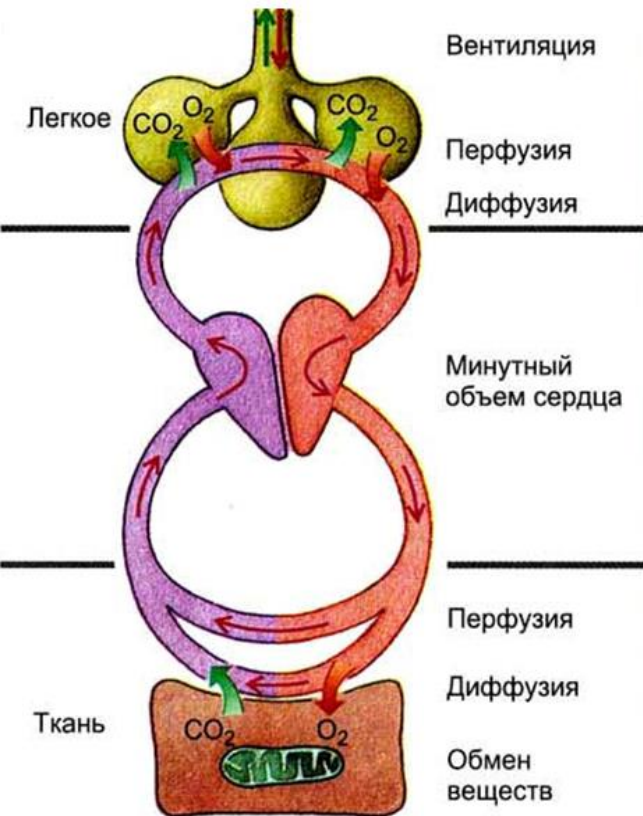


Учреждение образования
«Гомельский государственный
медицинский университет»
Кафедра нормальной и
патологической физиологии

ФИЗИОЛОГИЯ ДЫХАНИЯ

Газообмен в легких Транспорт газов кровью



Лекция № 2 для студентов 2 курса

Старший преподаватель Шилович Л.Л.

План лекции

- 1. Законы *диффузии* газов. Факторы влияющие, на процесс диффузии. Вентиляционно-перфузионный коэффициент.
- 2. Транспорт газов кровью O_2 и CO_2 .
Кривая диссоциации оксигемоглобина.
- 3. ГАЗООБМЕН МЕЖДУ КРОВЬЮ И ТКАНЯМИ



Обмен газов в легких происходит по *физическим законам диффузии*. Объем диффузии O_2 составляет около **500 л/сут**, CO_2 – **430 л/сут**.

- M/t – *объемная скорость диффузии*,
- M – количество газа; t – время *диффузии*
- ΔP – *парциального давления*.
- X – расстояние между двумя точками *диффузии*, (т.е. толщина аэрогематического барьера либо гистогематического барьеров;
- S – площадь газообмена;
- K – коэффициент диффузии Круга;
- α – коэффициент растворимости газа.

ЗАКОН ФИКА

$$\frac{M}{t} = \frac{\Delta P}{X / S \cdot k \cdot \alpha}$$

Парциальным давлением (ПД) называется то давление, которое оказывал бы данный газ, если бы он один занимал весь объем смеси газов.

Закон **Дальтона**

$P(\text{смеси})$ мм рт. ст. \times $C \%$

$$P \text{ газа} = \frac{\text{-----}}{100\%}$$

Для воздуха: $P_{\text{атм}} = 760$ мм Hg;



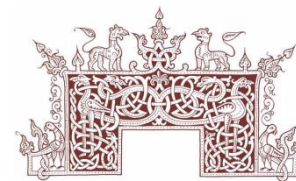
Процентный состав (С%) основных газов вдыхаемого и выдыхаемого воздуха (%).

ВОЗДУХ : **O₂** **CO₂** **NO₂**

Атмосферный **21,0** **0,02-0,03** **79,14**

Альвеолярный **14,0** **5,5** **80,7**

Выдыхаемый **16,0** **4,5** **79,5**



Парциальное давление газов в атмосферном воздухе:

Атмосферное давление = 760 мм рт.ст. (101 кПа)

Закон Дальтона:

$P(\text{смеси}) \text{ мм рт. ст.} \times C \%$

$P \text{ газа} = \frac{\text{-----}}{100\%}$

**Парциальное
давление**

Кислород **21 %**

$$P_{O_2} = 760 \times 20.9/100\% = 159 \text{ мм рт.ст.}$$

CO₂ **0.03 %**

$$P_{CO_2} = 760 \times 0.03/100 \% = 0.2 \text{ мм рт.ст.}$$

По закону Дальтона –
Парциальное давление каждого газа в смеси пропорционально его процентному содержанию газа в смеси т.е его доле от общего объема.

Расчет парциального давления в альвеолярном воздухе

$$pO_2 = \frac{(760 \text{ мм. рт. ст.} - 47 \text{ мм.рт.ст.}) \times 14\%}{100} = \underline{100 \text{ мм рт.ст.}}$$

$$pCO_2 = \frac{(760 \text{ мм. рт. ст.} - 47 \text{ мм.рт.ст.}) \times 5,5\%}{100} = \underline{40 \text{ мм рт. ст.}}$$

ПД водяных паров в альвеоле
является постоянной величиной **равной 47 мм рт. ст.**

Исходя из уравнения Фика, скорость диффузии прямо пропорциональна величине разности давлений (ΔP) – силе, обеспечивающей направленное движение молекул газа, и обратно пропорциональна $x/SK\alpha$ – величине сопротивления диффузии.

Разность давления здесь рассматривается между газовой средой (альвеолы) и жидкой (крови). Давление газа в жидкости характеризует величина – напряжение газа.

Напряжением газа в жидкости называется сила, с которой молекулы газа стремятся выйти в газовую среду.

Напряжение является количественным показателем газа, растворённого в жидкости

Растворимость для CO_2 значительно больше, чем для O_2 . И характеризуется α – **коэф.растворимости** (коэффициент Бунзена) – количество газа, способное раствориться в 1 мл жидкости при давлении газа над жидкостью 760 мм рт. ст. при $t = 0^\circ C$.
зависит от:

- 1) *природы газа;*
- 2) *состава жидкости;*
- 3) *объема и давления газа над жидкостью*
- 4) *температуры жидкости*

При атмосферном давлении 760 мм Hg и температуре $38^\circ C$ в крови растворяется O_2 - **0,3 %**,
 CO_2 - **3,0%**

Парциальное давление и напряжение O₂ и CO₂

Содержание	pO ₂	pCO ₂
<i>Альвеолярный воздух</i>	100 мм.рт.ст.	40 мм.рт.ст
<u><i>Венозная кровь</i></u>	<u>40 мм.рт.ст</u>	<u>46 мм.рт.ст</u>
<i>Артериальная кровь</i>	96 мм.рт.ст	39 мм.рт.ст

Газообмен в легких и тканях

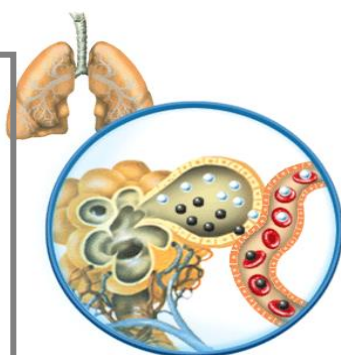
Вдыхаемый воздух:

$pO_2 = 160$ мм

рт.ст. (21%)

$pCO_2 = 0.2$ мм

рт.ст. (0.03%)



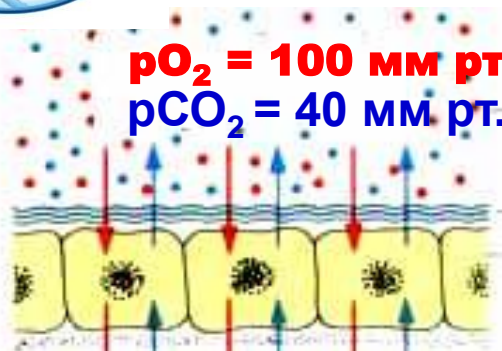
Выдыхаемый воздух:

$pO_2 = 120$ мм рт.ст. (16%)

$pCO_2 = 27$ мм рт.ст. (4.5%)

$pO_2 = 100$ мм рт.ст.
 $pCO_2 = 40$ мм рт.ст.

