Методические руководства

БОДИПЛЕТИЗМОГРАФИЯ

Профессиональные ассоциации:

- **Российское респираторное общество**
- **Российская ассоциация специалистов функциональной диагностики**

Год утверждения (частота пересмотра): 2024

ID:

URL:

Утверждены
Российским респираторным обществом
Российской ассоциацией специалистов функциональной диагностики

Оглавление

Ключевые слова
Список сокращений
Термины и определения (глоссарий)
1. Определение
2. Показания к проведению бодиплетизмографии
3. Противопоказания к проведению бодиплетизмографии
4. Технические условия
4.1. Инфекционный контроль
4.2. Требования к оборудованию
4.3. Условия измерения
4.4. Калибровка бодиплетизмографа
4.5. Дополнительный контроль качества производимых измерений
5. Методика проведения бодиплетизмографии
5.1. Теоретические подходы для получения формул количественной оценки показателей внутригрудного объема и бронхиального сопротивления
5.2. Подготовка к бодиплетизмографии
5.3. Порядок проведения бодиплетизмографии
5.4. Критерии качества бодиплетизмографии
5.5. Показатели бодиплетизмографии
6. Интерпретация результатов бодиплетизмографии
6.1. Выбор результата для анализа
6.2. Должные величины
6.3. Анализ результатов бодиплетизмографии
6.4. Обструктивный тип нарушений вентиляционной способности легких
6.5. Рестриктивный тип нарушений вентиляционной способности легких
6.6. Смешанный тип нарушений вентиляционной способности легких
7. Протокол бодиплетизмографии
Список литературы
Приложение 1. Состав рабочей группы
Приложение 2. Методология разработки клинических рекомендаций
Приложение 3. Клинические примеры
Приложение 4. Стандартные обозначения показателей

Ключевые слова

- Бодиплетизмография
- Общая бодиплетизмография
- Плетизмография всего тела
- Бронхиальное сопротивление
- Легочные функциональные тесты
- Вентиляционная функция легких
- Функциональные исследования системы дыхания
- Вентиляционные нарушения
- Исследование легочных объемов
- Исследование структуры общей емкости легких

Список сокращений

ВГН — верхняя граница нормы

ВГО — внутригрудной объем газа, измеренный методом бодиплетизмографии при перекрытии дыхательных путей

ДП — дыхательные пути

ВДП — внегрудные дыхательные пути

ДО — дыхательный объем

долж — должная величина

$Е_{вд}$ — емкость вдоха или инспираторная емкость легких

ЖЕЛ — жизненная емкость легких

$ЖЕЛ_{вд}$ — жизненная емкость легких, измеренная на вдохе

$ЖЕЛ_{выд}$ — жизненная емкость легких, измеренная на выдохе

ИЗЛ — интерстициальное заболевание легких

ИМТ — индекс массы тела

кг — килограмм

кПа — килопаскаль

л — литр

м — метр

мкг — микрограмм

мм рт. ст. — миллиметр ртутного столба

КТ ОГК — компьютерная томография органов грудной клетки

НГН — нижняя граница нормы

ОЕЛ — общая емкость легких

ООЛ — остаточный объем легких

$ОФВ_1$ — объем форсированного выдоха за первую секунду

ПО – программное обеспечение

РАСФД – Российская ассоциация специалистов функциональной диагностики

$РО_{выд}$ — резервный объем выдоха

РРО – Российское респираторное общество

с — секунда

°С — градусы по Цельсию

см — сантиметр

ФОЕ — функциональная остаточная емкость легких

$ФОЕ_{пл}$ — функциональная остаточная емкость легких, измеренная методом бодиплетизмографии при

расслабленном спокойном дыхании перед измерением ВГО

ФЖЕЛ — форсированная жизненная емкость легких, измеренная на выдохе

ХОБЛ — хроническая обструктивная болезнь легких

ЧД — частота дыхания (частота дыхательных движений)

ATPS — параметры газа в помещении, где проводится исследование: температура, барометрическое (атмосферное) давление и влажность воздуха (Atmospheric (ambient) condition for Temperature and barometric Pressure, Saturated)

ATS — Американское торакальное общество

BTPS — параметры газа в легких человека: температура тела человека (37°C), барометрическое (атмосферное) давление и полное насыщение водяным паром (Body condition for Temperature and barometric Pressure, Saturated)

ERS — Европейское респираторное общество

GLI — система должных величин, разработанная экспертной группой Европейского респираторного общества по стандартизации легочных функциональных тестов (Global Lung function Initiative — GLI)

Vt, occ — разница между внутригрудным обьемом легких в момент перекрытия заслонки и функциональной остаточной емкостью (синонимы: dVol, switch-in error)

P — давление

P_A – альвеолярное давление

Pатм — атмосферное давление

Pк — давление в камере

Pрот — давление в ротовой полости

sGaw — специфическая бронхиальная проводимость

$R_{ин}$ — инерционное сопротивление

$R_{фр}$ — фрикционное сопротивление

$R_{эл}$ — эластическое сопротивление

Raw — аэродинамическое бронхиальное сопротивление

$Raw_{вд}$ — бронхиальное сопротивление на вдохе

$Raw_{выд}$ — бронхиальное сопротивление на выдохе

$Raw_{общ}$ — общее бронхиальное сопротивление

$Raw_{эфф}$ — эффективное бронхиальное сопротивление

Raw0,5 — бронхиальное сопротивление между инспираторным и экспираторным потоками, равными 0,5 л/с

sRaw — специфическое бронхиальное сопротивление

$sRaw_{общ}$ — специфическое общее бронхиальное сопротивление

$sRaw_{эфф}$ — специфическое эффективное бронхиальное сопротивление

sRaw0,5 — специфическое бронхиальное сопротивление между инспираторным и экспираторным потоками, равными 0,5 л/с

SD — стандартное отклонение (standard deviation)

STPD — стандартные условия измерения: температура 0°С, или 273К, давление 101 кПа, или 760 мм рт. ст., сухой газ без водяных паров

V — объем

$V_к$ — объем камеры

V' — скорость потока воздуха

z-оценка – это число SD между измеренной величиной и должным значением, используется для оценки нормального диапазона и степени отклонения от должного значения

Стандартные обозначения показателей бодиплетизмографиии и англоязычный вариант их написания представлены в приложении.

