

# МЕХАНИКА ДЫХАНИЯ

## Содержание лекции:

Общий вид соотношения «давление-объем». Статика системы дыхания: эластическое сопротивление легких, грудной клетки, легких в грудной клетке.

Гистерезис легких. Поверхностное натяжение, сурфактант легких. Роль сурфактанта и сотовой структуры легочной ткани в обеспечении стабильности альвеол. Модели напряжений и деформаций микро- и макроструктуры легких.

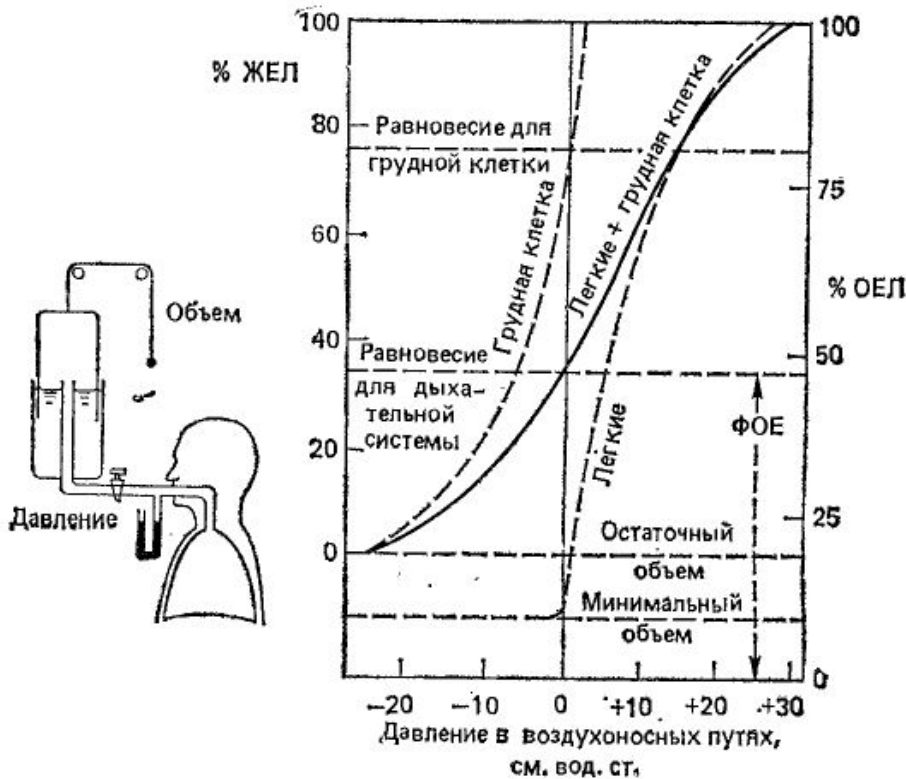
Нелинейность кривой объем-давление и действие силы тяжести на распределение напряжений, деформаций, вентиляции.

Динамика системы дыхания: давления, потоки, объемы. Сопротивление дыхательных путей.

- Общий вид соотношения «объем – давление» для системы дыхания
- Сила - деформация → давление – объем
- $P = f(V, dV/dt, d^2V/dt^2 \dots) = P_1(V) + P_2(dV/dt) + I^* d^2V/dt^2$

# Механика дыхания: статика

Эластическое сопротивление дыханию, эластическая тяга

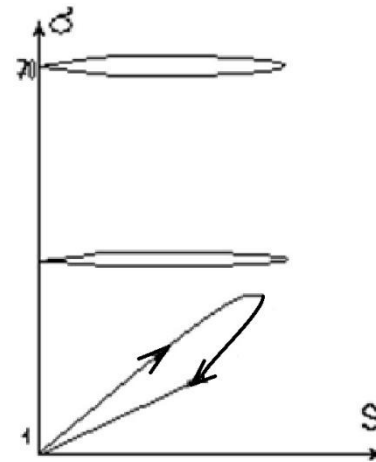
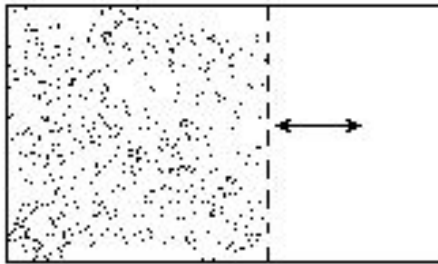


- Нелинейная кривая объем-давление. Линейная аппроксимация
- $P = EV = V/C =$
- $E_1V + E_2V = (1/C_1 + 1/C_2)V$
- **Эластичность легких и грудной клетки**  $C_1 \sim 0.2$  л/гПа;  $C_2 \sim 0.2$  л/гПа
- непрямой метод регистрации: плевральное давление = давление в полости пищевода.