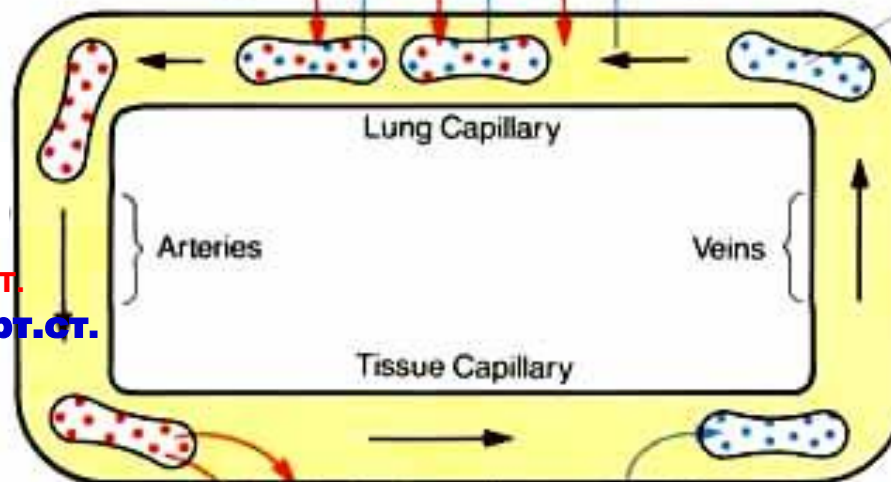
Полость
альвеолы



Артериальная
кровь

$pO_2 = 96$ мм рт.ст.

$pCO_2 = 39$ мм рт.ст.



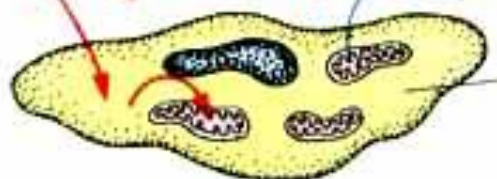
Эритроцит

Венозная
кровь

$pO_2 = 40$ мм рт.ст.
 $pCO_2 = 46$ мм рт.ст.

$P_{O_2} 0-40$ mm Hg

$P_{CO_2} 60$ mm Hg



Клетки
тела

Остальные факторы диффузии по формуле Фика

Проницаемость легочной мембраны для газа характеризуется ***K* -коэффициентом диффузии Крота** - определяет количество газа (в мл), которое способно диффундировать на расстояние 1 см через 1см² поверхности при разнице давления в 1мм рт. ст. при определенной температуре.

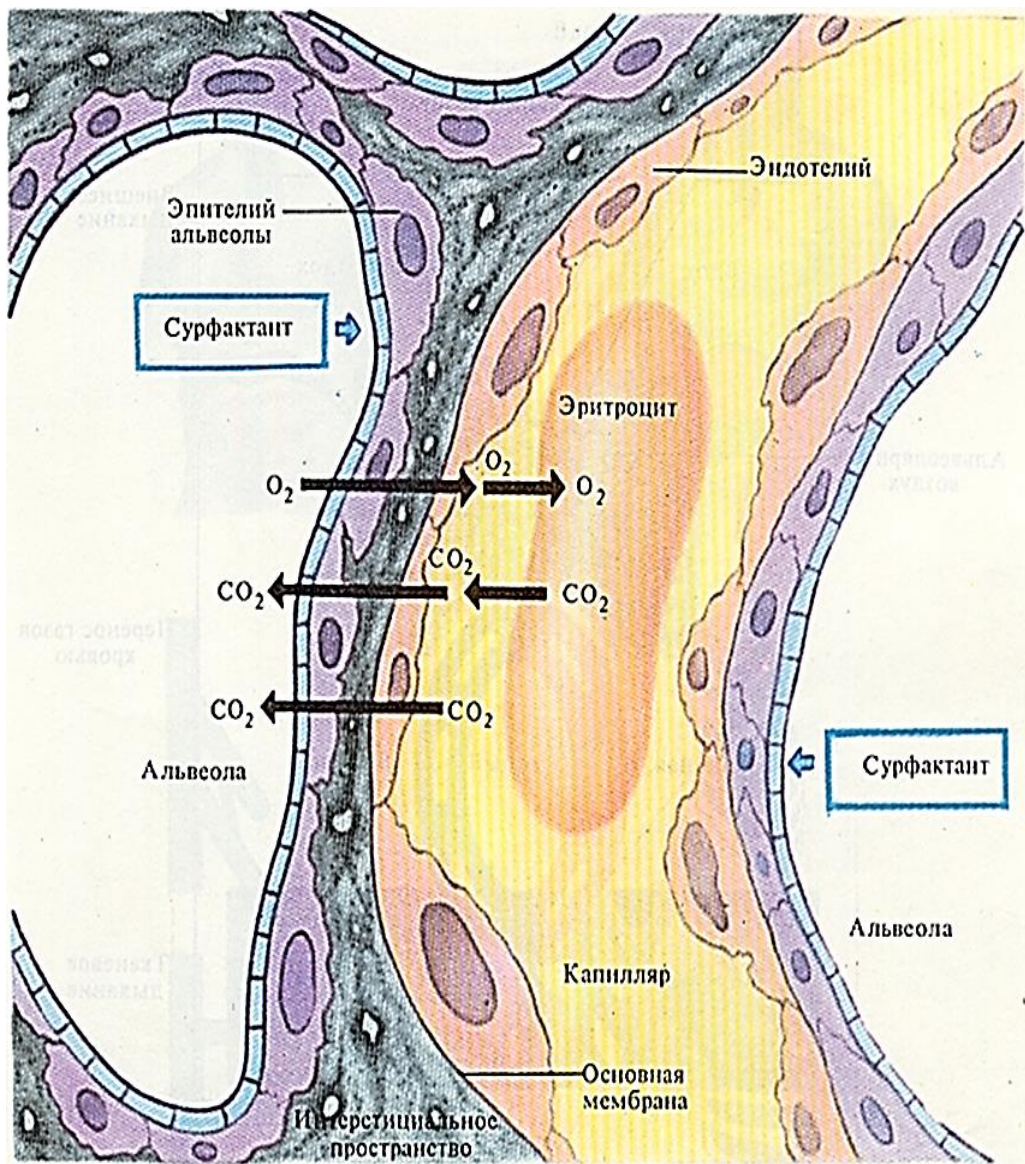
прямо пропорционально оказывает влияние **S** – **площадь диффузии.**

