

Бодиплетизмография: теоретические и клинические аспекты

О. И. Савушкина, к.б.н., зав. отделением исследований функции внешнего дыхания Центра функционально-диагностических исследований¹

А. В. Черняк, к.м.н., зав. лабораторией функциональных и ультразвуковых методов исследования²

¹ФГБУ «Главный военный клинический госпиталь имени академика Н. Н. Бурденко» Министерства обороны Российской Федерации, г. Москва

²ФГБУ «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства России, г. Москва

Bodipletizmografiya: theoretical and clinical aspects

O.I. Savushkina, A.V. Cherniak

Center of Functional Diagnostic Investigations, Acad. N.N. Burdenko the Main Military Clinical Hospital, Ministry of Defense, Federal Pulmonology Research Institute, Federal Medical and Biological Agency of Russia; Moscow, Russia

Резюме

Бодиплетизмография — легочный функциональный тест, который позволяет измерить внутригрудной объем газа (ВГО), легочные объемы, такие как жизненную емкость легких, общую емкость легких (ОЕЛ), остаточный объем легких (ООЛ), а также бронхиальное сопротивление. Метод бодиплетизмографии базируется на принципе взаимосвязи между давлением (P) и объемом (V) при постоянной температуре фиксированного количества газа: $P \times V = \text{const}$ при изотермальных условиях (закон Бойля — Мариотта). Бодиплетизмография позволяет диагностировать рестриктивный тип вентиляционных нарушений в случае снижения ОЕЛ и обструктивные нарушения — при увеличении легочных объемов: ООЛ, ООЛ/ОЕЛ и ВГО. При анализе легочных объемов у взрослых полученные значения сравнивают с должными величинами, которые рассчитываются по формулам, рекомендуемым Американским торакальным и Европейским респираторными обществами (АТО/ЕРО, 2005). Бодиплетизмография позволяет получать важную клиническую информацию, которая дает возможность оценивать параметры механики дыхания, проводить дифференциальную диагностику и контролировать течение заболевания.

Ключевые слова: бодиплетизмография, закон Бойля-Мариотта, внутригрудной объем газа, бронхиальное сопротивление, рестриктивные и обструктивные нарушения вентиляции.

Summary

Whole-body plethysmography — the lung function test that allows to measure of thoracic gas volume (TGV), vital capacity, total lung capacity (TLC), residual volume and airway resistance. The method is based on the relationship between pressure (P) and volume (V) at constant temperature of a fixed quantity of gas: $P \times V = \text{constant}$ under isothermal conditions (Boyle-Mariotte's Law). Clinical benefit of body plethysmography is the definition of restrictive lung disease at the presence of a reduced TLC and obstructive lung disease at the presence of abnormally increased lung volumes: RV, RV/TLC and TGV. Interpretation of lung volumes is based on comparisons of data measured in individual patient with reference (predicted) values based on healthy subjects. Normative values for lung volumes in adults have been reported by American Thoracic Society and European Respiratory Society in 2005 (ATS/ERS, 2005). Whole-body plethysmography provides the unique clinically relevant information, allows to estimate pulmonary mechanical parameters, carry out the differential diagnosis, control the course of the disease.

Key words: whole-body plethysmography, Boyle-Mariotte's Law, thoracic gas volume, airway resistance, restrictive and obstructive lung disease.

Одним из методов оценки вентиляционной функции легких является бодиплетизмография (от англ. body — тело; от греч. plethysmos — расширение). Бодиплетизмография дает возможность определять те параметры, которые нельзя получить при проведении спирометрии и обычно состоит из трех стандартных процедур измерения, порядок которых определяется целью обследования. В первую очередь обычно измеряют бронхиальное сопротивление (Raw), затем внутригрудной объем (ВГО) и легочные объемы при спокойной спирометрии. Также возможно проведение и форсированной спирометрии. Таким образом, бодиплетизмография является одним из методов исследования вентиляци-

онной функции легких, который позволяет в короткий промежуток времени получить большой объем разнообразной физиологической информации.