Термины и определения (глоссарий)

Бодиплетизмография (общая бодиплетизмография, плетизмография всего тела) — метод оценки вентиляционной способности легких, позволяющий определить статические легочные объемы легких (общую емкость легких и ее составляющие) и бронхиальное сопротивление.

Бронхиальное сопротивление (или сопротивление дыхательных путей) — неэластическое (аэродинамическое, фрикционное) сопротивление дыхательных путей воздушному потоку при дыхании.

Вентиляция легких — движение воздуха в легкие и из легких в результате периодических изменений объема грудной клетки за счет сокращения и расслабления *дыхательных мышц*, обеспечивающее поступление кислорода и выведение углекислого газа из организма.

Вентиляционная способность легких — способность органов дыхания обеспечивать воздухообмен в легких путем вентиляции.

Внутригрудной объем газа *(ВГО)* — объем, измеряемый при бодиплетизмографии во время специфичного для этого исследования дыхательного маневра («дыхательных маневров при перекрытии потока», «дыхания против заслонки»), близкий по величине к функциональной остаточной емкости легких.

Воспроизводимость (reproducibility) - близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно в изменившихся условиях; например, при смене оператора, инструмента, места выполнения, условий выполнения или времени выполнения.

Должная величина — установленное среднее значение показателя для человека данного пола, возраста, роста и популяционной принадлежности

Допустимость *(usability)* — признание пригодной для использования попытки, не соответствующей всем критериям *приемлемости*.

Дыхание — физиологический процесс, обеспечивающий газообмен между окружающей средой и организмом в соответствии с его метаболическими потребностями.

Дыхательный маневр — совокупность дыхательных движений, выполняемых по стандартизированному алгоритму, например, маневр форсированного выдоха.

Дыхательная система — система внешнего дыхания - функциональная система организма, обеспечивающая поглощение кислорода из внешней среды, артериализацию крови в легких и выведение углекислого газа.

Дыхательные мышцы — скелетные поперечнополосатые мышцы (диафрагма и вспомогательная дыхательная мускулатура), обеспечивающие вентиляцию легких за счет изменения объема грудной клетки.

Дыхательные пути — полые анатомические образования, обеспечивающие воздухообмен между окружающей средой и зоной активного газообмена в легких (носовая и ротовая полости, носоглотка, ротоглотка, гортань, трахея, бронхи, бронхиолы).

Дыхательный объем *(ДО)* — объем воздуха, вдыхаемый или выдыхаемый при каждом дыхательном цикле при спокойном дыхании.

Жизненная емкость легких *(ЖЕЛ)* — максимальный объем воздуха, который можно вдохнуть после максимального выдоха (или, наоборот, выдохнуть после максимального вдоха). Включает в себя *дыхательный объем*, *резервный объем вдоха*, *резервный объем выдоха.*

Емкость вдоха или инспираторная емкость легких *($Е_{вд}$)* — максимальный объем воздуха, который можно вдохнуть после обычного спокойного выдоха. $Е_{вд}$ - сумма резервного объема вдоха и дыхательного объема.

Калибровка прибора — процедура точной настройки прибора, во время которой устанавливается взаимосвязь между характеристиками потоков и объемов, определяемыми сенсором прибора, и их реальными величинами. Проводится в начале рабочего дня или при значимом изменении характеристик воздуха в помещении, используемом для функционального исследования системы дыхания.

Обструктивный тип нарушений вентиляционной способности легких — вид нарушения вентиляционной способности легких, возникающий вследствие сужения дыхательных путей и повышения их сопротивления движению воздуха

Общая емкость легких *(ОЕЛ)* — объем воздуха, который содержится в легких после максимально глубокого вдоха.

Остаточный объем легких *(ООЛ)* — объем воздуха, который остается в легких после максимально глубокого выдоха.

Паттерн дыхания — совокупность временных и объемных характеристик дыхательного цикла.

Повторяемость (repeatability) - близость друг к другу результатов измерений одной и той же величины, выполненных повторно в одинаковых условиях на одной и той же аппаратуре, в одном и том же месте, в одних и тех же условиях, одним и тем же специалистом.

Приемлемость *(acceptability)* — соответствие попытки дыхательного маневра во время проведения исследования всем критериям качественного измерения.

Растяжимость (податливость) легких — характеристика способности легких изменять объем при изменении эластического давления.

Резервный объем вдоха *($РО_{вд}$)* — объем воздуха, который можно дополнительно вдохнуть от уровня обычного спокойного вдоха до уровня максимально глубокого вдоха (уровня ОЕЛ).

Резервный объем выдоха *($РО_{выд}$)* — объем воздуха, который можно дополнительно выдохнуть от уровня обычного спокойного выдоха (т.е. от уровня ФОЕ) до уровня максимально глубокого выдоха (т.е. до уровня ООЛ).

