

5. Растяжимость легких, сопротивление дыханию

p_0

Мышечный каркас (МК)

Грудная клетка (ГК)

Плевральная полость (ПП)

Легкое (Л)

(Легочная паренхима)

Диафрагма (Д)

Брюшная полость

Закон Паскаля:

давление, производимое на поверхность жидкости
(газа) передается во все точки без изменения

p_0

МК

ГК

ПП

Л

Эластичная тяга

легких

$p_{\text{ЭТЛ}}$

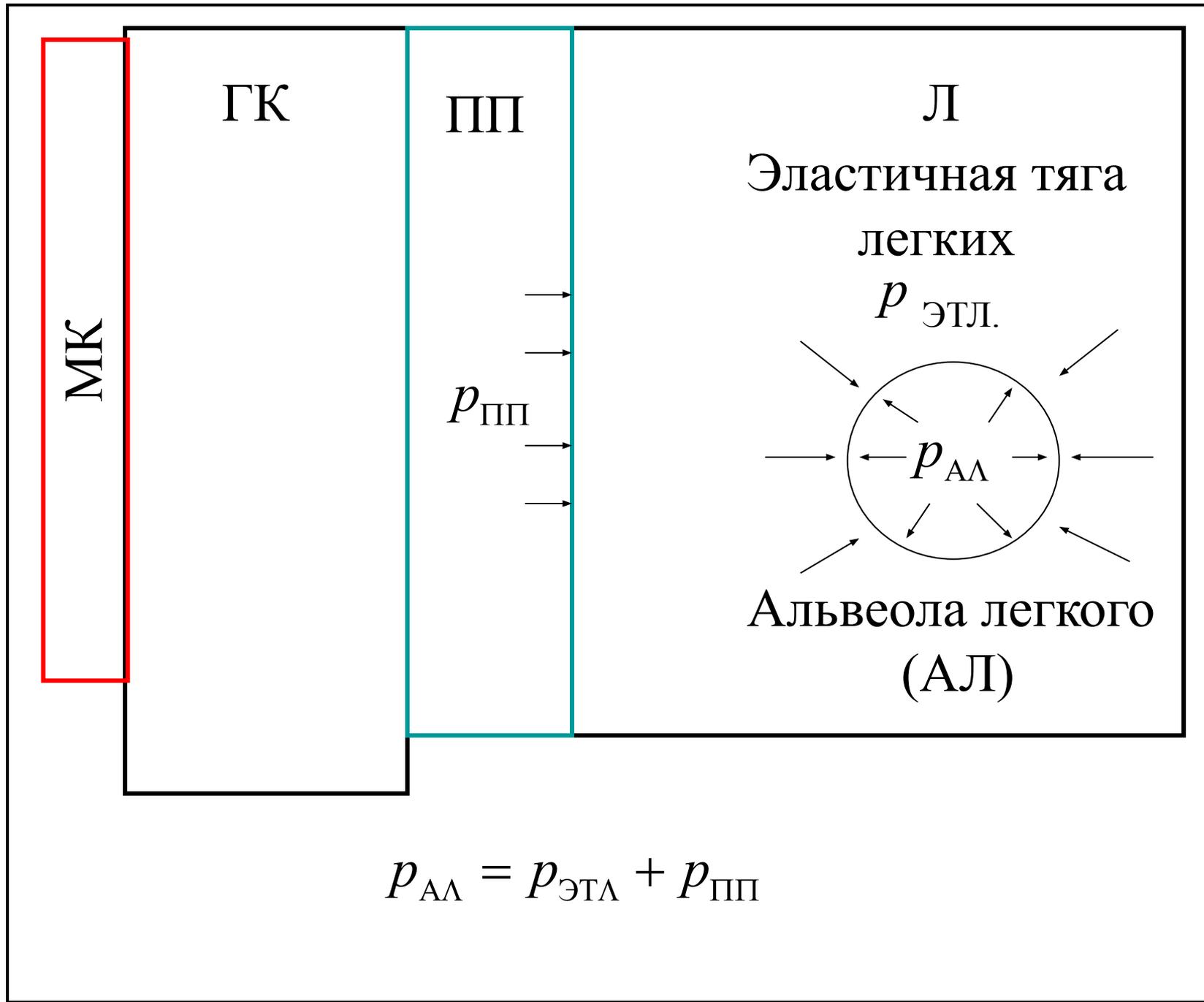
$p_{\text{ПП}}$

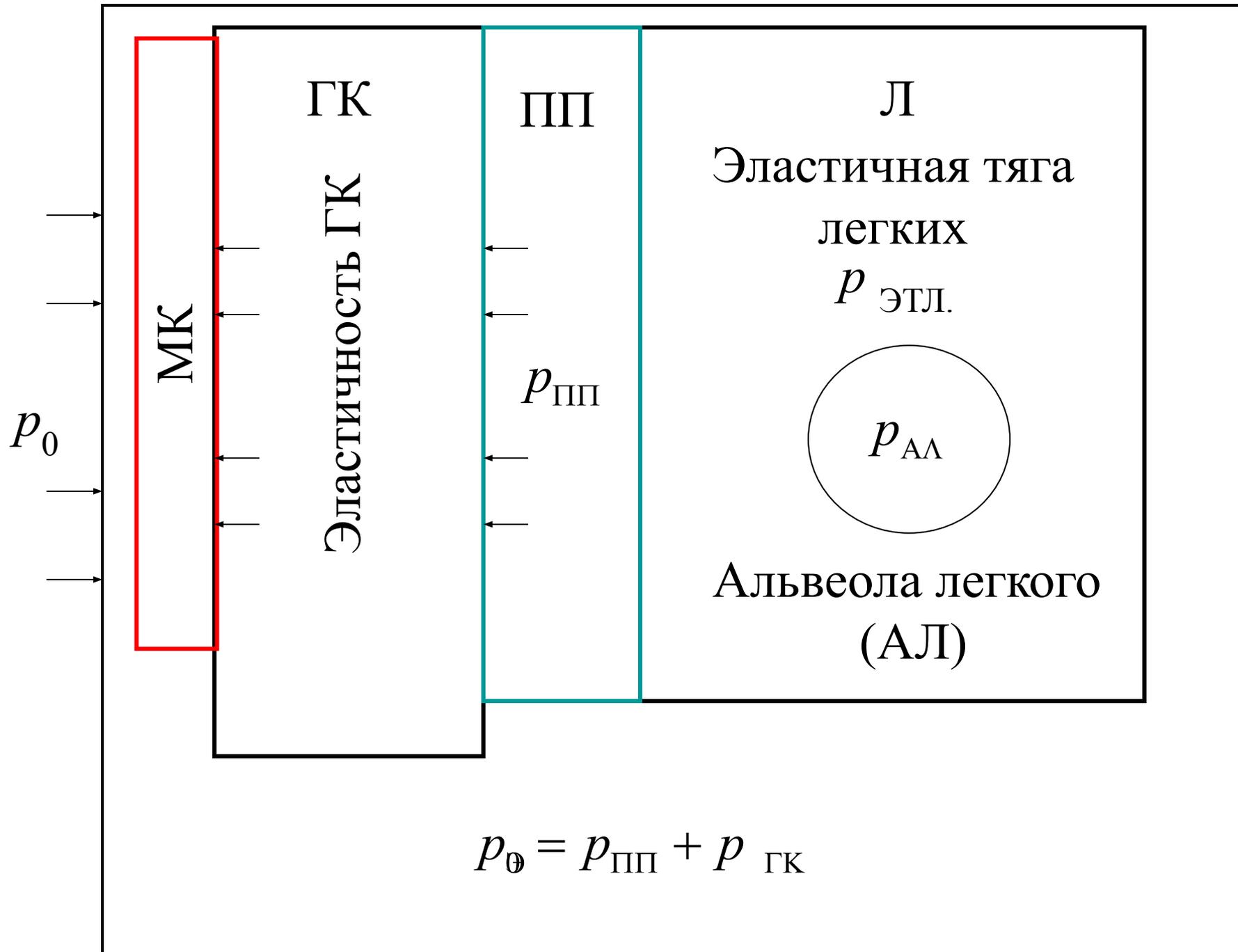
$p_{\text{АЛ}}$

Альвеола легкого

(АЛ)

