



# Лекция № 17 (к занятию № 17)

Тема:

## *Газообмен в лёгких. Внутреннее дыхание.*

Медицинский факультет  
Специальности: лечебное дело,  
педиатрия  
2008 / 2009 учебный год

23 декабря 2008 г.

# Литература основная



## Физиология человека

Под редакцией

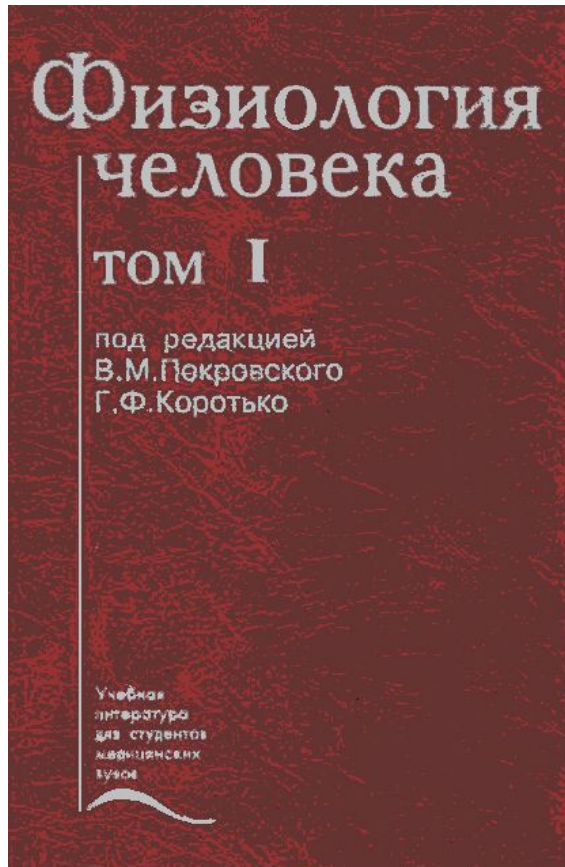
В.М.Покровского,

Г.Ф.Коротько

Медицина, 2003 (2007) г.

**C. 358-365.**

# Литература основная



## Физиология человека В двух томах . Том I.

Под редакцией  
В. М. Покровского,  
Г. Ф. Коротько

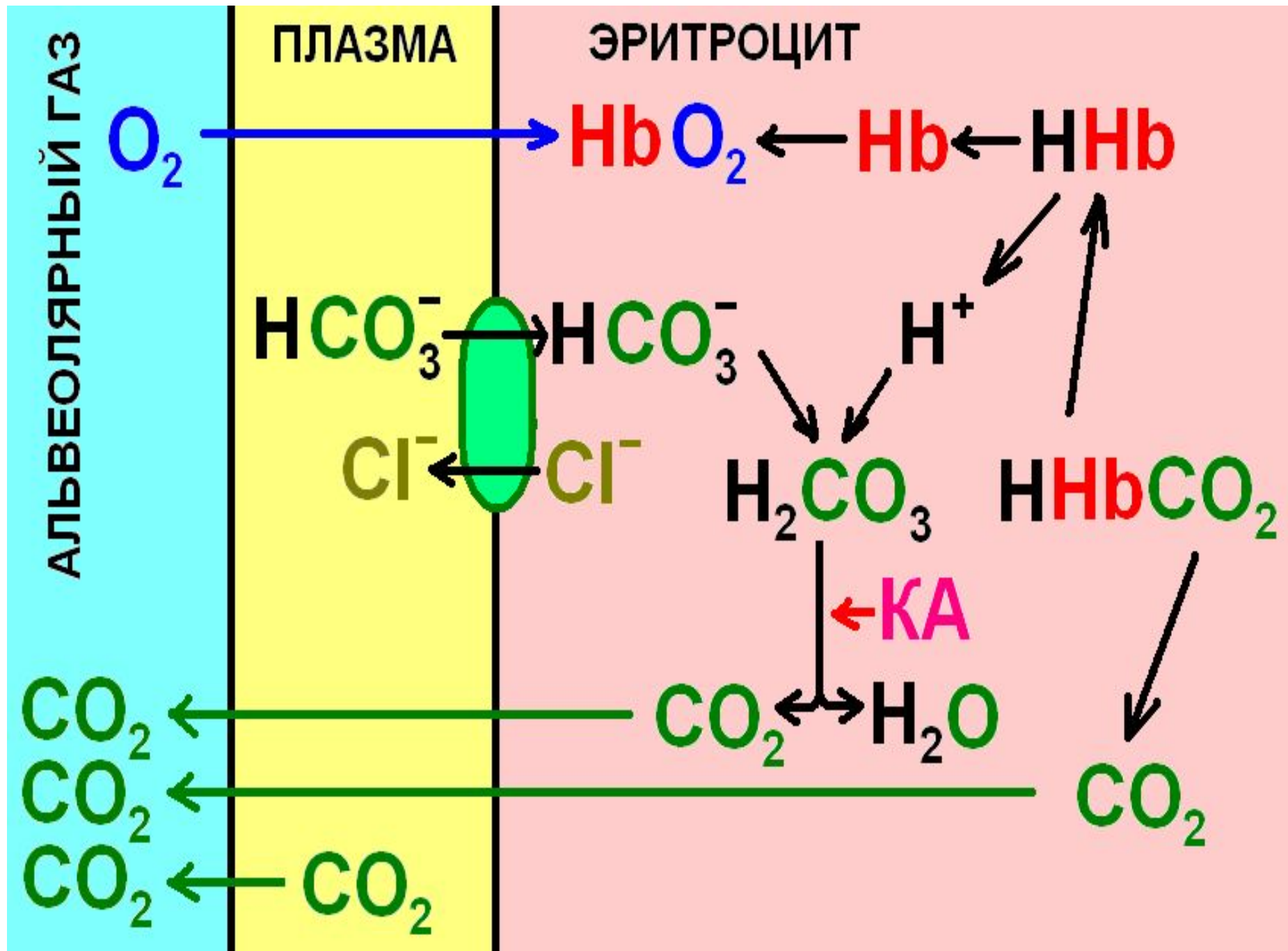
- Медицина, 1997 (1998, 2000, 2001) г.

С. ???

# Вопрос **1**



- Подробнее Учебник.



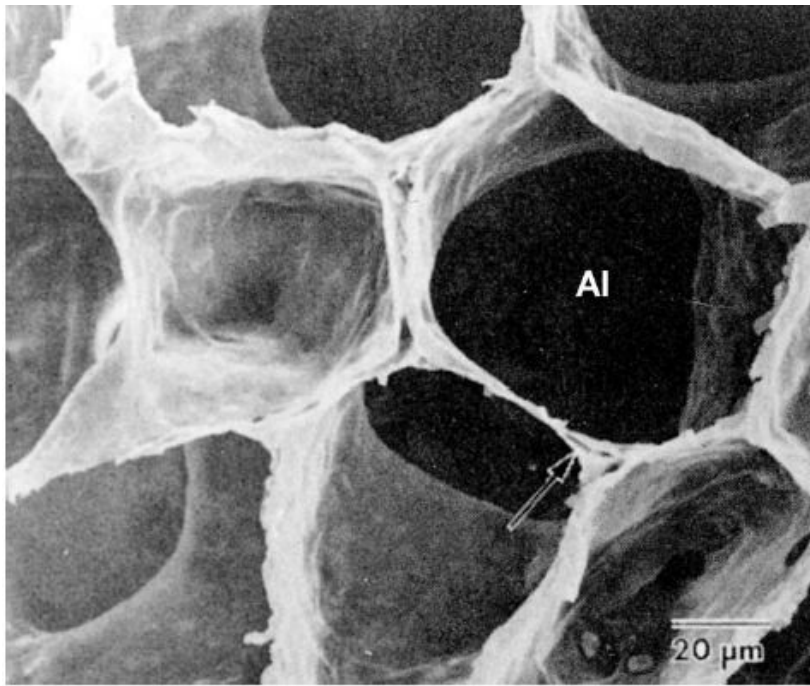
# Вопрос 2



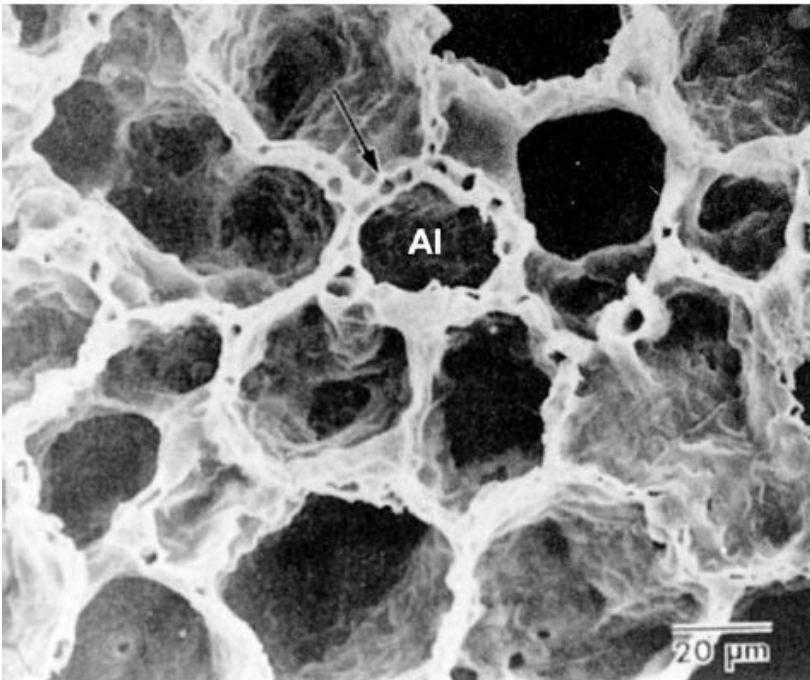
Подробнее Учебник,.

