

Клиническое применение метода бодиплетизмографии

О.И. Савушкина, А.В. Черняк

В статье обсуждается преимущество бодиплетизмографии перед другими методами в определении функциональной остаточной емкости легких, методология определения внутригрудного объема и бронхиального сопротивления, рассматриваются основные подходы к интерпретации полученных результатов, а также трактовка показателей с точки зрения патофизиологии.

Ключевые слова: бодиплетизмография, внутригрудной объем газа, бронхиальное сопротивление.

Большой интерес физиологов и клиницистов к изучению вопросов физиологии и патологии дыхания свидетельствует об актуальности и важном значении этой проблемы для клинической практики. Клиническая физиология дыхания, являясь одним из самых сложных разделов медицинских знаний, располагает самым обширным разнообразием диагностических методов по сравнению с возможностями функциональных исследований других органов и систем [1]. Одним из методов исследования функции внешнего дыхания является бодиплетизмография (БПГ).

Бодиплетизмография позволяет определить внутригрудной объем легких (ВГО) и оценить легочный объем и его составляющие, включая те из них, которые нельзя оценить при проведении спирометрии, а именно функциональную остаточную емкость легких (ФОЕ), остаточный объем легких (ООЛ), общую емкость легких (ОЕЛ), а также бронхиальное сопротивление (БС).

Ранее для определения ФОЕ использовали методы разведения газов (газодилуционные методы): метод разведения гелия в закрытой системе, вымывание азота методом множественных дыханий, вымывание азота методом одиночного вдоха и др. Однако сейчас эти методы не находят широкого применения в клинической практике.

В настоящее время широко используется БПГ, которая позволяет в течение 10–15 мин не только произвести несколько измерений ВГО (от 3 до 5), но и зарегистрировать показатели БС, петлю поток–объем и рассчитать ОЕЛ. Традиционно ВГО измеряется после спокойного выдоха, на уровне ФОЕ.

Различие описанных выше методов заключается в том, что ФОЕ, измеренная газодилуционным методом, отража-

ет лишь вентилируемый объем, тогда как ФОЕ, измеренная методом БПГ, включает как вентилируемые, так и не вентилируемые или плохо вентилируемые объемы (например, воздушные “ловушки”, буллы, бронхоэктазы, кисты). У здоровых лиц существенных различий между результатами этих измерений не обнаружено, что послужило основанием для использования ВГО в целях изучения ОЕЛ. Сравнительная характеристика методов определения ФОЕ представлена в табл. 1.

Таким образом, главной целью проведения БПГ является измерение ВГО, что позволяет оценить ОЕЛ и ее составляющие.

Методика проведения БПГ

Метод БПГ базируется на принципе взаимосвязи между давлением и объемом при постоянной температуре фиксированного количества газа, который гласит, что объем определенного количества газа при постоянной температуре изменяется обратно пропорционально давлению (закон Бойля). Современная формулировка этого закона такова: произведение давления газа на объем при постоянной температуре есть величина постоянная ($P \times V = \text{const}$) [2].

Исследование проводится следующим образом. Пациента усаживают в специальную закрытую герметичную кабину (камеру) с постоянным объемом воздуха. Пациент спокойно дышит через загубник. Во время исследования с

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов определения ФОЕ

Методы разведения газов	БПГ
- У пациентов с тяжелыми нарушениями бронхиальной проходимости дают неточные результаты (занижают истинные легочные объемы) вследствие наличия гиповентилируемых или не вентилируемых пространств - Перерыв между попытками достигает 10–20 мин	- Позволяет быстро произвести несколько измерений ФОЕ - Позволяет более точно оценить ФОЕ - Позволяет оценить БС (Raw) - Требует сложного технического оснащения - Требует от пациента четкого выполнения указаний врача

Ольга Игоревна Савушкина – канд. биол. наук, зав. отделением внешнего дыхания центра функционально-диагностических исследований Главного военного клинического госпиталя им. Н.Н. Бурденко Минобороны России, Москва.

Александр Владимирович Черняк – канд. мед. наук, зав. лабораторией функциональных и ультразвуковых методов исследования НИИ пульмонологии ФМБА России, Москва.