$$p_{\text{АЛ}} = p_{\text{ЭТЛ}} + p_{\text{ПП}}$$





$$p_{\Theta} = p_{\text{ПП}} + p_{\text{ГК}}$$

$$p_0 \boxtimes p_{\text{ПП}}$$

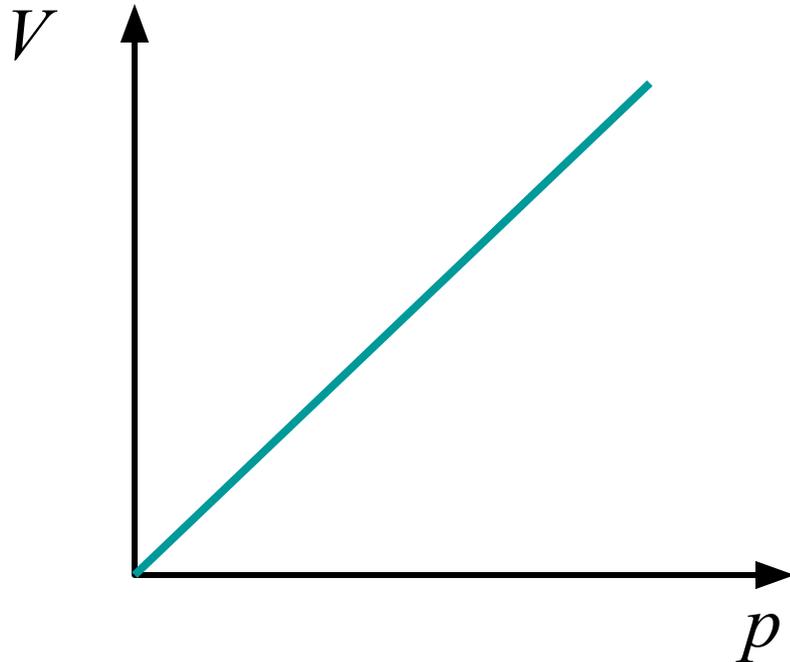
Если принять $p_0 = 0$, то $p_{\text{ПП}} < 0$

$p_{\text{ПП}}$ стремится сжать грудную клетку

Растяжимость легких

Для идеально упругого тела:

$$V = cp$$



Эластическое сопротивление
(растяжимость):

$$c = \frac{dV}{dp} = const$$

Эластическая тяга легких:

- а). Наличие в альвеолах эластических волокон
- б). Поверхностное натяжение пленки жидкости, покрывающей внутреннюю поверхность альвеол (55 – 65 % ЭТЛ)

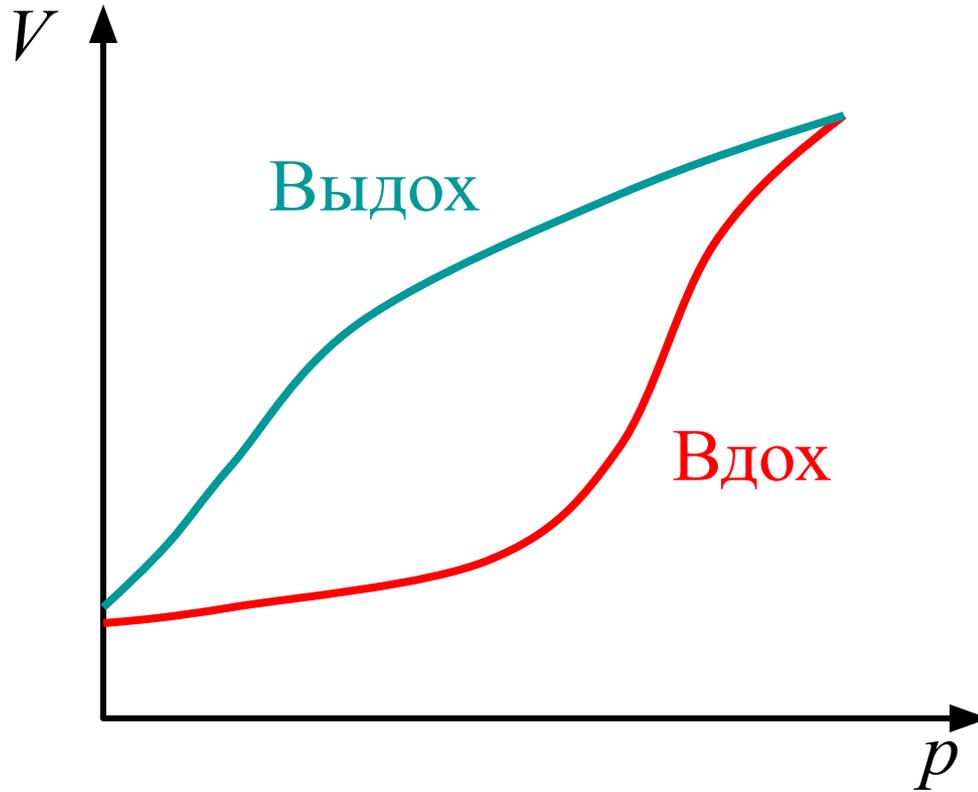
$$V = c(p)p$$

Эластическое сопротивление (растяжимость):

$$c(p) = \frac{dV}{dp} \neq const$$

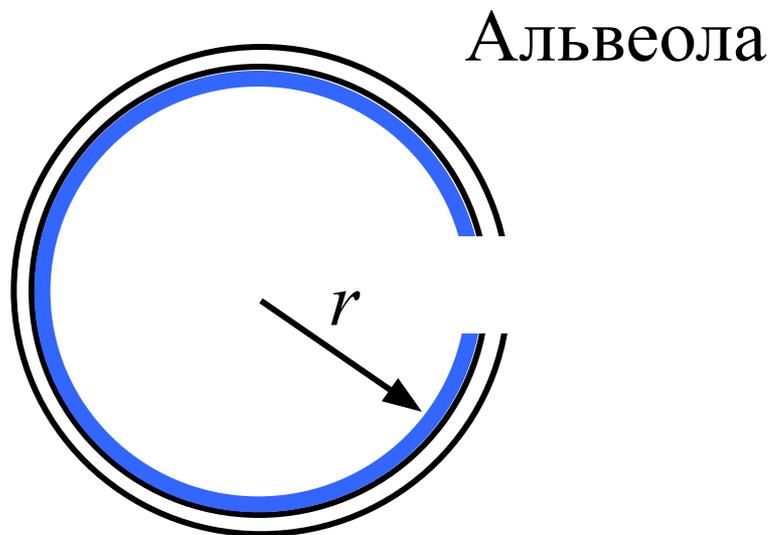
Следствия:

Нелинейность
Гистерезис



Давление Лапласа за счет поверхностного натяжения:

Сурфактант



$$p_{\Lambda} = \frac{\sigma}{r}$$

Оценка: $\sigma_{H_2O} \approx 0,073 \frac{H}{M} \quad \text{ммМ}25$

$p_{\Lambda} \approx 1200 \text{ мм в } (0,20 \text{ м} \quad . \quad .)$

Спадение альвеол;
 работа вдоха >> реальной

Сурфактант – ПАВ $\rightarrow \sigma \downarrow$

$$\sigma_{\text{Сурф.}} \approx 0,050 \frac{H}{M}$$

$$S_A \downarrow \Rightarrow C_{\text{Поверхностная}}^{\text{Сурфактанта}} \Rightarrow \sigma \downarrow \Rightarrow p_{\Lambda} \downarrow$$

Сопротивление дыханию

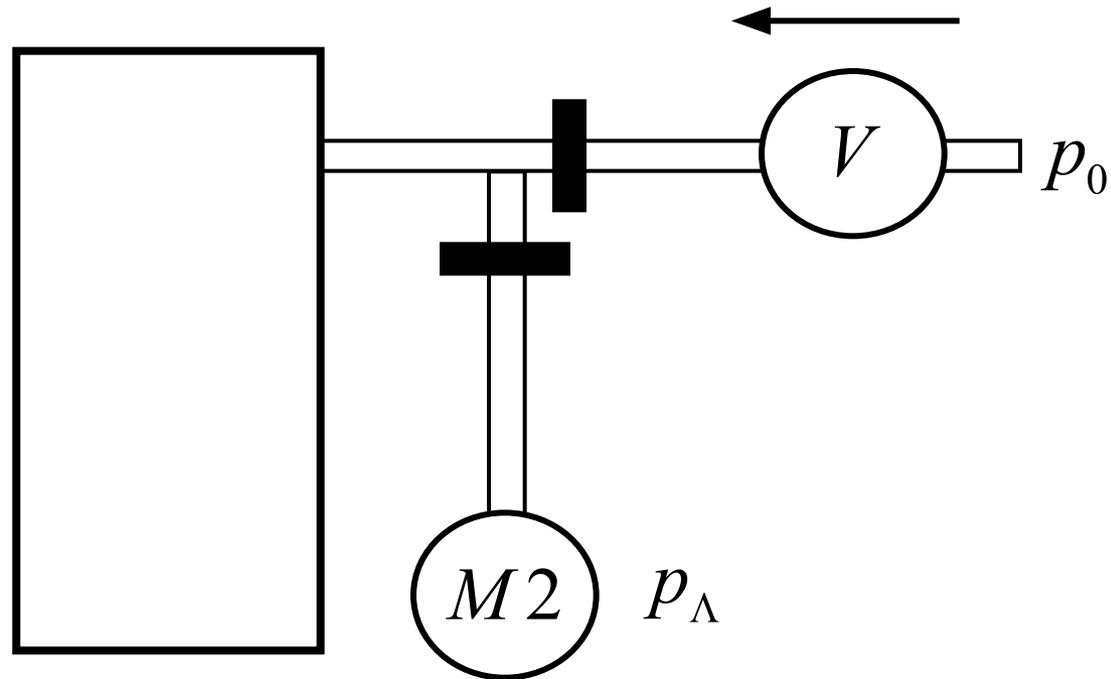
- а. Эластическое;
- б. Динамическое;
- в. Гравитационное;
- г. Инерциальное

а. Эластическое сопротивление

Преодоление

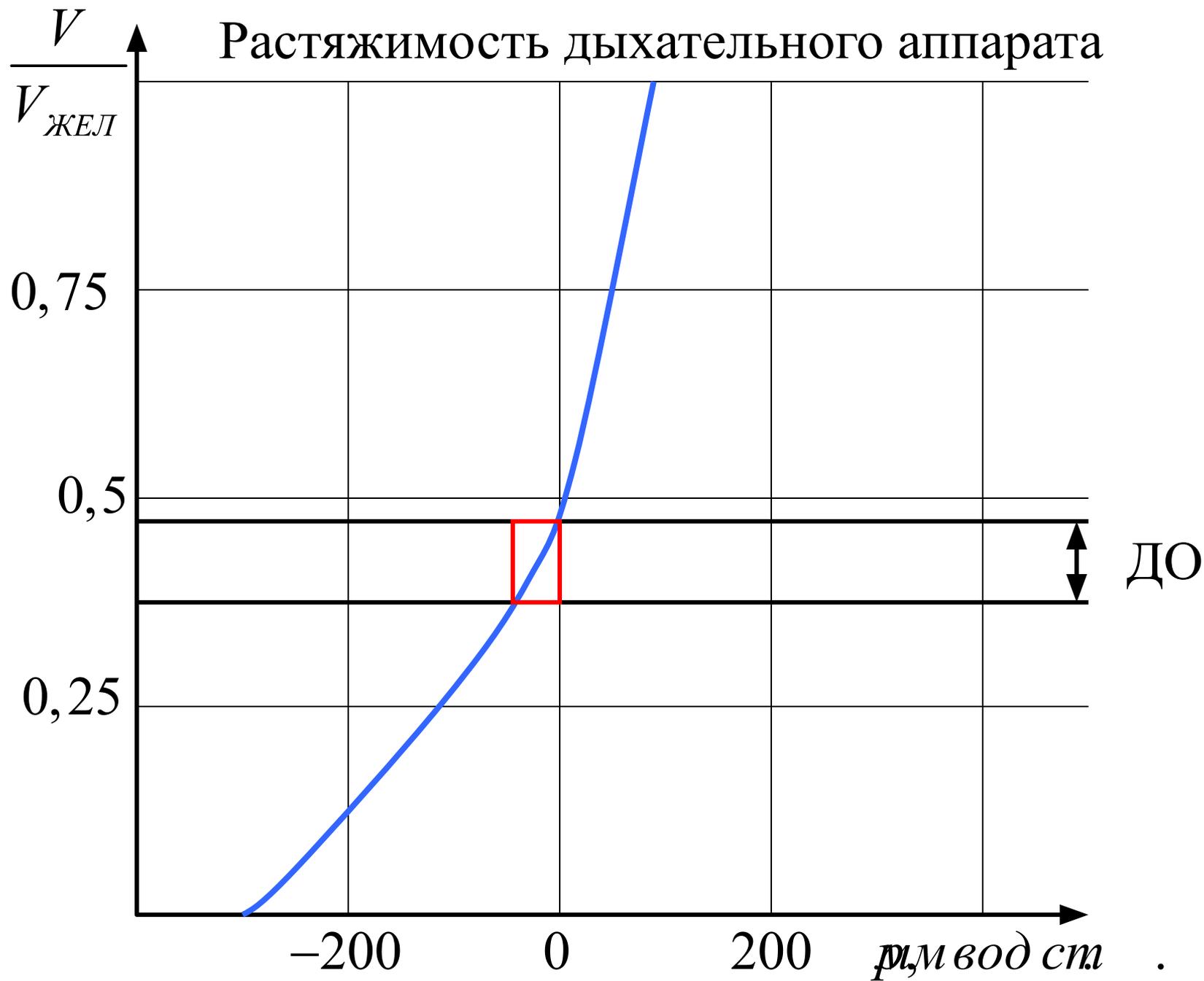
- а.1. Эластических сил легких;
- а.2. Эластической силы грудной клетки