- Часто **аэрогематический барьер** называют ***диффузионным барьером***



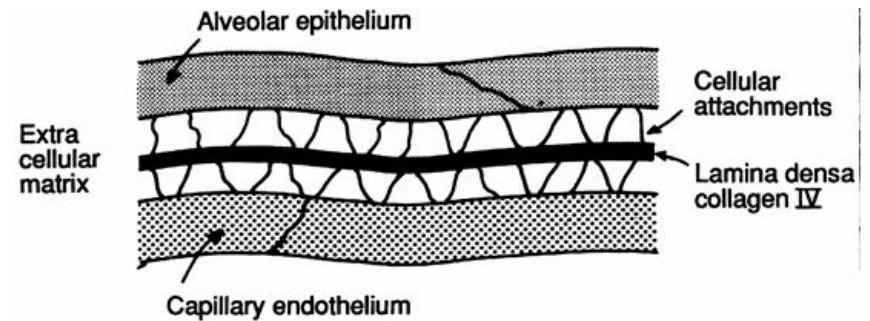
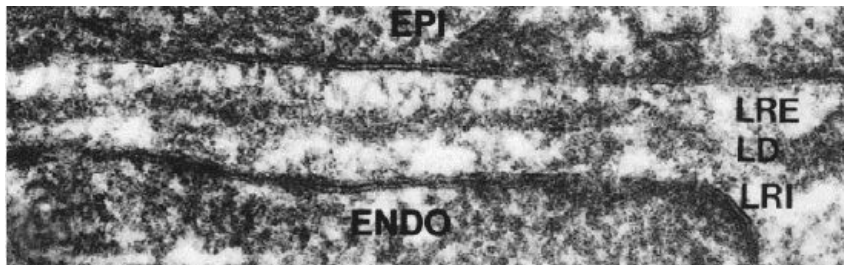
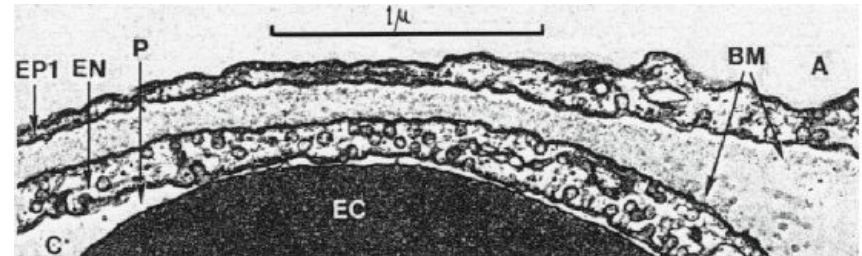


- Газообмен осуществляется в 16-23 генерациях ДП

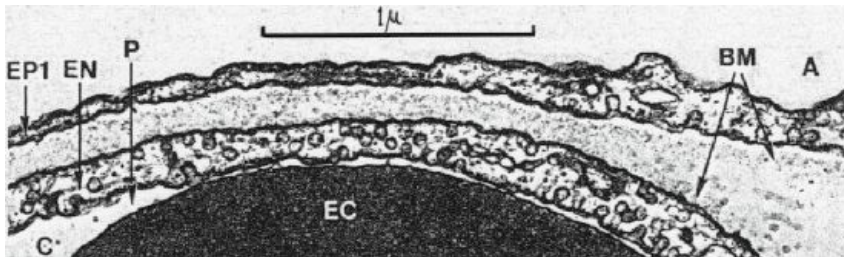


# Аэрогематический барьер

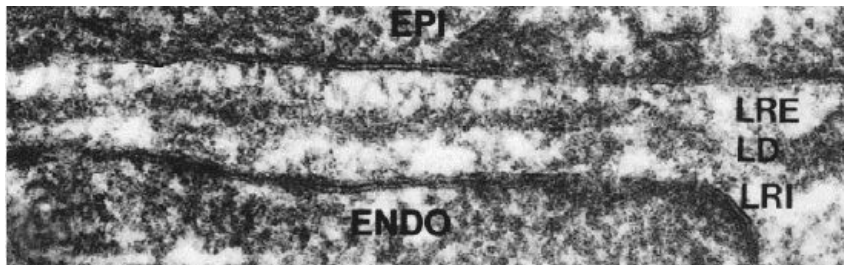
## Blood-Gas Barrier



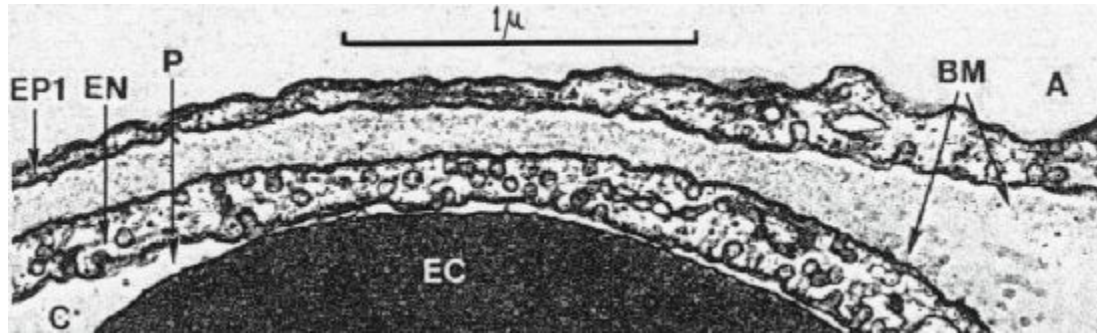
# Аэрогематический барьер включает следующие основные структуры:



- эпителий альвеолы
- две основные мембраны
- интерстициальное пространство
- эндотелий капилляра



# Аэрогематический барьер



Толщина – около 0,5 - 1 мкм

Площадь – около 80 м<sup>2</sup> (50-100 м<sup>2</sup>)

# Вопрос 3



Подробнее Учебник,.С.358-359.

# ***Движущая сила газообмена в лёгких***



- ***разность парциальных давлений*** (напряжений)  $O_2$  и  $CO_2$  в крови и в альвеолярном газе.
- молекулы газа путём ***диффузии*** переходят из области большего его парциального давления в область более низкого парциального давления.



# Парциáльное давление

— лат. *partialis* — частичный, от лат. *pars* — часть

— давление, которое имел бы газ, входящий в состав газовой смеси, если бы он один занимал объём, равный объёму смеси при той же температуре.



# Закон Фика



$$V_g = -D \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta P$$

где

**$V_g$**  — скорость диффузии (скорость переноса газа);

**$D$**  — константа диффузии;

**$S$**  — площадь барьера;

**$\Delta P$**  — разность парциальных давлений газа по обе стороны барьера;

**$d$**  — толщина барьера



# Закон Фика

- Газообмен осуществляется путем простой диффузии по закону Фика:
- диффузия газа прямо пропорциональна градиенту его парциального давления и площади барьера, обратно пропорциональна толщине барьера:

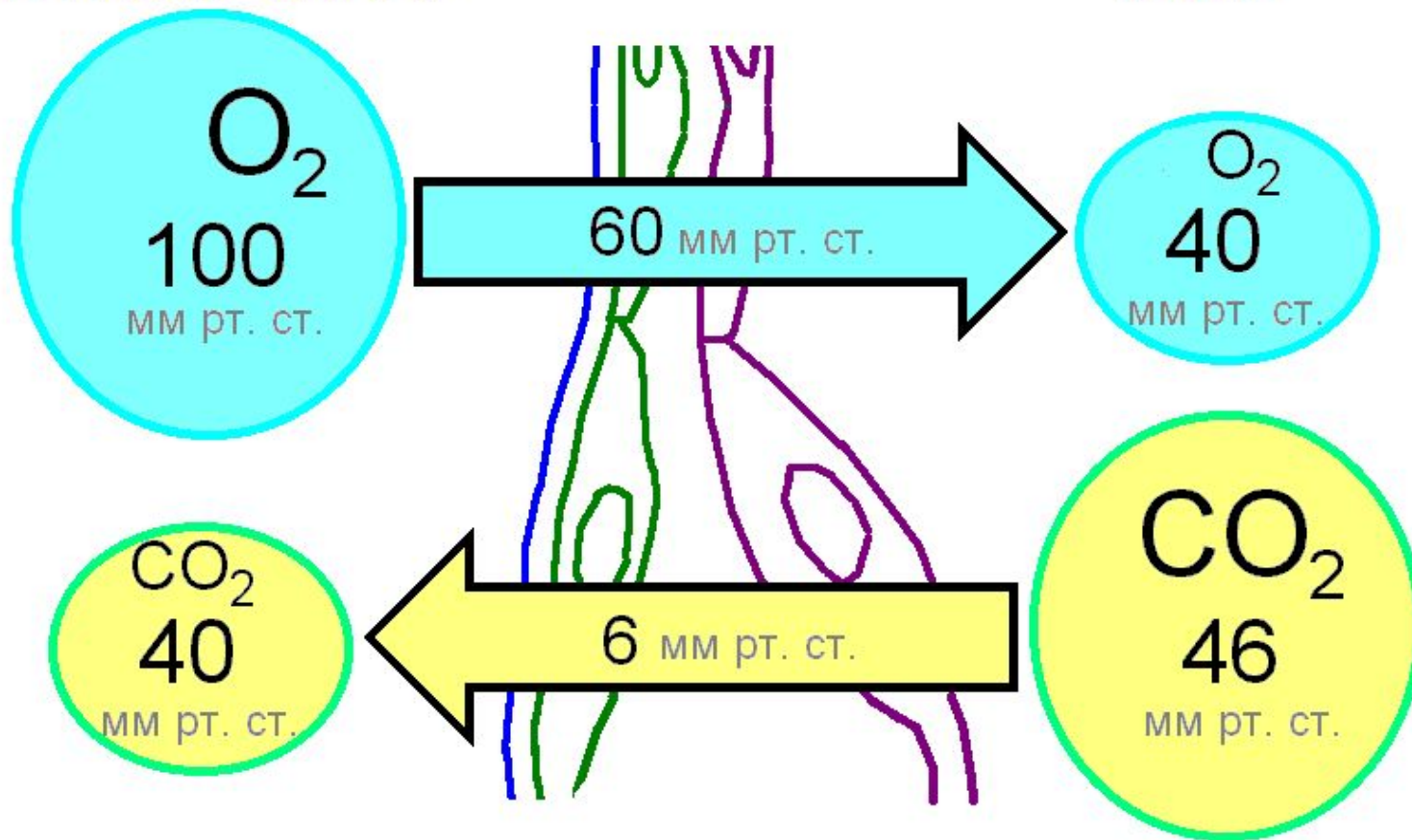
# Градиент давления

газов -  $\Delta P$



АЛЬВЕОЛЯРНЫЙ ГАЗ

КРОВЬ



# **$D$** — константа диффузии



Зависит от

- природы (свойств) газа
- свойств барьера в данный момент

# Зависимость константы диффузии $D$ от свойств газа



$$D \sim \frac{\alpha}{\sqrt{MM}}$$

$D$  прямо пропорциональна  
растворимости газа ( $\alpha$ )  
и обратно пропорциональна  
квадратному корню из молекулярной  
массы ( $MM$ ) газа