При проведении бодиплетизмографии измеряют следующие параметры:

- внутригрудной объем (ВГО) — объем воздуха в легких после обычного спокойного выдоха. Такой объем называют функциональной остаточной емкостью легких (ФОЕ);
- дыхательный объем (ДО) — объем воздуха, который вдыхается и выдыхается во время дыхательного цикла при спокойном дыхании. Окончание фазы вдоха называют конечно-инспираторным уровнем, окончание фазы выдоха называют конечно-экспираторным уровнем;

- резервный объем вдоха (РОВд) — максимальный объем воздуха, который можно вдохнуть после обычного среднего спокойного вдоха (конечно-инспираторного уровня);
- резервный объем выдоха (РОВвд) — максимальный объем воздуха, который можно выдохнуть после спокойного выдоха (конечно-экспираторного уровня).

На основании этих параметров путем вычисления рассчитывают:

- остаточный объем легких (ООЛ) — объем воздуха, который остается в легких после максимального полного выдоха. Он рассчитывается путем вычитания РОВвд из ВГО;

- жизненную емкость легких (ЖЕЛ) — максимальный объем воздуха, который можно вдохнуть или выдохнуть. ЖЕЛ является суммой ДО, РОвд и РОвд;
- общую емкость легких (ОЕЛ) — максимальный объем воздуха в легких после полного вдоха. ОЕЛ — это сумма ООЛ и ЖЕЛ;
- емкость вдоха (Евд) — максимальный объем, который можно вдохнуть после обычного спокойного выдоха. Евд — сумма ДО и РОвд, в норме обычно составляет 60–70% ЖЕЛ.

Метод бодиплетизмографии базируется на принципе взаимосвязи между давлением и объемом при постоянной температуре фиксированного количества газа. Данный принцип гласит: объем определенного количества газа (V) при постоянной температуре изменяется обратно пропорционально давлению (P) (закон Бойля — Мариотта) [1], т.е. $P \times V = \text{const}$.

Существует три типа бодиплетизмографов: постоянного объема, измеряющие давление; переменного объема, измеряющие объем; измеряющие объем и давление. Бодиплетизмограф постоянного объема используют для измерения небольших изменений внутригрудного объема за счет компрессии и декомпрессии воздуха в легких. Бодиплетизмограф постоянного давления используют для измерения больших изменений объема легких, связанных с потоком воздуха в легких и из легких. Бодиплетизмограф переменного объема с коррекцией давления сочетает в себе преимущества обоих вышеперечисленных типов. Далее речь пойдет о бодиплетизмографе постоянного объема, в котором легочные объемы измеряются по изменению давления в камере.

Во время исследования пациент находится в закрытой камере и дышит через загубник. С помощью пневмотахографа регистрируется вдыхаемый и выдыхаемый поток воздуха пациента, а датчики давления фиксируют изменения давления в камере ($P_{\text{кам}}$) и давления в ротовой полости ($P_{\text{рот}}$).

В конце одного из выдохов на конечно-экспираторном уровне дыхание пациента кратковременно прерывается путем закрытия дыхательной трубки

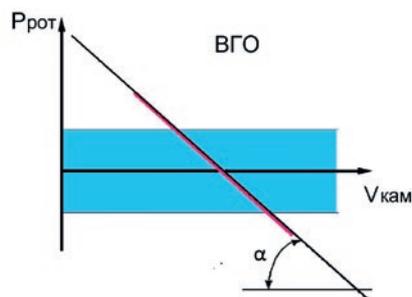


Рисунок 1. Графическое представление зависимости $P_{\text{рот}}$ от $V_{\text{кам}}$ во время маневра перекрытия потока: изменение $P_{\text{рот}}$ соответствует изменению $V_{\text{кам}}$; α — угол наклона кривой «давления перекрытия».

специальным клапаном. При закрытой дыхательной трубке пациент совершает дыхательные движения, «дышит» поверхностно с частотой 0,5–1 Гц или 30–60 «дыхательных» движений в минуту [2]. Закрытая боди-камера и пациент являются связанными системами. Во время маневра перекрытия потока воздух, содержащийся в легких пациента (а это и есть ВГО), при попытке вдоха разряжается. Таким образом, ВГО увеличивается на некоторую величину, а свободный объем камеры ($V_{\text{кам}}$) уменьшается на ту же величину, и, следовательно, увеличивается давление в камере ($P_{\text{кам}}$). На выдохе — наоборот.

