

**ФГБОУ ВО «КУБАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МЕДИЦИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра нормальной физиологии

Учебно-методическое пособие к практическим занятиям

по теме

БИОФИЗИКА ДЫХАНИЯ

Биофизика дыхания

Механика вдоха.

За счет того, что легкие обладают эластичностью (эластичность – сочетание растяжимости и упругости), давление в плевральной полости (давление в межплевральном щелевидном пространстве) ниже, чем в альвеолах. В условиях равновесия давление в альвеолах $P_{ал}$ уравнивается суммой давления в плевральной полости $P_{пл}$ и давления $P_{эл. л.}$, создаваемого эластической тягой легких.

$$P_{ал} = P_{пл} + P_{эл. л.}$$

$$P_{пл} = P_{ал} - P_{эл. л.}$$

Таким образом, плевральное давление меньше альвеолярного на величину, обусловленную эластической тягой легких.

Атмосферное давление на грудную клетку $P_{атм}$ уравнивается суммой плеврального давления и давления $P_{эл. г. к.}$, создаваемого эластичностью грудной клетки.

$$P_{атм} = P_{пл} + P_{эл. г. к.}$$

Плевральное давление (называют отрицательным, принимая уровень атмосферного за нуль), следовательно, меньше атмосферного на величину, развиваемую эластической тягой грудной клетки.

Отрицательное давление в плевральной полости стремится сжать грудную клетку. Тяга грудной клетки направлена в противоположную от тяги легких сторону (что облегчает вдох). Соотношение указанных сил определяет уровень спокойного дыхания и функциональную остаточную емкость. Когда глубина вдоха становится выше 70% жизненной емкости, эластичность грудной клетки начинает противодействовать вдоху, и ее тяга уже направлена в ту же сторону, что и эластическая тяга легочной ткани.

Акт вдоха совершается в результате увеличения объема грудной полости, происходящего при подъеме ребер и опускании диафрагмы.

Увеличение объема грудной клетки при сокращении дыхательных мышц приводит к уменьшению давления в плевральной полости. В результате этого воздух в легких, преодолевая сопротивление их растяжению, расширяется, а его давление в соответствии с законом Бойля-Мариотта уменьшается и становится ниже атмосферного. Возникновение разности давлений между атмосферой и альвеолами легких служит непосредственной причиной движения в них воздуха.

Объемная скорость тока воздуха описывается уравнение:

$$V' = \frac{\Delta P}{R_v},$$

ΔP - разность между $P_{атм}$ и $P_{ал}$; R_v - аэродинамическое сопротивление, обуславливаемое трением движущегося воздуха о стенки дыхательных путей и внутри воздушного потока.

V' - объем воздуха, проходящего по дыхательным путям за единицу времени (л/с).

Объемы вдыхаемого и выдыхаемого воздуха легко измеряются, например, спирометром. Изменения же объемов циркулируемого воздуха во времени записываются спирографом, возникающая кривая называется спирограммой. Объемная скорость воздуха измеряется пневмотахометром, а ее изменение во времени регистрируется пневмотахографом в виде кривой – пневмотахограммы.

Механика выдоха

Во время вдоха дыхательные мышцы преодолевают ряд сил:

1. эластическое сопротивление грудной клетки (после достижения 70% жизненной емкости) и внутренних органов, отдавляемых книзу диафрагмой;
2. эластическое сопротивление легких
3. динамическое (вязкостное) сопротивление всех перемещаемых тканей
4. аэродинамическое сопротивление дыхательных путей
5. тяжесть перемещаемой части грудной клетки

б. силы, обусловленные инерцией перемещаемых масс.

Энергия мышц, затраченная на преодоление всех видов динамического сопротивления (обусловленного трением), переходит в тепло и в дальнейшем процессе дыхания не участвует.

Остальная часть энергии мышц вдоха переходит в потенциальную энергию растяжения всех эластических тканей и потенциальную энергию тяжести. При расслаблении дыхательных мышц под действием электрических сил грудной клетки и внутренних органов и силы тяжести грудной клетки ее объем уменьшается.

Уменьшение объема грудной клетки приводит к повышению плеврального давления. В результате этого и под действием эластической тяги легких воздух в альвеолах сжимается, его давление становится выше атмосферного и он начинает выходить наружу. Когда эластическая тяга легких уравнивается понижающимся давлением в плевральной полости, выдох закончится. В легких остается некоторое количество воздуха, которое называют остаточным объемом. Непосредственной причиной движения воздуха через дыхательные пути являются циклические колебания альвеолярного давления.