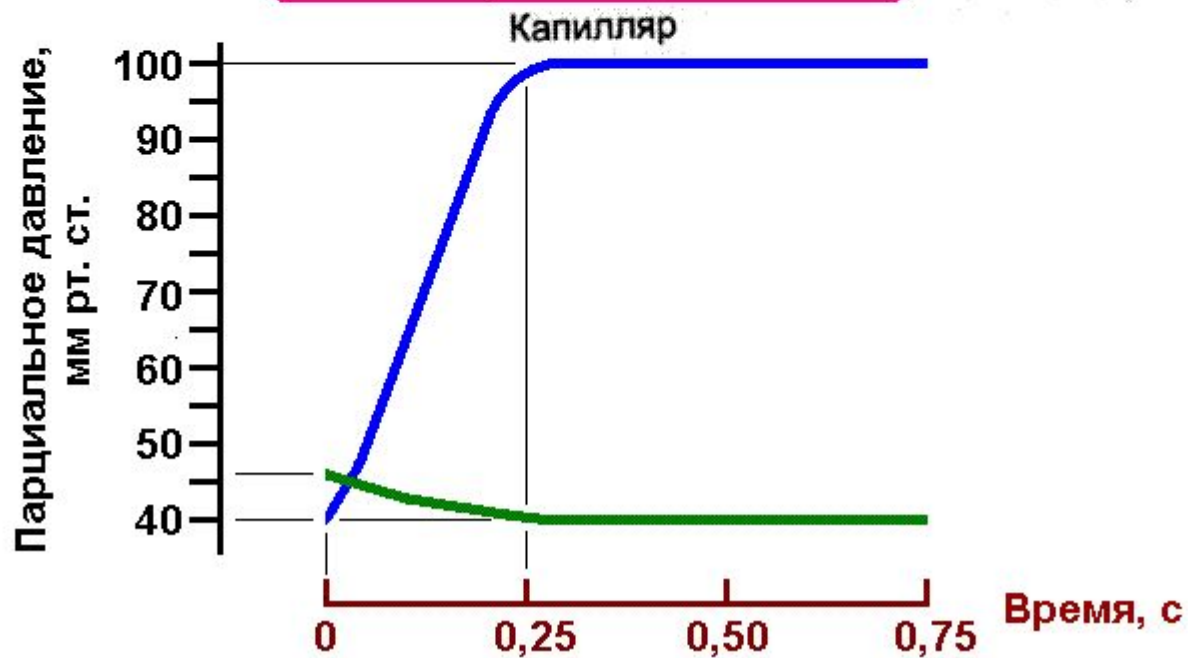
Зависимость константы диффузии  $D$  от  
свойств газа



- Растворимость  $CO_2$  значительно **выше** чем у  $O_2$
- Молекулярные массы  $CO_2$  и  $O_2$  различаются незначительно
- Поэтому  $CO_2$  диффундирует примерно в **20 раз быстрее**, чем  $O_2$

# Вопрос 4





## *Диффузия дыхательных газов по ходу лёгочного капилляра*



- Эритроцит проходит капилляр лёгких в среднем за 0,75 с.



# Изменение $pO_2$ по ходу капилляра



- В начале капилляра  $pO_2$  в эритроците уже составляет примерно 40 % от  $pO_2$  в альвеолярном газе.
- В условиях покоя  $pO_2$  в капиллярной крови становится практически таким же, как в альвеолярном газе, когда эритроцит проходит треть капилляра

# Изменение $p\text{CO}_2$ по ходу капилляра

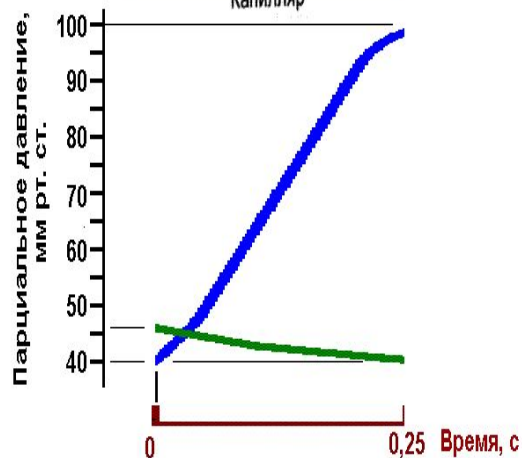
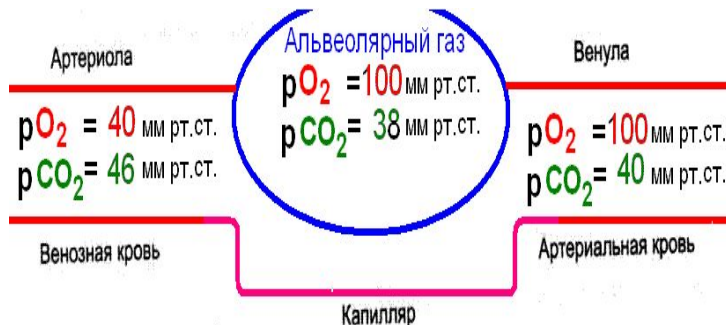


- В начале капилляра  $p\text{CO}_2$  в крови составляет примерно 46 мм рт. ст., а в альвеолярном газе 40 мм рт. ст.
- В условиях покоя  $p\text{O}_2$  в капиллярной крови становится практически таким же, как в альвеолярном газе, когда эритроцит проходит треть капилляра



# При физической нагрузке

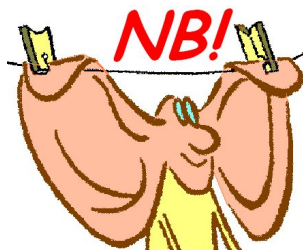
- Время прохождения эритроцита через капилляр может уменьшится в 3 раза.
- У здоровых людей  $pO_2$  практически не снижается



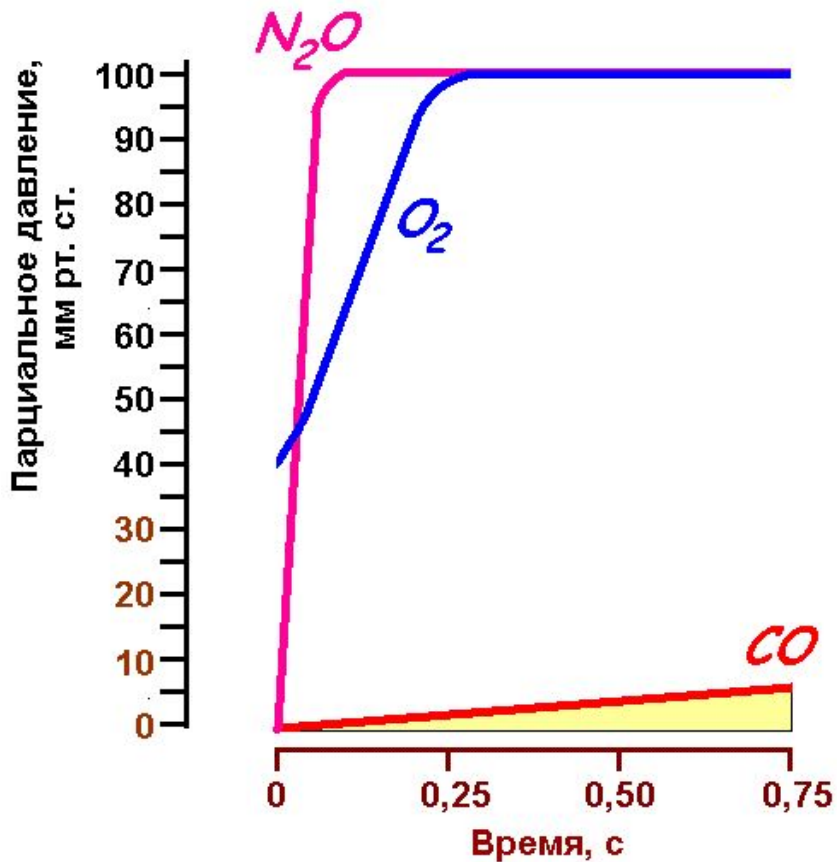
## *Диффузия дыхательных газов по ходу лёгочного капилляра*

- Таким образом диффузия  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  через аэрогематический барьер имеет достаточный запас времени.

# Вопрос 5

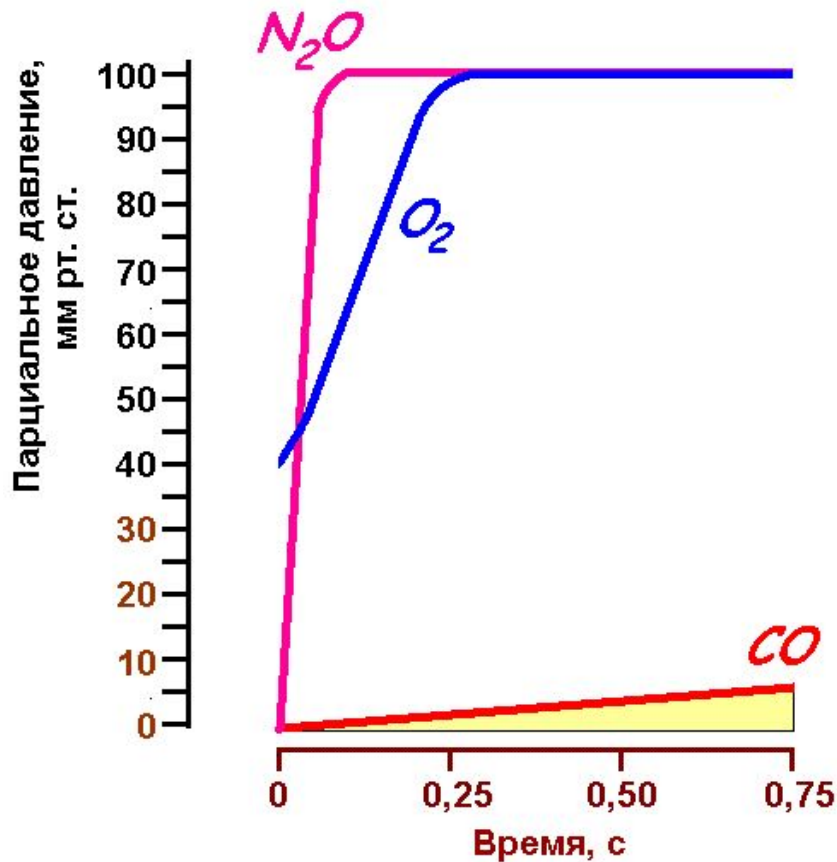


# Диффузия *CO* - ограничена диффузией



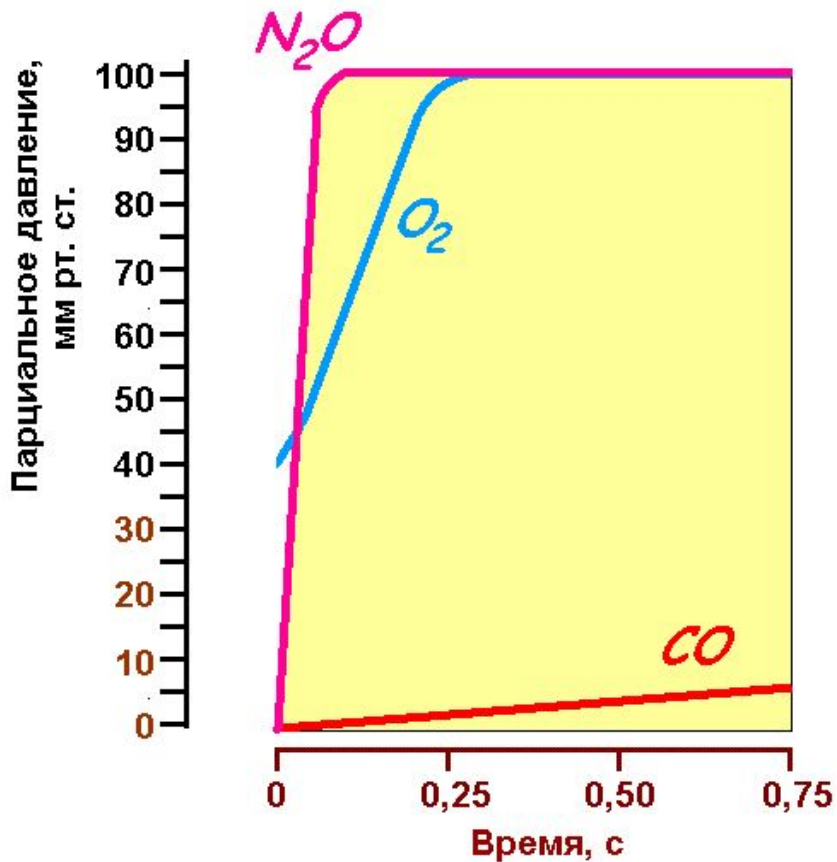
- *CO* способен очень прочно и в большом количестве связываться с гемоглобином практически без повышения его парциального давления в крови