Рестриктивный тип нарушений вентиляционной способности легких — вид нарушения вентиляционной способности легких, проявляющийся уменьшением объема

легких (например, при патологии легких) или нарушением расправления легких при вдохе (например, выраженные нервно-мышечные расстройства, гидроторакс, ограничения подвижности грудной клетки, ограничения подвижности диафрагмы).

Смешанный тип нарушений вентиляционной способности легких — вид нарушения вентиляционной способности легких, объединяющий в себе признаки обструктивного и рестриктивного типов нарушений вентиляционной способности легких.

Упругие свойства легких — эластическая тяга легких, которая формируется за счет эластических структур легких (коллагеновых, ретикулярных, эластических волокон), сил поверхностного натяжения, степени кровенаполнения легких и тонуса гладких мышечных волокон.

Условия ATPS — обозначение характеристик воздуха (температура, атмосферное давление, насыщение водяным паром) в помещении, используемом для функционального исследования системы дыхания.

Условия BTPS — обозначение характеристик воздуха в легких человека: температура тела (37°C), атмосферное давление и полное насыщение воздуха водяными парами.

Функциональная остаточная емкость *(ФОЕ)* — объем воздуха, который остается в легких после обычного спокойного выдоха; является суммой РОвыд и ООЛ.

1. Определение

Бодиплетизмография (общая бодиплетизмография, плетизмография всего тела) — это метод исследования механических свойств легких путем измерения внутригрудного объема газа (ВГО) и специфического бронхиального сопротивления (specific airway resistance — sR_{aw}). Измеренные величины позволяют рассчитать показатели, характеризующие эластические (статические) и неэластические (фрикционные, динамические) свойства аппарата вентиляции. К первым относятся статические легочные объемы — общая емкость легких (ОЕЛ) и ее составляющие, а ко вторым — аэродинамическое (воздушное, неэластическое, фрикционное) сопротивление дыхательных путей (airway resistance — R_{aw}) или бронхиальное сопротивление.

2. Показания к проведению бодиплетизмографии:

Диагностика:

- диагностика наличия и степени выраженности рестриктивного и смешанного типов нарушений вентиляционной способности легких при заболеваниях органов дыхания, а также других органов и систем;
- определение качественных и количественных характеристик обструктивных вентиляционных нарушений (в т.ч. выявление гиперинфляции легких и «воздушных ловушек», расчет бронхиального сопротивления, равномерности вентиляции легких и др).;
- уточнение причин респираторных жалоб больного, клинических симптомов либо отклонений в лабораторных показателях;
- предоперационная оценка риска;
- оценка прогноза заболевания;
- оценка функционального состояния перед участием обследуемого в программах с физическими нагрузками высокой интенсивности, дыхательными нагрузками.

Наблюдение:

- оценка эффективности лечебных мероприятий;
- мониторирование течения заболевания;
- наблюдение в популяциях, подвергающихся воздействию неблагоприятных факторов, в том числе связанных с профессиональной деятельностью;
- мониторирование побочных эффектов лекарств с известной способностью влиять на функциональное состояние или вызывать повреждения органов дыхания.

Экспертная оценка:

- оценка рисков при страховании здоровья и жизни;
- экспертиза трудоспособности;
- экспертная оценка состояния здоровья по другим юридическим поводам.

Общественное здоровье:

- эпидемиологические исследования;
- разработка систем должных величин;
- клинические исследования.

3. Противопоказания к проведению бодиплетизмографии

Абсолютные противопоказания для проведения бодиплетизмографии:

- выраженная клаустрофобия и другие заболевания или состояния, не позволяющие

пациенту находиться в кабине бодиплетизмографа и/или выполнять необходимые дыхательные маневры;
- потребность в постоянном использовании специальных технических устройств, работа которых влияет на давление внутри кабины плетизмографа (аппараты для непрерывного введения лекарственных средств, постоянной кислородотерапии и т.д.);
- травмы и заболевания челюстно-лицевого аппарата, препятствующие правильному захвату загубника и надеванию носового зажима;
- любые острые состояния, при которых выполнение дыхательных маневров сопряжено с риском для здоровья обследуемого.

Относительные противопоказания для проведения бодиплетизмографии:

- болевой синдром, препятствующий правильному выполнению дыхательных маневров;
- в первую неделю после операций на глазах, придаточных пазухах носа или среднем ухе;
- острый отит, синусит;
- приступообразный кашель, не позволяющий адекватно выполнить предложенные маневры;
- кровохарканье;
- проведенные торакальные или абдоминальные хирургические вмешательства, операции на головном мозге и сосудах головы в течение месяца перед исследованием.
-

Проведение бодиплетизмографии пациентам с признаками острых респираторных или других инфекционных заболеваний, включая туберкулез, возможно при условии строгого соблюдения актуальных на момент исследования санитарно-эпидемиологических норм. Следует принять во внимание высокий риск заражения от пациентов с большим количеством мокроты и у пациентов с наличием повреждений слизистой ротовой полости.

При назначении исследования важно оценить возможность пациента адекватно выполнить все требуемые дыхательные маневры. Если полноценный контакт с пациентом невозможен (когнитивные нарушения, языковой барьер и др.), то качественно выполнить бодиплетизмографию не удастся. При проведении бодиплетизмографии важно измерить массу тела пациента, поскольку существуют ограничения по весу пациента (как правило, масса тела должны быть не более 135-180 кг, зависит от технических характеристик аппаратуры и производителя), также этот показатель используется при расчетах объема боди-камеры (если во время исследования ребенок сидит на руках у взрослого, то необходимо внести общую массу тела ребенка+взрослого). Объем боди-камеры обычно составляет 700-1200 л (в зависимости от производителя).

