

ЛЕКЦИИ

УДК 612.221.4/24:616-073.173

DOI: 10.12737/20131

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БОДИПЛЕТИЗМОГРАФИИ И ЕЕ КЛИНИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

О.И.Савушкина¹, А.В.Черняк²

¹Центр функционально-диагностических исследований Федерального государственного казенного учреждения «Главный военный клинический госпиталь имени академика Н.Н.Бурденко» Министерства обороны Российской Федерации, 105094, г. Москва, пл. Госпитальная, 3

²Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт пульмонологии» Федерального медико-биологического агентства России, 105077, г. Москва, 11-я Парковая ул., 32

РЕЗЮМЕ

Одним из методов оценки вентиляционной функции легких является бодиплетизмография. Бодиплетизмография позволяет исследовать структуру общей емкости легких (ОЕЛ) и бронхиальное сопротивление (R_{aw}), то есть дает возможность определять те параметры, которые нельзя получить при проведении спирометрии, в том числе функциональную остаточную емкость легких (ФОЕ). ФОЕ, измеренная методом бодиплетизмографии, обозначается как внутригрудной объем газа (ВГО) и включает в себя как вентилируемые, так и плохо вентилируемые объемы. Метод бодиплетизмографии базируется на принципе взаимосвязи между давлением и объемом при постоянной температуре фиксированного количества газа. Данный принцип гласит: давление определенного количества газа при постоянной температуре изменяется обратно пропорционально объему (закон Бойля-Мариотта). При проведении бодиплетизмографии получают следующие параметры: ВГО, жизненную емкость легких (ЖЕЛ), резервный объем выдоха (РОВвд), дыхательный объем (ДО), резервный объем вдоха (РОВд), емкость вдоха (Евд), R_{aw} . Путем вычисления получают такие параметры как ОЕЛ, остаточный объем легких (ООЛ) и его долю в ОЕЛ. Уменьшение ОЕЛ позволяет диагностировать рестриктивный тип нарушения легочной вентиляции. Увеличение ООЛ и его доли в общей емкости легких при наличии обструкции воздухоносных путей (ВП) указывает на наличие воздушных ловушек. Увеличение ВГО при наличии

обструкции ВП позволяет диагностировать гиперинфляцию легких. При анализе легочных объемов используют должные значения, которые рассчитываются по формулам, рекомендуемым ERS и ATS 2005. Результаты выражают в процентах от должного значения. 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.

Ключевые слова: бодиплетизмография, общая емкость легких, внутригрудной объем газа, бронхиальное сопротивление.

SUMMARY

THEORETICAL AND METHODOLOGICAL ASPECTS OF BODY PLETHYSMOGRAPHY AND CLINICAL APPLICATIONS

O.I.Savushkina¹, A.V.Chernyak²

¹Center of Functional and Diagnostic Research of Main Military Clinical Hospital n.a. acad. N.N.Burdenko of Russian Federation Ministry of Defence, 3 Gospital'naya Sq., Moscow, 105094, Russian Federation

²Pulmonology Research Institute of Federal Medical and Biological Agency, 32 11th Parkovaya Str., Moscow, 105077, Russian Federation

One of the methods to evaluate lung function is body plethysmography. Body plethysmography allows to measure indicators that cannot be obtained during

spirometry, that is: total lung capacity (TLC), bronchial resistance (Raw), and functional residual capacity (FRC). FRC measured by body plethysmography reflects thoracic gas volume (TGV or VTG), and includes both ventilated and poorly ventilated volume. Plethysmographic measurements are based on the principle of the relationship between pressure and volume at constant temperature and fixed amount of gas. This principle states that the absolute pressure exerted by a given mass of an ideal gas is inversely proportional to the volume it occupies if the temperature and amount of gas remain unchanged within a closed system (Boyle-Marriott Law). In body plethysmography, the following parameters: TGV, vital capacity (VC), expiratory reserve volume (ERV), tidal volume (TV), inspiratory reserve volume (IRV), inspiratory capacity (IC), Raw are obtained. TLC, residual volume (RV) and its share in total lung capacity can be calculated. Reduced TLC allows to diagnose restrictive disorders of pulmonary ventilation. The RV and its share in TLC increase together with airway obstruction indicates air trapping. The TGV increase together with airway obstruction indicates hyperinflation. In the analysis of lung volumes predictive values, which are calculated by the formulas recommended by ATS/ERS statement, are used. The results are expressed as a percentage of the predicted value. Thus, body plethysmography is an important addition to spirometry and image methods of research, allowing to assess the functional state of the lungs more objectively; it helps to conduct the differential diagnosis and control the course of the disease.

Key words: body plethysmography, total lung capacity, intrathoracic gas volume, airway resistance.

Одним из методов оценки вентиляционной функции легких является бодиплетизмография. Бодиплетизмография позволяет исследовать структуру общей емкости легких (ОЕЛ) и бронхиальное сопротивление (Raw), т.е. дает возможность определять те параметры, которые нельзя получить при проведении спирометрии, в том числе функциональную остаточную емкость легких (ФОЕ).