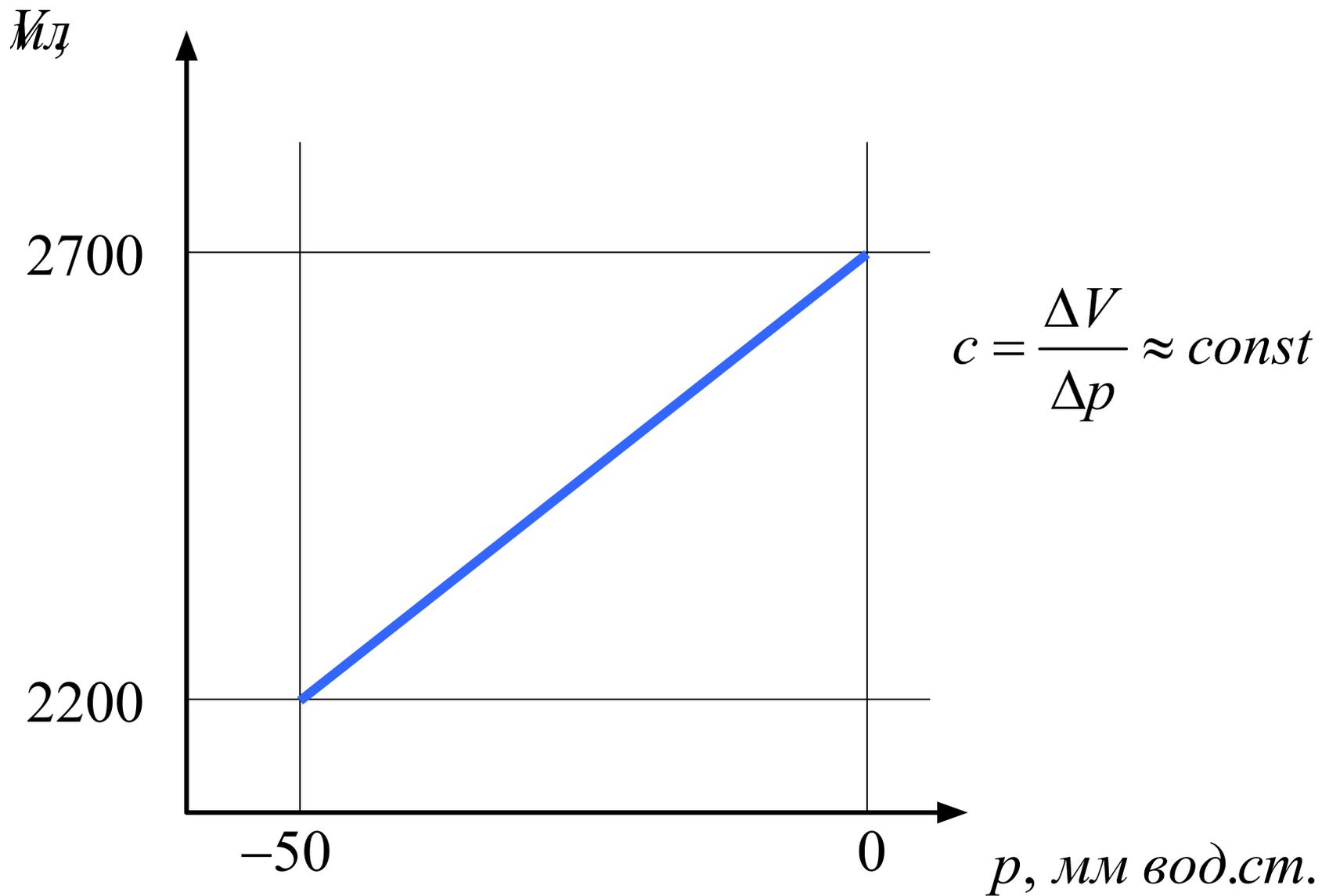
Исследование эластических свойств:



Расслабление
мускулатуры

Растяжимость дыхательного аппарата





Характеристика эластических свойств
аппарата дыхания – растяжимость:

$$c \approx \frac{500}{50} = 10 \frac{\text{мл}}{\text{мм вод.ст.}}$$

(Самостоятельно перевести в СИ)

Оценка:

Спокойный вдох:

$$\Delta V_{\text{л}} = 500$$

$$\Delta p_{\text{мм вод.ст}} = \frac{\Delta V}{c} = \frac{500}{10} = 50 \quad . \quad .$$

Растяжимость аппарата дыхания (в целом):

$$c = \frac{\Delta V}{\Delta p}$$

Растяжимость грудной клетки:

$$c_{\text{ГК}} = \frac{\Delta V_{\text{ГК}}}{\Delta p_{\text{ГК}}}$$

Растяжимость легких:

$$c_{\Lambda} = \frac{\Delta V_{\Lambda}}{\Delta p_{\Lambda}}$$

$$\Delta V = \Delta V_{\Gamma K} = \Delta V_{\Lambda}$$

$$\Delta p = \Delta p_{\Gamma K} + \Delta p_{\Lambda}$$

$$c = \frac{\Delta V}{\Delta p_{\Gamma K} + \Delta p_{\Lambda}} =$$

$$= \frac{1}{\frac{\Delta p_{\Gamma K}}{\Delta V} + \frac{\Delta p_{\Lambda}}{\Delta V}} =$$

$$c_{\Gamma K} = \frac{\Delta V_{\Gamma K}}{\Delta p_{\Gamma K}}$$

$$\frac{1}{c_{\Gamma K}}$$

$$\frac{1}{c_{\Lambda}}$$

$$c_{\Lambda} = \frac{\Delta V_{\Lambda}}{\Delta p_{\Lambda}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{c_{\Gamma\text{K}}} + \frac{1}{c_{\Lambda}}} = c$$

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c_{\Gamma\text{K}}} + \frac{1}{c_{\Lambda}}$$

$$c_{\Gamma\text{K}} \approx c_{\Lambda} = 2c = 20 \frac{\text{мл}}{\text{мм вод.ст.}}$$

б. Динамическое сопротивление

Возникает только во время дыхательных движений
и зависит от скорости

б.1. Тканевое – трение в тканях при их взаимном
перемещении (15 – 18 %)

б.2. Аэродинамическое – внутреннее трение

Потеря давления:

$$Q_V = \frac{\Delta p}{R_\Sigma}$$

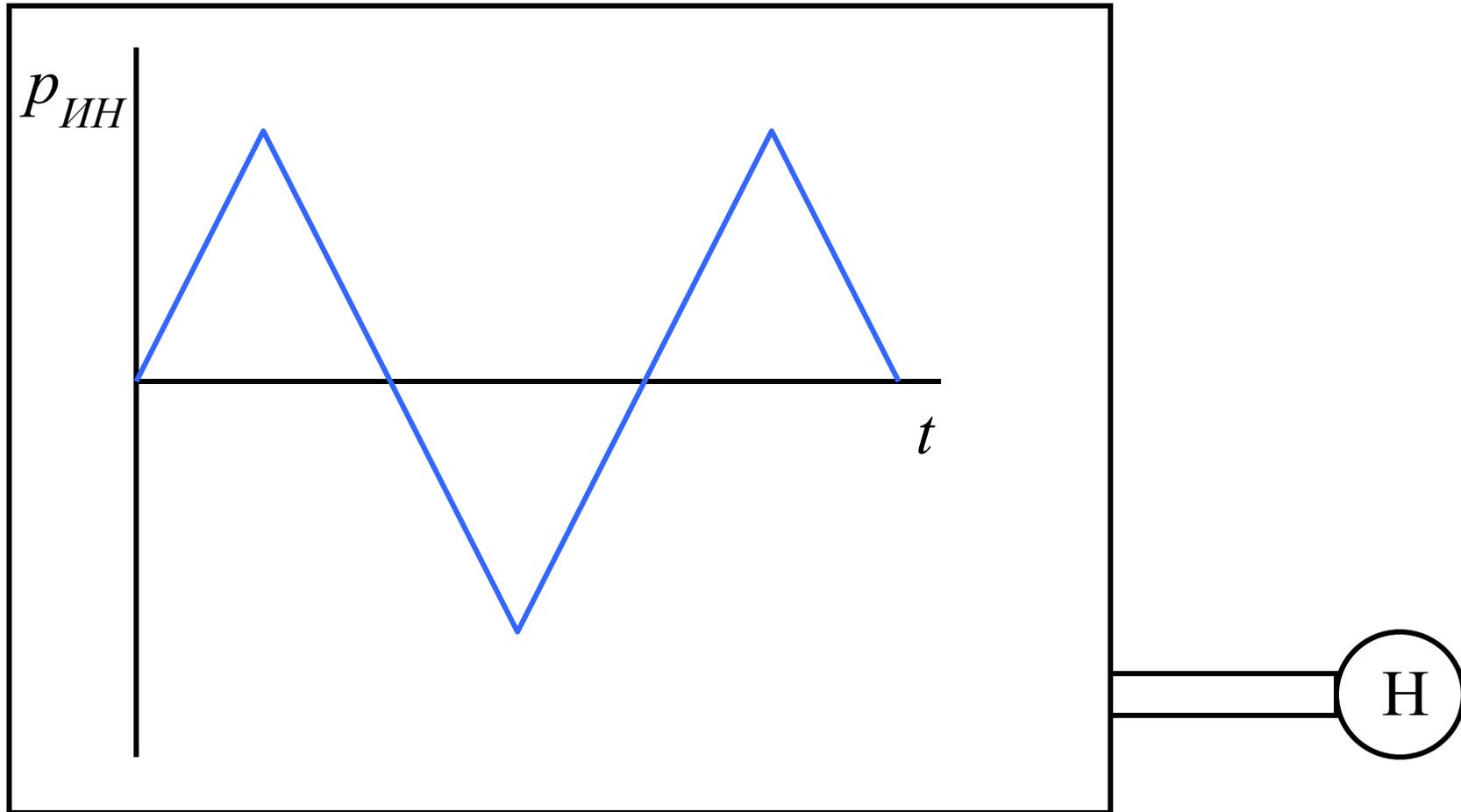


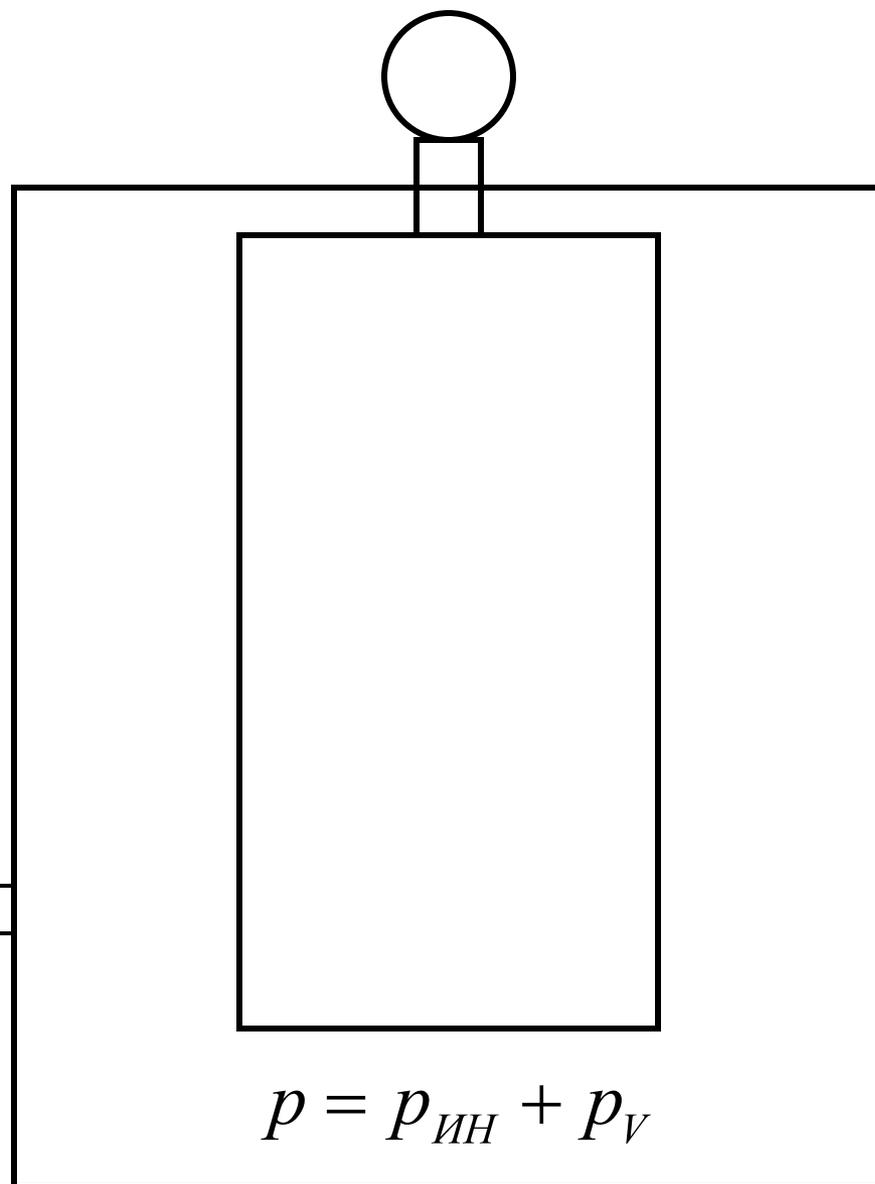
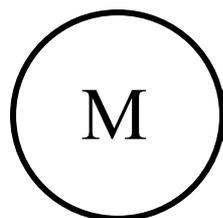
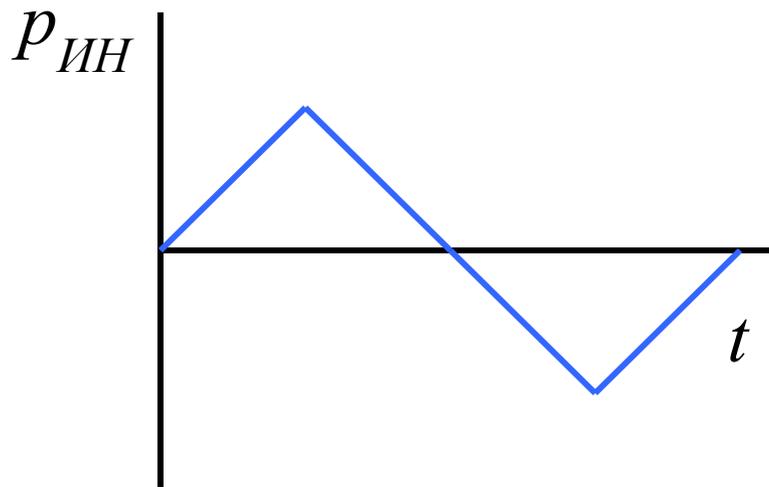
ламинарное
течение $\left(k_1 = \frac{1}{R_\Sigma} \right)$