Таким образом, колебания давления в камере ($\Delta P_{\text{кам}}$) являются отображением изменения ВГО ($\Delta V_{\text{ВГО}}$):

$$\Delta P_{\text{кам}} \sim \Delta V_{\text{ВГО}}$$

Кроме того, во время маневра перекрытия потока $P_{\text{рот}}$ становится эквивалентом Ральвь:

$$P_{\text{рот}} \sim P_{\text{альвь}}$$

В процессе маневра перекрытия потока регистрируется кривая «давления перекрытия» в координатах ($V_{\text{кам}}$ — $P_{\text{рот}}$) (рис. 1) [3]. Возникает вопрос: почему измеряем $P_{\text{кам}}$, а на графике по оси абсцисс откладываем $V_{\text{кам}}$? Повторно обращаем внимание, что в плетизмографах постоянного объема изменения свободного объема камеры ($\Delta V_{\text{кам}}$) измеряются по изменению давления в ней ($\Delta P_{\text{кам}}$). Коэффициент, который устанавливает связь между давлением в камере и ее свободным объемом, предварительно рассчитывается автоматически при проведении калибровки бодиплетизмографа и обозначается как коэффициент калибровки K . Во время калибровки происходит быстрое введение и выведение 30–50 мл воздуха

в камеру с помощью поршневого насоса, что имитирует изменения ВГО, которые происходят во время маневра перекрытия потока [4]. Однако калибровка бодиплетизмографа обычно осуществляется без обследуемого внутри кабины пациента, поэтому необходима коррекция величины K с учетом объема тела человека. Следовательно, перед началом исследования необходимо измерить величину массы тела пациента и ввести ее в программу, чтобы аппарат автоматически внес поправку в коэффициент калибровки. Таким образом, изменение объема камеры можно вычислить по изменению давления в ней:

$$\Delta P_{\text{кам}} = -K \times \Delta V_{\text{кам}} \quad (1),$$

Знак «-» в данном соотношении учитывает обратно пропорциональную зависимость между величиной давления в камере и ее свободным объемом.

Взаимоотношение между $P_{\text{рот}}$ и ВГО на уровне спокойного выдоха (т.е. на уровне ФОЕ легких), изменения $P_{\text{рот}}$ и ВГО во время имитации дыхания можно записать в виде следующего уравнения (закон Бойля — Мариотта для замкнутой системы ротовая полость-легкие):

$$P_{\text{рот}} \times \text{ВГО} = (P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{альвь}}) \times (\text{ВГО} + \Delta V_{\text{ВГО}}), \quad (2)$$

где $P_{\text{рот}}$ — начальное давление в ротовой полости на конечно-экспираторном уровне (спокойного выдоха); ВГО — внутригрудной объем на уровне спокойного выдоха (в нашем случае аналог ФОЕ); $\Delta P_{\text{альвь}}$ — изменение внутригрудного (альвеолярного) давления, которое при проведении маневра перекрытия потока становится равным изменению давления в ротовой полости ($\Delta P_{\text{рот}}$); $\Delta V_{\text{ВГО}}$ — изменение внутригрудного объема.

Решая уравнение (2) относительно ВГО, с учетом того, что параметрами $\Delta P_{\text{альвь}}$ и $\Delta V_{\text{ВГО}}$ можно пренебречь, так как они слишком малы, получаем
$$\text{ВГО} = -(\Delta V_{\text{ВГО}} / \Delta P_{\text{альвь}}) \times P_{\text{рот}} \quad (3),$$
 где величины $\Delta V_{\text{ВГО}}$ и $\Delta P_{\text{альвь}}$ отражают соответственно колебания внутригрудного объема газа и внутригрудного (альвеолярного) давления во время выполнения маневра перекрытия потока.

В формуле (3) используется параметр $P_{\text{рот}}$, измеряемый с помощью

манометра, а величина соотношения $\Delta V_{ВГО}/\Delta P_{альв}$ рассчитывается следующим образом.

Как было сказано выше, во время маневра перекрытия потока колебания давления в камере являются отображением изменения ВГО, а изменения давления в ротовой полости отражают изменения альвеолярного давления, что дает основание переписать формулу (1) следующим образом:

$$\Delta V_{ВГО} = -K \times \Delta V_{кам} \quad (1.1).$$

Разделим левую и правую части уравнения (1.1) на $\Delta P_{альв}$ и $\Delta P_{рот}$ соответственно:

$$\Delta V_{ВГО}/\Delta P_{альв} = -K \times \Delta V_{кам}/\Delta P_{рот} \quad (4),$$

