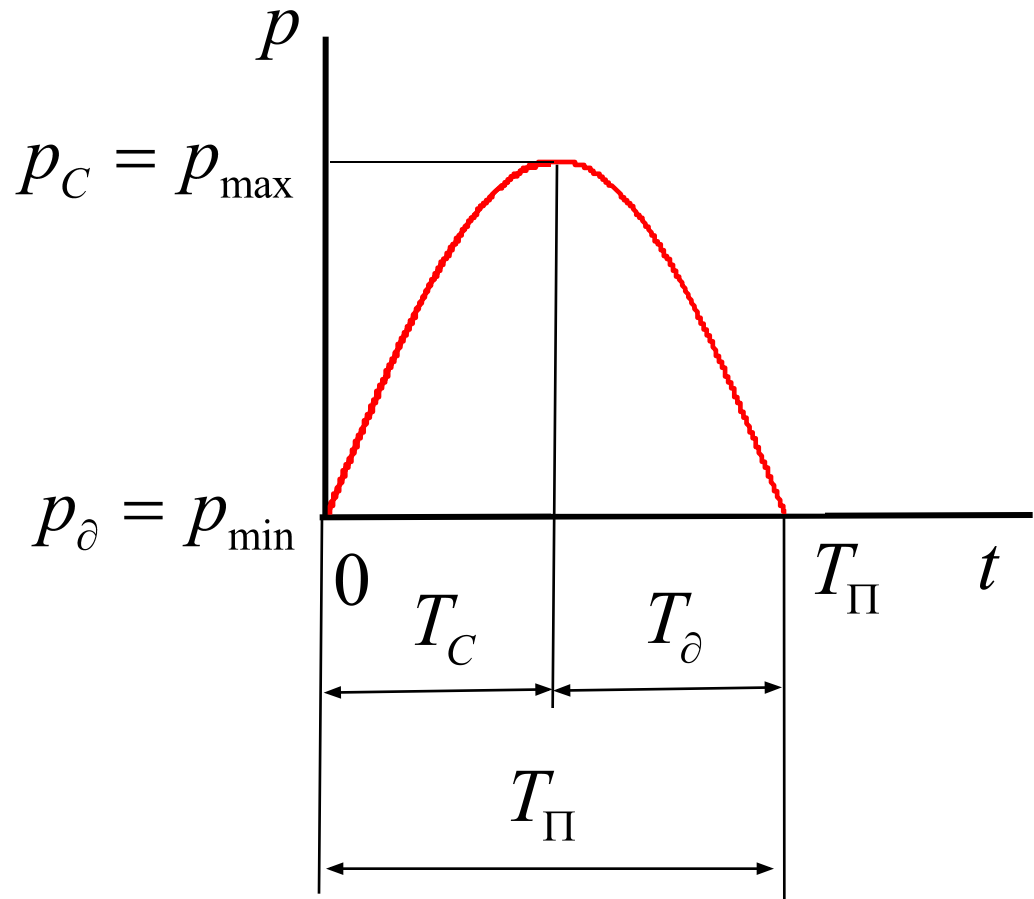
$$Qdt = kdp + \frac{p}{R_{\text{ПЦ}}} dt$$

$$\int Q dt = \int k dp + \int \frac{p}{R_{\text{ПС}}} dt$$

Интегрирование:

$$t \in [0; T_{\text{П}}]$$

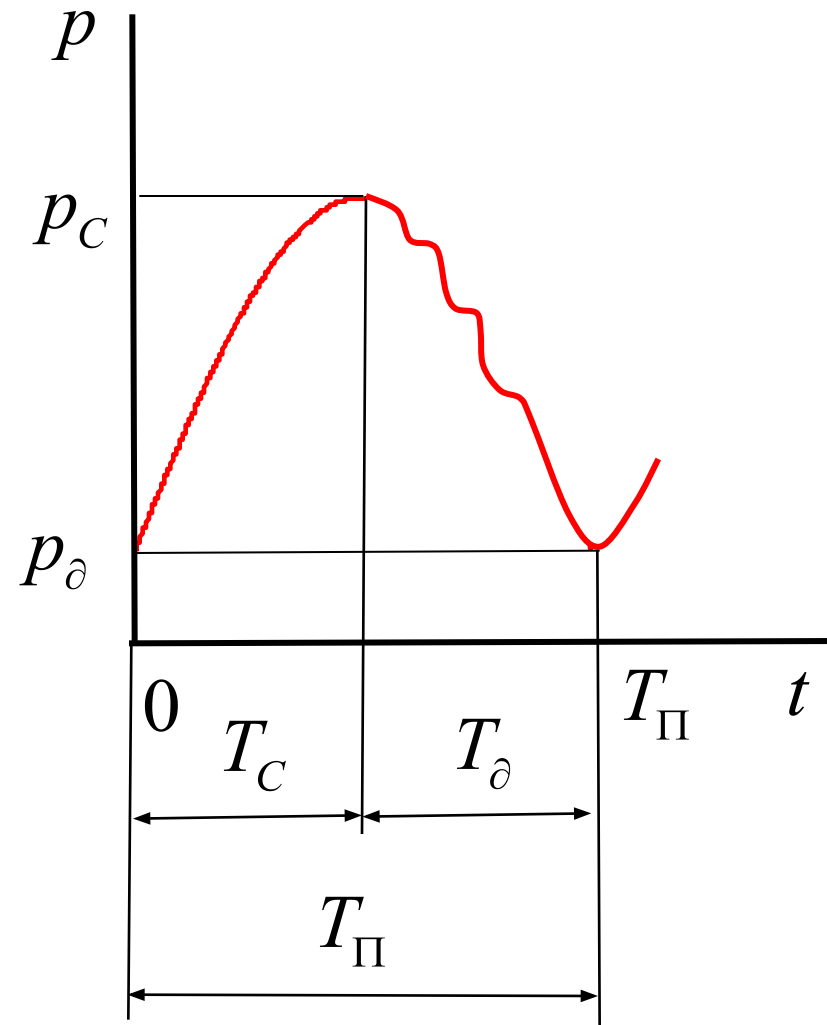
$$p \in [p_{\partial}; p_{\partial}]$$



$$\int_0^{T_{\Pi}} Q dt = \int_{p_{\partial}}^{p_{\partial}} k dp + \int_0^{T_{\Pi}} \frac{p}{R_{\Pi C}} dt$$