Решение о назначении бодиплетизмографии принимает лечащий врач после сопоставления рисков и пользы проведения бодиплетизмографии.

4. Технические условия

4.1. Инфекционный контроль

Для снижения риска инфицирования медицинского персонала и пациентов исследование должно проводиться в соответствии с актуальными санитарно-эпидемиологическими требованиями. Проводящий исследование специалист должен помыть руки или использовать сертифицированное дезинфицирующее средство для рук перед обследованием каждого нового пациента. Использование одноразовых перчаток не исключает необходимости обработки рук; при использовании перчаток для каждого пациента требуется новая пара. Пациенту также следует обработать руки антисептиком или салфеткой, поскольку пациент будет прикасаться к различным поверхностям (оборудованию, ручке кабины бодиплетизмографа, подлокотникам кресла и др.).

Использование одноразовых антибактериальных/антивирусных фильтров (далее *фильтры*) при проведении бодиплетизмографии стало стандартной практикой. Мундштук/загубник является неотъемлемым дополнением к фильтру: его использование делает исследование более удобным для

пациента и снижает загрязнение бодиплетизмографа.

При использовании фильтров необходимо отметить их использование в установках прибора (поставить галочку в соответствующем месте).

Все одноразовые предметы, включая фильтры и перчатки, необходимо утилизировать после тестирования в соответствии с санитарно-эпидемиологическими требованиями.

4.2. Требования к оборудованию

Все бодиплетизмографы должны удовлетворять техническим требованиям, предъявляемым к оборудованию в Российской Федерации. В отдельных ситуациях, например, при проведении клинических исследований, объем технических требований может быть расширен.

Для оптимального контроля качества измерений на мониторе интерфейса бодиплетизмографа должны отображаться петли специфического бронхиального сопротивления, петли ВГО, а также графическое представление маневра перекрытия потока. Желательно, чтобы все кривые одного типа в данном исследовании накладывались на дисплее друг на друга. Это позволяет визуально исключить отклонение кривой «давления перекрытия» от средней линии, что свидетельствует об утечке воздуха из-за негерметично удерживаемого мундштука или через неплотно закрытый зажимом нос, а также оценить повторяемость попыток.

4.3. Условия измерения

Все измерения при бодиплетизмографии выполняются в условиях окружающей среды, стандартно обозначающихся аббревиатурой ATPS: температура и влажность воздуха в используемом для работы кабинете и барометрическое (атмосферное) давление.

Для получения корректных результатов измерений следует придерживаться рекомендаций производителя по допустимым для эксплуатации прибора параметрам окружающей среды.

Результаты бодиплетизмографии отображаются в соответствии с характеристиками газа в легких человека, стандартно обозначающихся аббревиатурой BTPS: температура тела (37°C), барометрическое (атмосферное) давление (Ратм) и полное насыщение водяным паром. Параметры окружающей среды измеряются непосредственно перед началом калибровки, а актуальные поправки для пересчета от условий ATPS к условиям BTPS определяются по завершении калибровки прибора. Точность измерения температуры должна составлять ±1°C. Если температура в помещении быстро меняется, (т.е. более чем на 3°C в течение менее 30 минут), то следует своевременно скорректировать условия ATPS, т.е. повторить калибровку прибора.

4.4. Калибровка бодиплетизмографа

Калибровка системы – это процедура, во время которой устанавливается взаимосвязь между характеристиками давления/потоков и объемов, определяемыми датчиками, и их реальными величинами. Перед началом исследования ежедневно проводят поверку калибровки датчика потока 3-литровым калибровочным шприцем и калибровку датчиков давления кабины. Большинство современных диагностических систем оснащено встроенными термометром, барометром и гигрометром; в таком случае нет необходимости в ручном вводе вышеперечисленных параметров перед калибровкой. Корректность показаний встроенных в прибор датчиков параметров воздуха следует регулярно проверять: неисправность какого-либо из них способна существенно повлиять на результаты калибровки системы и, следовательно, на величину измеряемых в процессе исследования показателей.

Регулярного внимания требуют полноценность соединения друг с другом компонентов системы, правильность проведения и корректность результатов калибровки, соответствие аналогичных показателей, полученных на различных этапах исследования (например, величин объемов, зарегистрированных при спирометрии и бодиплетизмографии), а также частота и характер сообщений программного обеспечения (ПО) системы об ошибках.

Процесс калибровки должен быть доступен визуальному контролю, отображаясь на экране интерфейса системы в графической форме.

Калибровку следует проводить в день исследования после прогрева системы рекомендуемой

производителем продолжительности (обычно от 15 минут и более) и повторить при необходимости после изменения параметров окружающей среды. Для получения корректных результатов измерений температура кабины должна соответствовать учитываемым при калибровке показаниям термометра; по той же причине следует избегать сквозняков во время проведения калибровки и исследований. При калибровке аппарата и при проведении исследований следует держать двери и окна кабинета, где проводится исследование, плотно закрытыми, при наличии в кабинете работающей системы кондиционирования воздуха его поток не должен быть направлен в сторону прибора. Колебания давления, температуры воздуха в помещении и в кабине бодиплетизмографа способны помешать правильной калибровке и сопровождаются избыточными погрешностями выполняемых измерений. В период включения центрального отопления следует воздержаться от проведения функциональных исследований на время, требуемое для стабилизации изменившихся характеристик воздуха в лаборатории.