# Транспорт $CO$ - ограничен диффузией



- $CO$  по мере продвижения эритроцита по капилляру  $p_{CO}$  возрастает мало и
- препятствий для дальнейшего перехода  $CO$  в кровь не возникает

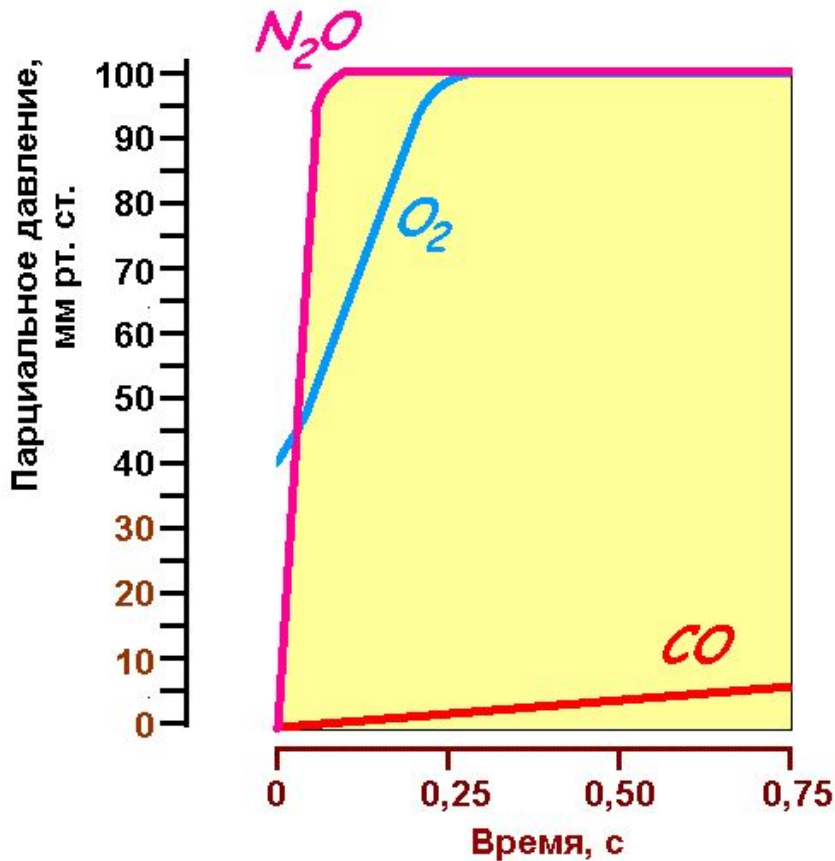
# Транспорт $N_2O$ - ограничен перфузией



- $N_2O$  не связывается с гемоглобином
- $p_{N_2O}$  в в крови быстро возрастает

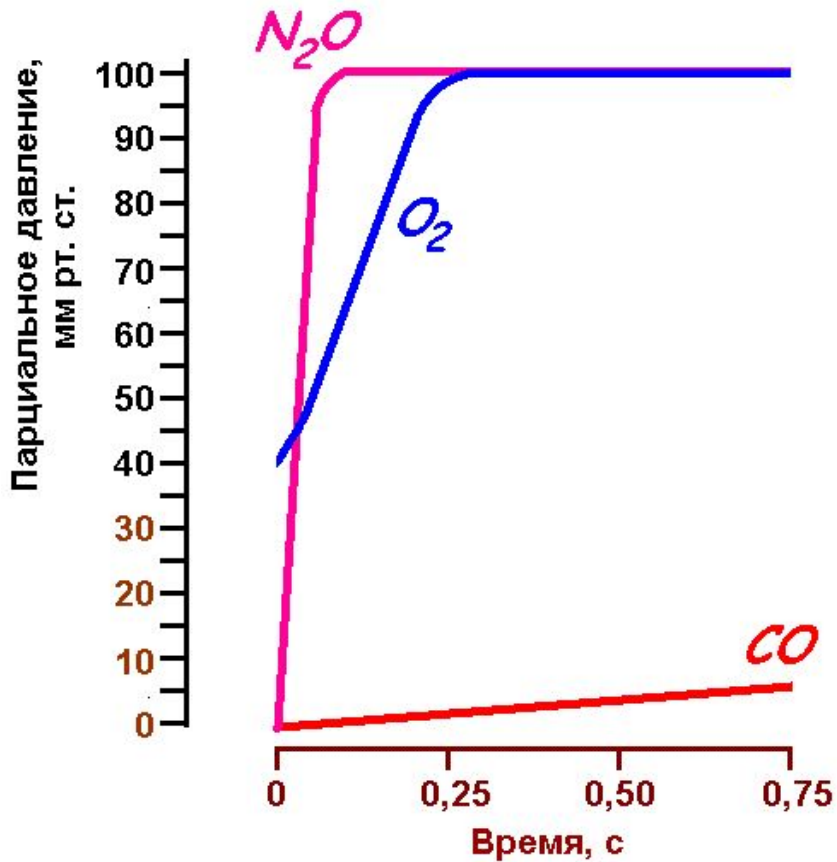


# Диффузия $N_2O$ - ограничена перфузией



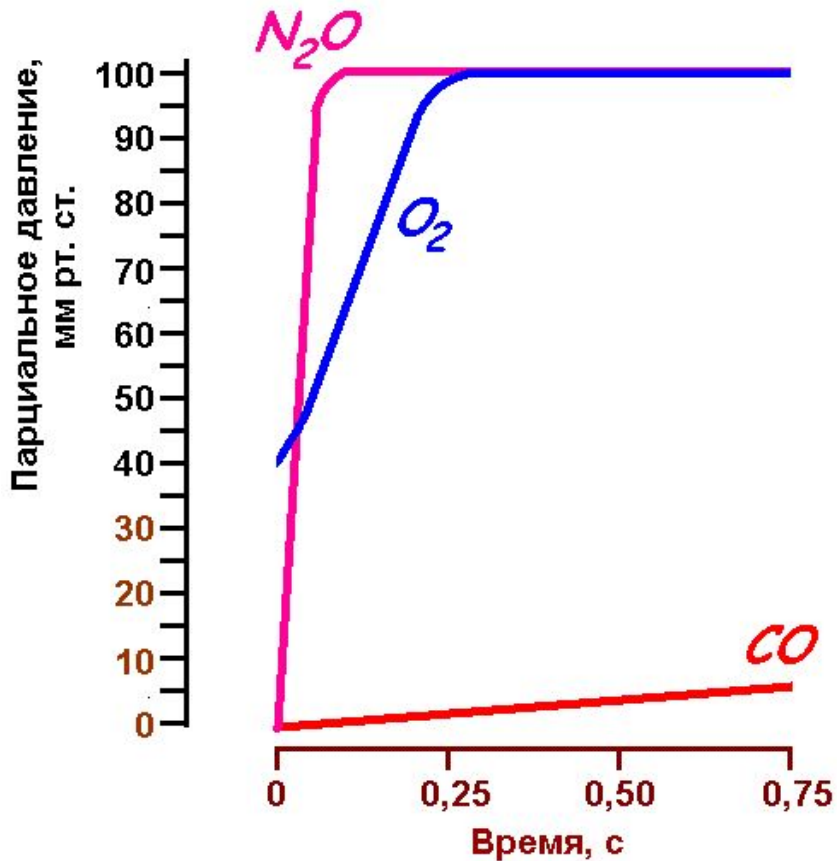
- при прохождении эритроцитом лишь 1/10 общей длины капилляра  $pN_2O$  достигает уровня альвеолярного газа.
- После этого переход  $N_2O$  в кровь прекращается

# Диффузия $O_2$



- Кривая переноса занимает промежуточное положение между кривыми  $CO$  и  $N_2O$ .

# Диффузия $O_2$



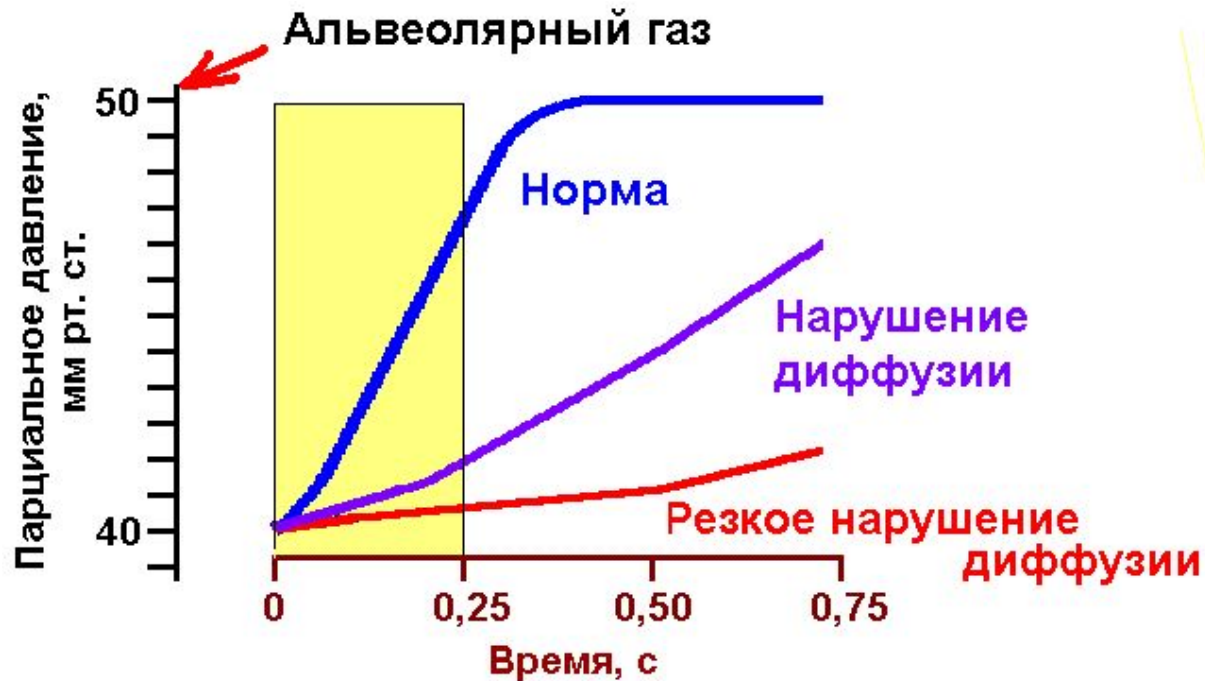
- В условиях покоя перенос  $O_2$  через АГБ ограничен перфузией.