# Сурфактант (ПАВ) легких

• Весы Вильгельми

Зависимость  $\sigma(s)$



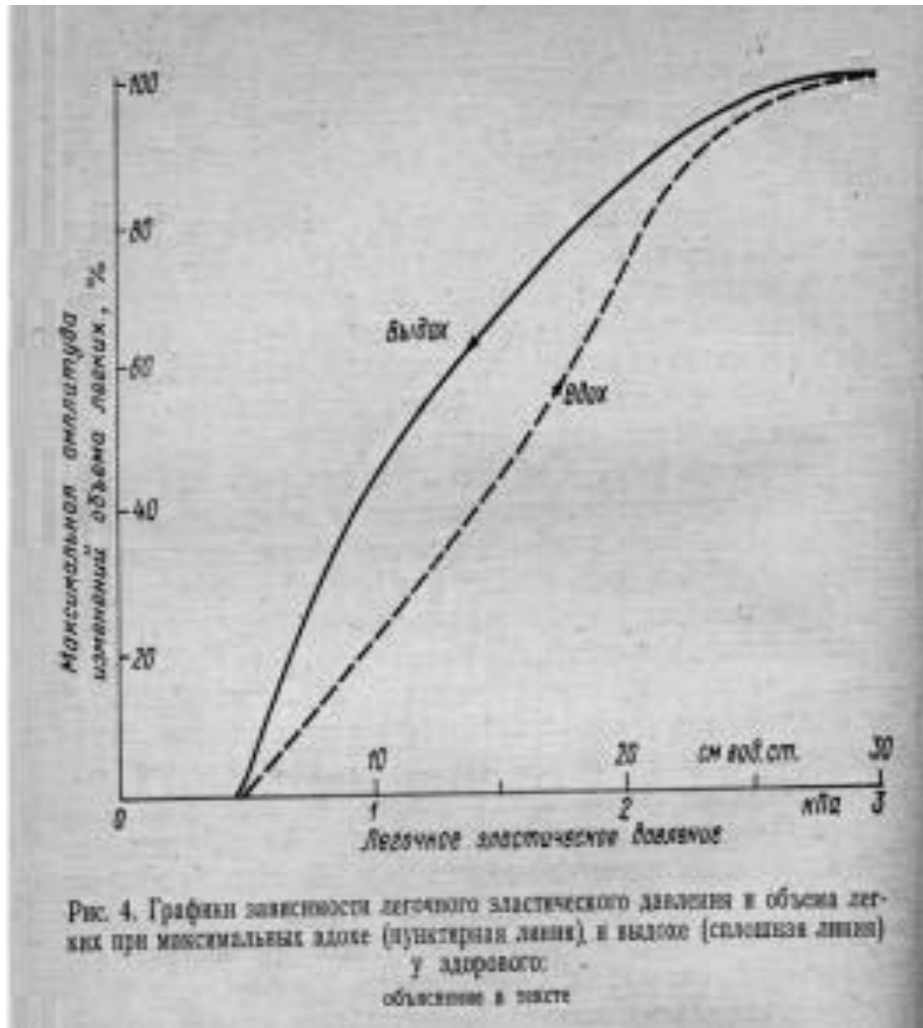
• У воды  $\sigma$  почти постоянно и равно 70 дин/см

□ **Поверхностно-активные вещества (ПАВ)** — химические соединения, которые, концентрируясь на поверхности раздела — химические соединения, которые, концентрируясь на поверхности раздела термодинамических фаз — химические соединения, которые, концентрируясь на поверхности раздела термодинамических фаз, вызывают снижение поверхностного натяжения

□ При наличии ПАВ (у моющих средств и т.п.)  $\sigma$  меньше: раствор мыла - около 35 дин/см; «Персил» без фосфатов - 31 дин/см )

• У ПАВ легких -  $\sigma$  очень низкое – единицы дин/см - (снижает работу дыхания<sup>4</sup>), растет с  $S$ ; гистерезис. Основное вещество ПАВ -