и подставив уравнение (4) в уравнение (3), получим

$$ВГО = (K \times \Delta V_{кам}/\Delta P_{рот}) \times P_{рот} \quad (3.1),$$

где отношение $\Delta P_{рот}/\Delta V_{кам}$ есть не что иное, как тангенс угла наклона кривой «давления перекрытия»:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta P_{рот}/\Delta V_{кам} \quad (5).$$

Подставив уравнение (5) в уравнение (3.1), получим

$$ВГО = K \times P_{рот} \times 1/\operatorname{tg} \alpha \quad (6).$$

Таким образом, для количественной оценки ВГО необходимо измерить начальное $P_{рот}$ на уровне ФОЕ легких и во время маневра перекрытия потока, определить коэффициент пропорциональности между $\Delta P_{рот}$ и $\Delta V_{кам}$, т.е. угол α .

Оценка величины бронхиального сопротивления происходит следующим образом: R_{aw} прямо пропорционально движущему давлению в дыхательных путях (ДП) и обратно пропорционально скорости потока воздуха [5]:

$$R_{aw} = \Delta P/V' \quad (7).$$

В момент перекрытия потока $\Delta P = \Delta P_{рот}$. В уравнении (7) умножим числитель и знаменатель на $\Delta V_{кам}$:

$$R_{aw} = (\Delta P_{рот} \times \Delta V_{кам}) / (V' \times \Delta V_{кам}) \quad (8).$$

Перепишем уравнение (8) следующим образом:

$$R_{aw} = (\Delta P_{рот}/\Delta V_{кам}) \times (\Delta V_{кам}/V') \quad (9)$$

Для определения величины бронхиального сопротивления в координатах ($V_{кам} - V'$) записываются пневмотахограммы (рис. 2) и определяется угол их наклона β , где

$$\operatorname{tg} \beta = V'/\Delta V_{кам} \quad (10).$$

Подставив уравнения (5) и (10) в уравнение (9), получим

$$R_{aw} = \operatorname{tg} \alpha / \operatorname{tg} \beta \quad (11).$$

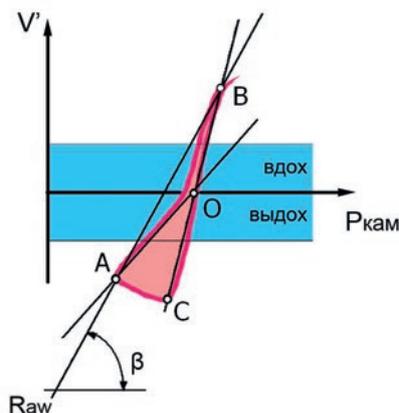


Рисунок 2. Петля бронхиального сопротивления: β — угол наклона петли к оси абсцисс; O — точка смены фаз дыхания; A — точка максимального изменения $V_{кам}$ на выдохе; B — точка максимального изменения V' и $V_{кам}$ на вдохе.



Рисунок 3. При измерении внутригрудного объема легких необходимо плотно придерживать руками щеки и подбородок

Таким образом, для определения величины бронхиального сопротивления необходимо выполнить маневр перекрытия потока и измерить ВГО, а также зарегистрировать петли бронхиального сопротивления и определить угол наклона β .

Важным условием получения достоверных результатов бодиплетизмографии является правильное выполнение всех необходимых измерений. Для этого ежедневно перед началом работы необходимо проводить калибровку пневмотахографа 3-литровым калибровочным шприцем и калибровку камеры. Все современные бодиплетизмографы, как правило, оснащены датчиками, определяющими параметры окружающей среды (температуру воздуха в помещении, относительную влажность и $R_{атм}$). В этом случае нет необходимости ежедневно вводить вышеперечисленные параметры перед калибровкой пневмотахографа.

Очень важно соблюдать правильное введение данных пациента: возраст, пол, рост и массу тела. Мы рекомендуем рост и массу тела пациента измерять, а не записывать их со слов пациента.

Перед выполнением бодиплетизмографии пациенту надо объяснить весь ход исследования и попросить внимательно выполнять команды, подаваемые врачом. Необходимо предупредить, что исследование будет проводиться в закрытой кабине не более 15 мин, при этом пациент будет видеть врача и слышать его команды. В случае ухудшения самочувствия (головокружение, нехватка воздуха и т.д.) или боязни замкнутого пространства пациент может отсоединиться от загубника и открыть кабину.

