

А.В. Черняк
ИЗМЕРЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ЛЕГОЧНЫХ ОБЪЕМОВ
(ОБЩАЯ БОДИПЛЕТИЗМОГРАФИЯ)

Под термином «измерение легочных объемов», как правило, подразумевают измерение статических легочных объемов, наиболее важными из которых являются жизненная емкость легких (ЖЕЛ), остаточный объем легких (ООЛ) и общая емкость легких (ОЕЛ).

Общая емкость легких может быть представлена как сумма нескольких легочных объемов и емкостей (рис.1). Обычно выделяют четыре легочных объема (резервный объем вдоха (РОВд), дыхательный объем (ДО), резервный объем выдоха (РОВвд) и ООЛ) и четыре емкости легких (ЖЕЛ, емкость вдоха (Евд), функциональная остаточная емкость (ФОЕ) и ОЕЛ). Емкостью называют сумму двух и более легочных объемов.

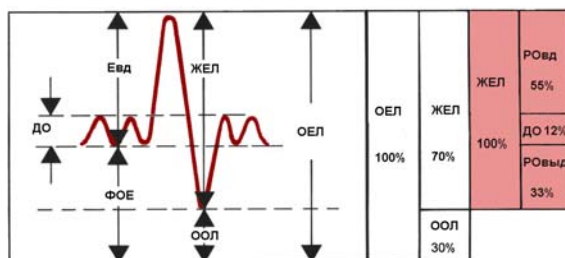


Рис. 1. Схематическое изображение статических легочных объемов и емкостей.

Легочные объемы и емкости

• **Жизненная емкость легких (ЖЕЛ).** Измерение ЖЕЛ может быть проведено одним из нижеследующих способов:

1. ЖЕЛвд: измерение производится пациенту в расслабленном состоянии. После полного выдоха делается максимально глубокий вдох.

2. ЖЕЛвыд: измерение производится в аналогичной манере из состояния максимального глубокого вдоха до полного выдоха.

3. Двустадийная ЖЕЛ: ЖЕЛ определяется в два этапа как сумма емкости вдоха и резервного объема выдоха.

Для определения жизненной емкости легких рекомендуется измерять ЖЕЛвд; если же это невозможно, то в качестве альтернативы может быть использован показатель ЖЕЛвыд. Не рекомендуется в рутинной практике измерять ЖЕЛ в два этапа; однако такое измерение возможно при обследовании больных с тяжелой одышкой, когда пациент не может выполнить весь маневр целиком.

• **Дыхательный объем (ДО)** - объем воздуха, который вдыхается и выдыхается во

время дыхательного цикла при спокойном дыхании.

• **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).

• Сумма ДО и РОВд в норме обычно составляет 60-70% ЖЕЛ, этот показатель называют емкостью вдоха (Евд).

• **Остаточный объем легких (ООЛ)** - объем воздуха, который остается в легких по окончании полного выдоха. Из всех вышеперечисленных объемов только ООЛ не может быть измерен непосредственно. Он рассчитывается путем вычитания РОВвд из ФОЕ: $ООЛ = ФОЕ - РОВвд$, или $ООЛ = ОЕЛ - ЖЕЛ$. Последний способ более предпочтителен.

• **Общая емкость легких (ОЕЛ)** рассчитывается двумя способами: $ОЕЛ = ООЛ + ЖЕЛ$ или $ОЕЛ = ФОЕ + Евд$. Последний способ более предпочтителен. При рестриктивных нарушениях ОЕЛ снижена.

• **Функциональная остаточная емкость (ФОЕ)** - объем воздуха в легких и дыхательных путях после спокойного выдоха. ФОЕ еще называют конечным экспираторным объемом. ФОЕ – это объем, при котором эластическая отдача легких уравновешена эластической отдачей грудной клетки, направление же их противоположно друг другу.

Измерение ФОЕ является определяющим этапом при оценке легочных объемов. К сожалению, этот показатель и показатели, рассчитанные с помощью ФОЕ (ООЛ и ОЕЛ), нельзя измерить с помощью спирометрии.

Показания и противопоказания для измерения легочных объемов

Первоначальным (и основным) показанием для измерения статических легочных объемов являлось выявление причины снижения ЖЕЛ (см. главу «Спирометрия»). В дальнейшем показания для исследования были расширены следующим образом:

1) подтверждение функционального диагноза, выставленного при спирометрическом исследовании;

2) диагностика рестриктивных или сочетанных обструктивно-рестриктивных на-

рушений вентиляционной способности легких и определение степени тяжести заболевания;

3) определение степени гиперинфляции у больных с обструктивными заболеваниями органов дыхания (например, буллезной эмфиземой и т.д.)