Ранее для определения ФОЕ легких использовались методы разведения газов (газодилуционные методы): метод разведения гелия в закрытой системе, вымывание азота методом множественных дыханий и методом одиночного вдоха, а также другие методы.

В настоящее время для оценки статических легочных объемов в процессе естественного дыхания широко применяется именно бодиплетизмография как более точный и быстрый метод [3], тогда как методы разведения газов чаще используются для оценки равномерности легочной вентиляции.

ФОЕ, измеренная методом бодиплетизмографии, обозначается как внутригрудной объем газа (ВГО). Различие газодилуционных методов и бодиплетизмографии заключается в том, что ФОЕ легких, измеренная газодилуционным методом, отражает лишь вентилируемый объем, тогда как ФОЕ легких, измеренная бодиплетизмографически, включает как вентилируемые, так и невентилируемые или плохо вентилируемые

объемы (например, «воздушные ловушки», буллы, кисты) и обозначается как ВГО. У здоровых лиц существенных различий между ФОЕ легких и ВГО газа не обнаружено, что послужило основанием для использования в клинической практике величины показателя ВГО в целях изучения ОЕЛ [5].

При проведении бодиплетизмографии получают следующие параметры: ВГО, жизненную емкость легких (ЖЕЛ), резервный объем выдоха (РОВд), дыхательный объем (ДО), резервный объем вдоха (РОВв), емкость вдоха (Евд = ДО + РОВв), Raw.

Путем вычисления получают следующие параметры:

- общая емкость легких: $ОЕЛ = ВГО + Евд$;
- остаточный объем легких: $ООЛ = ОЕЛ - ЖЕЛ$;
- отношение остаточного объема легких к общей емкости легких: $ООЛ/ОЕЛ$.

Метод бодиплетизмографии базируется на принципе взаимосвязи между давлением и объемом при постоянной температуре фиксированного количества газа. Данный принцип гласит: объем (V) определенного количества газа при постоянной температуре изменяется обратно пропорционально давлению (P) (закон Бойля-Мариотта) [5], т.е. $P \times V = const$.

При проведении бодиплетизмографии пациент находится в закрытой, практически герметичной камере постоянного объема при постоянной температуре газа, вентилируя воздух через загубник. Герметичность камеры является достаточно «условной» и регулируется закрытием/открытием небольших отверстий, что позволяет избежать подъемов давления в камере вследствие нагревания воздуха обследуемым. Кроме того, необходимо пояснить, что существует три типа боди-камер: постоянного объема, измеряющие давление; переменного объема; измеряющие объем и давление. В статье речь пойдет о боди-камере постоянного объема.

Исследование выполняется при спокойном дыхании пациента через загубник (рис. 1), исключив носовое дыхание путем наложения носового зажима. Движение грудной клетки, осуществляемое в процессе дыхания, вызывает в камере колебания давления, датчик давления фиксирует изменение давления воздуха в камере (Ркам), одновременно с этим, измеряется давление в ротовой полости (Ррот). Попутно с помощью пневмотахографа регистрируется вдыхаемый и выдыхаемый пациентом воздушный поток.

В конце одного из выдохов на уровне ФОЕ дыхание пациента кратковременно прерывается путем закрытия дыхательной трубки специальным клапаном. При закрытой дыхательной трубке пациент совершает дыхательные движения, «дышит» поверхностно и часто, осуществляя компрессию и декомпрессию оставшегося в легких воздуха после спокойного выдоха с частотой 0,5-1 Гц или 30-60 «дыхательных» движений в минуту [14]. Во время маневра перекрытия потока воздуха (газ), содержащийся в легких пациента, при выдохе сжимается, при вдохе разрежается. В это время производятся измерения Ркам и Ррот (при отсутствии потока Ррот является эквивалентом альвеолярного давления – Ральв). Камера и пациент являются связан-

ными системами: при вдохе происходит увеличение ВГО, вследствие чего свободный объем камеры ($V_{\text{кам}}$) уменьшается, что приводит к увеличению $P_{\text{кам}}$. При выдохе наблюдается обратный процесс. Таким образом, колебания давления в камере являются отображением изменения ВГО газа ($\Delta V_{\text{вго}}$): $\Delta P_{\text{кам}} \sim \Delta V_{\text{вго}}$.

Связь между изменениями $P_{\text{кам}}$ ($\Delta P_{\text{кам}}$) и $V_{\text{кам}}$ ($\Delta V_{\text{кам}}$) устанавливается в процессе калибровки кабины, когда рассчитывается коэффициент K [13]:

$$\Delta P_{\text{кам}} = -K \times \Delta V_{\text{кам}},$$

Таким образом, изменение объема камеры вследствие изменения ВГО в момент перекрытия потока можно вычислить по изменению давления в ней. Знак «-» в данном соотношении учитывает обратно пропорциональную зависимость между величиной давления в камере и ее свободным объемом.