$$\int_0^{T_{\Pi}} Q dt = \int_0^{T_{\Pi}} \frac{p}{R_{\Pi C}} dt$$

Экспериментальная кривая $p = f(t)$ для сонной артерии

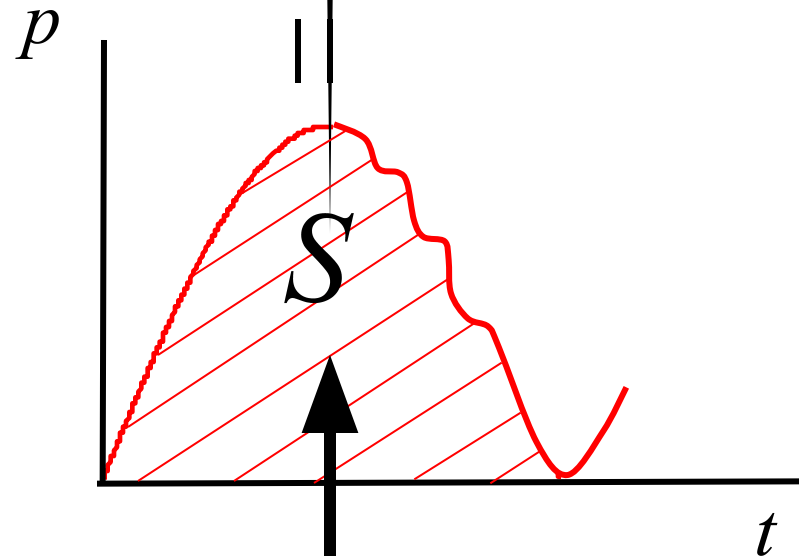


$$\int_0^{T_{\Pi}} Q dt = \frac{1}{R_{\text{ПС}}} \int_0^{T_{\Pi}} p dt$$

Ударный
объем крови



Эксперимент



Планиметр

$$R_{\text{ПС}} = \frac{\text{Планиметр}}{\text{Эксперимент}}$$

Во время диастолы:

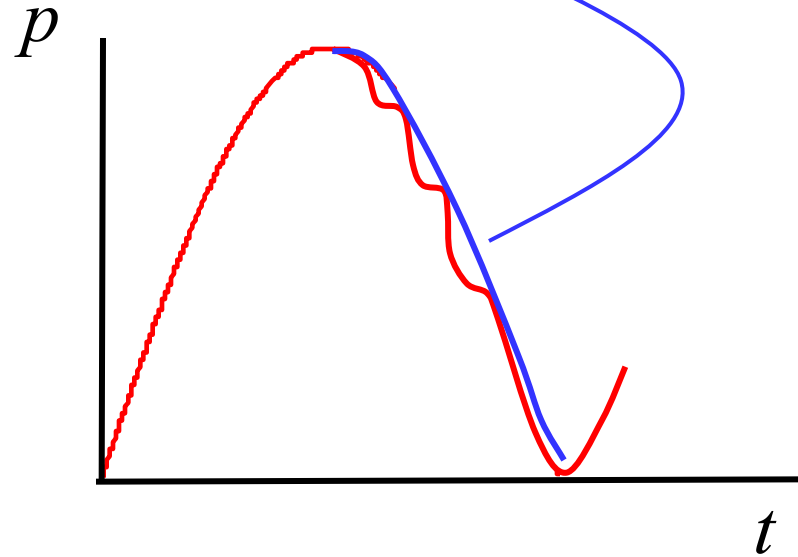
$$Q = 0$$

$$0 = kdp + \frac{p}{R_{\text{ПС}}} dt$$

$$\frac{dp}{p} = -\frac{1}{kR_{\text{ПС}}} dt$$

$$\int_{p_c}^p \frac{dp}{p} = -\frac{1}{kR_{\text{ПС}}} \int_0^t dt$$

$$p = p_C \exp\left(-\frac{t}{kR_{\text{ПЦ}}}\right)$$



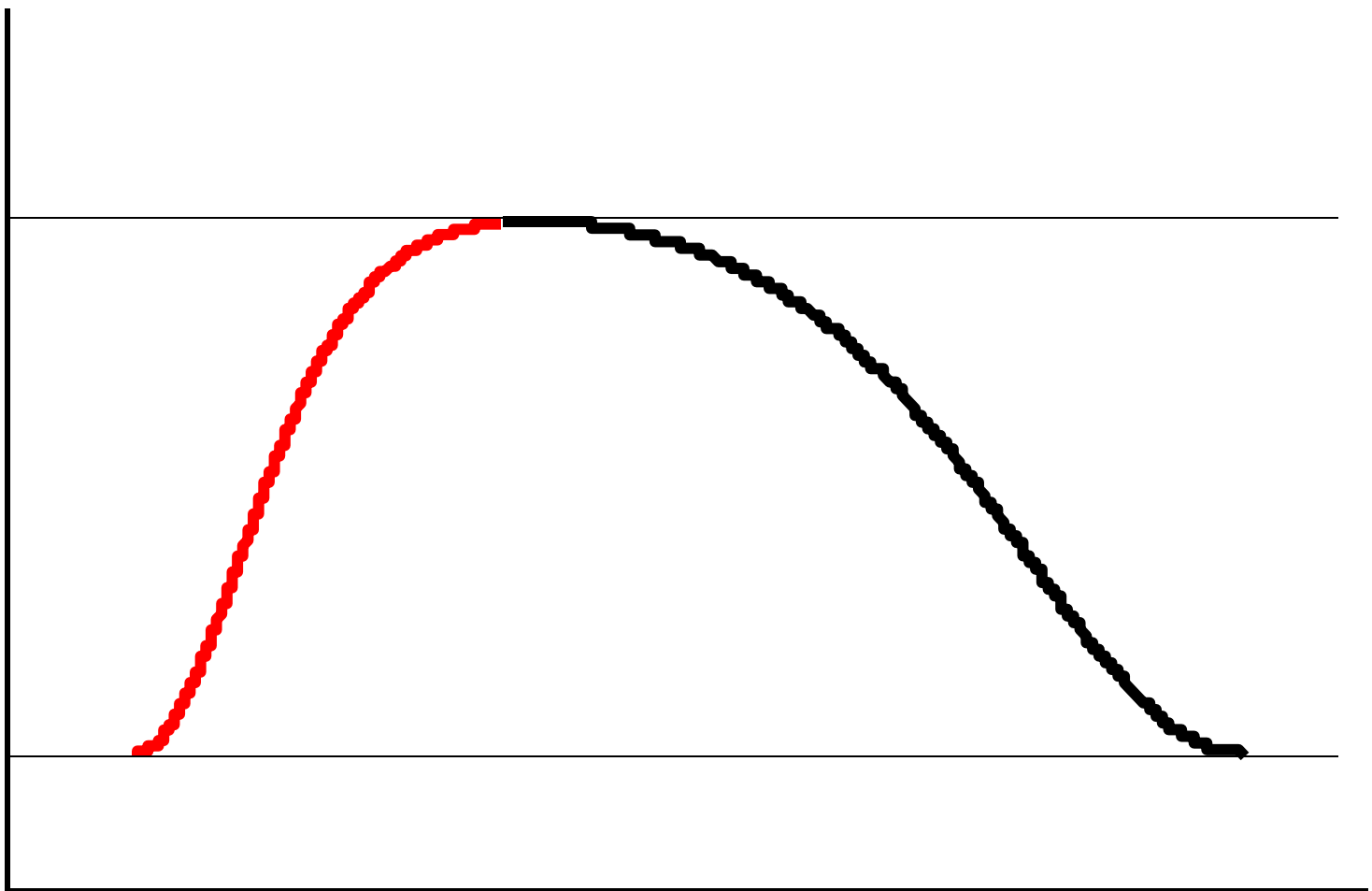
$$Q_0 = Q_C \exp\left(-\frac{t}{kR_{\text{ПЦ}}}\right)$$

$$Q_C = \frac{p_C}{R_{\text{ПЦ}}}$$

$\rho_{\text{кПа}}$

16,0

10,5



t

Пульсовая волна

Волна повышенного давления, распространяющаяся по аорте и артериям за счет выброса крови из левого желудочка во время систолы

$$\begin{aligned} v_{\text{ПВ}} &\approx 5 - 10 \text{ м/с} \\ \left(v_{\text{К max}} &\approx 0,3 - 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \right) \end{aligned}$$