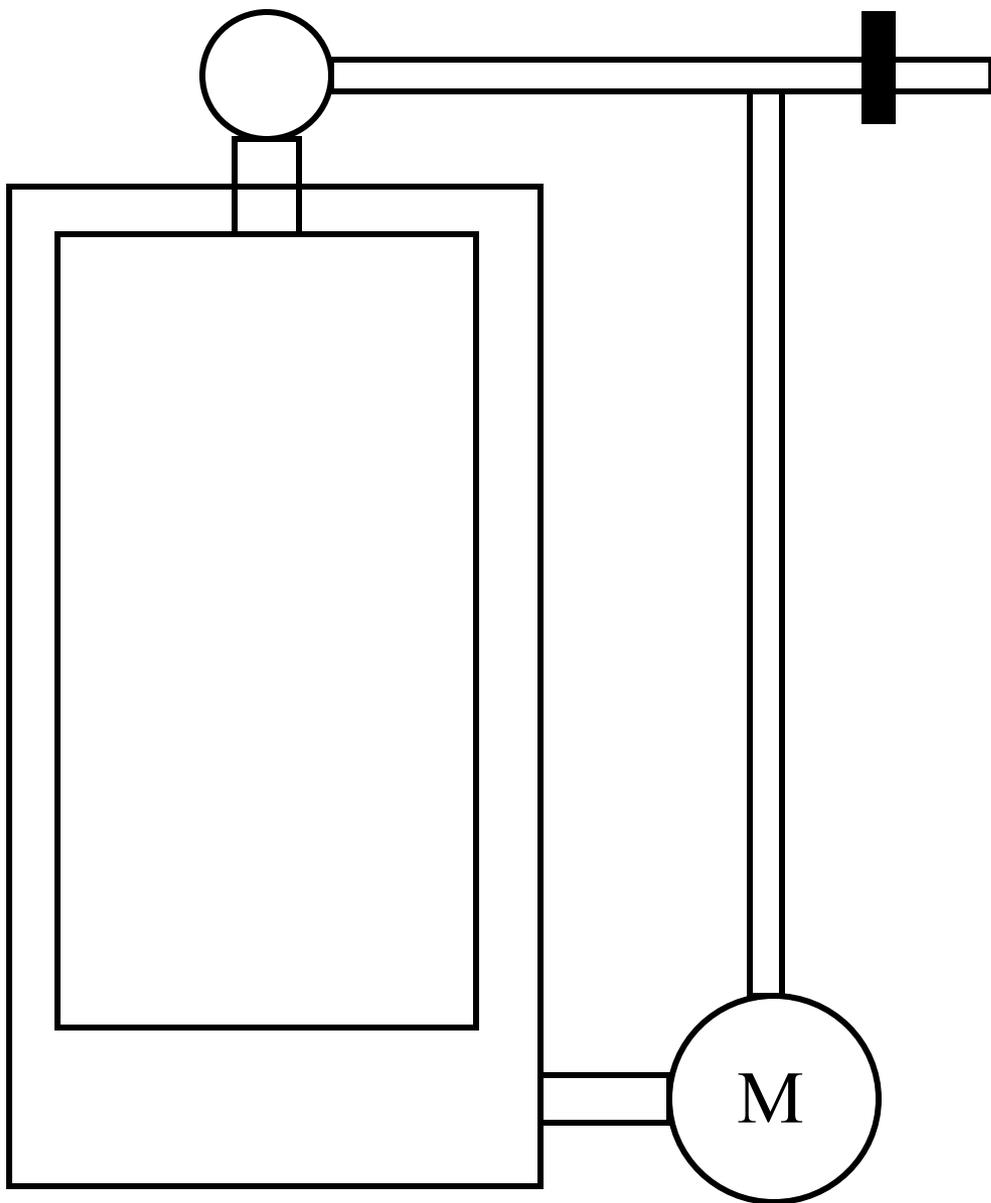
$$\Delta p = k_1 Q_V + k_2 Q_V^2$$

турбулентное
течение

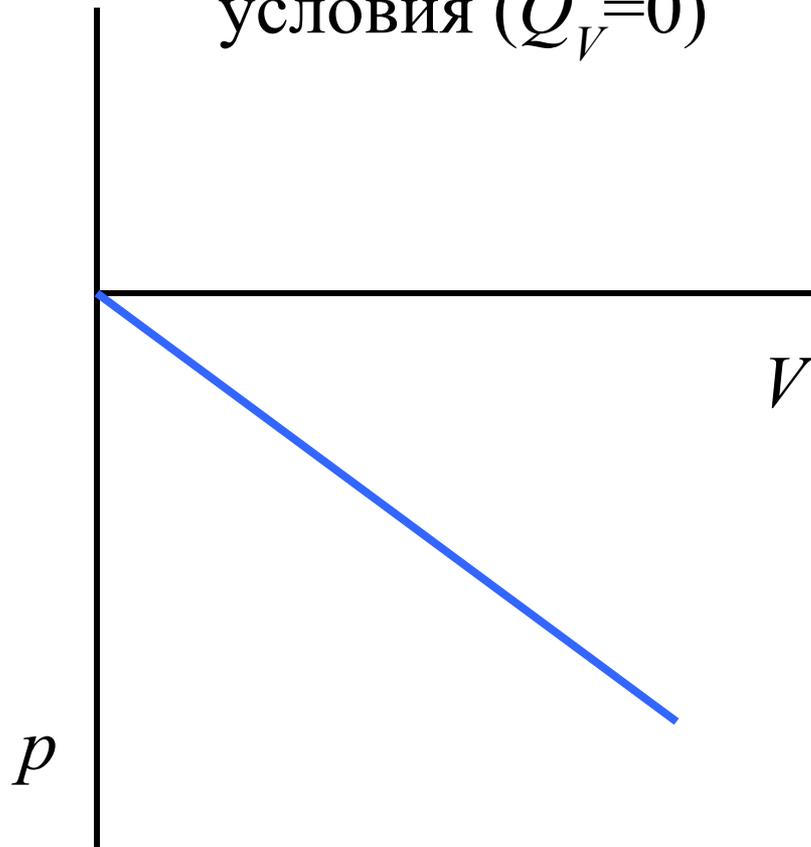
Общий плетизмограф («железные легкие»)