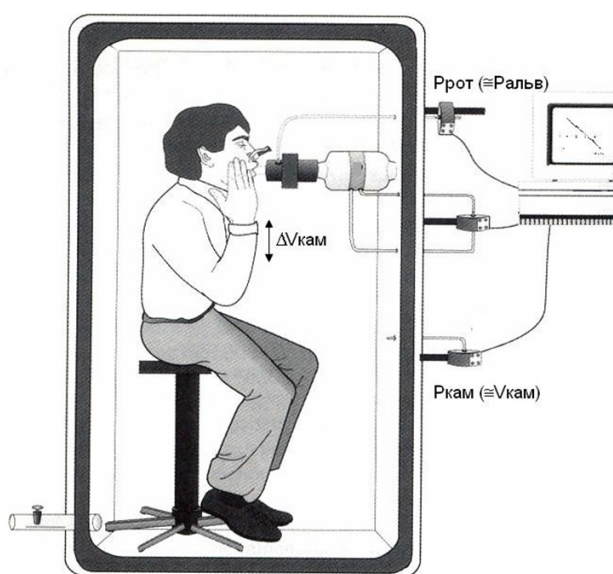


Рис. 1. Пациент во время бодиплетизмографического исследования.

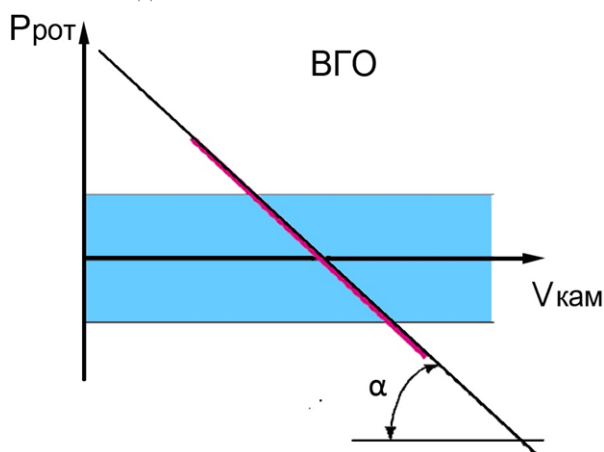


Рис. 2. Графическое представление зависимости $P_{\text{рот}}$ от $V_{\text{кам}}$ во время маневра перекрытия потока: изменение $P_{\text{рот}}$ соответствует изменению $V_{\text{кам}}$; α – угол наклона кривой «давления перекрытия».

Взаимоотношение между начальными $P_{\text{рот}}$ и ВГО газа с уровня спокойного выдоха (т.е. с уровня ФОЕ) и $P_{\text{рот}}$ и ВГО газа во время имитации дыхания можно за-

писать в виде следующего уравнения (закон Бойля-Мариотта для замкнутой системы ротовая полость – легкие):

$$P_{\text{рот}} \times \text{ВГО} = (P_{\text{рот}} + \Delta P_{\text{альв}})(\text{ВГО} + \Delta V_{\text{вго}}) \quad (1)$$

где $P_{\text{рот}}$ – начальное давление в ротовой полости на уровне ФОЕ (при спокойном выдохе); ВГО – внутригрудной объем газа в конце спокойного выдоха (в нашем случае аналог ФОЕ); $\Delta P_{\text{альв}}$ – 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 (альвеолярного) объема в процессе маневра перекрытия потока при попытке вдоха (при попытке выдоха мы должны отнять $\Delta V_{\text{вго}}$ от ВГО). Нет никакой разницы, для какой фазы дыхания мы запишем первоначальное уравнение (1). Конечный результат будет одинаковым.

Решая уравнение (1) относительно ВГО [6, 7], получаем:

$$\text{ВГО} = K \times P_{\text{рот}} \times 1/\tan \alpha \quad (2)$$

$$\text{где } \tan \alpha = \Delta P_{\text{рот}} / \Delta V_{\text{кам}} \quad (3)$$

Отношение $\Delta P_{\text{рот}} / \Delta V_{\text{кам}}$ (тангенс угла наклона α) рассчитывается в момент перекрытия потока, когда в координатах ($V_{\text{кам}}$; $P_{\text{рот}}$) регистрируются петли «давления перекрытия» (рис. 2) [3]. На представленном графике показана зависимость изменения $P_{\text{рот}}$, которое в момент перекрытия потока становится равным $P_{\text{альв}}$, от изменения $V_{\text{кам}}$, которое меняется обратно пропорционально изменению $P_{\text{кам}}$.

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

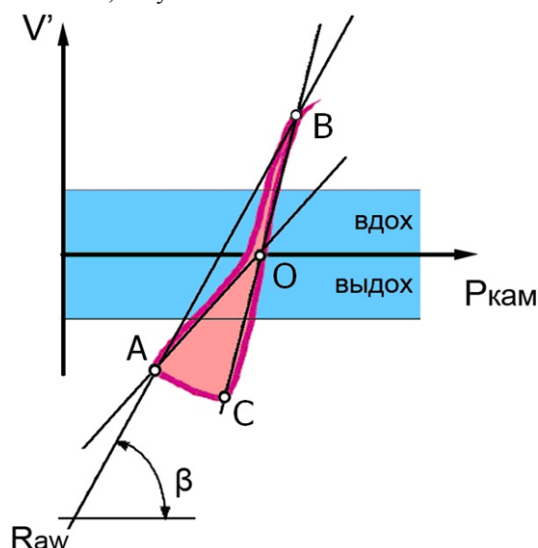


Рис. 3. Петля бронхиального сопротивления. β – угол наклона петли бронхиального сопротивления к оси давления; О – точка смены фаз дыхания; А – точка пика давления на выдохе; В – точка пика потока и пика давления на вдохе; С – точка пика потока на выдохе.