4) мониторинг течения заболевания и эффективности терапии;

5) определение прогноза на основании тяжести респираторных нарушений или скорости ухудшения показателей за определенный период времени;

6) проведение предоперационных исследований для оценки риска развития респираторных осложнений (например, при хирургической редукции объема легких у больных с эмфиземой) и предоперационной коррекции состояния пациента.

Измерение легочных объемов, как и спирометрия, является безопасным, однако требует более высокой квалификации специалистов, выполняющих тестирование, и большего технического оснащения. Ограничениями для измерения являются:

1) отсутствие кооперации пациент-доктор;

2) клаустрофобия;

3) наличие приборов или устройств, которые не могут быть помещены в кабину для исследования (например, при непрерывном внутривенном введении лекарств);

4) постоянная кислородотерапия (во время исследования необходимо отключать генератор кислорода и пациент не должен дышать через канюли или маску).

Если отсутствие кооперации делает невозможным практически все функциональные исследования, то остальные противопоказания относятся только к бодиплетизмографии.

Метод измерения легочных объемов

Наиболее распространенным методом измерения статических легочных объемов является общая бодиплетизмография.

Бодиплетизмографический метод позволяет определить внутригрудной объем (ВГО) газа. Главной особенностью этого метода является то, что пациент помещается внутрь измерительной камеры бодиплетизмографа (боди-камера). Наиболее универсальным способом является использование камеры постоянного объема. Как правило, измерение внутригрудного объема проводят в конце спокойного выдоха (на уровне ФОЕ).

Измерение внутригрудного объема газа основано на законе Бойля: объем определённого количества газа при постоянной темпе-

ратуре изменяется обратно пропорционально давлению:

$$P \times V = \text{constant, т.е.}$$

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2$$

В конце выдоха альвеолярное давление (Ральв) равно атмосферному давлению, измеренному в ротовой полости (Ррот), потому что в этот момент отсутствует поток воздуха; внутригрудной объем газа (Vtg) неизвестен. Когда дыхательные пути перекрываются на уровне ротовой полости, пациент делает попытки вдохов и выдохов, и газ, содержащийся в легких, попеременно сжимается и разрежается. При попытке вдоха объем грудной клетки увеличивается (ΔV), а давление внутригрудного газа снижается (ΔP): новый внутригрудной объем равен $V_2 = V_1 + \Delta V$, новое давление $P_2 = P_1 + \Delta P$. Регистрируются изменения давления в ротовой полости (P_2). Поскольку колебания давления происходят с небольшой частотой, то изменения альвеолярного и ротового давления одинаковы: $\Delta P_{\text{рот}} = \Delta P_{\text{альв}}$. Соответственно:

$$P_1 \times V_1 = P_2 \times V_2 = (P_1 + \Delta P) \times (V_1 + \Delta V) = P_1 \times V_1 + P_1 \times \Delta V + V_1 \times \Delta P + \Delta P \times \Delta V.$$

При небольших перепадах давления величиной $\Delta P \times \Delta V$ можно пренебречь, поскольку она очень мала. Следовательно:

$$P_1 \times \Delta V = -V_1 \times \Delta P;$$

$$V_1 = -P_1 \times \Delta V / \Delta P.$$

Если закон Бойля применить к лёгкому, то:

$$V_L = -P_{\text{альв}} \times \Delta V_L / \Delta P_{\text{альв}},$$

где V_L - внутригрудной объем, а за альвеолярное давление принимается атмосферное давление (Ратм) минус давление водяного пара при температуре 37 °С (Рвод.п.), поскольку предполагается, что если газ насыщен влагой, то объем водяных паров остаётся постоянным независимо от перепадов давления.

На форму петель оказывает влияние дряблость щек, губ, дна полости рта. В связи с этим пациенты всегда должны плотно придерживать руками щеки и подбородок. Вялость губ может быть вызвана удалением зубных протезов, поэтому не рекомендуется снимать их перед исследованием. Измеренный объем чуть выше ФОЕ, поскольку перекрытие дыхательных путей происходит не точно в конце выдоха. Для коррекции вводят поправочный коэффициент.