обратно пропорциональна **расстояние диффузии X.**

$$\frac{M}{t} = \frac{\Delta P \cdot S \cdot k \cdot \alpha}{X}$$



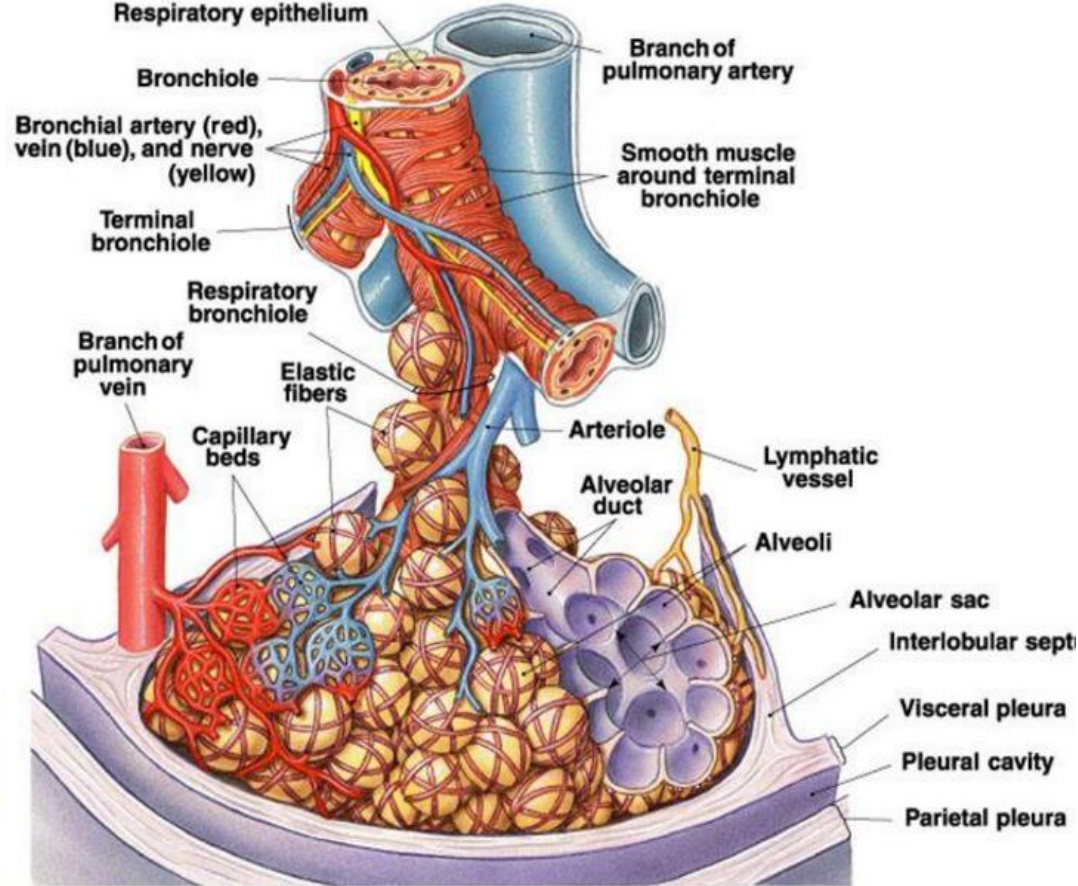
Расстояние диффузии X в лёгких представляет собой аэрогематический барьер



- Толщина 0,4 – 1,5 мкм
 - слой сурфактанта выстилающий альвеолу;
 - альвеолярный эпителий;
 - 2-е базальные мембраны и интерстициальное пространство между эпителием и эндотелием;
 - эндотелий капилляра;
- в ходе диффузии O_2 кроме барьера еще преодолевает:
- слой плазмы крови между эндотелием и эритроцитом;
 - мембрану эритроцита;
 - слой цитоплазмы в эритроците

S – площадь диффузии

– площадь контакта между функционирующими альвеолами и капиллярами. В одном



легком человека насчитывается в среднем 400 млн альвеол. Большая часть наружной поверхности альвеол соприкасается с капиллярами малого круга кровообращения, суммарная площадь этих контактов велика: во время выдоха около **90 м²**, во время вдоха она увеличивается до **130 м²**.

Соотношение вентиляции и перфузии в разных отделах легких. Распределение вентиляционно-перфузионного коэффициента (ВПК)

ВПК = МОД/МОК %

08-09
альвеолярная вентиляция / к
кровотоку в легких
4л/5л

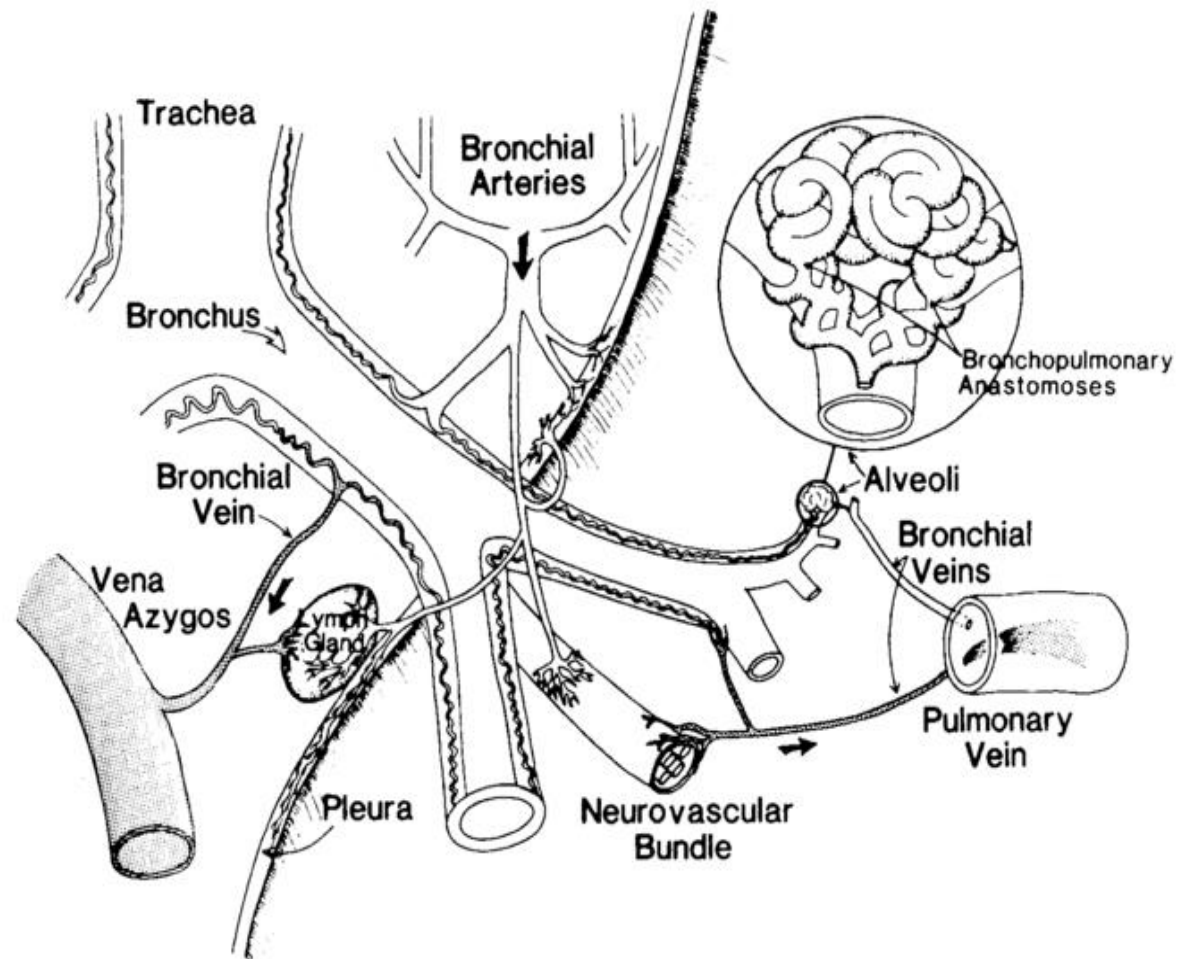


Перфузия – процесс, в ходе которого дезоксигенированная кровь лёгочных артерий проходит через лёгкие и оксигенируется

Система кровотока в лёгких

Венно-венозные анастомозы всегда в какой либо степени открыты и часть крови из бронхиальных вен большого круга поступает в пульмональные вены малого круга, по которым течёт артериальная кровь, поэтому насыщение крови кислородом становится меньше на 1-2% чем в пульмональных венулах.

Артерио-артериальные анастомозы между бронхиальными и пульманальными артериями открываются при прекращении вентиляции лёгкого и богатая кислородом кровь из бронхиальной артерии поступает в артерии малого круга в невентилируемую долю лёгкого и защищает ткань от кислородного голодания.