# Диффузия $O_2$ по ходу лёгочного капилляра при нарушении диффузии



- Ограничивается отчасти

# Диффузия $O_2$ по ходу лёгочного капилляра при понижении $pCO$ в альвеолярном газе

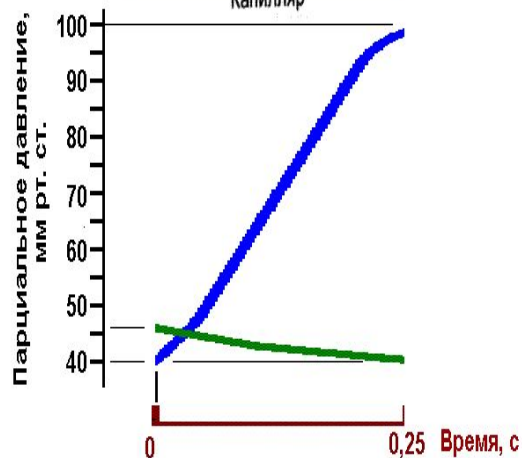
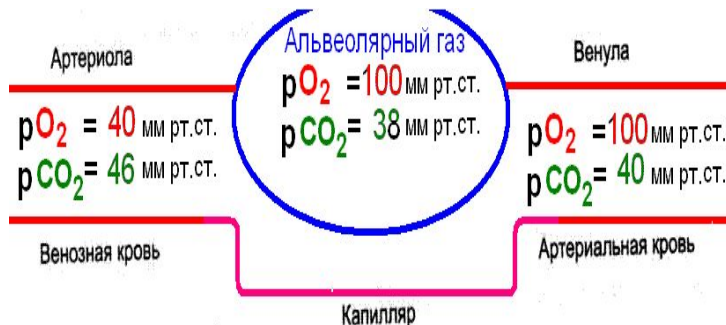


- Ограничивается отчасти диффузией

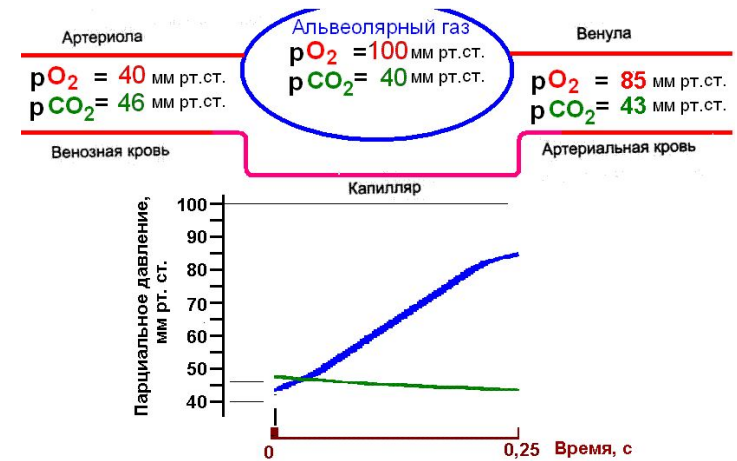
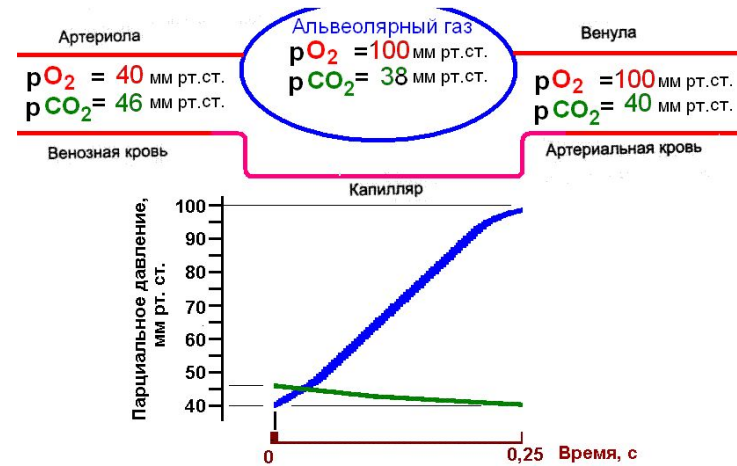


# При физической нагрузке

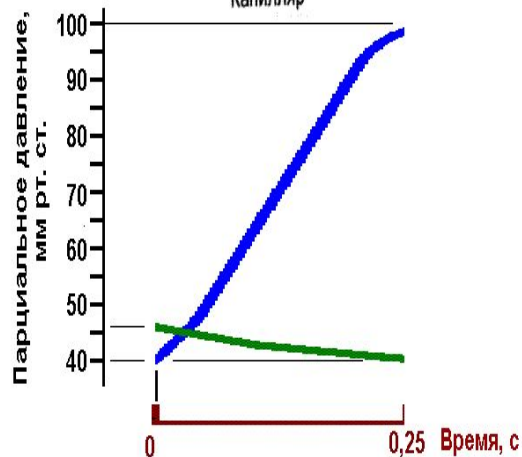
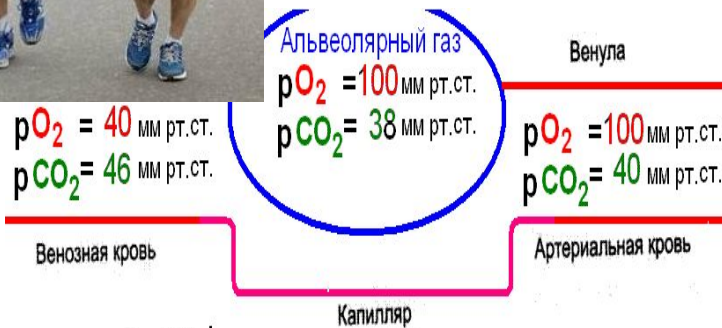
- Время прохождения эритроцита через капилляр может уменьшится в 3 раза.
- У здоровых людей  $pO_2$  практически не снижается



# При физической нагрузке



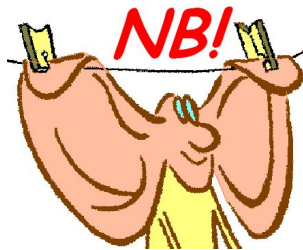
# При физической нагрузке



- Время прохождения эритроцита через капилляр может уменьшится в 3 раза.
- У здоровых людей  $p_{O_2}$  практически не снижается



# Вопрос 6



Подробнее Учебник, С.359

# Вернемся к закону Фика

$$V_g = - D \cdot \frac{S}{d} \cdot \Delta P$$

где

**$V_g$**  — скорость диффузии (скорость переноса газа);

**$D$**  — константа диффузии;

**$S$**  — площадь барьера;

**$\Delta P$**  — разность парциальных давлений газа по обе стороны барьера;

**$d$**  — толщина барьера

- Сложное строение АГБ не позволяет прижизненно определять

***S*** — площадь барьера;

***d*** — толщину барьера

# Рассмотрим изменённое уравнение Фика

$$Vg = D_L \cdot \Delta P$$

где

$$D_L = -D \cdot \frac{S}{d}$$

Показатель  $D_L$  назван  
показателем диффузионной  
способности лёгких

- Учитывает площадь, толщину и константу диффузии данного газа в данной ткани в определённых условиях

# Рассмотрим изменённое уравнение Фика

$$D_L = \frac{Vg}{\Delta P}$$

где

$D_L$  — диффузионной способности

$Vg$  — скорость диффузии  
(скорость переноса газа);

$\Delta P$  — разность парциальных давлений газа по обе стороны барьера;

# Определение $D_L$ для $CO$

- $D_L$  обычно определяется для  $CO$ , потому что его транспорт через АГБ ограничен только диффузией, но не перфузией
- Поскольку  $p_{CO}$  в крови мало вместо  $\Delta P$  используется  $p_{CO}$  в альвеолярном газе.

# $D_L$ для CO

- Составляет около

**25** мл·мин<sup>-1</sup>·мм рт. ст.<sup>-1</sup>



- В норме диффузия газов в ацинусах осуществляется уже в первой трети легочных капилляров.
- Значение диффузионной способности легких составляет примерно

**25 мл  $O_2$ /(мин · 1 мм рт. ст.)**

**600 мл  $CO_2$ /(мин · 1 мм рт. ст.)**

# Вопрос 7



# Размер тела

- $D_L$  возрастает с увеличением размеров тела: веса, роста и площади диффузионной поверхности

# Возраст

- $D_L$  возрастает по мере взросления и достигает максимума к 20 годам.
- После 20 лет снижается на 2 % ежегодно

# Пол

- Женщины при сравнимых возрасте и размерах тела имеют  $D_L$  10 % ниже, чем у мужчин

# Объём лёгких

- $D_L$  растёт с увеличением объёма лёгких
- Отношение  $D_L$  к объёму лёгких – константа Крога
- Константа Крога нормализует  $D_L$  по отношению к объёму лёгких

# Физическая нагрузка

- $D_L$  увеличивается во время физической нагрузки
- Предполагается или рост площади контакта вследствие расширения капилляров или «рекрутирование капилляров»