В современных диагностических системах программа калибровки бодиплетизмографа происходит в автоматическом режиме. Она, как правило, включает определение постоянной времени кабины и одновременную калибровку датчиков давления эмулятором ВГО.

Кривые калибровки отображаются на экране монитора в реальном времени. При условии правильной калибровки кабины и датчиков результаты укладываются в диапазон допустимых значений, заданных производителем: постоянной времени от 4 до 24 с (для контролируемой утечки идеально, когда постоянная времени примерно равна 10 с); диапазон величины калибровки (коррегирующий фактор или коэффициент усиления) от 0,75 до 1,25; показатель качества (коэффициент вариабельности) менее 3%.

При использовании бактериальных фильтров эти фильтры также следует применять для процедуры поверки калибровки пневмотахометра системы.

4.5. Дополнительный контроль качества производимых измерений

В качестве дополнительного способа контроля качества измерений при бодиплетизмографии рекомендуется проведение биологического контроля. Для этого периодически, не реже 1 раза в месяц, тестируют двух здоровых, некурящих добровольцев (например, сотрудников данного медицинского учреждения), способных адекватно выполнять дыхательные маневры с хорошей повторяемостью. Результаты измерения ОЕЛ, функциональной остаточной емкости легких (ФОЕ) и остаточного объема легких (ООЛ) регистрируются в специальном файле или журнале. При повторных исследованиях при условии методически правильного их выполнения значения ОЕЛ и ФОЕ не должны отличаться более чем на 10% от среднего значения (определяется после проведения первых 20 измерений), а ООЛ – не более чем на 20%. При получении более выраженных отклонений для выявления причины и устранения неисправности необходимо пригласить сервисного инженера [Wanger J. et al., 2005].

Для каждого бодиплетизмографа необходимо вести журнал, где следует регистрировать следующие манипуляции, влияющие на качество проводимых измерений:

- результаты ежедневных калибровок системы;
- сведения о поломках и ремонте оборудования;
- сведения о замене или модификации программного обеспечения;
- сведения о перемещении оборудования.

После замены программного обеспечения рекомендуется самостоятельно проверить корректность расчетов должных величин.

5. Методика проведения бодиплетизмографии

5.1. Теоретические подходы для получения формул количественной оценки показателей внутригрудного объема и бронхиального сопротивления

Принцип измерения ВГО основан на законе Бойля-Мариотта, согласно которому при постоянных температуре и массе газа величина произведения давления газа (P) на его объем (V) является постоянной. После срабатывания заслонки обследуемый совершает несколько дыхательных

движений с небольшой амплитудой (≈ ± 1 кПа) и частотой от 0,5 до 1 Гц. Работа дыхательных мышц при перекрытых дыхательных путях изменяет давление внутри альвеол (ΔP_A) и объем легких, величина которого на момент срабатывания заслонки равна ВГО. Согласно закону Бойля-Мариотта, взаимосвязь P_A и ВГО может быть описана уравнением:

$$P_A \times ВГО = (P_A - \Delta P_A) \times (ВГО + \Delta V),$$

раскрываем скобки

$$P_A \times ВГО = P_A \times ВГО - \Delta P_A \times ВГО + P_A \times \Delta V - \Delta P_A \times \Delta V,$$

сокращаем $P_A \times ВГО$ в левой и правой частях равенства и переносим $\Delta P_A \times ВГО$ в левую часть

$$\Delta P_A \times ВГО = P_A \times \Delta V - \Delta P_A \times \Delta V$$

$$\Delta P_A \times ВГО = (P_A - \Delta P_A) \times \Delta V$$

Соответственно, величина ВГО может быть рассчитана как:

$$ВГО = (P_A - \Delta P_A) \times (\Delta V / \Delta P_A)$$

Поскольку относительно P_A величина ΔP_A очень мала и составляет менее 2 %, в этой части уравнения ею пренебрегают:

$$ВГО \approx (\Delta V / \Delta P_A) \times P_A, \text{ где } P_A = Pатм - P_{H2O}$$

При расчете ВГО за P_A принимается разница между атмосферным давлением (Ратм) и парциальным давлением паров воды (P_{H2O}) при температуре 37ºС, а за ΔP_A — изменение ротового давления (ΔРрот), так как при выполнении маневра перекрытия потока давление в ротовой полости становится равным альвеолярному. Под ΔV понимают изменение объема газа в кабине плетизмографа (ΔVк), определяемое по изменению давления в кабине (ΔРк).

В отличие от первоначальных модификаций бодиплетизмографов, в современных аппаратах существует возможность мгновенного преобразования ΔРк в ΔVк, поэтому для унификации получаемой информации принято сразу отображать на графиках не ΔРк, а ΔVк. При расчетах ΔVк принимается равным изменению объема легких (ΔVл), поскольку вызывается одним и тем же усилием дыхательных мышц в закрытой системе. В связи с тем, что всегда измеряется именно ΔVк, а не ΔVл, в названиях осей графиков измерений и в расчетных формулах обычно не делают уточнения и обозначают ΔVк просто как ΔV (shift volume).