Соотношение между вентиляцией и перфузией по Зонам Веста

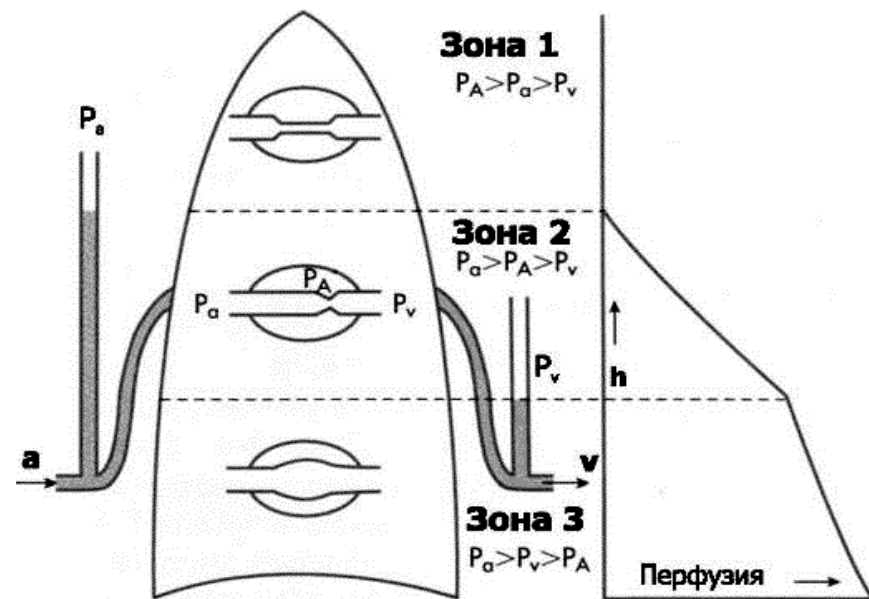
- **Зона 1** В верхушке лёгкого вентиляция превышает кровоток **ВПК** = 3 (непродуктивная вентиляция). В капиллярах верхушек лёгких кровоток снижен. Поэтому газообмен снижен.
- **Зона 2** ($P_a > P_A > P_v$) – Как выше описывалось кровоток зависит здесь от сердечного цикла и капилляры хорошо кровоснабжаются лишь во время систолы сердца.

Поэтому перфузия непродуктивная.

ВПК = 0.6

- **Зона 3** ($P_a > P_v > P_A$) – нижние две трети лёгкого. Характерен постоянный кровоток, что способствует газообмену.

ВПК = 0.8-0.9



ТРАНСПОРТ ГАЗОВ КРОВЬЮ

1. физически растворённые в плазме крови
2. химически связанном виде.

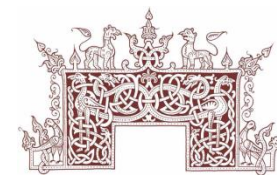
■ ***в физически растворенном состоянии - 0,3%***

в артериальной крови содержание $O_2 - 0,3$ об.%, $CO_2 - 3,0$ об.%,

в венозной - $O_2 - 0,11$ и $CO_2 - 2,9$ об.%

➤ **В артериальной крови химически связанного $O_2 - 0,20$ л**

➤ **в венозной $O_2 - 0,15$ л**



ТРАНСПОРТ КИСЛОРОДА КРОВЬЮ

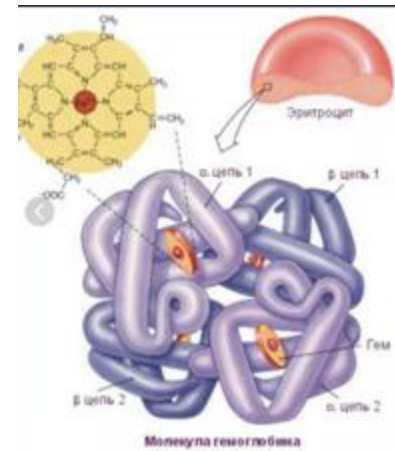
Гемоглобин, присоединивший O_2 - **оксигемоглобин (HbO_2 или $HHbO_2$)**;

гемоглобин, отдавший O_2 , и присоединивший H^+ - **восстановленный, или редуцированный (HHb)**.

1 гр гемоглобина связывает **1,36 – 1,34 мл O_2** , в 1 литре крови содержится 140 – 150 г гемоглобина. **140 гр x 1,34 = 187 мл. O_2**

Следовательно, в каждом литре крови максимально возможное содержание кислорода в химически связанной форме составит **190 – 200 мл O_2** , или **19 об%** – это **кислородная емкость крови**.

Кровь человека содержит примерно **700 – 800 г гемоглобина** и может связывать **1 л кислорода**.



Кривая диссоциации оксигемоглобина, ее характеристика.

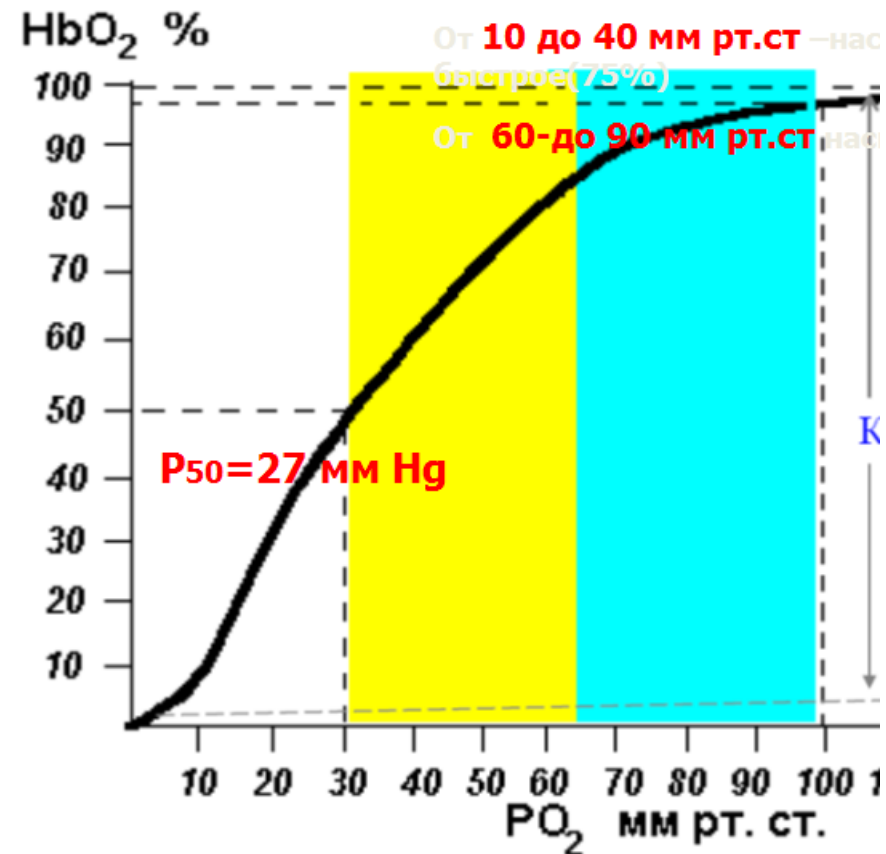
На кривой выделяют участки:

- **от 0 до 10 мм рт. ст.** – насыщение прямо пропорциональная напряжению,
- **от 10 до 50 мм рт. ст.** - насыщение очень быстрое, от
- **60 до 90 мм рт. ст.** - насыщение почти не изменяется.

- 1) **Крутой наклон** среднего участка, соответствующий напряжениям O_2 в тканях (**35 мм рт. ст. и ниже**),

благоприятствует отдаче O_2 в них.

- 2) От напряжения **60 мм рт. ст.**, начинается **Пологая часть, КДО** что демонстрирует стабильность тканевого pO_2 в условиях, когда pO_2 артериальной крови может уменьшаться: при подъеме в горы или на самолете, при заболеваниях легких, с возрастом. Даже когда альвеолярное pO_2 снижается **до 60 мм рт. ст.**, гемоглобин в артериальной крови все еще насыщен O_2 на **89%**, что только на 8% ниже нормальной 97% насыщения.