# Гистерезис легких.

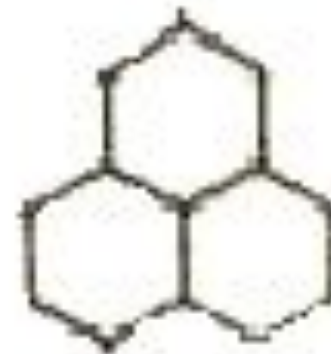
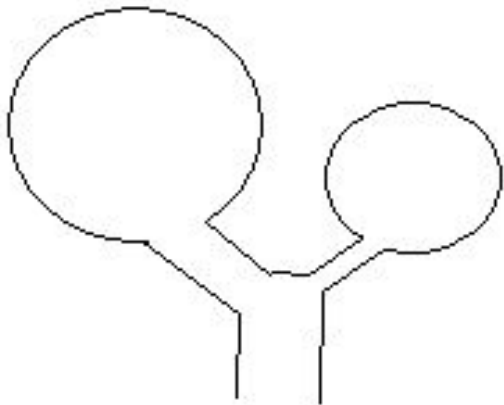


- Причины гистерезиса: поверхностное натяжение; ПАВ.
- Малая работа дыхания благодаря низкому  $\sigma$ . Стабильность альвеол из-за  $\sigma(s)$ .
- Отсутствие сурфактанта при респираторном дистресс-синдроме новорожденных: жесткие легкие, ателектаз, выпотевание жидкости.

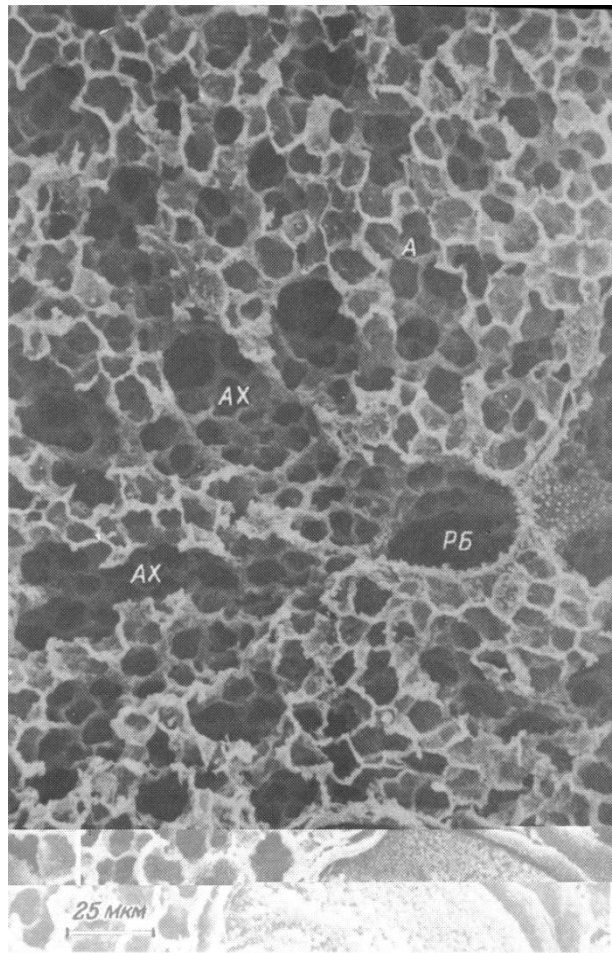
# Роль сурфактанта и сотовой структуры легочной ткани в обеспечении стабильности альвеол.

- Давление в пузырьке  $P = 4 \sigma / r$ , коллапс?