# Положение тела

- $D_L$  больше в положении лёжа на спине, чем стоя



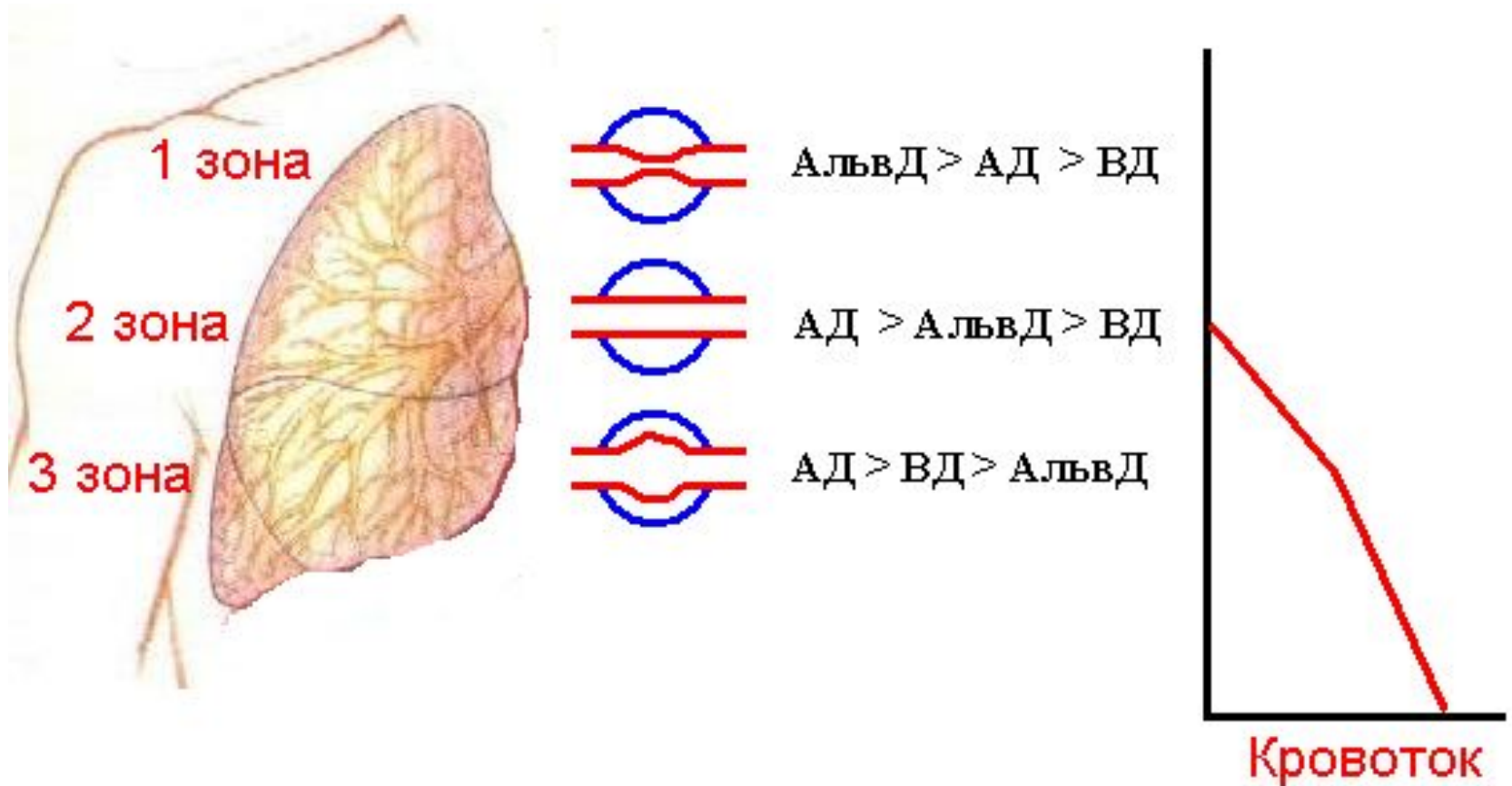
# Вопрос 8

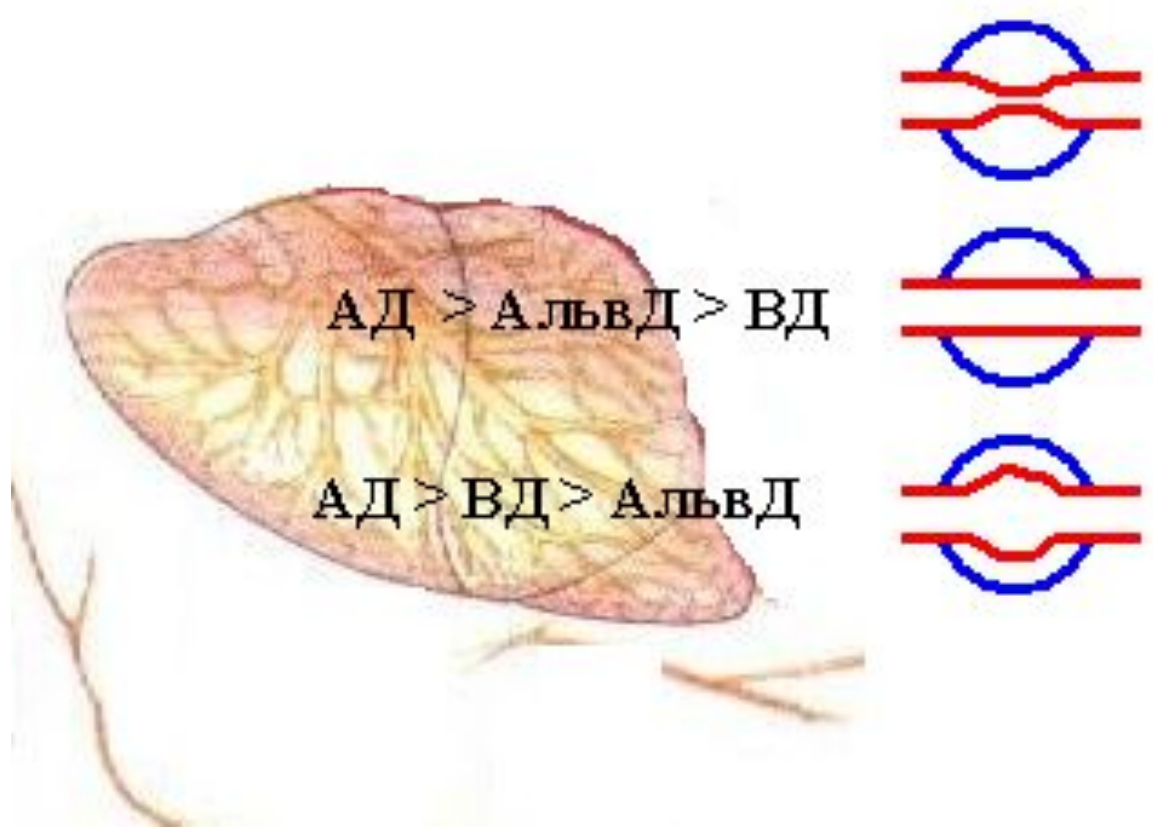


- Легкие являются единственным органом, через который проходит весь МОК.
- Легочные сосуды обладают большой растяжимостью и могут вместить МОК в 5 раз больше, чем в покое.
- В горизонтальном положении объем крови (-600 мл) в сосудах легких больше, чем стоя (это способствует развитию отека легких в патологии). (При активном вдохе кровенаполнение легких увеличивается до 1 000 мл, при активном выдохе снижается до 200 мл.)
- Легочные сосуды являются сосудами малого давления: систолическое АД равно 20 — 25 мм рт. ст., диастолическое — 10 — 15, среднее — 14—18 мм рт. ст.
- Поэтому на кровоток легких в вертикальном положении сильно влияет гидростатическое давление столба крови (в легких нулевое гидростатическое давление крови находится на уровне правого предсердия, т.е. корня легкого; на каждые 1,3 см выше корня легких артериальное и венозное давления снижаются на 1 мм рт. ст., ниже корня легкого повышаются).

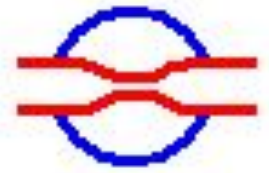
- На кровоток в легких влияет альвеолярное давление (АльвД), которое в зависимости от зоны легкого может быть выше, равно или ниже артериального (АД) и венозного (ВД) давлений.

В зависимости от соотношении АльвД, Рап и ВД легких выделяют в положении стоя три функциональные зоны (сверху вниз).

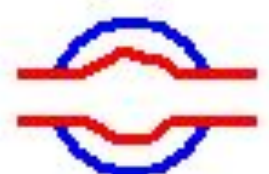




АД > АльВД > ВД



АД > ВД > АльВД



В зависимости от соотношений АльвД, Рап и ВД легких выделяют в положении стоя три функциональные зоны (сверху вниз).

- В 1-й зоне верхушки легких
- АльвД > АД > ВД.
- В результате компрессии сосудов микроциркуляции кровотоков в этой зоне минимален и возникает только во время систолы правого желудочка.

В зависимости от соотношений АльвД, Рар и ВД легких выделяют в положении стоя три функциональные зоны (сверху вниз).

- Во 2-й зоне
- $АД > АльвД > ВД$
- кровоток осуществляется в результате разности между артериальным и альвеолярным давлением и существенно зависит от последнего.

В зависимости от соотношений АльвД, Рар и ВД легких выделяют в положении стоя три функциональные зоны (сверху вниз).

- В 3-й зоне
- $A_D > V_D > A_{лвД}$ ,
- кровоток осуществляется в результате разницы между артериальным и венозным давлением и существенно не зависит от альвеолярного

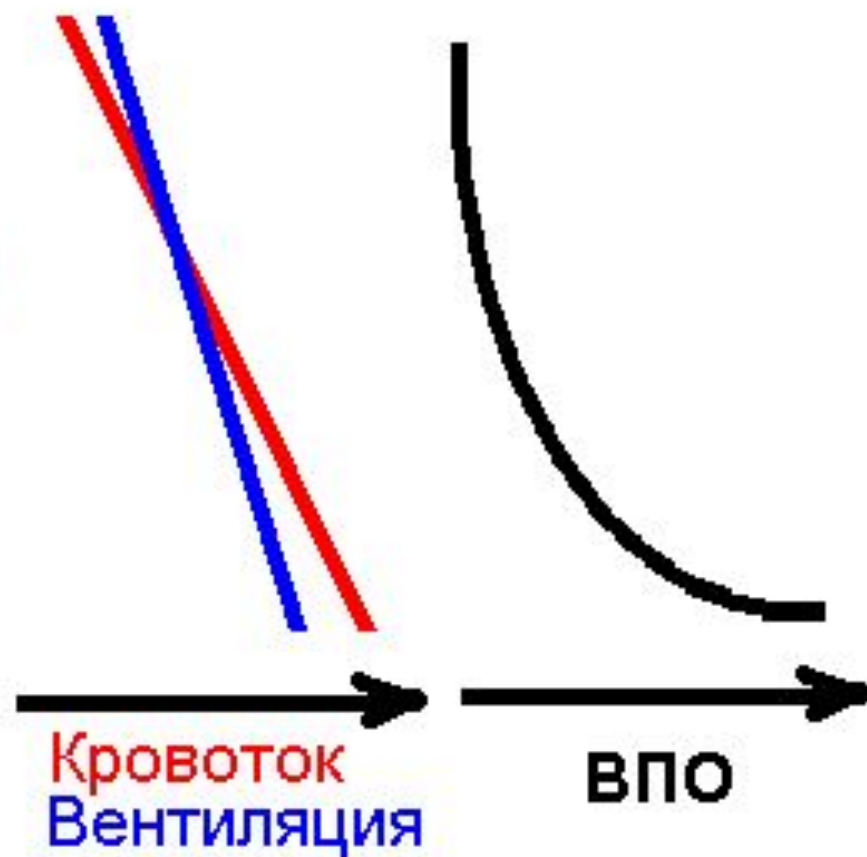


# Вопрос 8



# Вентиляционно - перфузионные отношения

- Для идеального обмена  $O_2$  и  $CO_2$  необходимо, чтобы соотношение между вентиляцией и кровотоком в легких было равно единице.