помощью пневмотахографа регистрируется вдыхаемый и выдыхаемый пациентом поток воздуха. С помощью сенсора давления фиксируется изменение давления воздуха в камере ($P_{\text{кам}}$), так как движение грудной клетки во время дыхания вызывает в камере колебания давления. Кроме того, измеряется давление в ротовой полости ($P_{\text{рот}}$). В конце одного из выдохов, на уровне ФОЕ, дыхание пациента кратковременно прерывается путем закрытия дыхательной трубки специальным клапаном. При закрытой дыхательной трубке пациент “дышит” поверхностно и часто (приблизительно 60 дыханий в 1 мин). При этом воздух (газ), содержащийся в легких пациента, на выдохе сжимается, а на вдохе разрежается. В это время производятся измерения $P_{\text{рот}}$ (эквивалент альвеолярного давления ($P_{\text{альв}}$)) и $P_{\text{кам}}$ (колебания $P_{\text{кам}}$ являются отображением изменения ВГО). Во время перекрытия потока в координатах ($P_{\text{кам}}, P_{\text{рот}}$) регистрируется кривая давления перекрытия (рис. 1) [3]. На форму петли оказывает влияние дряблость щек, губ, полости рта, в связи с чем пациент обязательно должен плотно придерживать руками щеки и подбородок (рис. 2). Вялость губ может быть вызвана удалением зубных протезов, поэтому не рекомендуется снимать их перед исследованием. Измеренный ВГО чуть выше ФОЕ, поскольку перекрытие дыхательных путей происходит не точно в конце выдоха. Для коррекции вводят поправочный коэффициент.

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

Во время проведения БПГ выполняется от 3 до 5 маневров перекрытия потока и вычисляется среднее значение ВГО ($\text{ВГО}_{\text{ср}}$). Показатели считаются воспроизводимыми, если отношение разности между максимальным и минимальным значениями ВГО к $\text{ВГО}_{\text{ср}}$ не превышает 5% [4].

Оценка показателей БПГ

После проведения маневра перекрытия обязательно регистрируют жизненную емкость легких (ЖЕЛ): максимальный объем воздуха, который можно вдохнуть ($\text{ЖЕЛ}_{\text{вд}}$) или выдохнуть ($\text{ЖЕЛ}_{\text{выд}}$), а также петли БС (Raw). Жизненную емкость легких, резервный объем выдоха ($\text{РО}_{\text{выд}}$) и емкость вдоха ($E_{\text{вд}}$) следует измерять для каждой пробы ФОЕ без отрыва от измерительной системы (это позволяет свести к минимуму возможные источники ошибок).

Измерение ЖЕЛ может быть проведено одним из следующих способов:

- 1) $\text{ЖЕЛ}_{\text{вд}}$: после полного выдоха делается максимально глубокий вдох;
- 2) $\text{ЖЕЛ}_{\text{выд}}$: измерение производится из состояния максимально глубокого вдоха до полного выдоха;
- 3) двустадийная ЖЕЛ: ЖЕЛ определяется в два этапа как сумма $E_{\text{вд}}$ и $\text{РО}_{\text{выд}}$.

Для определения ЖЕЛ рекомендуется измерять $\text{ЖЕЛ}_{\text{вд}}$; если же это невозможно, то в качестве альтернативы мо-

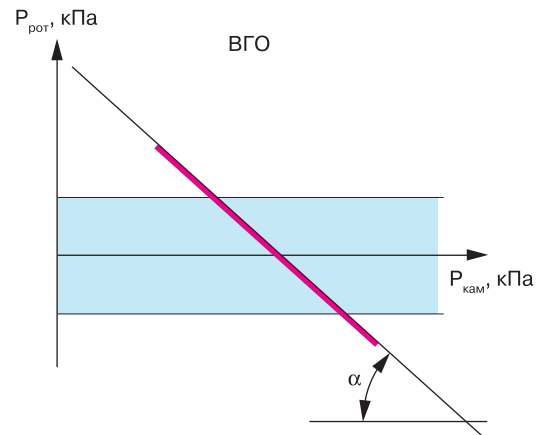


Рис. 1. Графическое представление респираторных усилий при перекрытии дыхательных путей: изменение $P_{\text{рот}}$ соответствует изменению $P_{\text{кам}}$. $P_{\text{рот}}$ во время маневра перекрытия потока становится равным $P_{\text{альв}}$. Экспираторные усилия приводят к увеличению $P_{\text{рот}}$ и снижению $P_{\text{кам}}$, инспираторные усилия – наоборот. Угол наклона $\Delta P_{\text{кам}} / \Delta P_{\text{рот}}$ пропорционален ВГО. α – угол наклона кривой давления перекрытия.



Рис. 2. Процесс измерения ВГО.

жет быть использован показатель $\text{ЖЕЛ}_{\text{выд}}$. Не рекомендуется в рутинной практике измерять ЖЕЛ в два этапа; однако такое измерение возможно при обследовании больных с тяжелыми нарушениями легочной вентиляции, когда пациент не может выполнить весь маневр целиком.

Таким образом, параметры БПГ, которые получают путем измерения, следующие: ВГО, ЖЕЛ, $\text{РО}_{\text{выд}}$, $E_{\text{вд}}$, Raw.