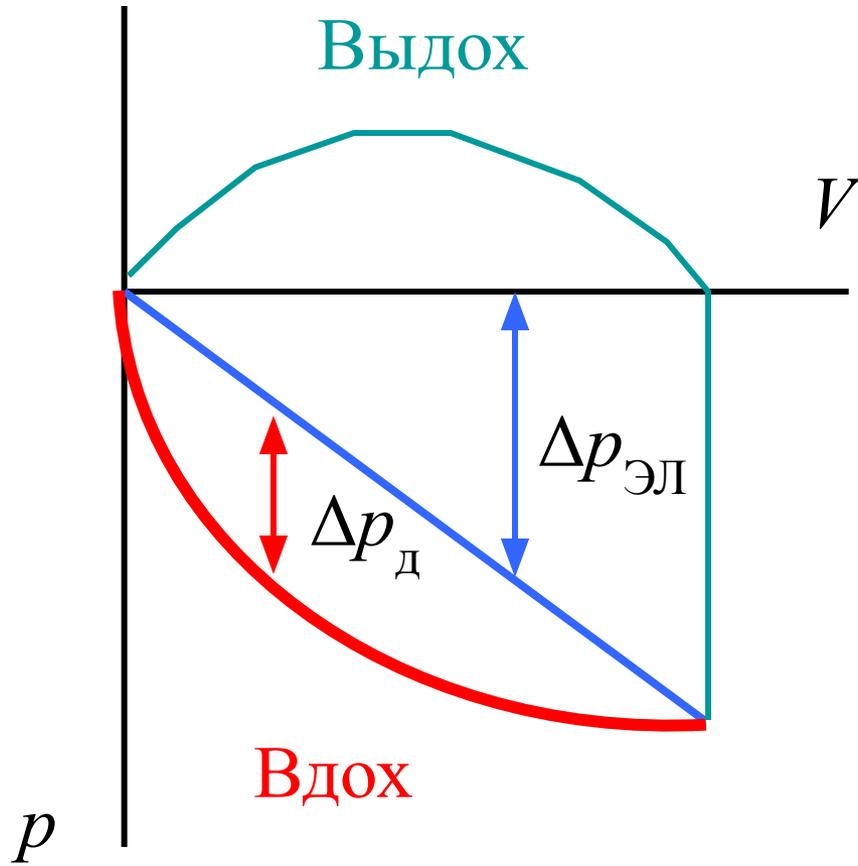




Статические
условия ($Q_V=0$)



Динамические условия ($Q_V \neq 0$)



$$Q_V = \frac{\Delta p_{\text{д}}}{R_{\text{д}}}$$

в. Гравитационные сопротивления
(преодоление силы тяжести)

г. Инерционные
(перемещение массивных объектов с var скоростью)

Термодинамика дыхания



6. Работа дыхания

Работа по преодолению всех сопротивлений

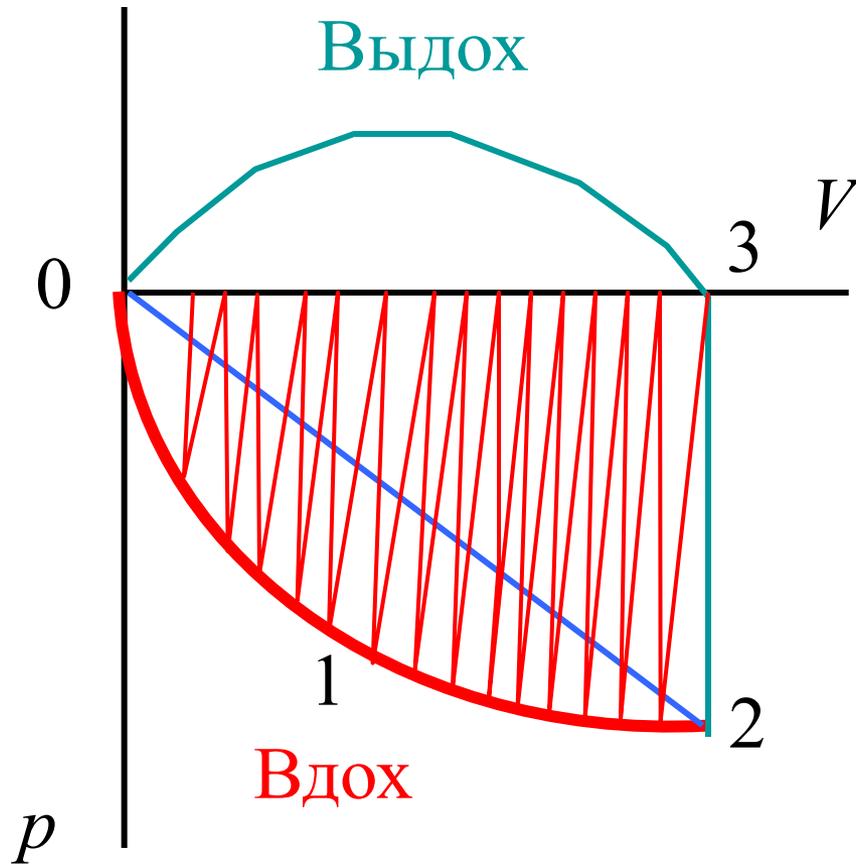
Работа по изменению объема:

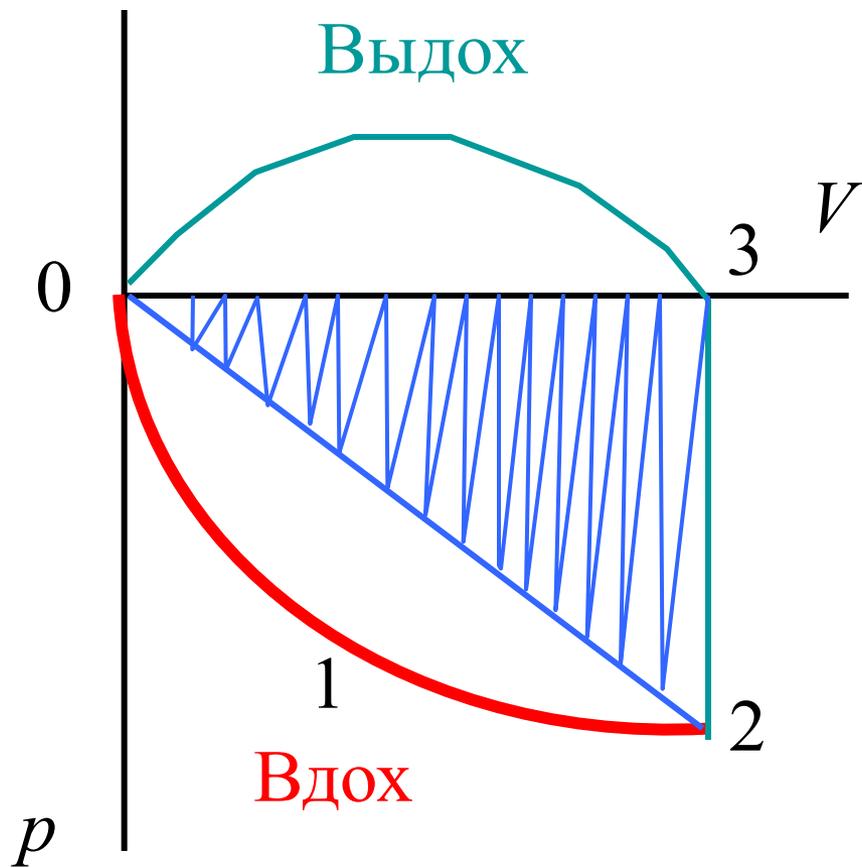
$$A = \int p dV \rightarrow S(p, V)$$

Вдох:

Работа вдоха

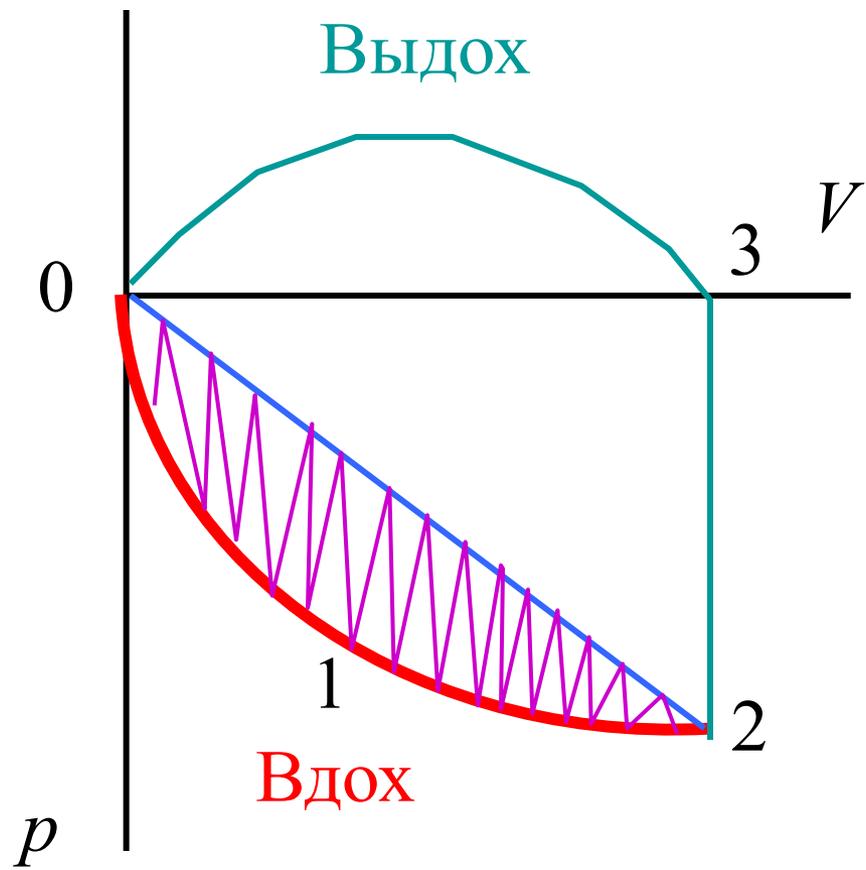
$$\int_{0-1-2-3-0} p dV$$





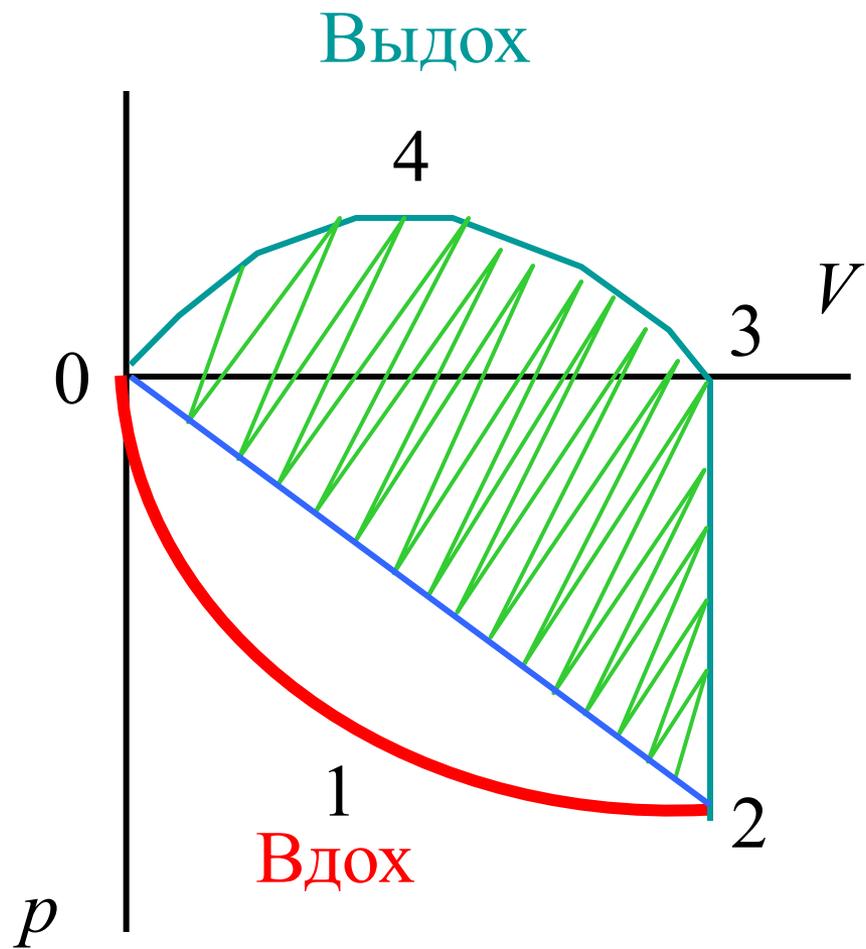
Потенциальная энергия

$$\int_{0-2-3-0} p dV = \Delta 023$$



Работа против СДС

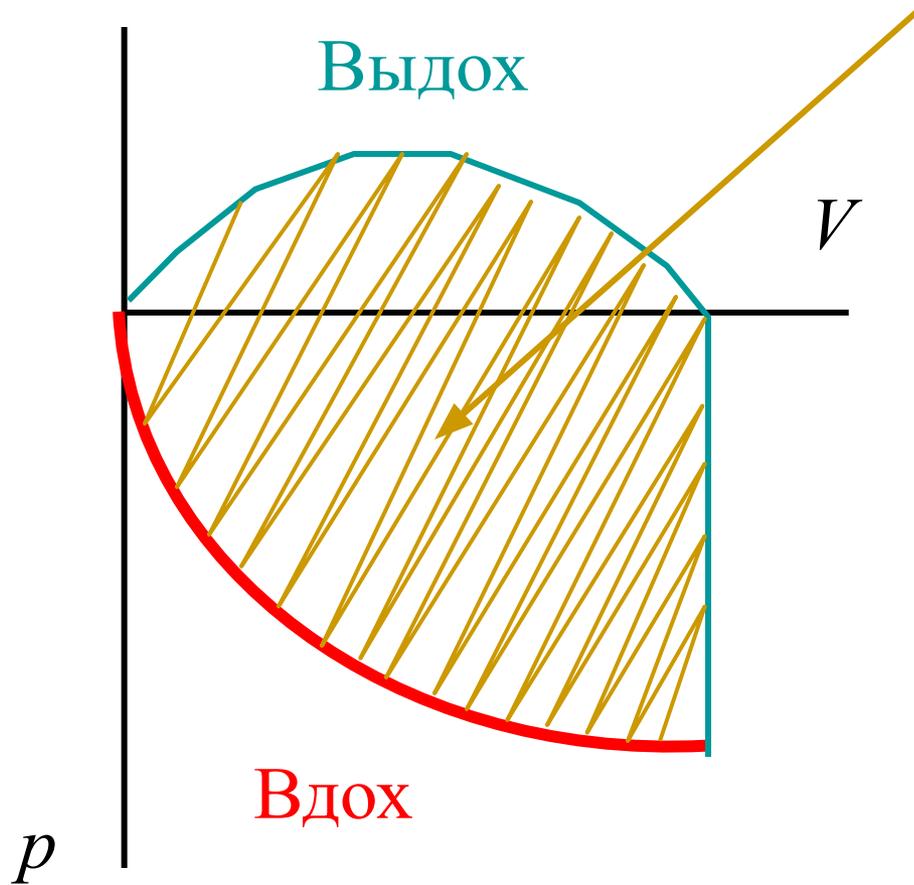
$$\int_{0-1-2-0} p dV$$



Выдох:

Работа выдоха

$$\int_{0-2-3-4-0} p dV$$



Работа за цикл:

$$A = \int_{0-1-2-3-4-0} p dV$$

Дыхательная работа
в покое:

0,1 – 0,6 Дж/л;
0,98 – 4,9 Дж/ мин.

Общие выводы:

1. Эластические свойства системы дыхания определяются совокупностью эластических свойств легких и грудной клетки
2. Работа дыхания определяется, в основном, статическими эластическими сопротивлениями легких и грудной клетки и динамическими сопротивлениями движений воздуха, тканей и органов