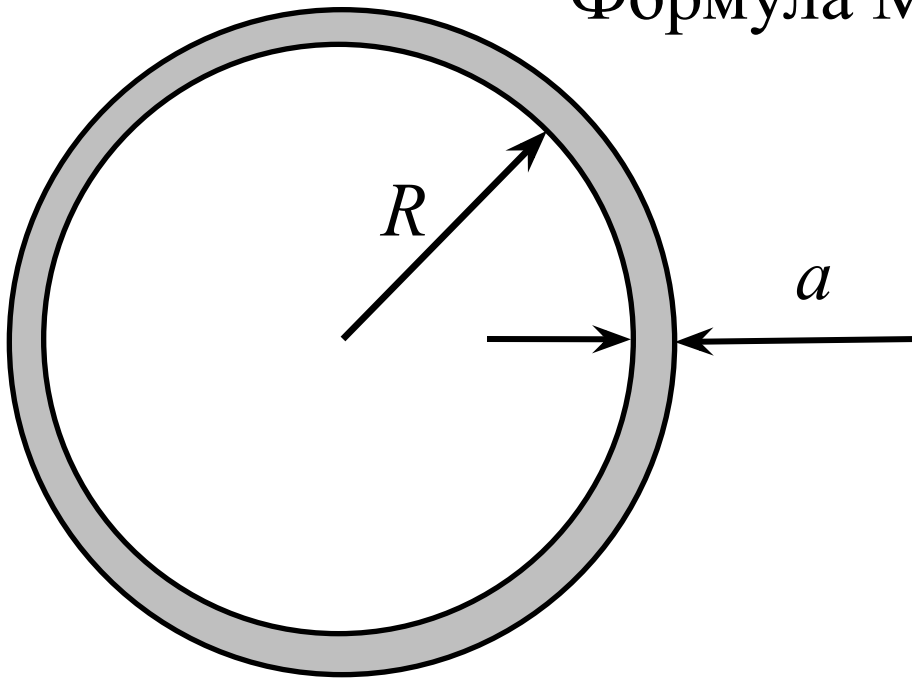
$$T_C \approx 0,3 \text{ с}$$

$$s = v_{\text{ПВ}} \cdot T_C \approx 1,5 - 3 \text{ м}$$

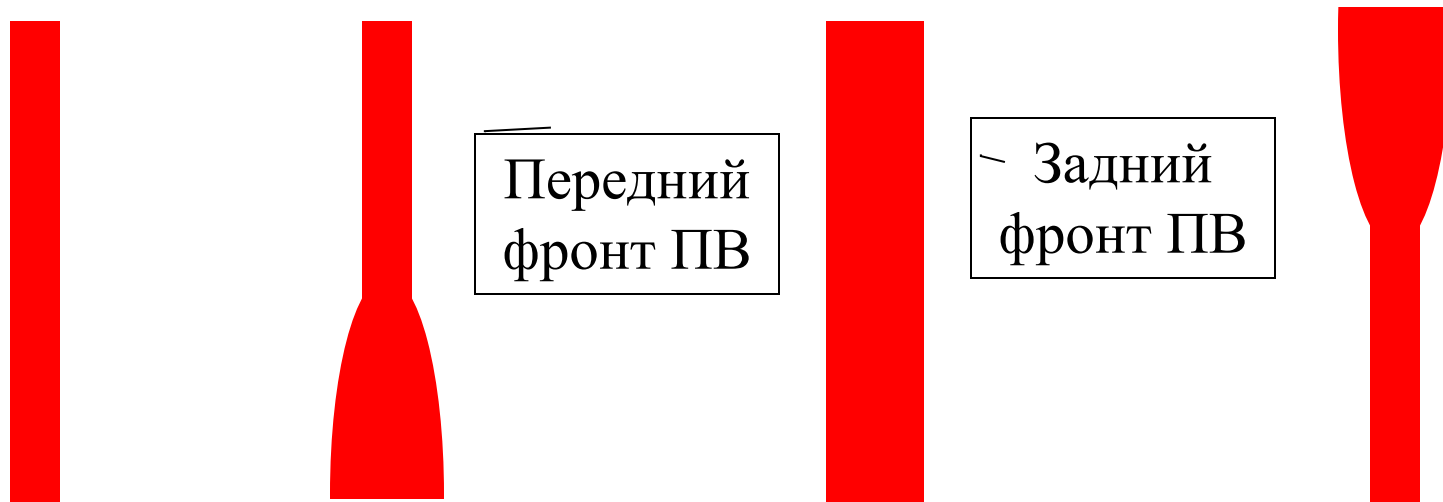
Скорость пульсовой волны:

$$v_{\text{ПВ}} = \sqrt{\frac{E \cdot a}{\rho \cdot R}}$$

Формула Моенса – Кортвега

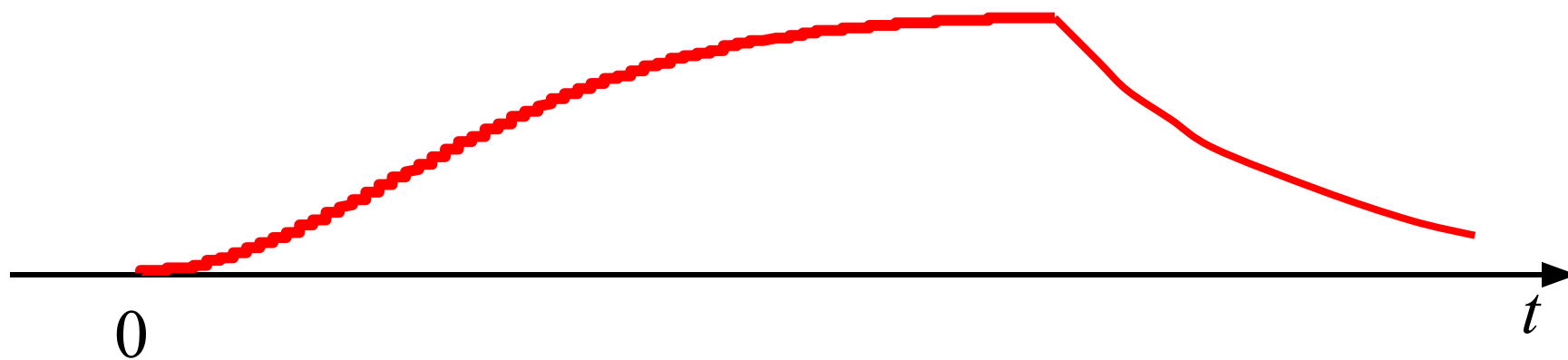


Профиль артерии



Передний фронт ПВ

Задний фронт ПВ

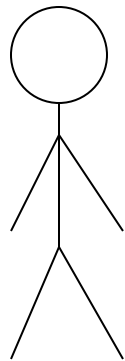


Полное давление в сечении сосуда:

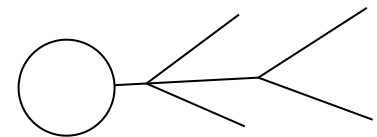
$$p_{\Sigma} = p_{CT} + p_{DIN} + p_{ГС} + p_{\Pi} + p_A$$

$$p_{CT} \approx 13 - 14 \text{ кПа}$$

$$p_{DIN} \approx 0 - 0,13 \text{ кПа}$$



$$p_{ГС} \approx -3 - 15 \text{ кПа}$$



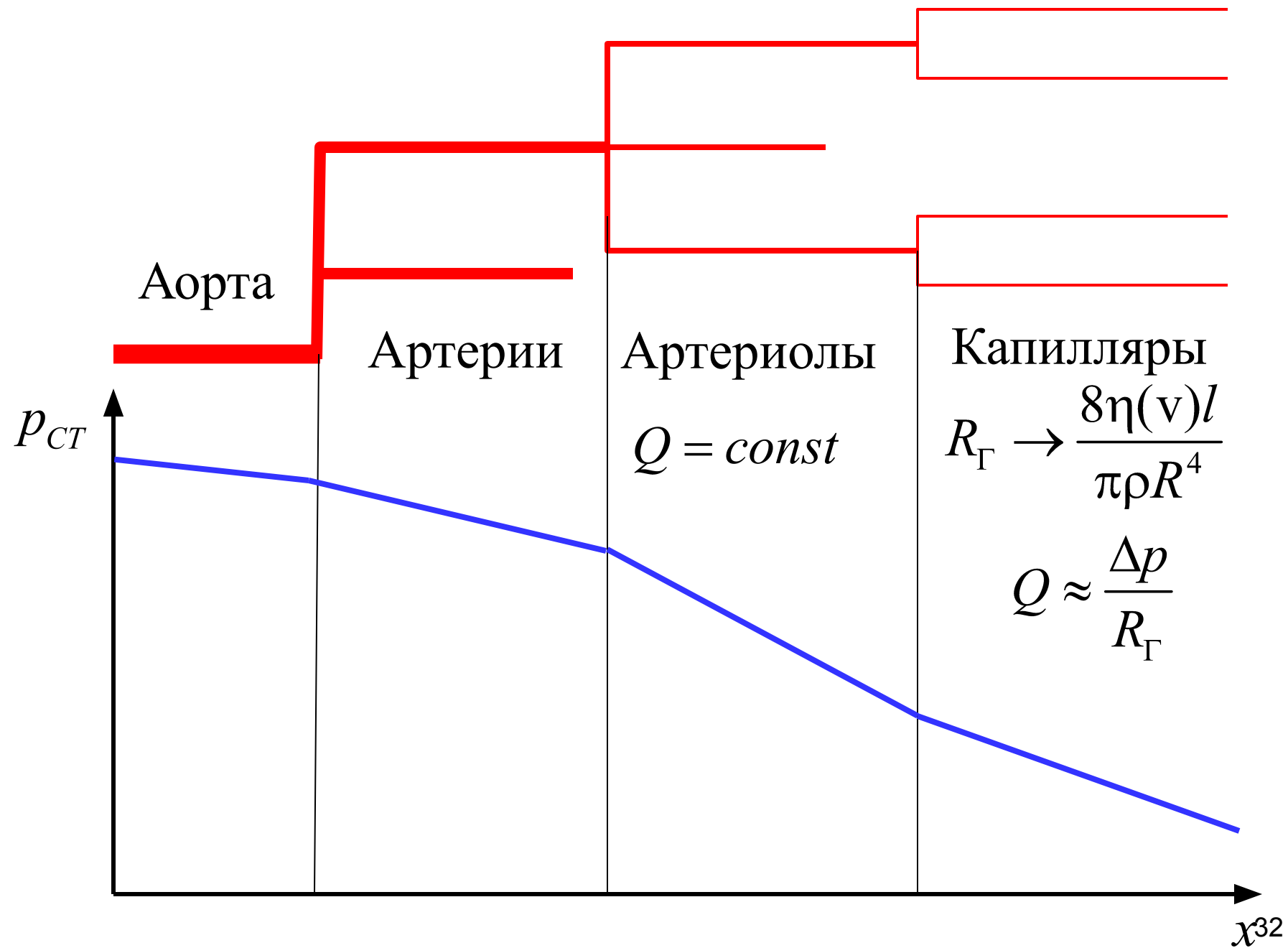
$$p_{ГС} \approx 0 \text{ кПа}$$

$$p_{\Pi} \approx -2,5 - 2,5 \text{ кПа}$$

$$p_A \approx 100 \text{ кПа}$$

Полное избыточное давление:

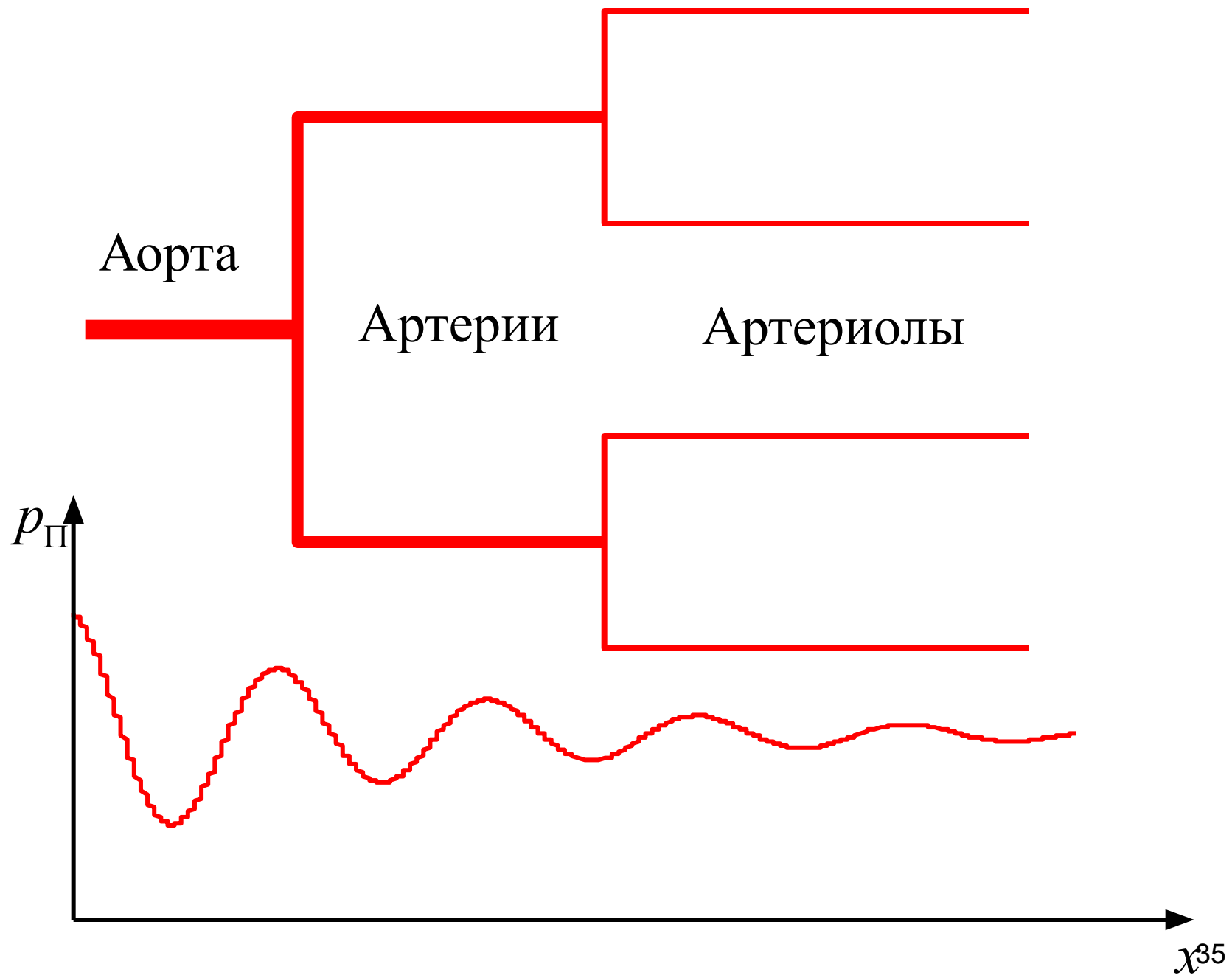
$$p_{\Sigma \text{МАН}} = p_{\text{СТ}} + p_{\Pi}$$