Растяжимость легких.

Отклонение поведения легких от поведения идеально упругих тел обусловлено тем, что эластическая тяга легких обусловлена двумя факторами:

1. наличием в альвеолах эластических волокон
2. поверхностным натяжением пленки жидкости, покрывающую внутреннюю поверхность альвеол.

На долю поверхностного натяжения приходится 55-65% эластической тяги легких.

Сопротивление дыханию

Эластическое сопротивление.

Наибольшим сопротивлением, которое должны преодолеть дыхательные мышцы при вдохе, является упруго-эластическая сила аппарата внешнего дыхания.

Преодолеваемые эластические силы разделяются на два вида:

1. эластические силы легких
2. эластические силы грудной клетки (и внутренних органов, смещаемых диафрагмой).

Эластические силы, развиваемые легкими и грудной клеткой, зависят от их объемов и не зависят от скорости изменения этих объемов.

В среднем диапазоне изменений объема зависимость V-Рал близка к линейной и характеризуется уравнением:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P}, \quad C - \text{величина растяжимости.}$$

У здорового человека растяжимость близка к **0,1 л/см вод ст.**

Растяжимость дыхательного аппарата бывает уменьшена при определенных заболеваниях.

Динамическое сопротивление

Сопротивления дыханию, возникающие исключительно во время дыхательных движений, т.е. когда воздух идет в легкие или из легких, называют динамическим или вязкостным сопротивлением. Различают динамическое сопротивление тканевое и воздушное (или аэродинамическое).

Тканевое динамическое сопротивление возникает в результате трения в тканях, которые перемещаются во время дыхания. Оно определяется скоростью движения. У людей со здоровыми органами дыхания тканевое динамическое сопротивление составляет 15% 18% всего динамического сопротивления.

Аэродинамическое сопротивление

При дыхании требуется давление, чтобы преодолеть трение между стенками трахеобронхиального дерева и воздушным потоком, а также внутри самого потока. Воздушный поток может быть ламинарным или турбулентным.

В общем случае давление ΔP (или разность давлений), необходимое для преодоления аэродинамического сопротивления, определяется уравнением:

$$\Delta P = k_1 \cdot V' + k_2 \cdot V'^2,$$

где k_1 и k_2 - коэффициенты, характеризующие аэродинамические сопротивления соответственно для ламинарного и турбулентного потоков воздуха.

Коэффициенты находятся из уравнений:

$$k_1 = \frac{8l\eta}{\pi r^4},$$

$$k_2 = \frac{fl}{4\pi^2 r^5},$$

где l – длина трубки, r – ее радиус, η – вязкость газа, f – коэффициент трения, зависящий от плотности газа.

Это уравнение показывает, что аэродинамическое сопротивление увеличивается с повышением объемной скорости воздуха, при переходе от ламинарного к турбулентному потоку и, особенно при сужении просвета дыхательных путей. Например, при астме это сопротивление может быть в 7-8 раз больше, чем у здоровых людей.

Сопротивления, связанные с гравитацией и инерцией.

При дыхании происходит изменения положения грудной клетки и органов брюшной полости в гравитационном поле Земли. В зависимости от фазы дыхательного цикла и ориентации положения тела в пространстве сопротивление, связанное с тяжестью перемещаемых органов, меняется. Поскольку при дыхании приходит в движение система, обладающая массой, то при этом проявляется ее инерция. Сопротивление, обусловленное инерцией, возникает при изменении скорости движения, т.е. при ускорении. Инерционный фактор в обычных условиях дыхания весьма мал и приобретает некоторое значение лишь при увеличении ускорений, что бывает при очень частом дыхании и увеличенной вентиляции.

Работа дыхания

Работой дыхания называется работа по преодолению всех видов сопротивления, которая выполняется дыхательными мышцами при вентиляции легких. Для случая дыхательной системы работа выражается произведением давления на изменение объема.

Показатели дыхательной системы

Легочные объемы

Дыхательный объем (ДО) - это количество воздуха, которое можно вдохнуть и выдохнуть при спокойном дыхании (300-800 мл.). При этом длительность одного цикла дыхания составляет 4-6 с. Такое дыхание называется эйпное (нормальное дыхание).