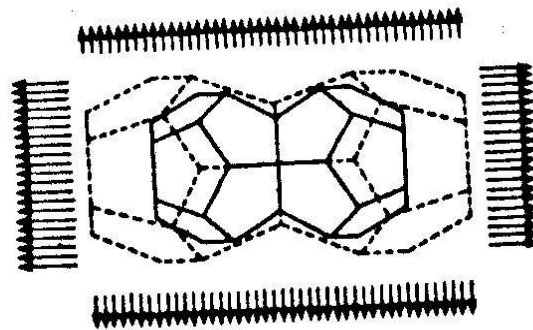
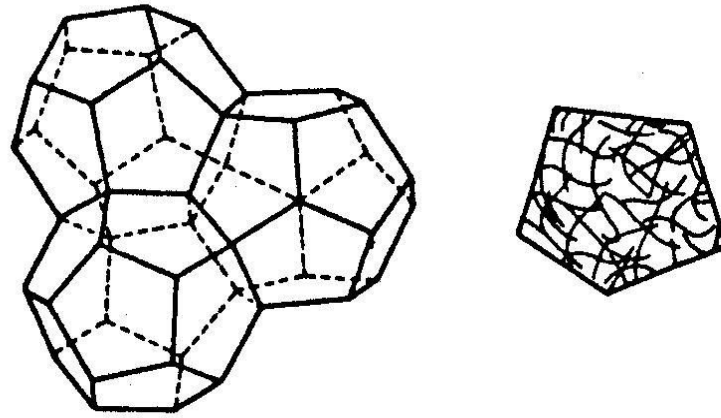
- **Первый механизм стабильности –**
- **Зависимость  $\sigma$  (S)**
- Отсутствие сурфактанта – выпотевание жидкости, ателектаз. Отравления озоном. Респираторный дистресс-синдром новорожденных. Искусственный сурфактант. Дыхание чистым кислородом при перегрузках (у летчиков).
- **Второй механизм стабильности –** общие стенки.
- Когда один пузырек схлопывается, остальные держат его стенки и не дают ему до конца спастись.