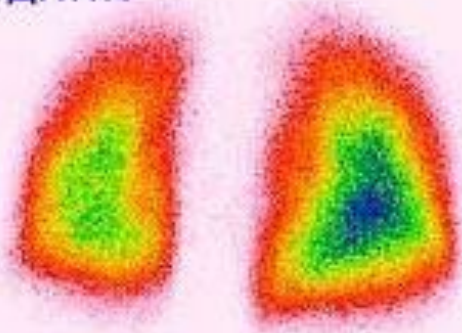


# Перфузионно-вентиляционные отношения

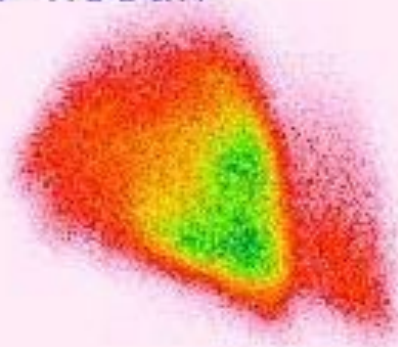
Однако в норме имеется неодинаковое отношение вентиляции и кровотока (В/К) в разных отделах легких в вертикальном положении:

- в верхних отделах вентиляция превышает кровоток ( $V/K \approx 3$ );
- в средних отделах они примерно равны ( $V/K \approx 0,9$ );
- в нижних отделах кровоток превышает вентиляцию ( $V/K \approx 0,7$ ).

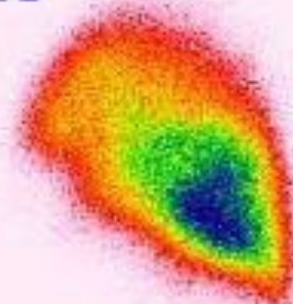
Задняя



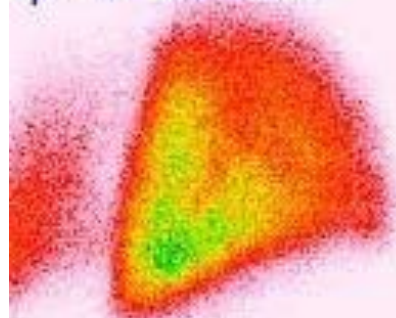
Л 3 Косая



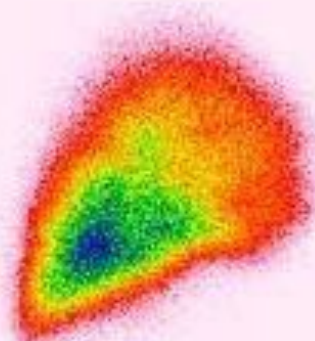
Л Боков



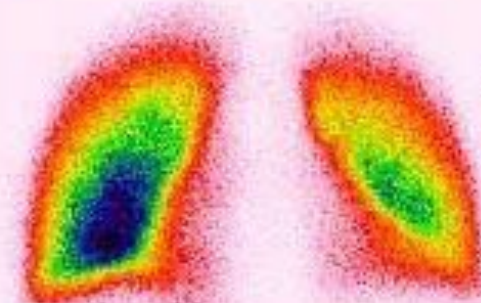
Пр 3 Косая



Пр Боков

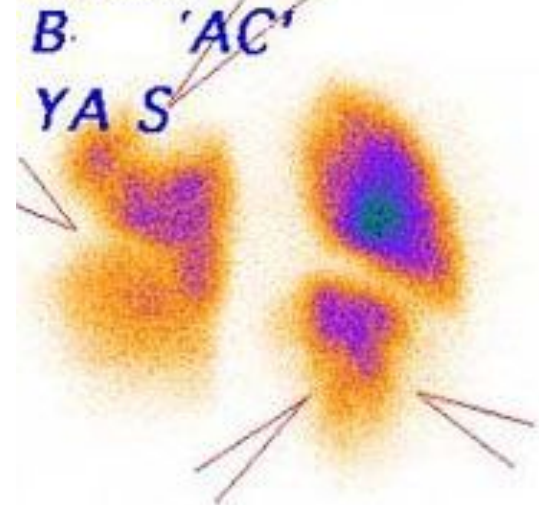


Передняя

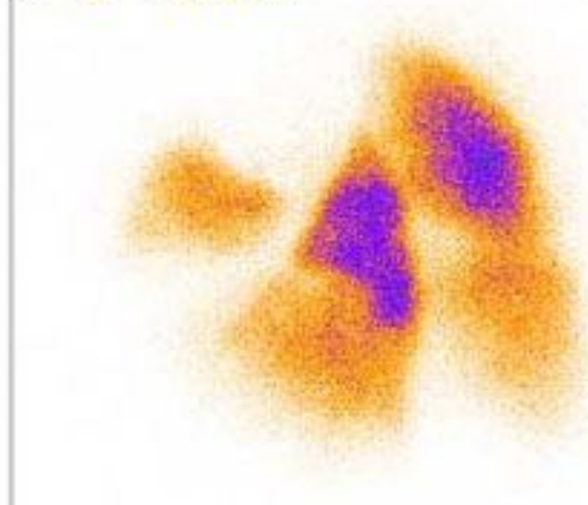


©НИИПК

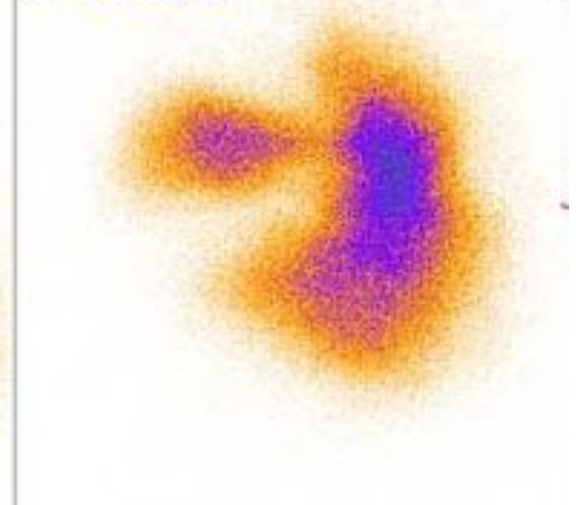
Задняя



Л 3 Косая



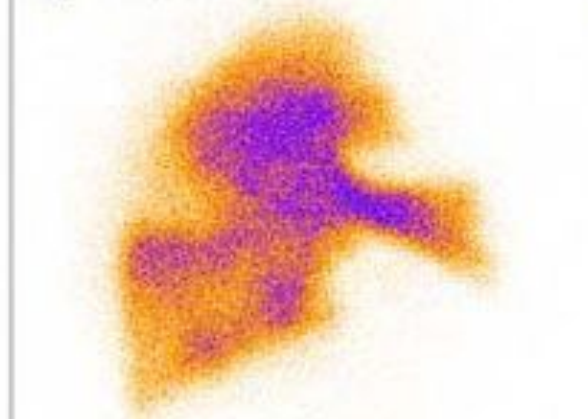
Л Боков



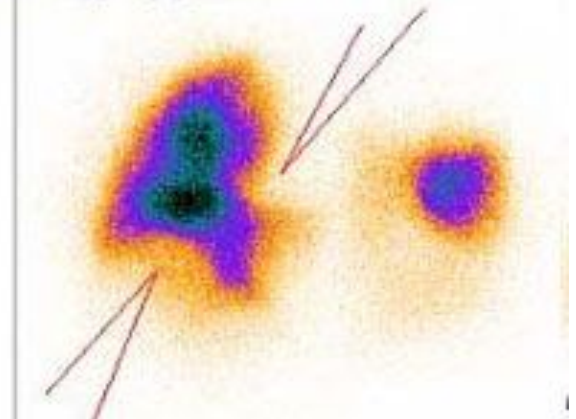
Пр 3 Косая



Пр Боков



Передняя



# Вопрос 9



# Кислородная ёмкость крови

- 1 г гемоглобина способен максимально связывать 1,34 мл  $O_2$
- Учитывая, что нормальное содержание гемоглобина составляет 15 г/100 мл, можно рассчитать, что в 100 мл крови максимально может содержаться 20,1 мл  $O_2$ , связанного с гемоглобином.
- Данная величина называется кислородной емкостью крови (КЕК):

$$\text{КЕК} = [\text{Hb}] \times 1,34 \text{ мл } O_2/\text{гHb}/100 \text{ мл крови.}$$



# Кислородная ёмкость крови

- Наиболее важным параметром, определяющим количество кислорода, связанного с гемоглобином, является насыщение гемоглобина кислородом — сатурация (**SaO<sub>2</sub>**), который рассчитывают по формуле:

$$SaO_2 = \frac{O_2, \text{ связанный с Hb}}{КЕК} \times 100 \%$$

# Кислородная ёмкость крови

- При  $P_{aO_2}$   $SaO_2$ , равном 100 мм рт.ст., насыщение гемоглобина кислородом артериальной крови составляет около 97 %.
- В венозной крови ( $P_{O_2} = 40$  мм рт.ст.)  $SaO_2$  приблизительно равна 75 %.