Пациенту усаживают на стул в камеру, объясняют весь ход исследования и затем закрывают дверь. Приблизительно 2 мин требуется для выравнивания давления и температуры внутри плетизмографа. В это время пациент спокойно дышит, что приводит к нагреванию и увлажнению воздуха. По команде врача пациент надевает на нос зажим, берет в рот загубник, крепко обхватывает его зубами и губами, язык должен находиться под загубником. Подсоединение пациента через загубник к аппарату должно быть герметичным. Пациент начинает спокойно дышать через загубник. При этом необходимо руками плотно придерживать щеки и подбородок, так как во время маневра перекрытия потока щеки раздуваются, создавая дополнительный объем, который сказывается на конечном результате исследования (рис. 3).

Только после установления стабильного дыхания (не менее 4 дыхательных циклов) при спокойном выдохе пациент услышит команду врача «Будет перекрытие» (традиционно ВГО измеряется после спокойного выдоха, на уровне ФОЕ). Одновременно врач нажимает соответствующую «иконку» на экране. Пациент почувствует препятствие на вдохе (поступление воздуха будет перекрыто специальным клапаном). В этот момент, придерживая руками щеки, в течение нескольких секунд необходимо имитировать дыхание: выполнить поверхностные, неглубокие «дыхательные» движения

с частотой не более 1 Гц или 60 дыханий в минуту [2]. Этот маневр целесообразно отретпировать до начала исследования, закрывая пневмотахограф рукой с противоположной стороны от загубника в конце одного из выдохов. Показатель частоты дыхания во время маневра перекрытия потока целесообразно вывести на экран (если это возможно) для контроля его величины во время выполнения попыток.

От частоты дыхания зависит сопротивление ДП и распределение воздуха в легких, а следовательно, измеряемые объемы. Во время маневра перекрытия потока у пациентов с бронхиальной обструкцией при увеличении частоты дыхательных движений более 60 в минуту будет происходить переоценка величины ФОЕ и ООЛ.

Как и при других исследованиях функции легких, рекомендуется записать и сохранить три воспроизводимых измерения ВГО. Далее все полученные графические и цифровые данные должны быть проанализированы на соответствие критериям качества проведения исследования [6].

После определения ВГО необходимо выполнить маневр ЖЕЛ.

Регистрация петель бронхиального сопротивления при бодиплетизмографическом исследовании не требует больших усилий от пациента, так как производится при спокойном дыхании. Как и при других измерениях, пациент

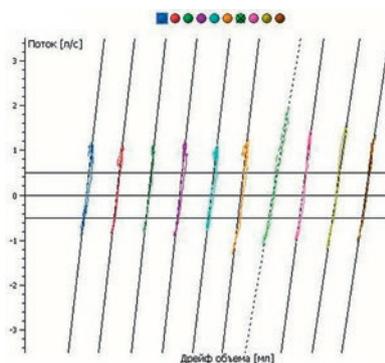


Рисунок 4. Петли бронхиального сопротивления.

должен сидеть прямо, не сгибая шею. Во время одного исследования рекомендуется зарегистрировать, по крайней мере, 5–10 петель. Петли Raw записывают при дыхании пациента через загубник точно с такой же частотой, как во время маневра перекрытия потока, так как для расчета количественного показателя бронхиального сопротивления используется величина ВГО. Кроме того, от частоты дыхания зависит сопротивление ДП: чем чаще пациент дышит, тем более выражена неравномерность легочной вентиляции, тем выше бронхиальное сопротивление. Следовательно, для того чтобы можно было сравнивать полученные показатели бронхиального сопротивления при повторных исследованиях, пациенту необходимо задавать одну и ту же частоту дыхания. Удобно для этой цели использовать метроном.

Таблица 1

Границы нормы и градации отклонений от нормы объемов и емкостей легких

Показатели	Норма	Степень тяжести		
		Легкая	Средняя	Тяжелая
ОЕЛ, %долж.	85–125	126–135	136–145	>145
	85–115	116–125	126–140	>140
	85–115	84–75	74–60	<60
	81–125	126–135	136–145	>145
	81–125	80–75	74–60	<60
ЖЕЛ, %долж.	≥81	80–71	70–51	<51
	≥85	84–70	69–50	<50
ВГО, %долж.	80–120	–	–	–
	85–140	141–190	191–230	>230
	85–140	84–70	69–51	<51
ООЛ, %долж.	85–140	141–175	176–225	>225
	85–140	84–70	69–50	<50
	85–150	151–200	201–250	>250
	85–150	84–70	69–50	<50
ООЛ/ОЕЛ, % %долж.	Должное +8% <140	Должное +(9–15)% 141–170	Должное +(16–25)% 171–210	Должное + >25% >210
РОВЫД, %долж.	80–120	–	<60	–
ЕВД, %долж.	80–120	–	<60	–

Качественный контроль петель бронхиального сопротивления можно осуществлять на графиках: правильно зарегистрированные петли должны идти параллельно друг другу (рис. 4) или накладываться друг на друга [7]. Количественные критерии воспроизводимости показателей бронхиального сопротивления в современной литературе не представлены.