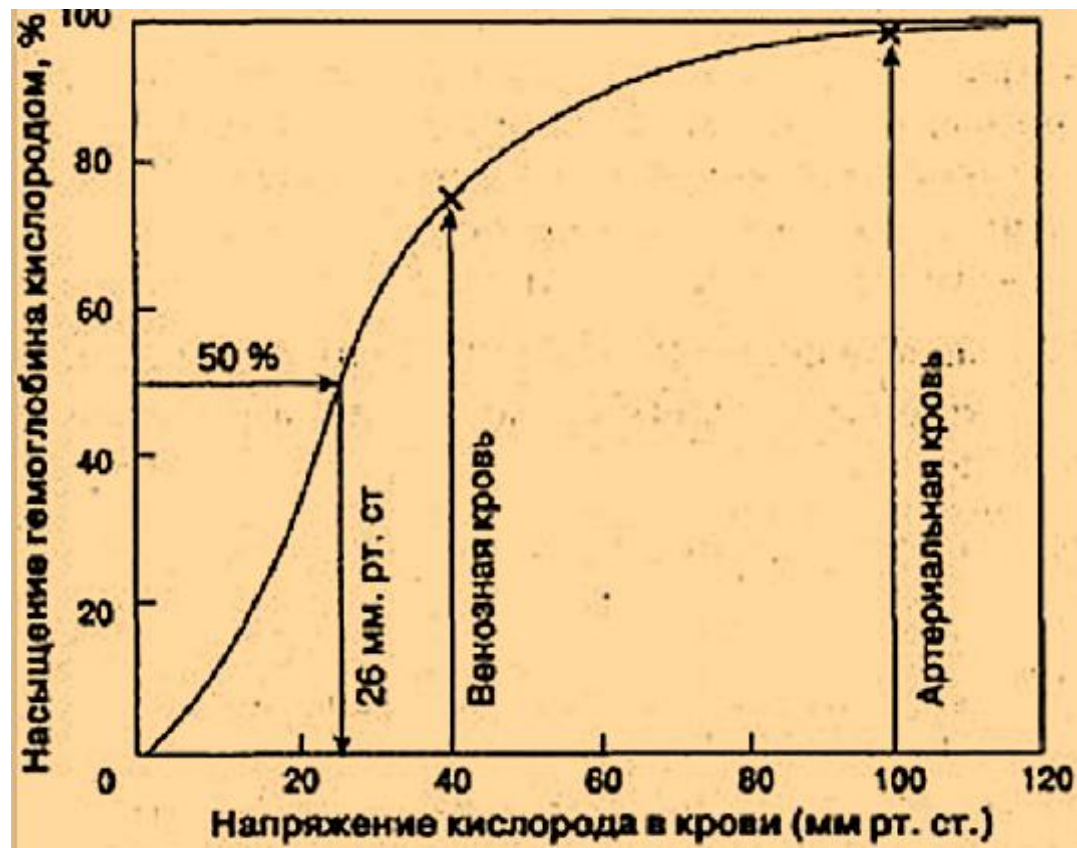
Кривая диссоциации оксигемоглобина, ее характеристика.

В норме при $pH = 7,4$ и $t = 37^{\circ}C$:

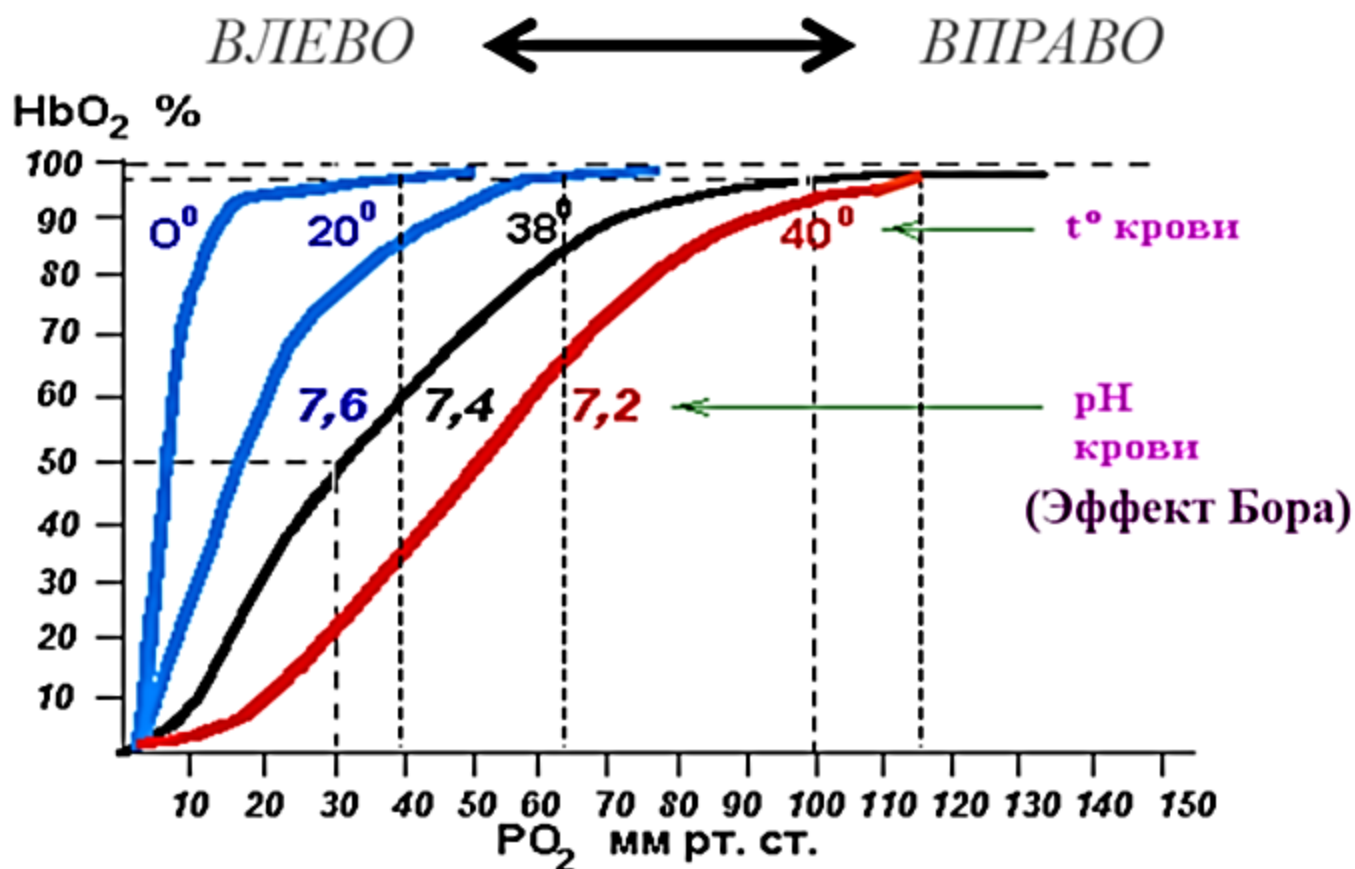
- 1 точка соответствует 50%-ному насыщению гемоглобина кислородом – P_{50} - **напряжение полунасыщения (точка разрядки по Кругу)**. pO_2 артериальной крови **26 мм рт. ст.** В межклеточной жидкости напряжение pO_2 может быть от 20-40 мм.рт.ст., при этом градиент давления может практически

пропасть и в тканях начнётся кислородное голодание.