Для оценки величины R_{aw} в координатах ($P_{\text{кам}}$; V'), где V' – скорость потока воздуха в воздухоносных

путях (ВП), записываются петли бронхиального сопротивления – пневмотахограммы (фаза вдоха над осью давления, фаза выдоха – под осью давления) и определяется угол их наклона β ($\text{tg } \beta = V' / \Delta P_{\text{кам}}$) (рис. 3).

Таким образом, обработка зарегистрированных петель бронхиального сопротивления состоит в определении наклона этих петель к оси давления. Это позволяет произвести количественную оценку показателей бронхиального сопротивления: бронхиальное сопротивление прямо пропорционально движущему давлению в ВП (ΔP) и обратно пропорционально V' [4]:

$$Raw = \Delta P / V' \quad (4)$$

где в момент перекрытия потока $\Delta P = \Delta P_{\text{альв}}$

В уравнении (4) умножим числитель и знаменатель на давление в камере ($\Delta P_{\text{кам}}$). Получим:

$$Raw = (\Delta P_{\text{альв}} \times \Delta P_{\text{кам}}) / (V' \times \Delta P_{\text{кам}}) \quad (5)$$

Перепишем уравнение (5) следующим образом:

$$Raw = (\Delta P_{\text{альв}} / \Delta P_{\text{кам}}) \times (\Delta P_{\text{кам}} / V') \quad (6)$$

$$\text{где } \Delta P_{\text{кам}} / V' = 1 / \text{tg } \beta \quad (7)$$

Принимая во внимание, что $\Delta P_{\text{альв}} / \Delta P_{\text{кам}} \sim \Delta P_{\text{рот}} / \Delta V_{\text{кам}}$, подставим уравнения (3) и (7) в уравнение (6) и получим:

$$Raw = \text{tg } \alpha / \text{tg } \beta \quad (8)$$

Таким образом, для количественной оценки показателей бронхиального сопротивления необходимо вычислить не только величину угла β , но и провести маневр перекрытия потока и определить угол α (рис. 2).

В зависимости от того, какое бронхиальное сопротивление мы хотим определить: на вдохе ($Raw_{\text{вд}}$ или $R_{\text{ин}}$), выдохе ($Raw_{\text{выд}}$ или $R_{\text{ех}}$), общее бронхиальное сопротивление (иначе бронхиальное сопротивление по пику давления, $Raw_{\text{общ}}$ или $R_{\text{тот}}$) или бронхиальное сопротивление по пику потока ($Raw_{\text{поток}}$ или R_{peak}), оценивают разные углы наклона β [6, 7].

При анализе легочных объемов используют должные значения, которые рассчитываются по формулам, рекомендуемым совместным соглашением Американского торакального общества (ATS) и Европейского респираторного общества (ERS), опубликованном в 2005 году [12]. Как правило, результаты выражают в процентах от должного значения (%долж.): полученное значение/должное значение $\times 100\%$.

В настоящее время нет единых границ нормы и градаций отклонений от нормы объемов и емкостей легких. Обзор литературы по этому вопросу представлен в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Границы нормы и градации отклонений от нормы объемов и емкостей легких

Показатель	Норма	Степень тяжести			Источник
		Легкая	Средняя	Тяжелая	
ОЕЛ, %долж.	85–125	126–135	136–145	>145	[8]
	85–115	116–125	126–140	>140	[5]
	85–115	84–75	74–60	<60	[5]
	81–125	126–135	136–145	>145	[2]
	81–125	80–75	74–60	<60	[2]
ЖЕЛ, %долж.	≥ 81	80–71	70–51	<51	[2], [8]
	≥ 85	84–70	69–50	<50	[5]
ВГО, %долж.	80–120	-	-	-	[7]
	85–140	141–190	191–230	>230	[2]
	85–140	84–70	69–51	<51	[2]
ООЛ, %долж.	85–140	141–175	176–225	>225	[5]
	85–140	84–70	69–50	<50	[5]
	85–150	151–200	201–250	>250	[2]
	85–150	84–70	69–50	<50	[2]
	Долж. ± 8	Долж. + (9-15)	Долж. + (16-25)	Долж. + 25 и более	[5]
ООЛ/ОЕЛ, %	<140	141–170	171–210	>210	[2]
РОВЫД, %долж.	80–120	-	<60	-	-
Евд, %долж.	80–120	-	<60	-	-

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 лит-

рах (л) с диапазоном нижняя граница нормы (НГН, л) и верхняя граница нормы (ВГН, л) [10]:

$$\text{НГН} = \text{должное значение} - 1,645 \times \sigma,$$

$$\text{ВГН} = \text{должное значение} + 1,645 \times \sigma,$$

где должное значение – среднее по выборке изме-

ренное значение (σ), которое рассчитывается по формуле должных величин; σ – стандартное отклонение от среднего.