Процесс измерения ВГО при дыхании с закрытой заслонкой визуализируется на экране монитора в виде замкнутых узких петель (петли ВГО), регистрируемых в координатах ΔРрот – ΔV (рис. 1в). Котангенс угла наклона регистрируемых петель к оси абсцисс (1/tg α) пропорционален ВГО. Измеренный методом бодиплетизмографии ВГО в момент перекрытия заслонки несколько превышает функциональную остаточную емкость легких (ФОЕ), при расчете которой учитывают объем мертвого пространства прибора (Vd) и объем, определяемый разницей ФОЕ и реального объема легких в момент перекрытия дыхательных путей (Vt,occ):

$$ФОЕ_{плет} = ВГО - Vd - Vt,occ$$

Возникновение Vt,occ связано с особенностями активации заслонки, которая срабатывает не в конце спокойного выдоха (на уровне ФОЕ), а в начале следующего за ним вдоха — при объеме, несколько превышающем ФОЕ (рис. 1а). Измерение Vt,occ происходит при каждом маневре измерения ВГО, а величина Vd определяется при производстве оборудования и однократно вводится в программное обеспечение (ПО) системы.

В случае использования фильтров в системах, прежде эксплуатировавшихся без них (за исключением ультразвуковых датчиков потока практически любая модель пневмотахометра может использоваться без фильтра) следует скорректировать установленное производителем значение Vd на величину мертвого пространства фильтра. Аналогичная процедура выполняется при

доукомплектации бодиплетизмографа дополнительными измерительными модулями, размещаемыми внутри кабины (например, модуля для определения диффузионной способности легких).
Измерение sRaw не требует от пациента выполнения каких-либо дыхательных маневров — его проводят при спокойном дыхании при частоте дыхания аналогичной частоте измерения ВГО. Одновременная регистрация потока воздуха (V') и изменений Рк, преобразуемых в ΔV, отображается на экране монитора в координатах V' — ΔV в виде замкнутых петель (петель sRaw), котангенс угла наклона которых к оси абсцисс (1/tg β) зависит от величины sRaw (рис. 1б). Расчет sRaw производят по формуле:

$$sRaw = (\Delta V / V') \times (Ратм - PH2O)$$

На основании измеренного sRaw современные приборы позволяют рассчитать ряд дополнительных параметров, например, общее для всех фаз дыхательного цикла специфическое сопротивление (sRawобщ).

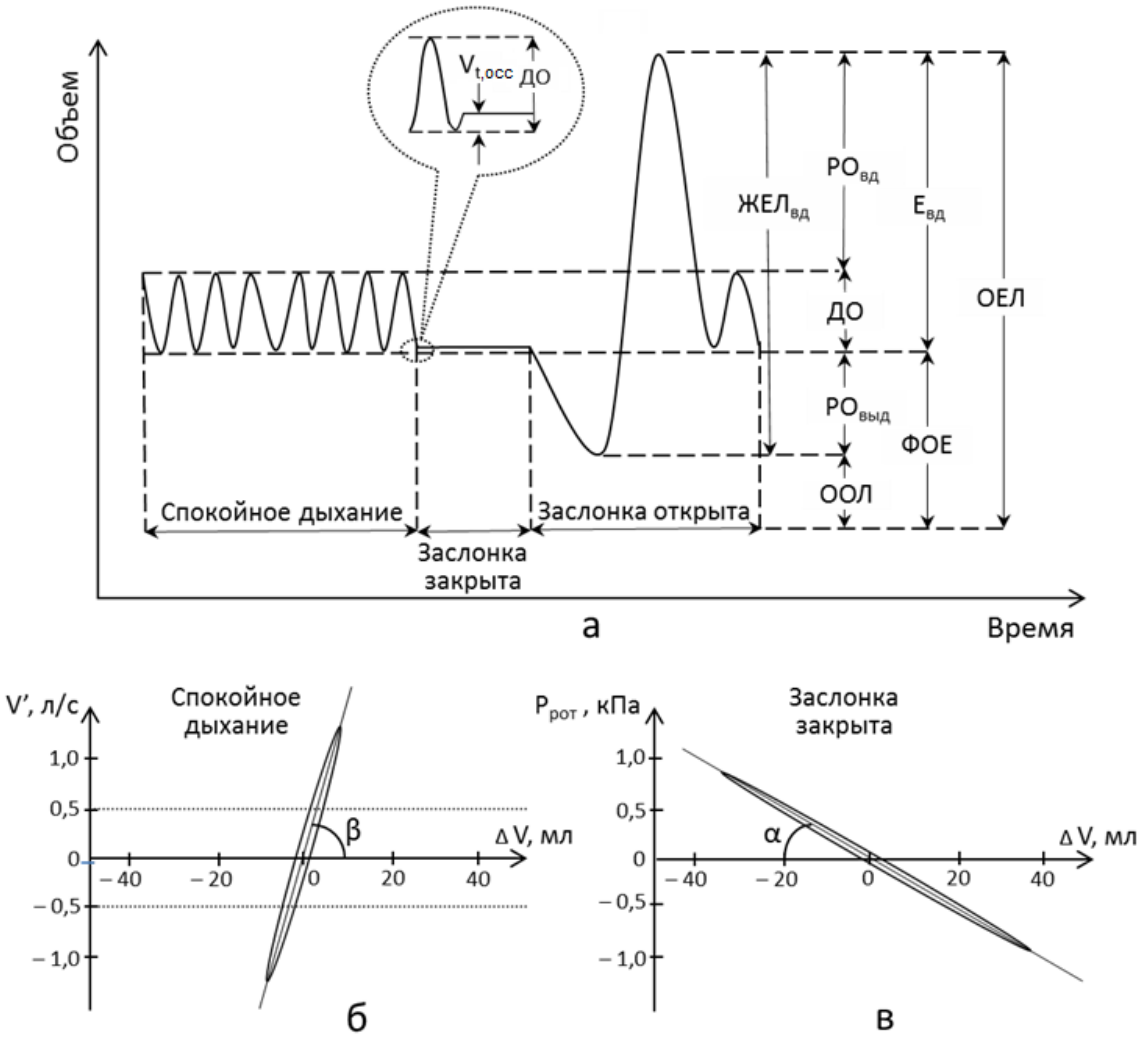


Рисунок 1. Схематическое изображение измерений при бодиплетизмографии:
а) последовательность выполнения дыхательных маневров и определение статических легочных объемов; б) измерение специфического бронхиального сопротивления — петля sR_{aw}; в) измерение внутригрудного объема — петля ВГО [Каменева М.Ю. и соавт., 2005].