# Пористая структура легких

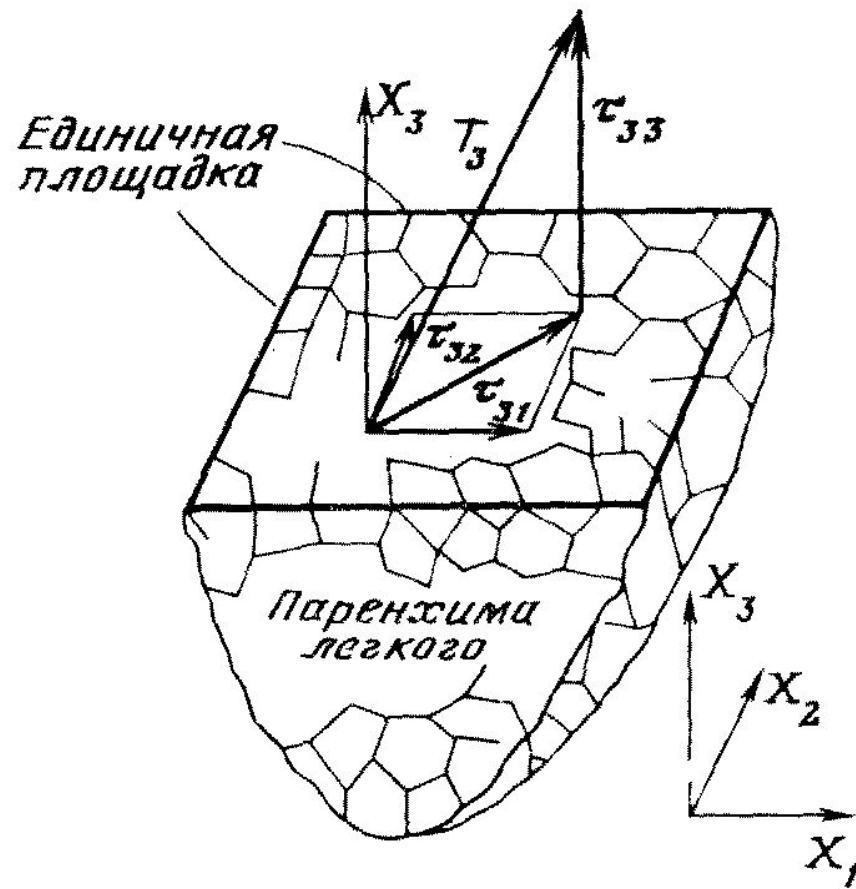


# Модели микроструктуры легких

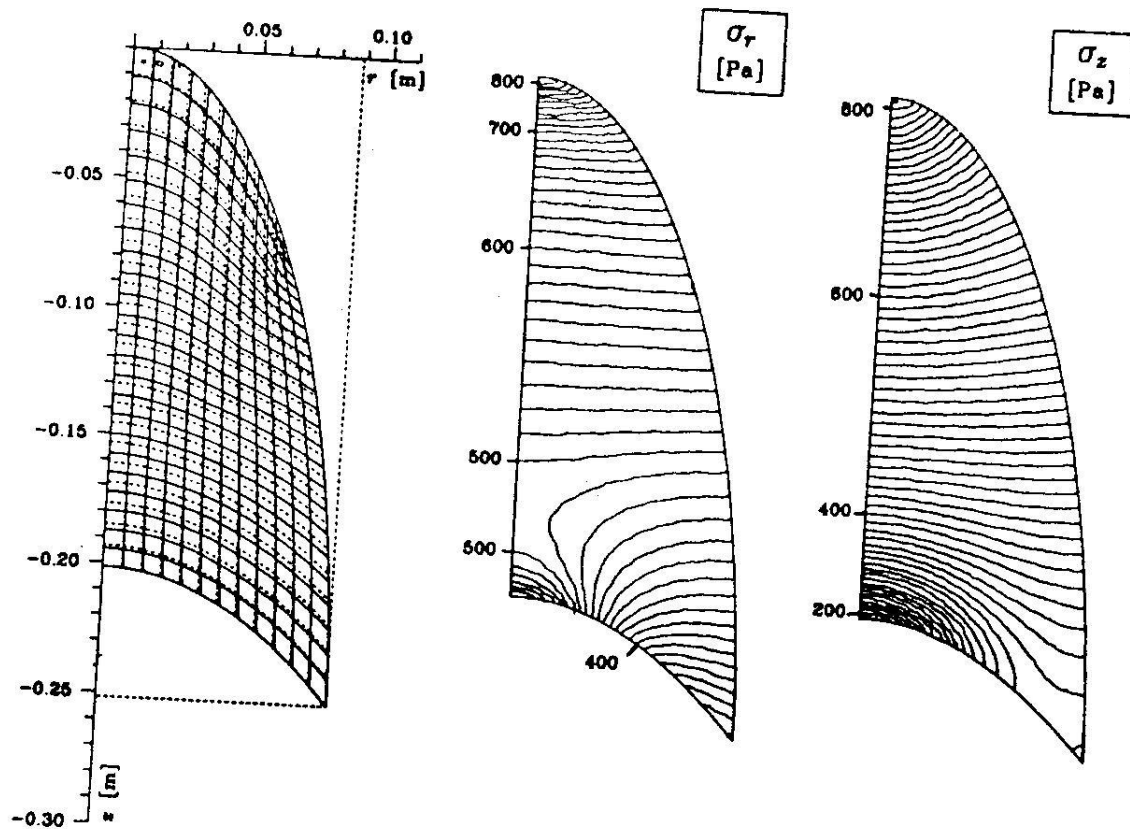




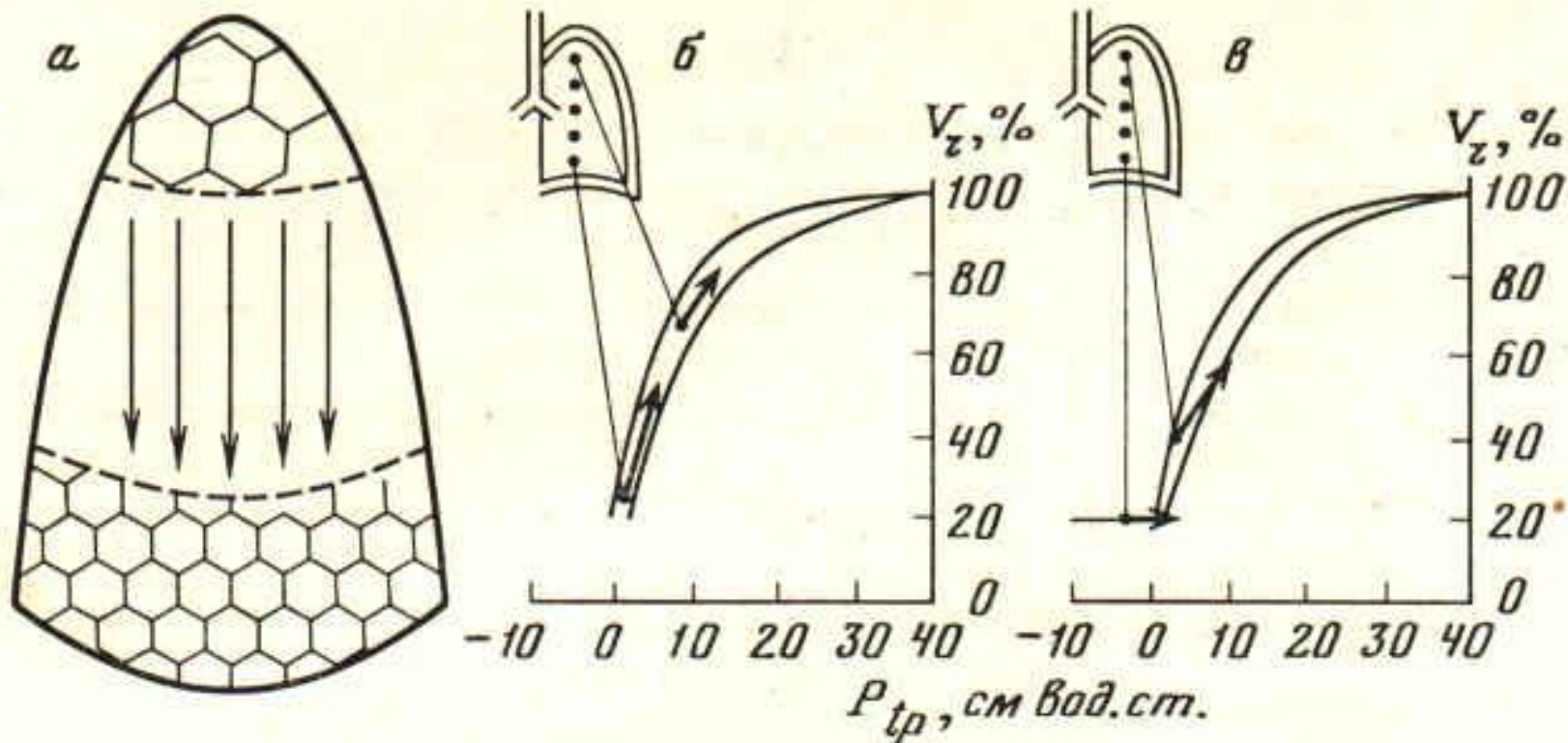
# Механические напряжения в легких



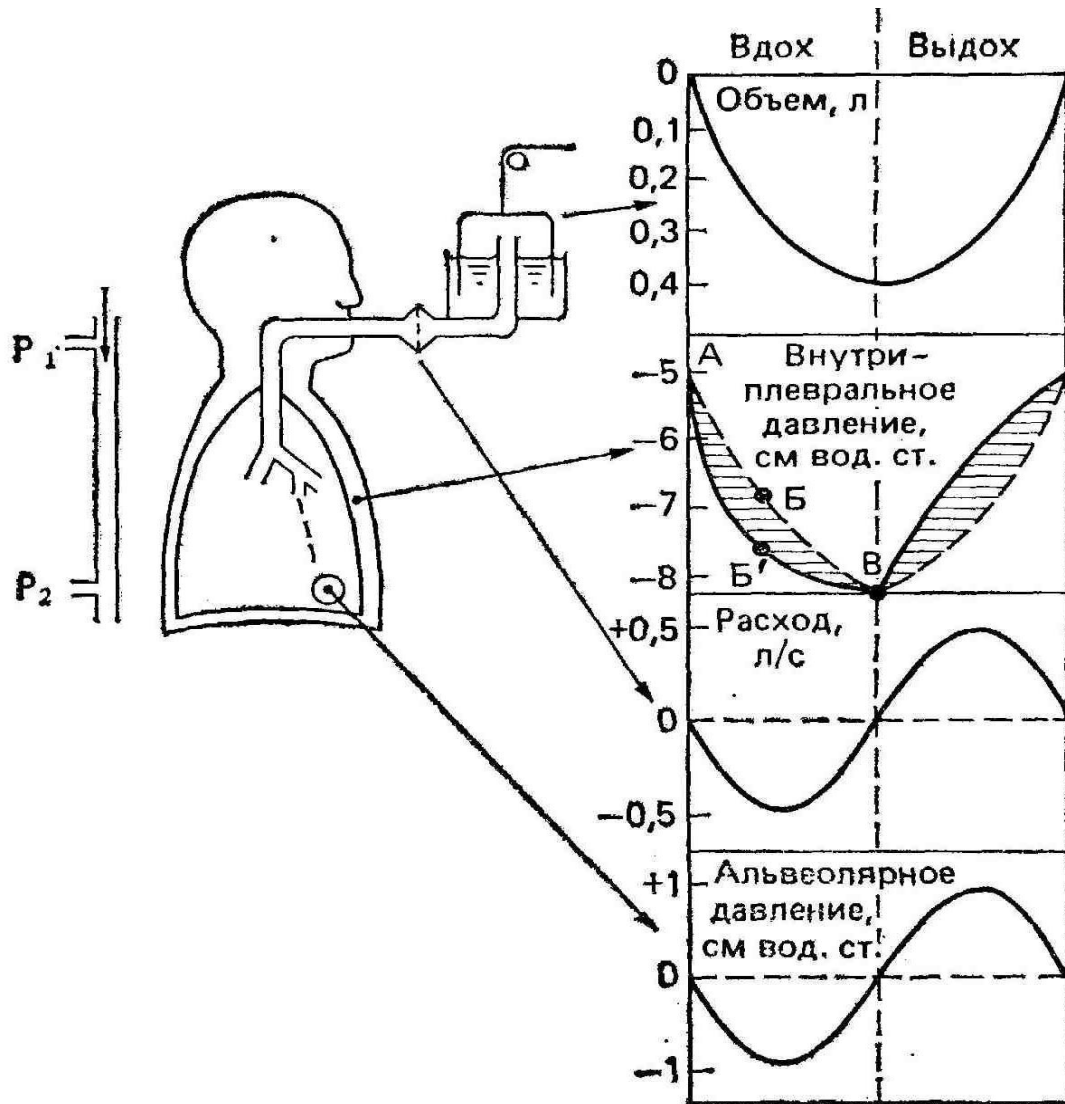
# Распределение механических напряжений



# Распределение давления, деформации и вентиляции легких



# Взаимоотношение между давлением и объемом в ходе дыхательного цикла



$$P = E \cdot V + R \cdot dV/dt$$