Параметры БПГ, которые получают путем вычисления, следующие:

- $\text{ОЕЛ} = \text{ВГО}_{\text{ср}} + E_{\text{вд макс}}$;
- $\text{ООЛ} = \text{ОЕЛ} - \text{ЖЕЛ}_{\text{макс}}$;
- $\text{ООЛ}/\text{ОЕЛ}$.

Во время проведения БПГ также регистрируют петли БС (рис. 3).

В координатах ($P_{\text{кам}} - V'$) записываются пневмотахограммы (фаза вдоха – над осью давления, фаза выдоха –

Таблица 2. Границы нормы и градации отклонений от нормы показателей дыхания

Показатели	Увеличение			Норма	Источник
	резкое	значительное	умеренное		
ОЕЛ, % от должной	>145	136–145	126–135	80–125	[5]
	>140	126–140	116–125	80–115	[6]
ВГО, % от должного	>120	>120	>120	80–120	–
ООЛ, % от должного	>225	176–225	141–175	80–140	[6]
				УН 120–140	
ООЛ/ОЕЛ, %	ДЗ + 25	ДЗ + 16–25	ДЗ + 9–15	ДЗ ± 4	[6]
				УН: ДЗ ± 5–8	
Р _{выд} , % от должного	–	–	–	80–120	–
Е _{вд} , % от должной	–	–	–	80–120	–
Raw, кПа с/л	>0,80	0,60–0,80	0,31–0,59	<0,30	[6]

Обозначения: ДЗ – должное значение, УН – условная норма.

под осью давления), определяется угол их наклона β и производится количественная оценка показателя БС. Различают показатели БС на вдохе, выдохе, а также показатель общего БС или БС по пику давления и др.

Показатели, полученные при проведении БПГ, сопоставляют с результатами, представленными в табл. 2.

Целесообразно оценивать попадание фактических значений ВГО, ОЕЛ, ООЛ, ЖЕЛ (полученных при исследовании) в диапазон значений нижняя граница нормы (НГН) – верхняя граница нормы (ВГН) [1, 4]:

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

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

где σ – стандартное отклонение от среднего.

Сопоставление особенностей отклонений показателей БС и легочных объемов от нормы позволяет дифференцировать ряд синдромов изменений механических свойств легких, таких как [6]:

1) стойкая изолированная обструкция внегрудных дыхательных путей при рубцовом сужении трахеи или отеке

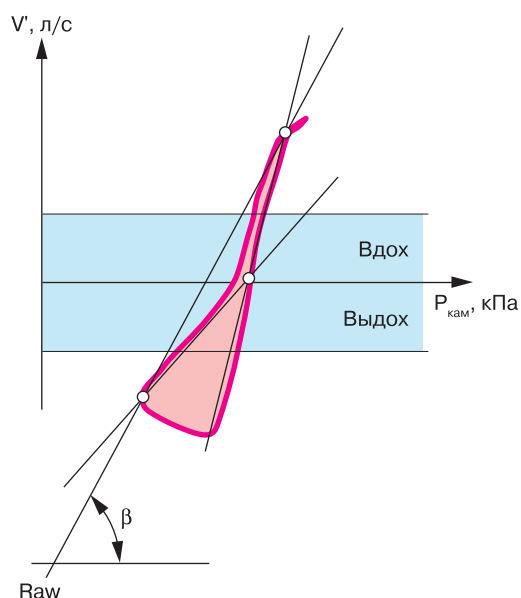


Рис. 3. Петля БС. V' – поток; β – угол наклона петли БС к оси давления.

гортани. В этом случае увеличивается БС как на вдохе, так и на выдохе. Общая емкость легких и ее структура не изменены. Однако при резком стенозе может наблюдаться небольшое уменьшение ЖЕЛ;

2) изолированное увеличение податливости стенок внегрудных дыхательных путей (трахеомалация, парез голосовых связок), которое в отличие от первого синдрома характеризуется преобладанием БС вдоха над БС выдоха;

3) фиброз легких различной этиологии. Повышение эластического сопротивления легких наблюдается при диффузном межальвеолярном и перибронхиальном разрастании соединительной ткани. Увеличение количества интерстициальной ткани вызывает уменьшение способности легких к растяжению. В то же время эластическая отдача легких увеличивается. Воздушность легочной ткани снижается, что выражается в уменьшении ОЕЛ и ЖЕЛ. Жизненная емкость легких снижается в основном за счет снижения $E_{вд}$. Повышение эластической отдачи легких вызывает задержку закрытия дыхательных путей во время выдоха из-за увеличения радиальной тракции на их наружную стенку. Поэтому объем, при котором происходит закрытие дыхательных путей, уменьшается, однако выраженного снижения абсолютной величины ООЛ не происходит, а его доля в ОЕЛ существенно возрастает. Таким образом, при фиброзах различной этиологии наблюдается уменьшение ОЕЛ и ЖЕЛ при мало измененной абсолютной величине ООЛ. Нарушения бронхиальной проходимости, как правило, отсутствуют;