5.2. Подготовка к бодиплетизмографии

После регистрации параметров окружающей среды и выполнения калибровки системы перед

началом исследования рекомендуется:

- получить от пациента информацию относительно имеющихся заболеваний; использования лекарственных препаратов, потенциально влияющих на результаты исследования (с указанием названия, дозы и времени последней ингаляции); курения, в том числе о времени выкуривания последней сигареты;
- измерить рост и массу тела пациента (без обуви) и внести эти данные в систему;
- проверить актуальность информации о пациенте в базе данных;
- объяснить пациенту порядок проведения исследования и важность правильного выполнения всех дыхательных маневров, продемонстрировать их выполнение.

Возраст рассчитывают, используя дату рождения и дату проведения исследования, и указывают число прожитых лет с точностью до одного знака после запятой. (у детей – число прожитых лет и месяцев). Рост определяют в сантиметрах, округляя до целого числа. Измерение роста производится без обуви, пациенту необходимо стоять с прямой спиной, смотреть перед собой, а ноги держать вместе. В тех случаях, когда измерить рост в положении стоя невозможно (например, пациенты в инвалидных креслах) или у пациентов с кифосколиозом, его можно определить по размаху рук [Quanjer P.H. et al., 2014]. В последнем случае фиксируют максимальное расстояние между средними пальцами. Повторное измерение роста у взрослых (25 лет и старше) целесообразно проводить не чаще одного раза в год. Пол указывается в соответствии со свидетельством о рождении, даже в случаях иной гендерной идентичности. Массу тела измеряют без уличной одежды и обуви в килограммах, с точностью до 0,5 кг. Указывают также популяционную (этническую) принадлежность пациента. Все перечисленные параметры используют для корректного расчета должных значений для конкретного обследуемого.

Бодиплетизмографию рекомендуется выполнять в положении больного сидя, с прямой спиной и слегка приподнятым подбородком. Ноги пациента должны иметь упор снизу; следует использовать регулировку положения кресла по высоте. Если по какой-то причине требуется проведение исследования в положении пациента стоя или каком-либо другом (отличном от регламентированного), это должно быть отражено в протоколе исследования.

При наличии у пациента съемных зубных протезов рекомендуется не снимать их при проведении бодиплетизмографии, однако в ситуации, когда они мешают плотному захвату пациентом загубника и становятся причиной утечки воздуха, следует продолжить исследование без них.

Одежда не должна сковывать движения обследуемого и ограничивать экскурсию грудной клетки и брюшной стенки. Из тех же соображений за 2 часа до исследования не рекомендуется обильный прием пищи [Graham B.L. et al., 2019].

При проведении бодиплетизмографии следует учитывать, что помимо газа, содержащегося в легких, компрессии и декомпрессии при выполнении дыхательных маневров подвергается газ, находящийся в желудочно-кишечном тракте. Специальные исследования показали, что в обычных условиях его объем не превышает 150 мл и существенно не влияет на результаты, однако при выраженном метеоризме его количество может быть значительным - это обстоятельство необходимо учитывать при назначении исследования: требуется подготовка пациента для уменьшения выраженности метеоризма.

Современные диагностические комплексы в достаточной степени защищены от бытовых источников электромагнитного излучения; в случае, если производителем бодиплетизмографа не указано обратного, пациент может оставить при себе портативные электронные устройства. Тем не менее, с целью удержания внимания обследуемого и оптимизации процедуры тестирования можно предложить пациенту перевести мобильные устройства в беззвучный режим и оставить их в отдалении от бодиплетизмографа. При размещении вблизи от бодиплетизмографа работающих на электричестве устройств следует ознакомиться с рекомендациями производителя для исключения их влияния посредством электромагнитного или теплового излучения на качество проводимых измерений.

5.3. Порядок проведения бодиплетизмографии

Исследование проводят в несколько этапов: определение сопротивления дыхательных путей и измерение статических легочных объемов и емкостей. Порядок этапов может варьировать в зависимости от ПО системы. Пациенту объясняют ход исследования, надевают на нос обследуемого зажим, размещают в кабине бодиплетизмографа и герметично ее закрывают. Во время исследования кабина должна оставаться герметично закрытой, а температура внутри и снаружи – постоянной. Герметичность камеры является условной: имеется небольшое отверстие, которое обеспечивает контролируемую утечку воздуха. Такая утечка воздуха сводит к минимуму не связанные с респираторными маневрами медленно происходящие изменения давления, которые вызваны повышением температуры (температурным дрейфом) из-за нагрева воздуха внутри кабины (рис. 2). Измерения начинают не сразу после размещения человека в кабине плетизмографа, а спустя некоторое время, после стабилизации внутри температуры и давления (обычно через 0,5-2 мин). После этого пациенту предлагается захватить губами и зубами мундштук. Во время измерений пациенту необходимо ладонями фиксировать щеки и область диафрагмы полости рта, так как во время маневра перекрытия потока щеки надуваются и спадаются, что влияет на качество измерений (рис. 2). Пациент должен сидеть прямо, не наклоняя и не запрокидывая голову.