Измерения статических легочных объемов и бронхиального сопротивления целесообразно дополнять форсированной спирометрией.

Таким образом, при выполнении вышеперечисленных требований проведения бодиплетизмографии будут получены оптимальные показатели ВГО и бронхиального сопротивления, что позволит сравнивать результаты проведенных исследований между собой, даже если повторные исследования будут проводиться в разных медицинских учреждениях. При анализе легочных объемов у взрослых используют должные значения, которые рассчитываются по формулам, рекомендуемым Американским торакальным и Европейским респираторными обществами (АТО/ЕРО, 2005) [8]. Как правило, результаты выражают в процентах от должного значения (%долж.): полученное значение/должное значение × 100%.

В настоящее время нет единых границ нормы и градаций отклонений от нормы объемов и емкостей легких. Обзор литературы по этому вопросу представлен в таблице 1 [6].

У 5% здоровых людей из общей популяции показатели могут быть выше и у 5% — ниже нормальных значений, которые определяются 90% доверительным интервалом. Поэтому в некоторых случаях целесообразно сравнивать фактические значения объемов в литрах (л) с диапазоном НГН и ВГН [11]: НГН = должное значение — 1,64 × σ; ВГН = должное значение + 1,64 × σ, где должное значение рассчитывается по формуле должных величин; σ — стандартное отклонение от среднего. Значения 1,645 × σ для легочных объемов у взрослых от 18 до 70 лет опубликованы Quanjer Ph.N с соав. [4]. Современные бодиплетизмографы позволяют выводить на экран и в протокол не только средние значения должных величин, но и значения НГН и ВГН.

Показатель ОЕЛ считается сниженным, если его фактическое значение (л) в меньше НГН, и увеличенным, если его фактическое значение превышает ВГН.

Показатель ЖЕЛ считается сниженным, если его фактическое значение (л) меньше НГН.

Обращаем внимание на то, что в отличие от остальных легочных объемов и емкостей показатели ЖЕЛ и составляющие ее Евд и РО_{выд} имеют однонаправленную градацию изменений в сторону уменьшения.

Для Евд и РО_{выд} НГН и ВГН не вычисляются, поэтому их величины считаются умеренно сниженными, если они попадают в диапазон 60–80%долж., и значительно сниженными — менее 60%долж.

Внутригрудной объем газа считается увеличенным, если его фактическое значение (л) превышает ВГН. Снижение ВГО не имеет какого-либо клинического значения, так как может быть обусловлено как снижением ООЛ, так и снижением РО_{выд}.

Остаточный объем легких считается сниженным, если его величина менее 85%долж., и увеличенным — если его фактическое значение (л) превышает ВГН.

Для оценки степени отклонения показателя ООЛ/ОЕЛ мы предпочитаем пользоваться градацией, предложенной Л. Л. Шиком и Н. Н. Канаевым (см. табл. 1) [1].

Относительно небольшое число исследований было посвящено выработке должных значений Raw у взрослых. У взрослых возраст не оказывает существенного значения на величину Raw. В качестве верхней границы нормы для мужчин и женщин было выбрано значение равное 0,30 кПа • с/л [1, 9]. Градации отклонений от нормы показателей Raw приведены в табл. 2 [1].