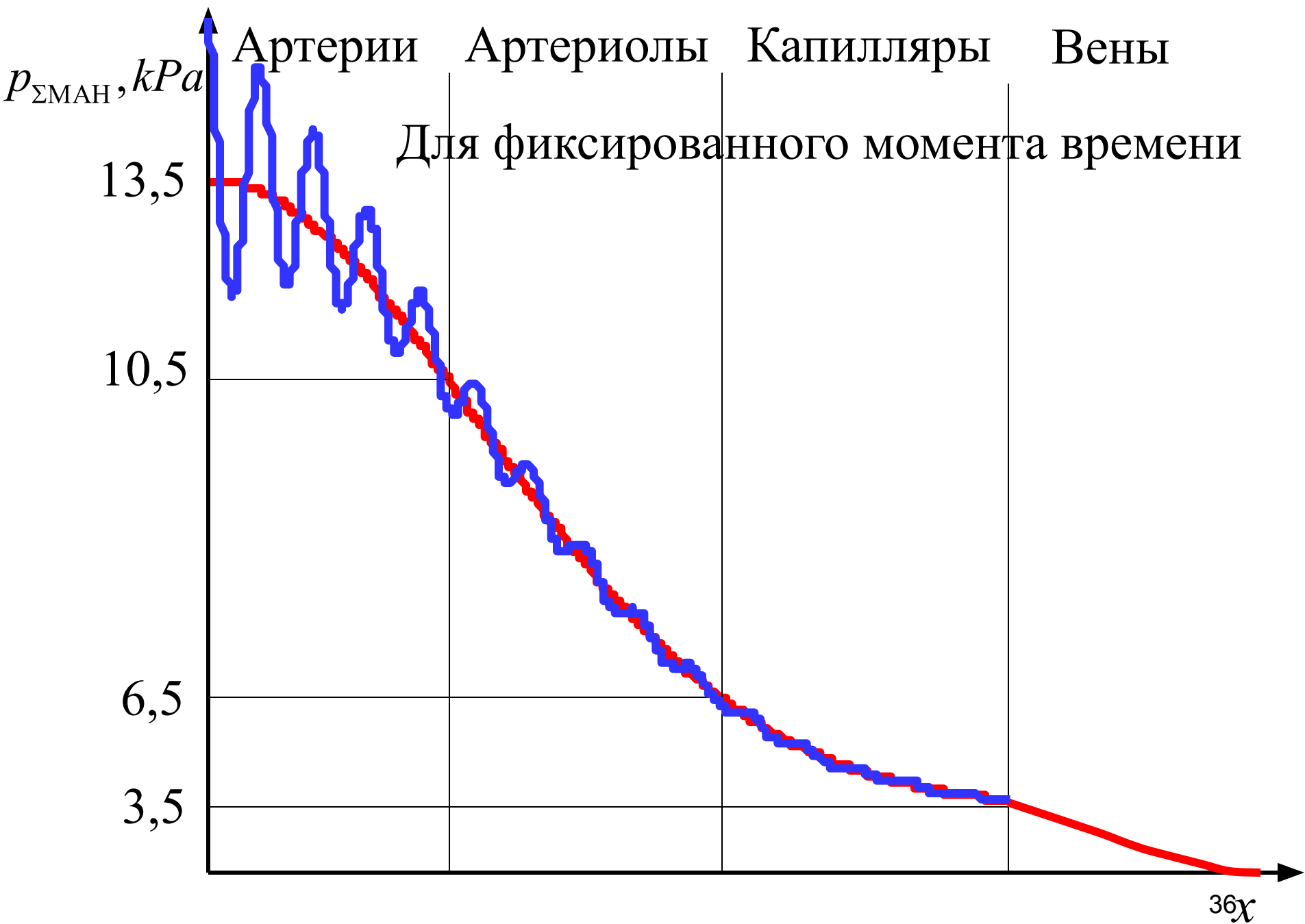




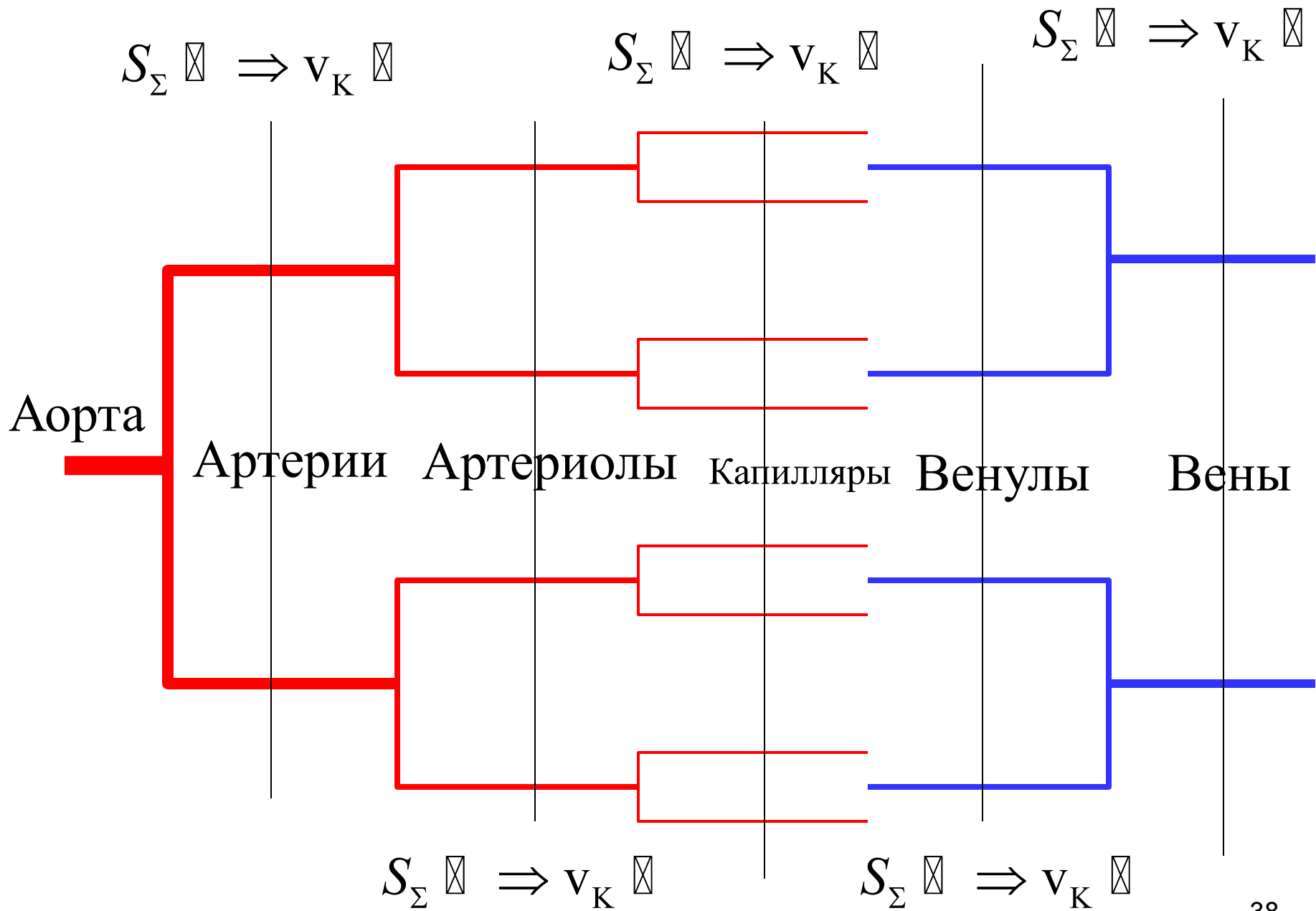
Изменение пульсовой составляющей давления:

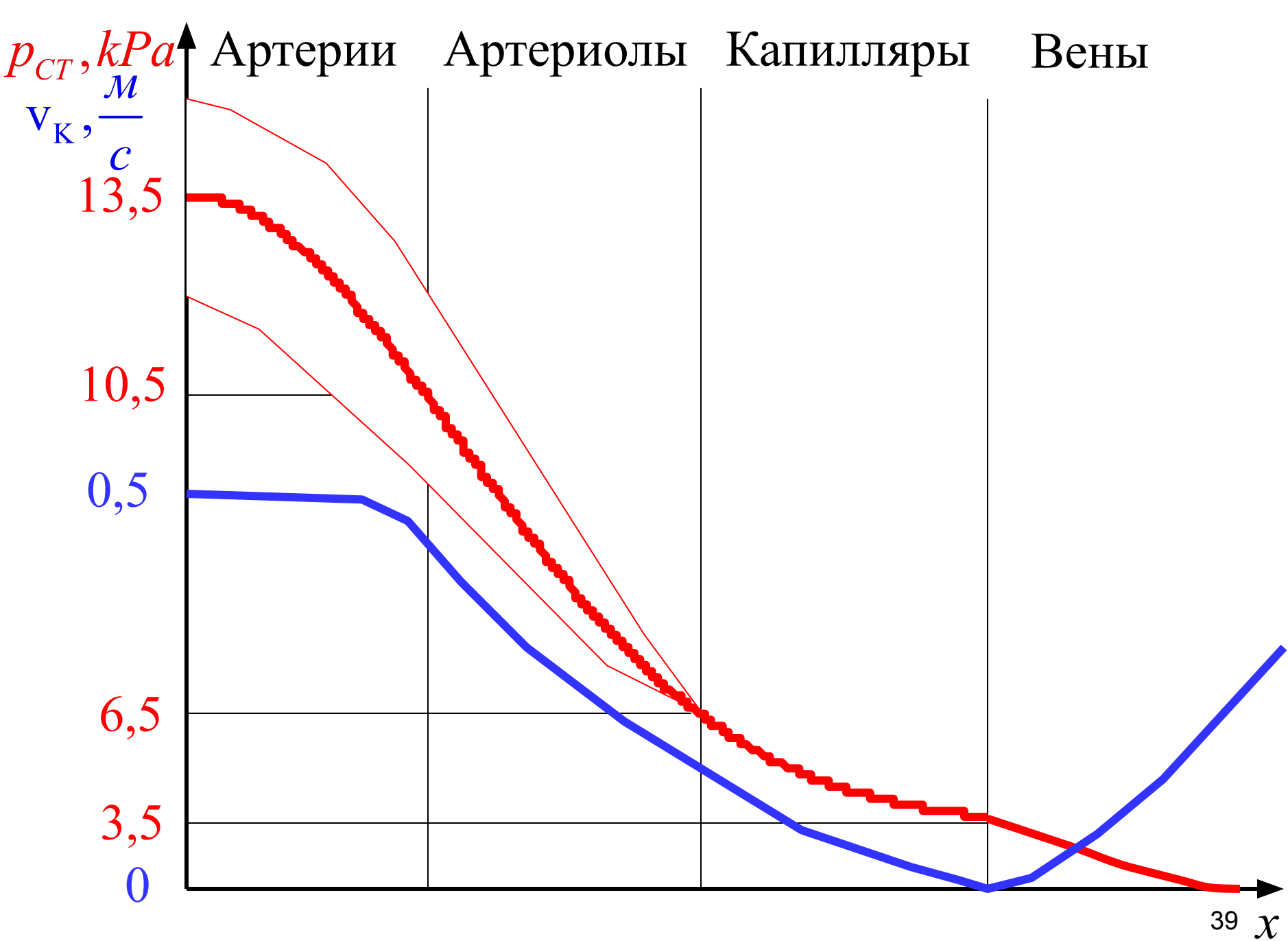
$$p_{\Pi} = p_{\Pi A} \cdot e^{-\lambda x} \cdot \cos \frac{\hat{a}}{T_{\Pi}} \left(t - \frac{x}{v_{\Pi B}} \right)$$