- Сопротивление дыхательных путей

- $Q = \frac{P_A}{R_{aw}}, R_{aw} = \frac{P_A}{Q},$

- Квадратичная зависимость перепада давления от потока (есть аналоги в уравнении Навье-Стокса):

- $P = k_1 * dV/dt + k_2 * (dV/dt)**2$

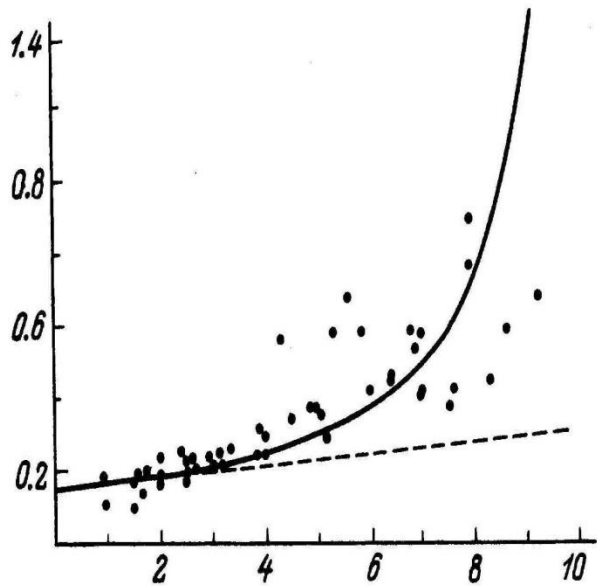
- (уравнение Порпера);

- $R = P / (dV/dt) = k_1 + k_2 * dV/dt$

- Коэффициент  $k_1$  пропорционален вязкости,  $k_2$  - плотности газа

- $R_{aw} = \frac{a}{1 - bV}$

# Зависимость бронхиального сопротивления от потока воздуха у здорового мужчины



- Точками представлены измеренные значения сопротивления; линии – аппроксимации: по закону
- $R_{aw} = 1.5 + 0.17 \sqrt{V}$
- (пунктирная линия) и по закону
- $R_{aw} = 0.17 / (1 - 0.1 \cdot \sqrt{V})$  (Любимов Г.А.)
- (сплошная линия)
- По оси абсцисс — поток воздуха,  $л \cdot с^{-1}$  ; по оси ординат — бронхиальное сопротивление,  $кПа \cdot л^{-1} \cdot с$