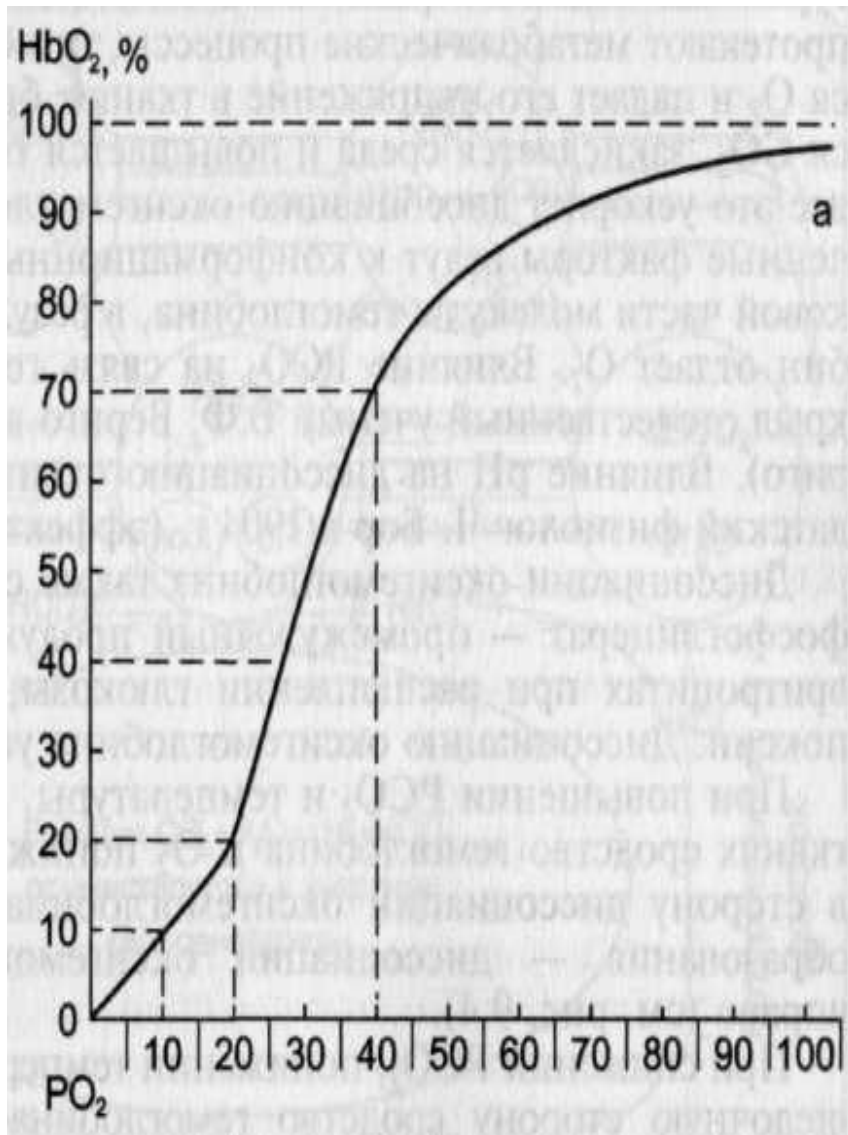
- **сатурация** ([лат.](#)) - насыщение;
- в медицине - насыщение жидкостей и тканей организма тем или иным газом (иногда насыщение создается искусственно - ИВЛ, оксигенация крови и т.д.)

# Вопрос **10**



Подробнее Учебник С. 361-363

# Кривая диссоциации оксигемоглобина



На кривой имеется 4

характерных отрезка

1 — от 0 до 10 мм рт. ст.

2 — от 10 до 40 мм рт. ст.

3 — от 40 до 60 мм рт. ст.

4 — свыше 60 мм рт. ст.

- 1 — при напряжении  $O_2$  в крови от 0 до 10 мм рт. ст. в крови находится восстановленный гемоглобин, оксигенация крови идет медленно;
- 2 — от 10 до 40 мм рт. ст. — насыщение гемоглобина кислородом идет очень быстро и достигает 75 %;
- 3 — от 40 до 60 мм рт. ст. — насыщение гемоглобина кислородом замедляется, но достигает 90 %
- 4 — при возрастании  $PO_2$  свыше 60 мм рт. ст. дальнейшее насыщение гемоглобина идет очень медленно и постепенно приближается к 96—98 %, никогда не достигая 100 %. Однако такое высокое насыщение гемоглобина кислородом наблюдается только у молодых людей. У пожилых людей эти показатели ниже.

# Вопрос **11**



# **Методы исследования газового состава крови**

- *Полярографические методики*
- *Оксигемометрия и  
оксигемография*



# Полярографические методики

- В камере, куда в микродозах помещают исследуемую кровь, находятся электроды, имеющие избирательную чувствительность к  $H^+$  (электрод рН),  $O_2$  (электрод  $PO_2$ ) и  $CO_2$  (электрод  $PCO_2$ )
- Поляризационные напряжения, которые возникают на электродах, пропорциональны значениям концентрации исследуемых веществ.
- На цифровом индикаторе непосредственно отсчитывается значения рН в единицах, а значения напряжений газов — в миллиметрах ртутного столба.

# Оксигемометрия и оксигемография

- позволяют оценить кислородтранспортную функцию крови.
- Основаны на том, что в красной части спектра коэффициент поглощения света для восстановленного гемоглобина в несколько раз больше, чем для оксигемоглобина.
- При этом значение насыщения гемоглобина кислородом получают в процентах.
- Для того чтобы вычислить содержание  $O_2$  в пробе крови, нужно знать количество в ней гемоглобина.
- Используя кислородную емкость 1 г гемоглобина (1,34 мл  $O_2$ ), можно вычислить содержание  $O_2$  в крови.

# Оксигемометрия и оксигемография

- Комбинированные оксигемометры кроме кюветного определения оксигемоглобина в пробах крови снабжены ушным датчиком для проведения непрерывной бескровной оксигемометрии.
- При этом прибор регистрирует относительное значение насыщения гемоглобина крови кислородом по отношению к исходной величине
- В некоторых оксигемометрах вносится поправка на значение оптической плотности ткани без крови и регистрируют абсолютные величины оксигемоглобина циркулирующей крови.
- Оксигемометры, снабженные самописцем, позволяют проводить оксигемографию — записывать динамику изменения оксигемоглобина в крови.

# Вопрос **12**



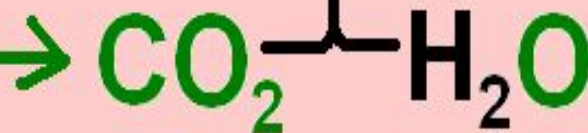
ТКАНИ

ПЛАЗМА

ЭРИТРОЦИТ



←КА



# ***Диффузионные градиенты***

- $P_{O_2}$  притекающей к тканям крови -95 мм рт. ст.;
- в межклеточной жидкости -45,
- на поверхности клеток -20;
- в митохондриях -1 мм рт. ст.
- Эти градиенты обеспечивают поступление кислорода из крови в клетки тканей.
- $P_{CO_2}$  в притекающей к тканям крови -40 мм рт. ст., в клетках - 60 мм рт. ст., что обеспечивает поступление  $CO_2$  из клеток тканей в кровь.

# ***Диффузионные градиенты***

- $P_{CO_2}$  в притекающей к тканям крови -40 мм рт. ст.,
- в клетках - 60 мм рт. ст., что обеспечивает поступление  $CO_2$  из клеток тканей в кровь.

# ***Количественная характеристика обмена $O_2$ между кровью и тканями***

- Количественно обмен между кровью и тканями характеризует артериовенозная разница по  $O_2$ , равная 50 мл  $O_2$ /л крови,
- и коэффициент использования  $O_2$ , характеризующий долю  $O_2$  поступившего из крови в клетки ткани



# *Значения коэффициентов утилизации кислорода*

- Каждые 100 мл артериальной крови, содержащие 18—20 мл  $O_2$ , отдают тканям в среднем около 4,5 мл  $O_2$ , т.е. 20—30 %.
- В миокарде, сером веществе мозга и печени коэффициент утилизации достигает 50—60 %.

# ***Основной механизм регуляции*** **газообмен между кровью и тканями**

- сдвиги кривой диссоциации оксигемоглобина,
- изменение объемного кровотока в тканях и органах.

# Вопрос **13**



# Потребление $O_2$

- Показателем тканевого дыхания в организме является потребление  $O_2$  ( $PO_2$ ), л/мин:

$$PO_2 = \text{Артериовенозная разница } O_2 \cdot \text{МОК.}$$

- Это наиболее адекватный показатель значения физической нагрузки.
- В целом организме минимальное  $PO_2$  равно

# *Потребление $O_2$*

В целом организме

- Минимальное **ПО<sub>2</sub>** равно 0,2 л/мин
- В покое – 0,3 л/мин
- Максимальное – 3,0 л/мин

# Основные пути потребления

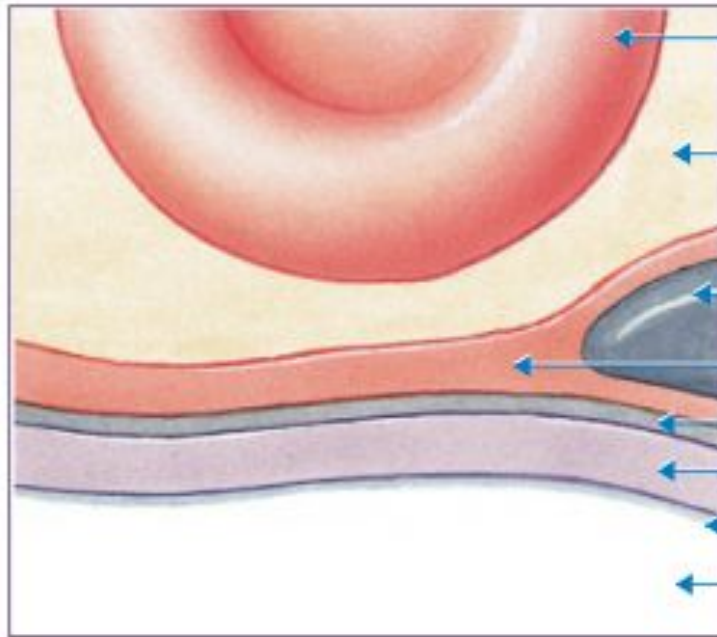


- **Митохондриальный путь** (40 — 85%);
- **Микросомальный путь** в гладкой ЭПС (10 — 40 %)
- **Образование активных продуктов неполного восстановления  $O_2$**  (5—15 %) (в нейтрофилах — до 90 %)
- **Миоглобин** (много в красных мышцах и миокарде).

# Основные пути потребления



- *Митохондриальный путь* (40 — 85% всего  $O_2$ ); восстановление четырех электронов  $O_2$  до воды под действием цитохрооксидазы, основная функция — аккумуляция энергии в виде АТФ.
- *Микросомальный путь* в гладкой ЭПС (10 — 40 % всего потребляемого  $O_2$ ); монооксигеназная реакция (с участием цитохрома P450) внедряет атом кислорода в молекулу окисляемого вещества, что приводит к образованию полярных (т. е. водорастворимых) веществ. Основные функции этого пути — синтез и инактивация стероидных гормонов, детоксикация ксенобиотиков, в том числе лекарств.
- *Образование активных продуктов неполного восстановления  $O_2$*  (супероксидный анион, перекись водорода, гидроксильный радикал, пероксид водорода, синглетный кислород) — 5—15 % (в нейтрофилах — до 90 %) всего потребляемого  $O_2$ . Функциональная роль: фагоцитарная активность лейкоцитов, вазомоторное действие, лизис клеточных мембран (например, при овуляции) и др.
- *Миоглобин* (много в красных мышцах и миокарде). Депонирует и транспортирует  $O_2$  в клетке. Обладает высоким сродством к  $O_2$  ( $P_{50} = 8$  мм рт. ст.) и отдает его только при низком  $P_{O_2}$  в клетке (меньше 10 мм рт. ст., например при сокращении мышц).



Эритроцит

Плазма крови

Ядро клетки эндотелия

Эндотелий капилляра

Интерстициальное пространство

Альвеолярный эпителий

Альвеолярная жидкость

Альвеолярная смесь газов