Резервный объем вдоха (РО_{вд}) - количество воздуха, которое можно вдохнуть после спокойного вдоха (до 3литров).

Резервный объем выдоха (РО_{выд}) - количество воздуха, которое можно выдохнуть после спокойного выдоха (до 1,5 л).

Остаточный объем легких (ООЛ) - количество воздуха, которое остается в легких после самого глубокого выдоха (1,0–1,2 л). Остаточный объем состоит из минимального (200 мл) и коллапсного (800–1000 мл). Минимальный объем воздуха никогда не удаляется из легких, так как задерживается в воздушных ловушках. Поэтому легкое взрослого человека и дышавшего новорожденного не тонет в воде. Это используется в судебно-медицинской экспертизе для доказательства или опровержения факта мертворождения ребенка.

Легочные емкости

Легочные емкости состоят из нескольких объемов.

Жизненная емкость легких (ЖЕЛ) - это наибольший объем воздуха, который можно выдохнуть после максимального вдоха (от 2,8 л до 5,0 л).

$$\text{ЖЕЛ} = \text{ДО} + \text{РО}_{\text{вд}} + \text{РО}_{\text{выд}} .$$

Должная жизненная емкость легких (ДЖЕЛ). Зависит от роста, возраста и пола, находится по формулам и номограммам. Расхождение ЖЕЛ и ДЖЕЛ в норме должно находиться в пределах $\pm 10\%$.

Емкость вдоха ($E_{\text{вд}}$) - это сумма ДО и $\text{РО}_{\text{вд}}$, т.е. максимальный объем газа, который можно вдохнуть после спокойного выдоха. Величина этой емкости характеризует способность легочной ткани к растяжению.

Альвеолярный объем, или функциональная остаточная емкость легких (ФОЕ) - это количество воздуха, остающееся в легких после спокойного выдоха:

$$\text{ФОЕ} = \text{РО}_{\text{выд}} + \text{ООЛ}.$$

ФОЕ при расчетах принимают равной 2,5 л.

Общая емкость легких (ОЕЛ) – объем воздуха, содержащийся в легких при максимально глубоком вдохе:

$$\text{ОЕЛ} = \text{ДО} + \text{РО}_{\text{вд}} + \text{РО}_{\text{выд}} + \text{ООЛ}.$$

Показатели вентиляции легких

Минутный объем дыхания (МОД). Это объем воздуха, проходящий через дыхательную систему за 1 минуту.

$$\text{МОД} = \text{ЧД} \cdot \text{ДО} ,$$

где ЧД – частота дыхания, 12–18 вдохов или выдохов в минуту (в среднем ЧД =16), ДО = 300 –800 мл (в среднем 500 мл).

Обычно минутный объем дыхания составляет 6–8 л. При интенсивной мышечной работе МОД может увеличиться до 100 л.

Минутная альвеолярная вентиляция (МАВ). Это количество воздуха, которое доходит до альвеол за минуту.

$$\text{МАВ} = (\text{ДО} - \text{АМП}) \cdot \text{ЧД} ,$$

где АМП – анатомическое мертвое пространство. В среднем

$$\text{МАВ} = (500 - 150) \cdot 16 = 5,6 \text{ л}.$$

Коэффициент альвеолярной вентиляции (КАВ), или коэффициент вентиляции легких (КВЛ) – показывает часть альвеолярного объема, воздух которого обновляется за один вдох.

$$\text{КВЛ} = (\text{ДО} - \text{АМП}) / \text{ФОЕ}.$$

В норме коэффициент вентиляции легких равен одной седьмой от альвеолярного объема: $\text{КВЛ} = \text{ФОЕ} / 7$.

Максимальная вентиляция легких (МВЛ) – это объем воздуха, который проходит через легкие за определенный промежуток времени при максимально возможной глубине и частоте дыхания. МВЛ зависит от возраста, роста, пола, проходимости дыхательных путей, упругости грудной клетки, растяжимости легких и тренированности дыхательной системы. У молодого мужчины МВЛ может достигать 120–150 л/мин, а у спортсменов – до 180 л/мин.

Спирометрия и спирография

Спирометрия и спирография являются наиболее распространенными методами исследования функции внешнего дыхания. Спирометрия позволяет измерить легочные объемы и емкости, спирография же обеспечивает возможность не только измерения, но и графической регистрации основных показателей вентиляции при спокойном и форсированном дыхании, физической нагрузке и проведении фармакологических проб.