- 2 точка соответствует **97%**-ному насыщению гемоглобина кислородом – P_{97} - точка зарядки. В норме **97%**-ное насыщение гемоглобина начинается уже с напряжения кислорода **pO_2 70мм рт. ст.**



Сдвиги кривой диссоциации



Сдвиг влево - легче насыщение кислородом: <t; <Pco₂; >pH

Сдвиг вправо - легче отдача кислорода: >t; >Pco₂; <pH

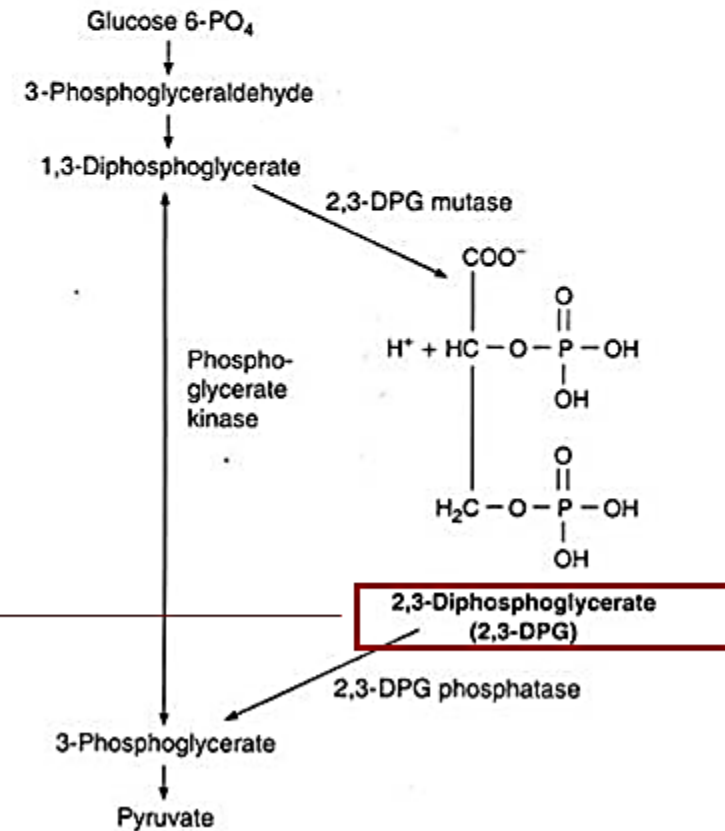
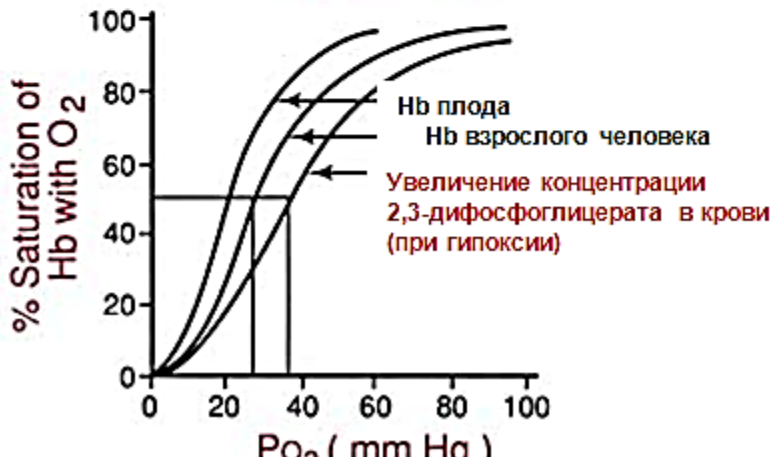
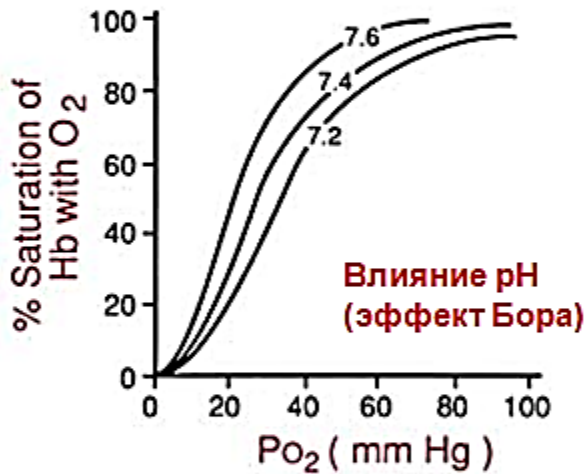
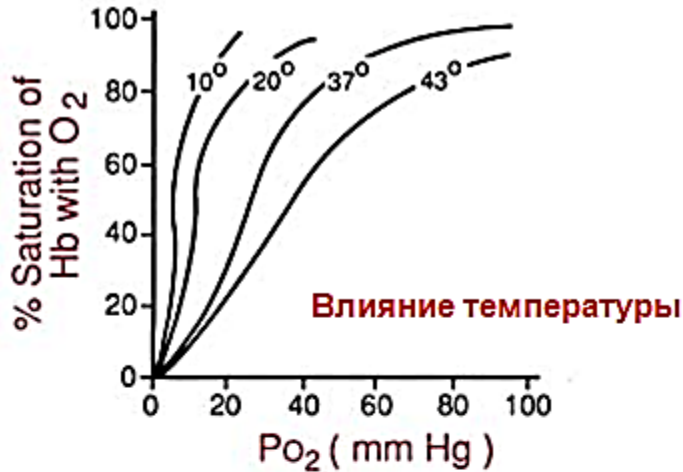
Влияние различных параметров крови на кривую диссоциации оксигемоглобина

Если **сродство** гемоглобина к O_2 увеличивается, то процесс идет в сторону образования оксигемоглобина и график диссоциации смещается **влево**. Это наблюдается при:

- понижении температуры;
- сдвиге pH в щелочную сторону.

При **понижении сродства** гемоглобина к O_2 процесс идет больше в сторону **диссоциации** оксигемоглобина, при этом график диссоциации смещается **вправо**. Наблюдается при

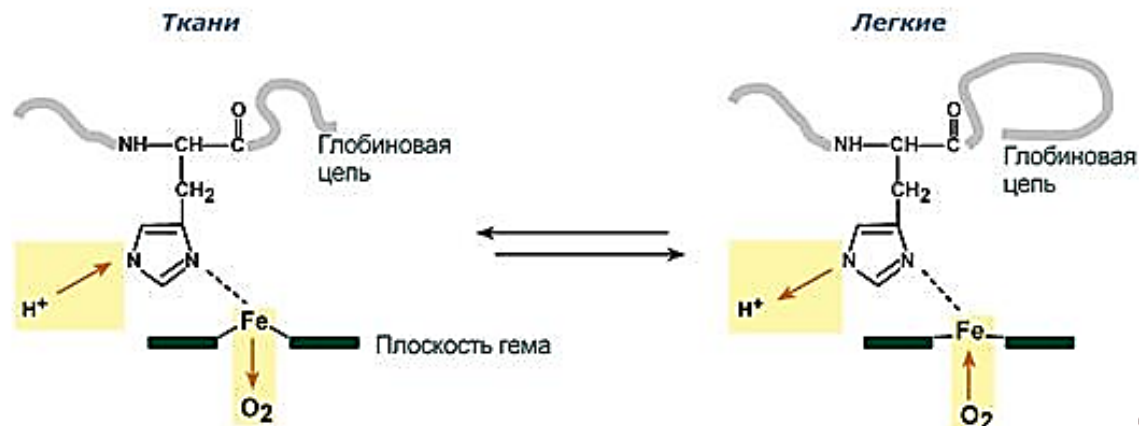
- увеличении парциального давления CO_2 ;
- повышении температуры;
- смещении pH в кислую сторону.



Влияние парциального напряжения углекислоты на оксигинацию

Повышение CO_2 в крови приводит к образованию H_2CO_3 , которая с образованием протона H^+ это приводит к **эффекту Бора**:

Изменение сродства гемоглобина к кислороду в тканях и в легких при изменении концентрации ионов H^+ и O_2 обусловлено конформационными перестройками глобиновой части молекулы. **В тканях** при присоединении H^+ к остаткам гистидина (глобиновой части), образуется восстановленный гемоглобин (H-Hb) с низким сродством к кислороду. **В легких** поступающий в больших количествах кислород "вытесняет" ион водорода из связи с остатком гистидина гемоглобиновой молекулы.