Бодиплетизмография позволяет быстро провести несколько измерений ФОЕ. Это выгодно отличает бодиплетизмографию от методов вымывания азота или разведения гелия. Кроме того, ФОЕ, измеренная бодиплетизмографическим методом, включает в себя как вентилируемые, так и не вентилируемые отде-

лы легких. Бодиплетизмография является более дорогим методом, технически более сложным и требует, чтобы пациент четко выполнял указания врача и прилагал больше усилий, чем при исследовании методом разведения газов. Тем не менее, бодиплетизмография является предпочтительным методом, поскольку позволяет более точно оценить ФОЕ.

Клиническое применение измерения объемов легких

Как и при спирометрии, интерпретация результатов измерения объемов легких основывается на их сравнении с должными значениями. В клинической практике большинство врачей функциональной диагностики при анализе легочных объемов используют должные значения, рекомендованные Рабочей группой Европейского сообщества Угля и Стали в 1993 г. (табл. 1). Как правило, на практике результаты выражают в процентах от должного значения (полученное значение/должное значение $\times 100\%$), нижней границей нормы (НГН) считают 80% от должных величин. Этот подход приемлем у детей, но не подходит для взрослых людей, поскольку разброс значений от должного у взрослых постоянный и не зависит от роста и возраста пациента. Исследования последних лет показали, что у взрослых людей в качестве НГН следует брать значение 5-й процентили гистограммы должных значений. Это позволит достаточно точно разграничить «норму» от «патологии». На практике, как правило, за «норму» принимают диапазон значений 90% популяции (90%-ный доверительный интервал – ДИ: диапазон между 5-й и 95-й процентилем, которые вычисляют как расчетное должное значение $\pm 1,64 \cdot \text{RSD}$). RSD (остаточная среднеквадратическая ошибка) – статистический параметр, который рассчитывают при разработке должных значений и рекомендуют указывать наряду с должной величиной (табл.).

В клинической практике алгоритм, основанный на анализе основных спирометрических параметров (ОФВ₁, ЖЕЛ, ОФВ₁/ЖЕЛ) и ОЕЛ, достаточно прост и информативен (рис.2).

Проблемы возникают, когда эти показатели (некоторые или все сразу) находятся на границе нормальных значений. В этих случа-

ях буквальная интерпретация функциональных изменений слишком упрощена и может привести к ложным результатам. Для правильной оценки функционального статуса следует провести дополнительные исследования в соответствии с клинической ситуацией (например, проба с бронходилататором, измерение диффузионной способности легких, оценка силы дыхательных мышц, нагрузочный тест).

Таблица

Должные значения объемов легких для взрослых пациентов

Показатели	Уравнение	90% ДИ*	RSD
Мужчины			
ОЕЛ, л	$7,99 \cdot P - 7,08$	$\pm 1,15$	0,70
ООЛ, л	$1,31 \cdot P + 0,022 \cdot B - 1,23$	$\pm 0,67$	0,41
ФОЕ, л	$2,34 \cdot P + 0,01 \cdot B - 1,09$	$\pm 0,99$	0,60
ФОЕ/ОЕЛ, %	$43,8 + 0,21 \cdot B$	$\pm 11,1$	6,74
ООЛ/ОЕЛ, %	$14,0 + 0,39 \cdot B$	$\pm 9,0$	5,46
Женщины			
ОЕЛ, л	$6,60 \cdot P - 5,79$	$\pm 0,99$	0,60
ООЛ, л	$1,81 \cdot P + 0,016 \cdot B - 2,00$	$\pm 0,58$	0,35
ФОЕ, л	$2,24 \cdot P + 0,001 \cdot B - 1,00$	$\pm 0,82$	0,50
ФОЕ/ОЕЛ, %	$45,1 + 0,16 \cdot B$	$\pm 9,8$	5,93
ООЛ/ОЕЛ, %	$19,0 + 0,34 \cdot B$	$\pm 9,6$	5,83

*: Нижний и верхний процентиль – 5-й и 95-й проценти 90% ДИ высчитывают как должное $\pm$ указанное число. В: возраст (годы); Р: рост (метры). RSD: остаточная среднеквадратическая ошибка.

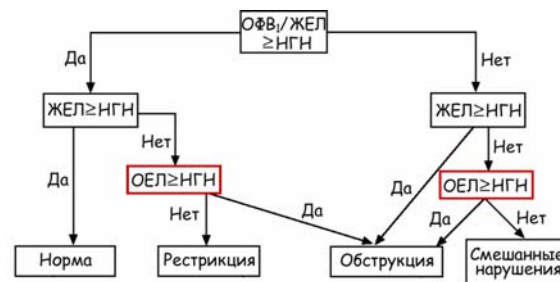


Рисунок 2. Упрощенный алгоритм интерпретации функциональных методов исследования. НГН: нижняя граница нормы.