Современные бодиплетизмографы позволяют выводить в протокол не только средние значения должных величин, но и значения НГН и ВГН.

Для показателя ОЕЛ диапазоны 115–125 %долж. и 81–85 %долж. мы считаем условной нормой, так как по одним данным верхней границей нормы считается 115 %долж. и нижней – 85%долж; по другим данным верхней границей нормы считается 125 %долж. и нижней – 81 %долж. (табл. 1). Поэтому необходимо обращать внимание на попадание фактического значения ОЕЛ (σ) в диапазон значений НГН (σ) и ВГН (σ). То же касается ЖЕЛ: при получении показателя ЖЕЛ от 81–85 %долж. целесообразно сравнивать фактическое значение ЖЕЛ (σ) с НГН (σ). Встречаются случаи, когда у пожилых пациентов показатель ЖЕЛ оказывается чуть ниже 81 %долж., однако, фактическое его значение превышает НГН (σ). В таких ситуациях показатель ЖЕЛ считаем в пределах нормы. Обращаем внимание на то, что в отличие от остальных легочных объемов и емкостей показатели ЖЕЛ и составляющие ее Евд и РОвд имеют однонаправленную градацию изменений в сторону уменьшения.

Для Евд и РОвд НГН (σ) и ВГН (σ) не вычисляются, поэтому их величины считаются умеренно сниженными, если они попадают в диапазон 80–60 %долж. и значительно сниженными – менее 60 %долж.

Внутригрудной объем газа считается увеличенным, если его значение по данным разных авторов превышает 120 %долж. [7], 140 %долж. [2] или 150 %долж. [8]. Поэтому при увеличении ВГО более 120 %долж. целесообразно сравнивать его фактическое значение (σ) с ВГН (σ).

Остаточный объем легких считается сниженным, если его величина менее 85 %долж., и увеличенным – если его значение по данным разных авторов превышает 140 %долж. [5] или 150 %долж. [2]. Поэтому при увеличении ООЛ более 140 %долж. также целесообразно сравнивать его фактическое значение (σ) с ВГН (σ).

Для оценки степени отклонения показателя ООЛ/ОЕЛ мы предпочитаем пользоваться градацией, предложенной Л.Л.Шиком и Н.Н.Канаевым (табл. 1) [5].

Таблица 2

Норма и градации отклонения от нормы показателей бронхиального сопротивления

Raw, кПа×с/л	Изменения
0,31–0,59	Умеренное увеличение
0,60–0,80	Значительное увеличение
>0,8	Резкое увеличение

При оценке показателей бронхиального сопротивления фактическое полученное значение сравнивается с верхней границей нормы (0,3 кПа×с/л). Норма и градации отклонения от нормы показателей бронхиаль-

ного сопротивления приведены в таблице 2 [5].

Кроме того, метод бодиплетизмографии позволяет качественно оценить форму петель бронхиального сопротивления, которые при разных патологических процессах в лёгких приобретают различный вид (рис. 4) [9]. У здорового человека петли бронхиального сопротивления узкие, характеризуются расположением, близким к вертикальному (рис. 4, а), при бронхиальной обструкции они расширяются, меняя форму, напрямую зависят от тяжести протекающего процесса (рис 4, б,в)

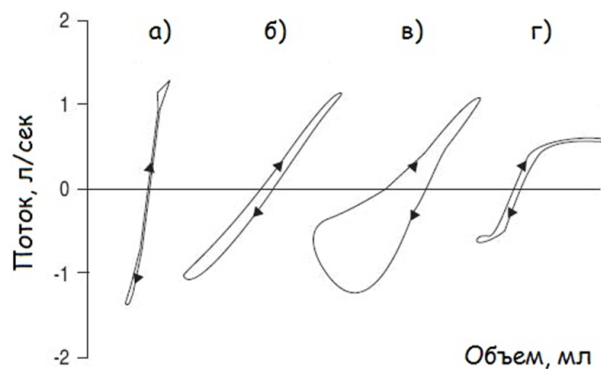


Рис. 4. Схематическое представление петель бронхиального сопротивления:

а) при отсутствии бронхиальной обструкции; б) при умеренной бронхиальной обструкции увеличение количественных показателей бронхиального сопротивления при линейной петле бронхиального сопротивления; в) при выраженной бронхиальной обструкции; при эмфиземе; г) при фиксированной обструкции верхних ВП.

Верхние части кривых описывают фазу вдоха, нижние части кривых – фазу выдоха; 0 – точка смены фаз дыхания.

При интерпретации результатов бодиплетизмографии обязательно оцениваются следующие показатели:

1. Общая емкость легких.

Снижение ОЕЛ свидетельствует о рестриктивных нарушениях легочной вентиляции, при которых снижаются также ЖЕЛ и/или ООЛ. Обращаем внимание, что только при сниженной ОЕЛ можно делать заключение о нарушениях легочной вентиляции по рестриктивному типу.

Увеличение ОЕЛ происходит при выраженной бронхиальной обструкции. При увеличении ОЕЛ определяются также увеличенные ООЛ и ВГО газа [5].