4) изолированная обструкция мелких бронхов, которая проявляется изолированным увеличением ООЛ. При этом показатели БС остаются в норме, а ОЕЛ может оставаться неизменной или слегка увеличивается;

5) выраженное нарушение бронхиальной проходимости на фоне неизменных эластических свойств легких, при котором умеренно повышается БС с преобладанием БС на выдохе. Общая емкость легких может быть нормальной или увеличенной. В ее структуре ООЛ всегда увеличен. Жизненная емкость легких может быть неизменной или уменьшенной.

Нарушение бронхиальной проходимости (бронхиальная обструкция) обычно сопровождается повышением воздухонаполненности легких. Ее характеризует величина ВГО. При бронхиальной обструкции происходит замедление выдоха и рефлекторное его прерывание из-за быстрого нарастания $P_{альв}$, что обуславливает увеличение ВГО. Повышение ВГО при наличии обструкции свидетельствует о гиперинфляции легких. Однако увеличение воздухонаполненности легких при бронхиальной обструкции является следствием не только патологических нарушений, но и компенсаторно-приспособительных реакций. При увели-

чении ВГО происходит смещение уровня дыхания в инспираторную сторону, что приводит к повышению эластической отдачи легких и способствует уменьшению энергозатрат на осуществление выдоха. Растяжение эластических структур легочной ткани передается на стенки внутрилегочных дыхательных путей, 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 повышение ВГО приводит к увеличению поверхности диффузии и улучшению условий газообмена [6];

6) эмфизема легких. Уменьшение эластических свойств легких, имеющее место при эмфиземе легких, характеризуется увеличением ВГО, ООЛ, ООЛ/ОЕЛ. Повышение БС на вдохе и выдохе свидетельствует о сужении бронхов воспалительного характера у больных хронической обструктивной болезнью легких бронхитического типа, а преобладание БС на выдохе наблюдается при эмфизематозном типе и указывает на клапанный механизм бронхиальной обструкции вследствие утраты легкими эластических свойств. При альвеолярной деструкции, характерной для эмфиземы, происходит потеря эластических свойств легких. Уменьшение радиальной тяги эластических элементов легких приводит к снижению стабильности просвета внутрилегочных дыхательных путей, прежде всего дистальных. Бронхи, лишенные эластической поддержки, спадаются даже при очень небольшом увеличении внутригрудного давления, так как имеет место преобладание сил, действующих извне на стенку бронха, что обуславли-

вает их экспираторный коллапс и выраженное увеличение БС на выдохе.

Общая емкость легких при эмфиземе, как правило, увеличена. Однако это не означает, что вентиляционная и диффузионная способность легких сохраняется в пределах нормы. При эмфиземе вследствие альвеолярной деструкции поверхность для обмена газов уменьшается, в результате происходит нарушение диффузионной способности легких. 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.

Заключение

Таким образом, БПГ позволяет в короткий промежуток времени получить большой объем разнообразной физиологической информации, и прежде всего оценить вентиляционную способность легких по состоянию легочных объемов и емкостей, а также по скорости движения воздуха и сопротивлению в дыхательных путях [7].

Список литературы

1. Черняк А.В. // Функциональная диагностика в пульмонологии. Практическое руководство / Под ред. А.Г. Чучалина. М., 2009.
2. Гриппи М.А. Патофизиология легких. СПб., 2000.
3. Кольцун С.С. // Функциональная диагностика. 2003. № 1. С. 65.
4. Wanger J. et al. // Eur. Respir. J. 2005. V. 26. P. 511.
5. Современные проблемы клинической физиологии дыхания: Сб. науч. тр. / Под ред. Р.Ф. Клемента, В.К. Кузнецовой. Л., 1987.
6. Руководство по клинической физиологии дыхания / Под ред. Л.Л. Шика, Н.Н. Канаева. Л., 1980.
7. Воробьева З.В. Исследование вентиляционной функции легких. М., 2008. ●



Продолжается подписка на журнал “Лечебное дело” — периодическое учебное издание РНИМУ им. Н.И. Пирогова

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук.

Подписку можно оформить в любом отделении связи России и СНГ.

Журнал выходит 4 раза в год. Стоимость подписки на полгода по каталогу агентства “Роспечать” – 220 руб., на один номер – 110 руб.

Подписной индекс 20832