Заключение

Нарушения легочной вентиляции крайне не редко являются патогномичными для определенного заболевания, поэтому почти всегда требуют дифференциальной диагностики. Вследствие этого следует воздержаться от категоричных суждений о клиническом диагнозе. Функциональные исследования, независимо от их объема, как правило, позволяют лишь предположить определенное заболевание. В большинстве случаев большую помощь в установлении правильного диагноза приносит совместное обсуждение полученных результатов врачом-функционалистом, клиницистом и специалистом по имидж-диагностике.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. Quanjer PH, Tammeling GJ, Cotes JE, Pedersen OF, Peslin R, Yernault JC. Lung volumes and forced ventilatory 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.
2. Ross JC, Copher DE, Teays JD, Lord TY Functional residual capacity in patients with pulmonary emphysema. *Ann. Intern. Med.* 1962, 57: 18-28.
 3. Tammeling GJ, Quanjer PhH - *Contours of Breathing 1*. Ingelheim am Rhein: CH Boehringer Sohn, 1979.
 4. Wanger J, Clausen JL, Coates A, Pedersen OF, Brusasco V, Burgos F, Casaburi R, Crapo R, Enright P, van der Grinten CPM, Gustafsson P, Hankinson J, Jensen R, Johnson D, MacIntyre N, McKay R, Miller MR, Navajas D, Pellegrino R, Viegi G. - Standardisation of the measurement of lung volumes. *Eur Respir J* 2005; 26: 511-522.
 5. Quanjer PhH, de Pater L, Tammeling GJ. - *Plethysmographic Evaluation of Airway Obstruction*. Leusden: Netherlands Asthma Foundation, 1971.
 6. DuBois AB, Botelho SR, Bedell GN, Marshall R, Comroe JHJr. - A rapid plethysmographic method for measuring thoracic gas volume; a comparison with a nitrogen wash-out method for measuring functional residual capacity. *J Clin Invest.* 1956, 35: 322-326.
 7. Nolle D, Reif E, Ulmer WT. - *Die Ganzkörperplethysmographie. Methodische Probleme und Praxis der Bestimmung des intrathorakalen Gasvolumens und der Resistance-Messung bei Spontanatmung*. *Respiration*. 1968, 25: 14-34.
 8. Van de Woestijne KP, Bouhuys A. - Spirometer response and pressure correction in body plethysmography. *Prog Respir Res.* 1969, 4: 64-74.
 9. Bryant GH, Hansen JE. - An improvement in whole body plethysmography. *Am Rev Respir Dis.* 1975, 112: 464-465.
 10. Quanjer PhH. Predicted values: how should we use them? *Thorax* 1988; 43: 663-664.
 11. Pellegrino R, Viegi G, Brusasco V, Crapo RO, Burgos F, Casaburi R, Coates A, van der Grinten CPM, Gustafsson P, Hankinson J, Jensen R, Johnson DC, MacIntyre N, McKay R, Miller MR, Navajas D, Pedersen OF, Wanger J. - Interpretative strategies for lung function tests. *Eur Respir J* 2005; 26: 511-522.
 12. Stocks J, Quanjer PH. - Reference values for residual volume, functional residual capacity and total lung capacity. *ATS workshop on lung volume measurements. Official statement of the European Respiratory Society. Workshop report.* *Eur Respir J*, 1995, 8: 492-506.
 13. American Thoracic Society Statement. Evaluation of impairment/disability secondary to respiratory disease. *Am Rev Respir Dis* 1982; 126: 945-951.
 14. Miller MR, Pincock AC. Predicted values: how should we use them? *Thorax* 1988; 43: 265-267.
 15. Quanjer PH, Tammeling GJ. In: *De fysiologische basis van klinisch laboratorium-onderzoek*. Ed: Croughs RJM, Hemker HC; Oosthoek, Scheltema en Holkema; Utrecht, 1976.
 16. Кольцун С.С. Система интерпретации функционального состояния внешнего дыхания в пульмонологии. // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора медицинских наук - Москва. - 1999. - 52 с.
 17. Черняк А.В. Измерение легочных объемов. Практическое руководство "Функциональная диагностика в пульмонологии" под редакцией академика А.Г.Чучалина. (изд. Атмосфера, 2009 г.).
-