2. Жизненная емкость легких.

Этот показатель снижается при многих видах патологии, а повышается при акромегалии и у здоровых лиц (например, у спортсменов).

Причины снижения ЖЕЛ:

- уменьшение объема легочной ткани (резекция легких, ателектаз);

- состояния, при которых уменьшается растяжимость легочной ткани (фиброз, застойная сердечная недостаточность);

- при обструктивных легочных заболеваниях ЖЕЛ также может снижаться за счет замедления опорожнения легких (экспираторное закрытие ВП);

- патология плевры и плевральных полостей (утолщение плевры, плевральный выпот, опухоли плевры с распространением на легочную ткань);

- уменьшение размеров грудной клетки – легкие не могут расправляться и спадаться в полной мере, если движения грудной стенки ограничены;

- нарушение нормальной работы дыхательных мышц, в первую очередь диафрагмы, межреберных мышц и мышц брюшной стенки, которые обеспечивают расправление и опустошение легких.

3. Остаточный объем легких.

Увеличение ООЛ часто встречается у пациентов с обструктивными заболеваниями легких, у которых из-за отека стенок бронхов, сокращения гладкой мускулатуры, воспалительной клеточной инфильтрации, снижения эластической отдачи легочной ткани увеличивается сопротивление ВП, а, следовательно, время выдоха, что препятствует опустошению альвеол и способствует возникновению «воздушных ловушек» [10]. Таким образом, по результатам бодиплетизмографии делать заключение о «воздушных ловушках» можно в том случае, если при наличии признаков бронхиальной обструкции увеличивается ООЛ и его вклад в структуру ОЕЛ, т.е. увеличивается показатель ООЛ/ОЕЛ. Нормальные данные спирометрии и увеличение ООЛ, а также сочетание увеличенного ООЛ с нормальным бронхиальным сопротивлением на выдохе [3] указывают на изолированную обструкцию мелких (менее 2 мм в диаметре) бронхов, т.е. на изолированную дистальную обструкцию [5].

Снижение ООЛ происходит при рестриктивном нарушении легочной вентиляции. Однако при некоторых заболеваниях легких, таких как саркоидоз, пневмония, часто выявляется изолированное снижение ООЛ, что, по мнению Л.Л.Шика и Н.Н.Канаева [5], обусловлено увеличением радиальной тяги эластических элементов легких, которое препятствует спадению бронхов на выдохе и, таким образом, способствует уменьшению воздушности легочной ткани. Кроме того, снижение ООЛ иногда является единственным физиологическим отклонением у пациентов с заболеваниями грудной клетки, например, со скелетной деформацией, или патологией внутренних органов (застойная сердечная недостаточность, инфекционные заболевания) [13].

4. Отношение остаточного объема легких к общей емкости легких (ООЛ/ОЕЛ) – характеризует, какой объем в структуре ОЕЛ занимает ООЛ.

Увеличение отношения ООЛ/ОЕЛ при выявлении признаков бронхиальной обструкции и увеличении ООЛ указывает на наличие «воздушных ловушек» [10].

5. Внутригрудной объем газа – это емкость, которая включает в себя ООЛ и РОвыд ($ВГО = ООЛ + РОвыд$).

Увеличение ВГО газа чаще всего обусловлено нарушением бронхиальной проходимости. При выраженной бронхиальной обструкции происходит замедление выдоха и рефлекторное его прерывание из-за быстрого нарастания альвеолярного давления, что обуславливает экспираторный коллапс ВП и приводит к увеличению не только ООЛ, но и ВГО. Увеличение ВГО при

наличии бронхиальной обструкции свидетельствует о гиперинфляции легких [10].

Увеличение ВГО при бронхиальной обструкции с неизменными эластическими свойствами легочной ткани является следствием не только патологических нарушений, но и компенсаторно-приспособительных реакций. При увеличении ВГО происходит смещение уровня дыхания в инспираторную сторону, что приводит к увеличению эластической отдачи легких и способствует уменьшению энергозатрат на осуществление выдоха. Растяжение эластических структур легочной ткани передается на стенки внутрилегочных ВП, увеличивая тем самым силы, растягивающие бронхи и препятствующие их коллабированию на выдохе. Кроме того, увеличение ВГО создает условия для раскрытия пор Кона и коллатеральной вентиляции (отдельные группы альвеол связаны между собой порами Кона, диаметр которых близок к диаметру альвеол; по этим путям осуществляется коллатеральная вентиляция). Необходимо отметить, что рост ВГО газа при сохраненных эластических свойствах легочной ткани приводит к увеличению поверхности диффузии и улучшению условий газообмена [5].

Увеличение ВГО при утрате легкими эластических свойств уже не обуславливает, как в случае бронхиальной обструкции, уменьшение активной работы выдоха, а приводит к увеличению энергозатрат и ухудшению условий газообмена.

Изолированное увеличение ВГО при нормальном показателе ООЛ может быть обусловлено большим РОвыд. Общая емкость легких в этом случае может так же оказаться незначительно увеличенной.

Уменьшение ВГО газа чаще всего обусловлено снижением РОвыд и/или ООЛ.