Таким образом, бодиплетизмография позволяет оценить:

- величину ОЕЛ, снижение которой свидетельствует о рестриктивном нарушении вентиляционной функции легких;
- ЖЕЛ, которая снижается как при рестриктивном, так и выраженном обструктивном нарушениях вентиляции;

Таблица 2
Границы нормы и градации отклонений от нормы показателей бронхиального сопротивления (Raw)

Raw, кПа•с/л	Изменения
≤0,30	Норма
0,31–0,59	Умеренное увеличение
0,60–0,80	Значительное увеличение
>0,8	Резкое увеличение

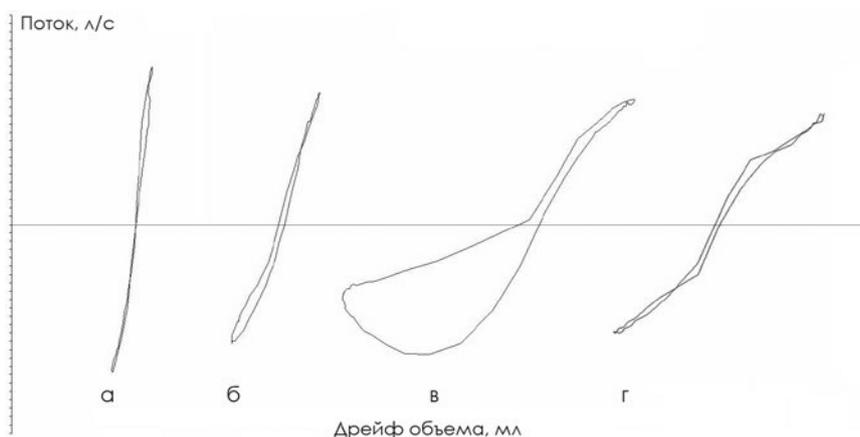


Рисунок 5. Схематическое представление петель бронхиального сопротивления: а — при отсутствии бронхиальной обструкции; б — при умеренной бронхиальной обструкции; в — при выраженной бронхиальной обструкции; г — при фиксированной обструкции верхних ДП. Верхние части кривых описывают фазу вдоха, нижние части кривых — фазу выдоха.

- ООЛ и его отношение к ОЕЛ, увеличение которых при наличии обструкции позволяет диагностировать наличие «воздушных ловушек»; снижение ООЛ происходит при рестриктивном нарушении вентиляции [6];
- ВГО, увеличение которого при наличии бронхиальной обструкции свидетельствует о гиперинфляции легких [6];
- бронхиальное сопротивление.

При интерпретации бронхиального сопротивления анализируют как форму петель специфического сопротивления, так и количественные данные. При качественном анализе петель (рис. 5) [7] видно, что при отсутствии бронхиальной обструкции петли узкие, характеризуются расположением, близким к вертикальному (рис. 5а). При бронхиальной обструкции петля становится более полой, происходит увеличение ее наклона к оси объема (рис. 5б), «булавовидные» расширения в фазу выдоха (рис. 5в) свидетельствуют о выраженной бронхиальной обструкции, наличии «воздушных ловушек». При фиксированной внегрудной обструкции петли имеют S-образный вид (рис. 5г).

Таким образом, бодиплетизмография является важным дополнением

к спирометрии и рентгеновским методам исследования, что позволяет более объективно оценивать функциональное состояние легких, помогает проводить дифференциальную диагностику и контролировать течение заболевания.

Список литературы.

1. Шик Л.Л., Канаев Н.Н., ред. Руководство по клинической физиологии дыхания. Л.: Медицина, 1980.
2. Wanger J., Clausen J.L., Coates A. et al. Standardisation of the measurement of lung volumes. // Eur. Respir. J.— 2005.— Том 26, № 3.— С. 511–522.
3. Кольцун С.С. Методы определения остаточного объема легких // Функциональная диагностика.— 2003.— № 1.— С. 65–76.
4. Quanjer Ph.H, Tammeling G. J., Cotes J.E. et al. Lung volumes and forced ventilatory flows // Eur. Respir. J.— 1993.— Vol. 6, Suppl. 16.— С. 5–40.
5. Крофтон Дж., Дуглас А. Заболевания органов дыхания. М.: Медицина, 1974.
6. Савушкина О.И., Черняк А.В., ред. Легочные функциональные тесты: от теории к практике. Руководство для врачей. М.: Фирма Стром; 2017.
7. Goldman M. D., Smith H. J., Ulmer W. T. Whole-body plethysmography // In: Lung function testing. Ed. R. Goselink, H. Stam // Eur. Respir. Monograph. 2005.— Vol. 10, Monograph 31.— P. 15–43.
8. Pellegrino R., Viegi G., Brusasco V. et al. Interpretative strategies for lung function tests // Eur. Respir. J.— 2005.— Vol. 26, № 5.— С. 948–968.
9. Quanjer P. Standardized lung function testing. // Bull. Eur. Physiopathol. Respir. 1983.— Vol. 19, Suppl. 5.— P. 33–38.