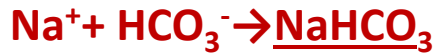
ТРАНСПОРТ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА КРОВЬЮ

Газообмен в тканях

1. При поступлении CO_2 в эритроцит прежде всего происходит гидратация молекул CO_2 с образованием H_2CO_3



2. Образовавшаяся H_2CO_3 диссоциирует $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$, концентрация бикарбонат-иона в эритроците возрастает и он диффундирует в плазму (в обмен на Cl^- , чтобы не нарушать ионное равновесие), где, соединяясь с Na^+ , образует бикарбонат натрия:



3. При увеличении P_{CO_2} в крови в цитоплазме эритроцита происходит процесс диссоциации оксигемоглобина и образование восстановленного гемоглобина (при участии протона «эффект» Бора):



4. Восстановленный гемоглобин является менее сильной кислотой, чем H_2CO_3 , поэтому угольная кислота вытесняет K^+ из калийной соли оксигемоглобина, образуя бикарбонат калия



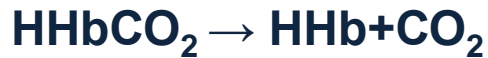
5. Восстановленный гемоглобин может присоединять углекислый газ к аминок группам глобина с образованием карбамидной связи:



ТРАНСПОРТ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА КРОВЬЮ

Газообмен в лёгких

1. CO₂ отщепляется от карбогемоглобина и диффундирует из венозной крови в альвеолярный воздух и образуется восстановленный гемоглобин.



Этому способствует переход O₂ по градиенту давления. Оксигенация гемоглобина ведет к снижению образования карбаминогемоглобина, поскольку уменьшает количество свободных NH₂ групп глобина, *эффекта Веригго-Холдена*.

2. O₂ переходит в кровь, поступает в эритроцит и вступает в реакцию с карбогемоглобином HbCO₂ с образованием H⁺, HbO₂ и CO₂ уходит в альвеолу. Протоны могут связываться с гидрокарбонат-ионами с образованием новых порций угольной кислоты H⁺ + HCO₃⁻ = H₂CO₃



3. Далее так как соединение (HbO₂) является более сильной кислотой, чем H₂CO₃, поэтому происходит реакция замещения между бикарбонатом калия (одна из транспортных форм CO₂) и HbO₂. Суммарное уравнение реакции имеет вид:

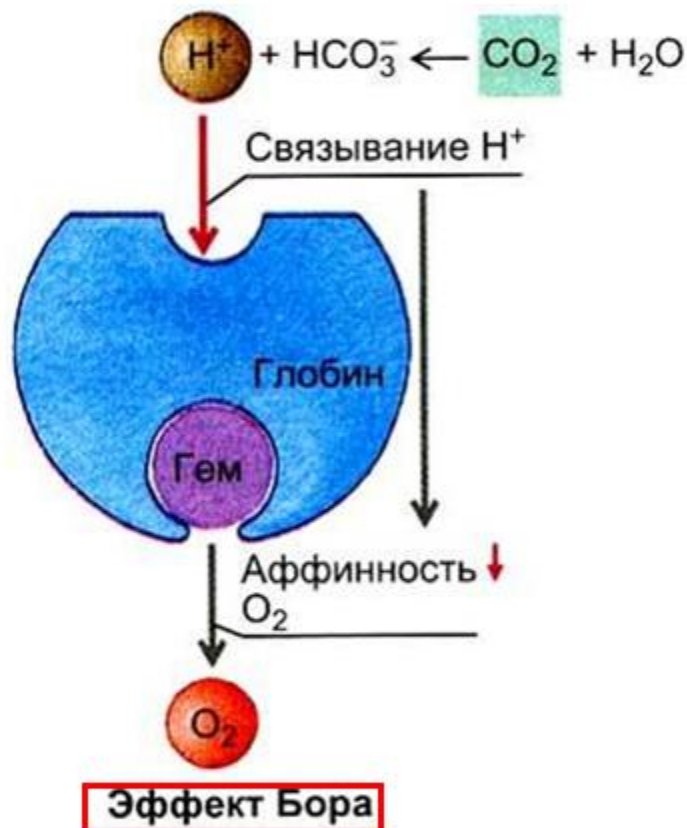


4. С выходом CO₂ в альвеолярный воздух уровень CO₂ в крови резко падает, это активизирует карбоангидразу, происходит процесс распада угольной кислоты:



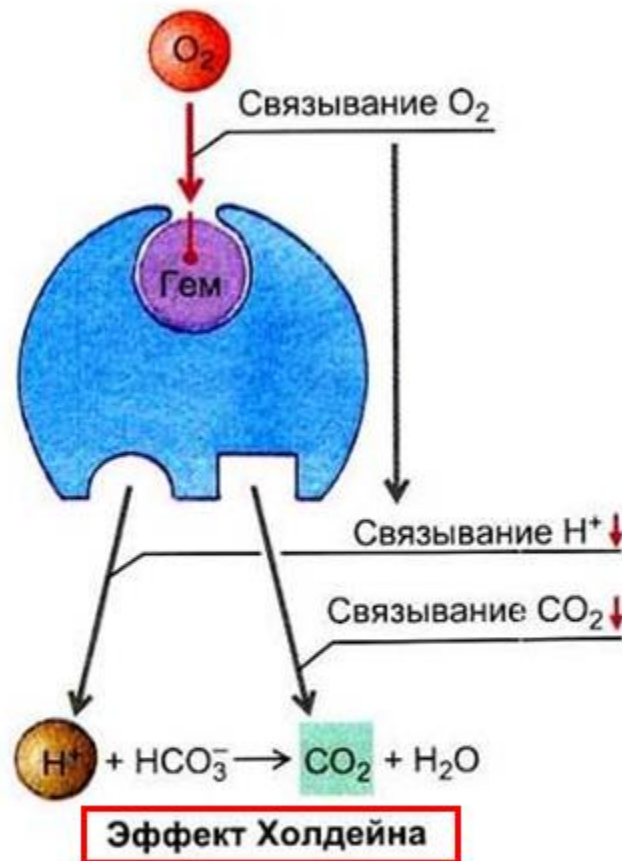
и CO₂ уходит в альвеолу

Связывание H^+ уменьшает сродство Hb к O_2



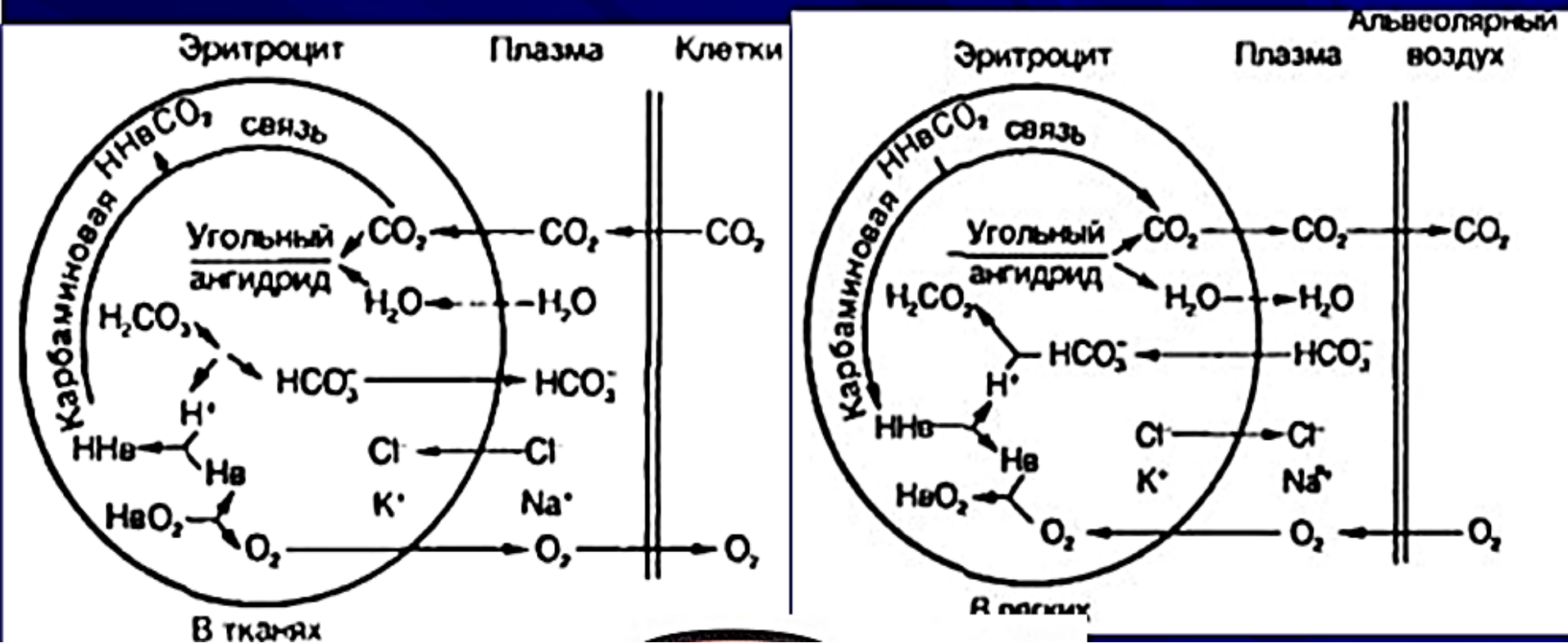
В ТКАНЯХ
гемоглобин
легко отдает O_2

Связывание O_2 уменьшает сродство Hb к H^+ и CO_2



В ЛЕГКИХ
гемоглобин легко
отдает CO_2

Транспорт CO₂ и O₂



Газообмен в тканях

	<i>Ткани</i>	<i>Тканевая Жидкость</i>	Артериаль ная кровь
pO_2	<i>0</i>	<i>← 20-40 ←</i>	<u><i>100(96)</i></u>
pCO_2	<i>60-45</i>	<i>→ 46 →</i>	<i>36-40</i>

Обмен O_2 между кровью и тканями

$$V\%O_2 \text{ крови} = 1,34 \times [Hb] \times S_{O_2} \times 10^{-5}$$

S_{O_2} степень насыщения гемоглобина кислородом в %

нормативное количество $[Hb]$ в г/л = **160г/л**

Зная **число Хюфнера** (1,34) и степень насыщения гемоглобина кислородом (S_{O_2}) в артериальном и венозном концах капилляра, можно рассчитать объемное содержание O_2 в крови:

$$V\%O_2 \text{ арт. крови} = 1,34 \times 160 \times 97 \times 10^{-5} = \mathbf{0,20 \text{ л}}$$

где В артериальной крови ($S_{O_2} = 97\%$)

$$V\%O_2 \text{ вен. крови} = 1,34 \times 160 \times 75 \times 10^{-5} = \mathbf{0,16 \text{ л}}$$

- в венозной ($S_{O_2} = 75\%$)
- В артериальной крови ($S_{O_2} = 97\%$) содержание химически связанного O_2 около **0,20 л** на л крови; в венозной - **0,16 л** на л крови. Следовательно, *артерио-венозная разница* по O_2 равна **0,04**. Это означает, что при прохождении крови через тканевые капилляры используется лишь **20%** кислородной емкости.

Коэффициент утилизации O₂

$V\%O_2$ арт .крови - $V\% O_2$ в вен. крови x 100

$$КУO_2 = \frac{\text{---}}{V\% O_2 \text{ в арт. крови}}$$

$КУO_2 = 30-40 \%$

-
-

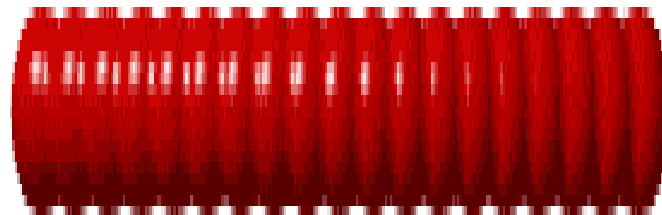
$V\%O_2=20$

8

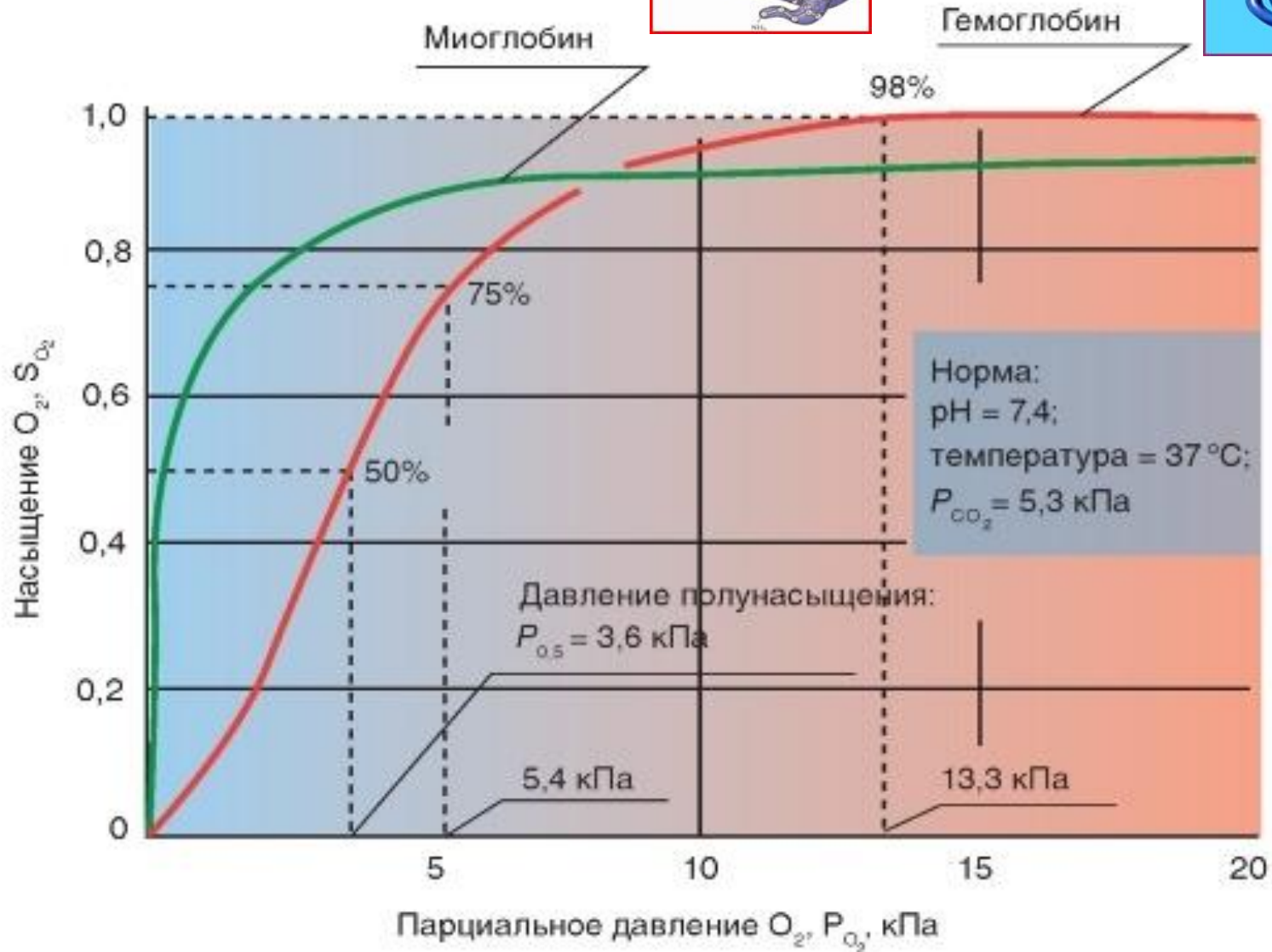
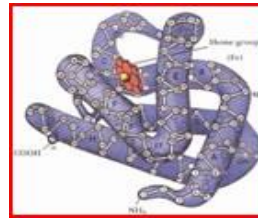
$V\%O_2=12$

20-100%

8 - x%



КДО (КОГ)



A scenic autumn landscape featuring rolling hills and trees with vibrant red and orange foliage. The scene is bathed in the warm, golden light of a sunset or sunrise, creating a peaceful and picturesque atmosphere. The foreground shows a grassy slope leading up to a cluster of trees, with the background showing more distant hills under a soft, hazy sky.

Благодарю за внимание !