6. Емкость вдоха (входит в структуру ЖЕЛ).

Показатель Евд позволяет косвенно судить о величине ВГО: при гиперинфляции легких Евд снижается, при этом ОЕЛ остается в пределах нормы или увеличивается. Кроме того, одним из ранних признаков рестриктивной патологии легких также является снижение Евд. Однако в этом случае показатель ОЕЛ также становится ниже НГН (л).

Таким образом, причину снижения Евд необходимо оценивать в комплексе с другими показателями.

7. Резервный объем выдоха (входит в структуру ЖЕЛ).

РОвыд может снижаться как при рестриктивном, так и обструктивном нарушении вентиляции. Изолированное снижение РОвыд может наблюдаться у лиц с патологическим ожирением, при слабости дыхательных мышц (прежде всего экспираторных), а также при асците и беременности [10].

8. Бронхиальное сопротивление.

Raw оценивается визуально по форме петель [1] и количественно по отклонению показателя от нормы. В случае увеличения показателей бронхиального сопротивления необходимо обратить внимание на соотношение выявленных изменений: величина бронхиального сопротивления увеличена на выдохе (Rawвыд), вдохе

(Rawvd), или показатели повышены в равной степени.

При бронхиальной обструкции происходит увеличение наклона петель бронхиального сопротивления к оси объема (рис. 4, б), появление изогнутостей, пересечений, расширений в области точки 0 и «булаво-видных» расширений в области выдоха (рис. 4, в). Расширения в области выдоха в виде булавы характеризуют утрату легкими эластических свойств и позволяют предположить наличие в легких зон, не имеющих связи с ВП, т.е. «воздушных ловушек» [5].

Повышение количественных показателей, как на выдохе, так и на вдохе при линейной петле бронхиального сопротивления свидетельствует о наличии бронхоспастических нарушений или обструктивного бронхита [5]. Повышение бронхиального сопротивления в большей степени на выдохе в сочетании с нелинейной формой петли (в этом случае петли бронхиального сопротивления становятся широкими, увеличивается их наклон к оси объема) указывает на неоднородность нарушений проходимости ВП [8]. Эта неоднородность может быть вызвана выраженными отечно-воспалительными изменениями, наличием плохо вентилируемых зон, несимметричным изменением просвета бронхов при дыхании, а также может быть обусловлена изменением эластических свойств легочной паренхимы. Последние три механизма характерны для эмфиземы легких [8].

Кроме того, сочетание нормального бронхиального сопротивления со снижением параметра максимальной объемной скорости выдоха на уровне 75% при маневре ФЖЕЛ (МОС₇₅), указывает на наличие нарушений проходимости мелких бронхов, тогда как повышение бронхиального сопротивления при нормальном показателе МОС₇₅ свидетельствует о локализации обструкции преимущественно в области крупных бронхов [5].

Таким образом, бодиплетизмография является важным дополнением к спирометрии и рентгеновским методам исследования, что позволяет более объективно оценивать функциональное состояние бронхолегочной системы, помогает проводить дифференциальную диагностику и контролировать течение заболевания легких.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белов А.А., Лакшина Н.А. Оценка функции внешнего дыхания. М.: Русский врач, 2006. 68 с.
2. Каменева М.Ю. Исследование функции внешнего дыхания // Интерстициальные заболевания легких: руководство для врачей / под ред. М.М.Ильковича, А.Н.Кокосова. СПб.: Нордмедиздат, 2005. С.50–59.
3. Кольцун С.С. Методы определения остаточного объема легких // Функциональная диагностика. 2003. №1. С.65–76.
4. Крофтон Дж., Дуглас А. Заболевания органов дыхания: пер. с англ. М.: Медицина, 1974. 734 с.
5. Руководство по клинической физиологии дыхания / под ред. Л.Л.Шика, Н.Н.Канаева. Л.: Медицина, 1980. 376 с.
6. Савушкина О.И. Бодиплетизмография: принцип

и возможности метода. Подходы к интерпретации результатов исследования // Функциональная диагностика. 2013. №3. С.48–53.

7. Савушкина О.И., Черняк А.В., Науменко Г.В. Бодиплетизмография: теоретические и клинические аспекты. М.: ГВКГ им. Н.Н.Бурденко, 2014. 45 с.

8. Современные проблемы клинической физиологии дыхания: сборник научных трудов / под ред. Р.Ф.Клементя, В.К.Кузнецовой. Л.: ВНИИ пульмонологии МЗ СССР, 1987. 145 с.

9. Стручков П.В., Винницкая Р.С., Люкевич И.А. Введение в функциональную диагностику внешнего дыхания. М., 1996. 72 с.

10. Черняк А.В. Измерение легочных объемов // Функциональная диагностика в пульмонологии: практическое руководство / под ред. А.Г.Чучалина. М.: Атмосфера, 2009. с.36–62.

11. Goldman M.D., Smith H.J., Ulmer W.T. Whole-body plethysmography // Lung function testing / R.Gosselink, H.Stam (eds) // Eur. Respir. Monogr. 2005. Vol.10. P.15–43.