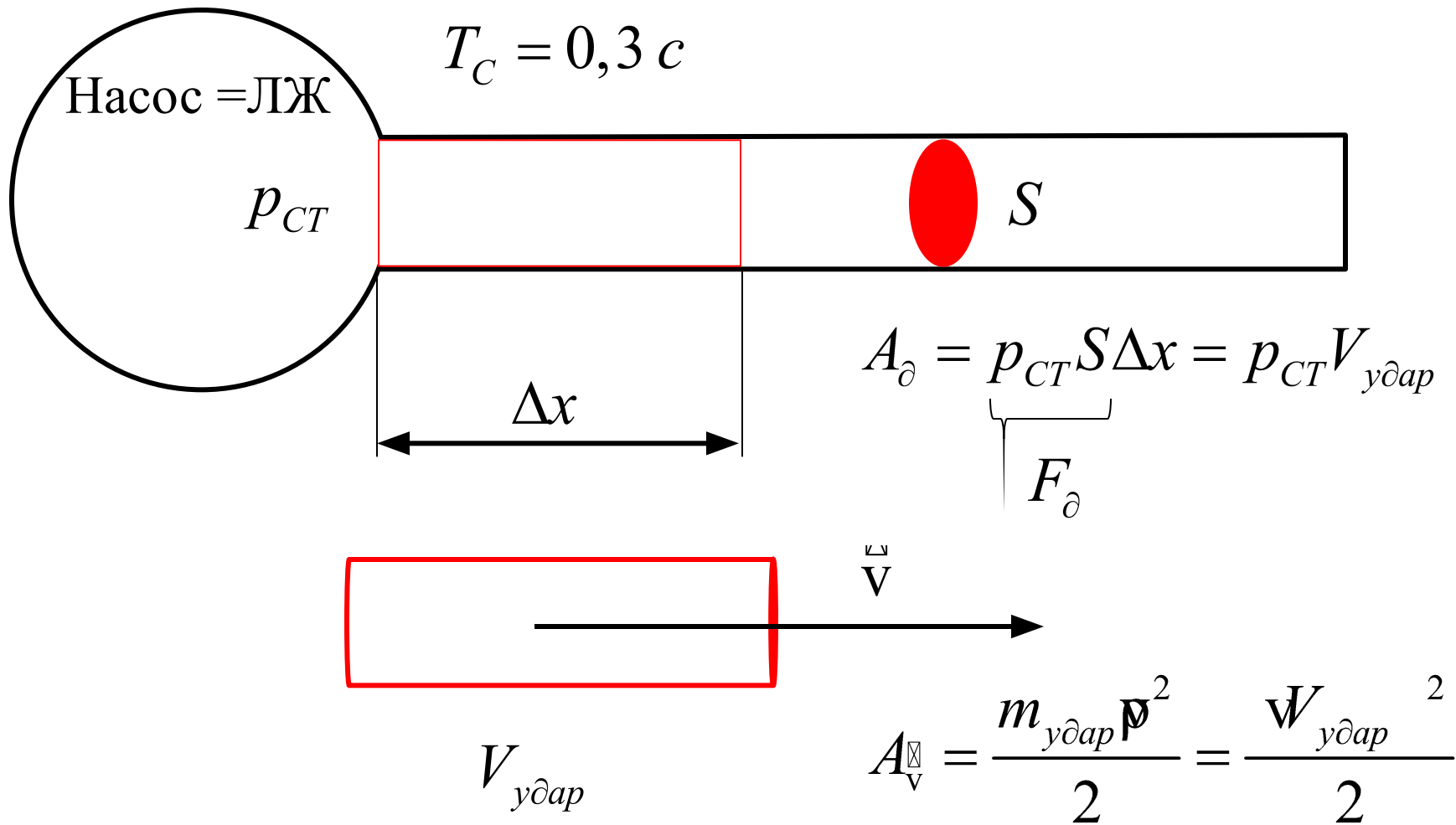


$$Q = v_K S_\Sigma = \text{const}$$





Однократное сокращение левого желудочка:



$$A_{\partial} = p_{CT} V_{y\partial ap}$$

$$A_{\nabla} = \frac{\rho V_{y\partial ap} v^2}{2}$$

$$A_{\Lambda} = A_{\partial} + A_{\nabla}$$

$$A_{\Lambda} = p_{CT} V_{y\partial ap} + \frac{\rho V_{y\partial ap} v^2}{2}$$

$$A_{\Pi} = 0,2 A_{\Lambda}$$

$$A_{1C} = A_{\Lambda} + A_{\Pi} = 1,2 A_{\Lambda}$$

$$A_{1C} = 1,2 A_{\Lambda} = 1,2 \left(p_{CT} V_{y\partial ap} + \frac{\rho V_{y\partial ap} v^2}{2} \right)$$

$$p_{CT} \approx 13,5 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$M_{y\partial ap} \approx 60 \cdot 10^{-6} \text{ }^3$$

$$\rho \approx 1,05 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$v \approx 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

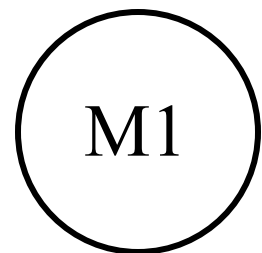
$$A_{1c} \approx 1$$

$$\langle P \rangle = \frac{A_{1c}}{T_c} = 3,3 \text{ Bm}$$

Ткань (плоть человеческая)

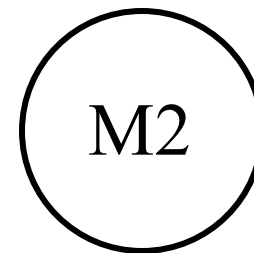
Артерия

Трубка Пито - Прандтля



M1:

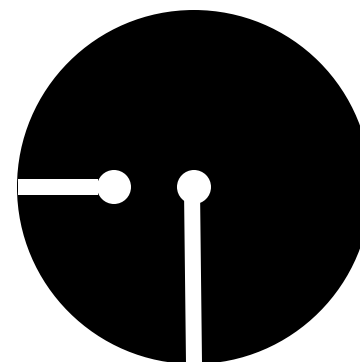
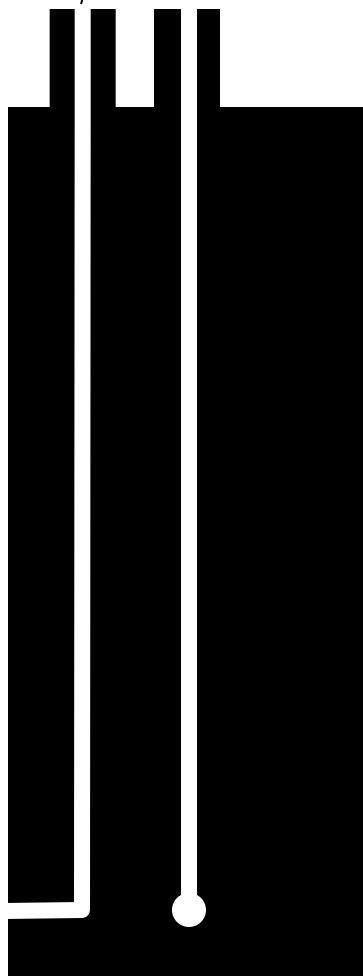
$$p_{M1\Sigma} = p_{CT} + p_{DIN} + p_{\Pi}$$



M2:

$$p_{M2\Sigma} = p_{CT} + p_{\Pi}$$

КрОВОТОК



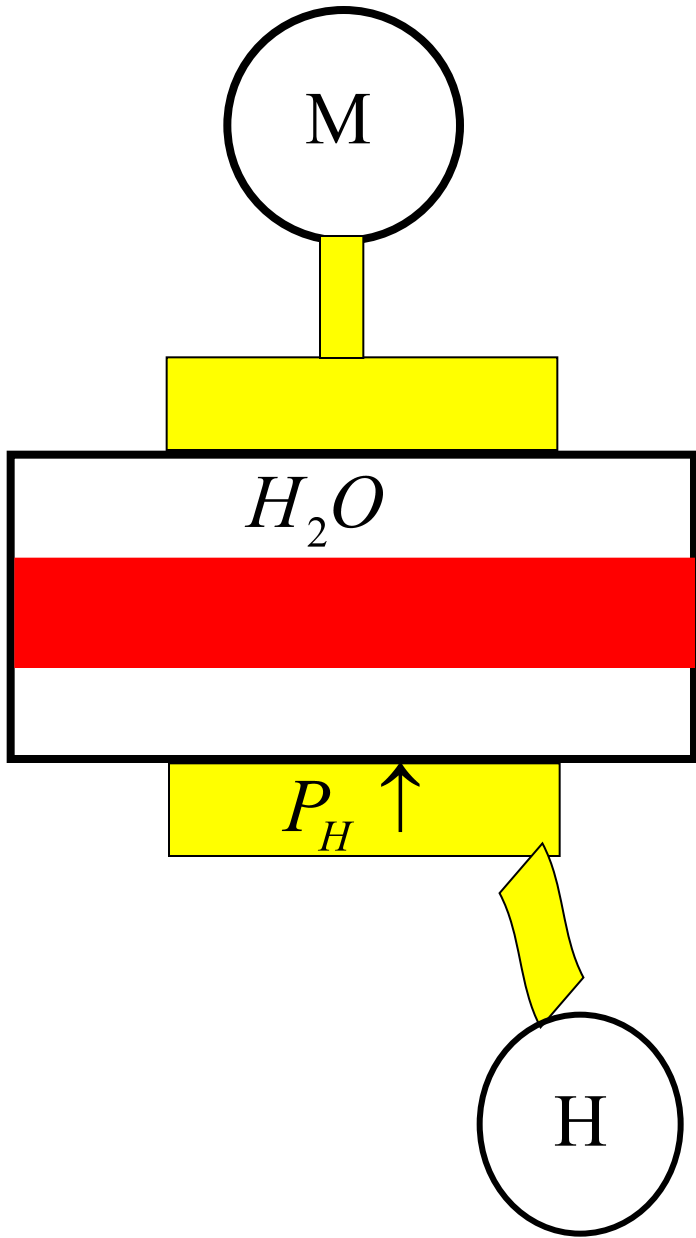


Плоть

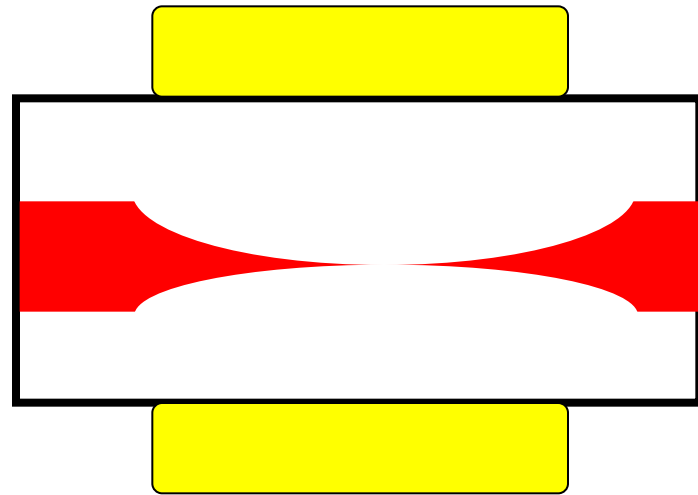
Артерия

$$p_{M1\Sigma} - p_{M2\Sigma} = p_{DIN} = \frac{\rho v_K^2}{2}$$

$$v_K = f(r)$$



$$P_M \approx P_{TK} \approx P_{APT}$$



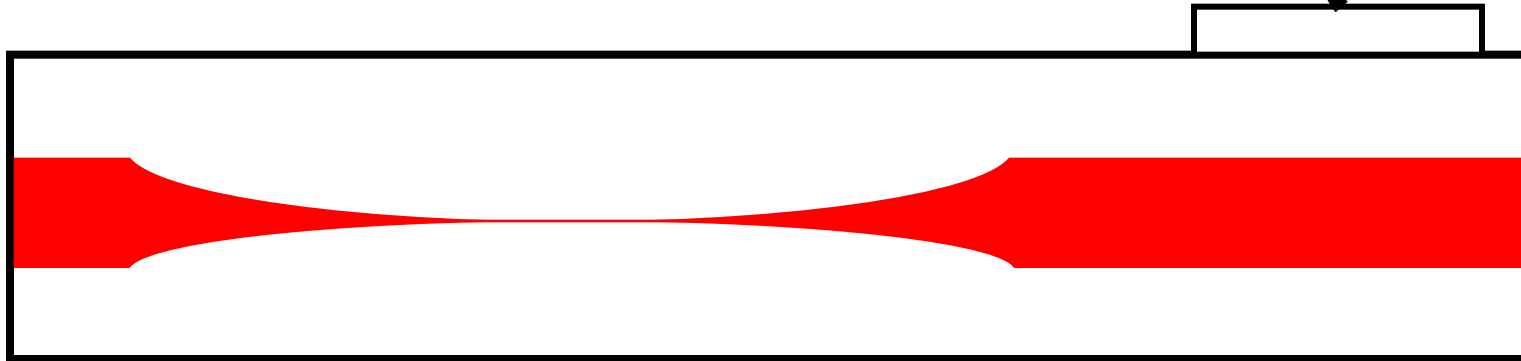
$$v_K = 0$$

Давление в манжете плавно уменьшается

Врач

Приемник
звука

Звукопровод



$$p = p_{\max} = p_C \Rightarrow v_K \approx 0 \Rightarrow \text{начало шумов}$$

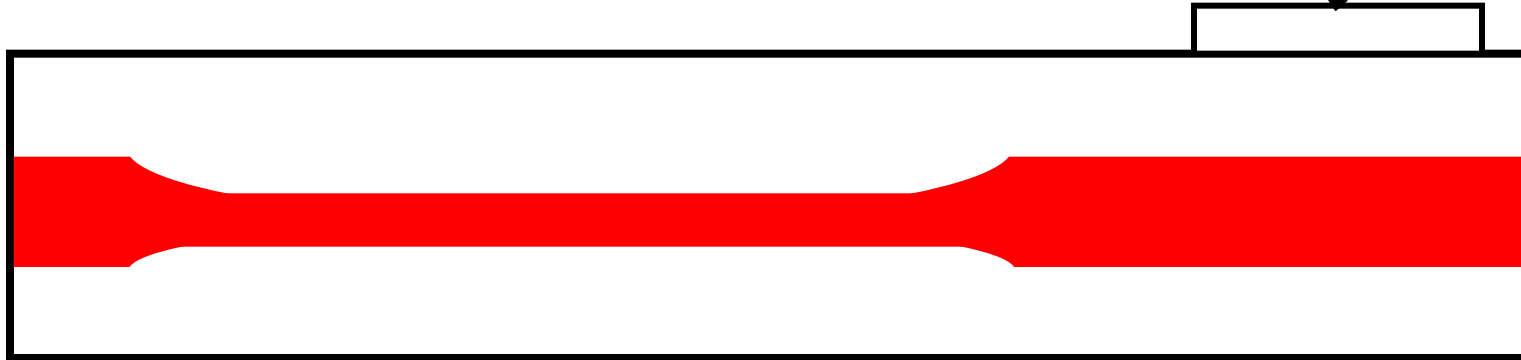
Фиксируется давление, соответствующее началу шумов: p_C

Давление в манжете плавно уменьшается

Врач

Приемник
звука

Звукопровод



$$p = p_{\min} = p_{\partial}$$

прекращение шумов

Фиксируется давление, соответствующее
прекращению
шумов: p_{∂}

Общие выводы:

1. Законы гидромеханики в гемодинамике применимы лишь качественно из-за эластичности сосудов и неньютоновских вязких свойств крови
2. Эластичность сосудов существенно сглаживает пульсации давления в кровеносной системе