12. Pellegrino R., Viegi G., Brusasco V., Crapo R.O., Burgos F., Casaburi R., Coates A., van der Grinten C.P.M., Gustafsson P., Hankinson J., Jensen R., Johnson D.C., MacIntyre N., McKay R., Miller M.R., Navajas D., Pedersen O.F., Wanger J. Interpretative strategies for lung function tests // Eur. Respir. J. 2005. Vol.26, №5. P.948–968.

13. Quanjer P.H., Tammeling G.J., Cotes J.E., Pedersen O.F., Peslin R., Yemault J.-C. Lung volumes and forced ventilator flows. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Steel and Coal. Official Statement of the European Respiratory Society // Eur. Respir. J. 1993. Vol.6, Suppl.16. P.5–40.

14. Wanger J., Clausen J.L., Coates A., Pedersen O.F., Brusasco V., Burgos F., Casaburi R., Crapo R., Enright P., van der Grinten C.P.M., Gustafsson P., Hankinson J., Jensen R., Johnson D., MacIntyre N., McKay R., Miller M.R., Navajas D., Pellegrino R., Viegi G. Standardisation of the measurement of lung volumes // Eur. Respir. J. 2005. Vol.26, №3. P.511–522.

REFERENCES

1. Belov A.A., Lakshina N.A. Evaluation of respiratory function. Methodological approaches and diagnostic value. Moscow: Russkiy vrach; 2006 (in Russian).
2. Kameneva M.Yu. Study of respiratory function. In: Il'kovich M.M., Kokosov A.N. (eds). Interstitial lung disease: a Guide for Physicians. St. Petersburg: Nordmedizdat; 2005:50–59 (in Russian).
3. Kol'tsun S.S. Methods for determination of functional residual capacity (FRC). *Funktsional'naya diagnostika* 2003; 1:65–76 (in Russian).
4. Crofton J., Douglas A. Respiratory diseases. Moscow: Meditsina; 1974 (in Russian).
5. Shik L.L., Kanaev N.N. Guidelines for Clinical Respiratory Physiology. Leningrad: Meditsina; 1980 (in Russian).
6. Savushkina O.I. Body plethysmography: Principles

and methods possibilities. The approaches to interpretation the study results. *Funktsional'naya diagnostika* 2013; 3:48–53 (in Russian).

7. Savushkina O.I., Chernyak A.V., Naumenko G.V. Body plethysmography: theoretical and clinical aspects. Moscow; 2014 (in Russian).

8. Klementa R.F., Kuznetsov V.K., editors. Modern problems of clinical physiology of respiration. Leningrad; 1987 (in Russian).

9. Struchkov P.V., Vinnitskaya R.S., Lyukevich I.A. Introduction to the functional diagnosis of external respiration. Moscow; 1996 (in Russian).

10. Chernyak A.V. Measurement of lung volumes. In: Chuchalin A.G. (ed.). Functional diagnosis in pulmonology: a Practical Guide. Moscow: Atmosfera; 2009: 36–62 (in Russian).

11. Goldman M.D., Smith H.J., Ulmer W.T. Whole-body plethysmography. In: Gosselink R., Stam H. (eds). Lung function testing. *Eur. Respir. Monogr.* 2005; 10:15–43.

12. Pellegrino R., Viegi G., Brusasco V., Crapo R.O., Burgos F., Casaburi R., Coates A., van der Grinten C.P.M., Gustafsson P., Hankinson J., Jensen R., Johnson D.C., MacIntyre N., McKay R., Miller M.R., Navajas D., Pedersen O.F., Wanger J. Interpretative strategies for lung function tests. *Eur. Respir. J.* 2005; 26(5):948–968.

13. Quanjer P.H., Tammeling G.J., Cotes J.E., Pedersen O.F., Peslin R., Yemault J.-C. Lung volumes and forced ventilator flows. Report Working Party Standardization of Lung Function Tests, European Community for Steel and Coal. Official Statement of the European Respiratory Society. *Eur. Respir. J.* 1993; 6(Suppl.16):5–40.

14. Wanger J., Clausen J.L., Coates A., Pedersen O.F., Brusasco V., Burgos F., Casaburi R., Crapo R., Enright P., van der Grinten C.P.M., Gustafsson P., Hankinson J., Jensen R., Johnson D., MacIntyre N., McKay R., Miller M.R., Navajas D., Pellegrino R., Viegi G. Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur. Respir. J.* 2005; 26(3):511–522.

Поступила 18.01.2016

Контактная информация

Ольга Игоревна Савушкина,

кандидат биологических наук,

заведующая отделением функции внешнего дыхания

Центра функционально-диагностических исследований,

Главный военный клинический госпиталь им. акад. Н.Н.Бурденко,

105094, г. Москва, пл. Госпитальная, 3.

E-mail: olga-savushkina@yandex.ru

Correspondence should be addressed to

Ol'ga I. Savushkina,

PhD, Head of Department of Respiratory Function of Center of Functional and Diagnostic Research,

Main Military Clinical Hospital n.a. acad. N.N.Burdenko,

3 Gospital'naya Sq., Moscow, 105094, Russian Federation.

E-mail: olga-savushkina@yandex.ru