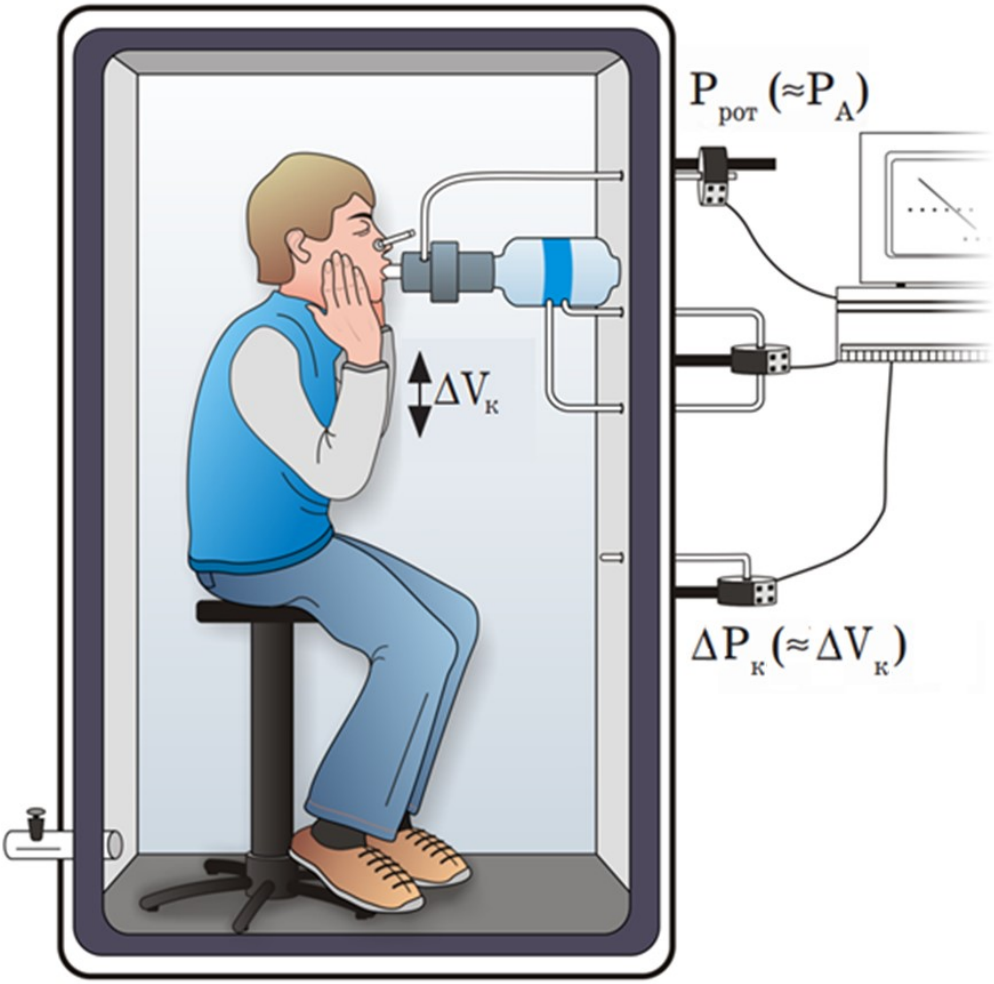


Рисунок 2. Проведение бодиплетизмографии. Во время измерения внутригрудного объема легких: необходимо плотно придерживать руками щеки и подбородок. [Савушкина О.И., Черняк А.В., 2017]

На одном из этапов измеряют бронхиальное сопротивление. Измеряют вначале специфическое бронхиальное сопротивление (sRaw). Регистрация петель sRaw не требует больших усилий от пациента, так как проводится при обычном или учащенном дыхании. Первоначально исследование проводили при частом поверхностном дыхании [DuBois A.B. et al., 1956], ПО современных приборов позволяет устранить влияние изменения температуры и влажности, так что даже при спокойном дыхании кривые вдоха и выдоха петли sRaw в норме тесно соприкасаются друг

с другом. В ходе одного исследования рекомендуется зарегистрировать по меньшей мере 5-10 петель sRaw. Оптимальное качество записи достигается, когда петли sRaw получаются равномерными и повторяемыми, в норме петли узкие, их стороны почти полностью прилежат друг к другу как на вдохе, так и на выдохе, однако у пациентов с выраженной обструкцией в экспираторной части петли между ними появляется пространство (рис.3). Петли записывают при дыхании пациента через загубник точно с такой же частотой дыхания, как во время маневра перекрытия потока, так как для расчета количественного показателя бронхиального сопротивления используется величина ВГО. Кроме того, от частоты дыхания зависит сопротивление дыхательных путей (ДП): чем чаще пациент дышит, тем более выражена неравномерность легочной вентиляции и выше бронхиальное сопротивление. Следовательно, для того чтобы можно было сравнить полученные показатели бронхиального сопротивления при повторных осмотрах, пациенту необходимо задавать одну и ту же частоту дыхания. С этой целью удобно использовать метроном (в некоторых устройствах есть функция контроля частоты дыхания пациента). В отчете, если ПО позволяет это сделать, необходимо указывать частоту дыхания и ВГО во время измерения бронхиального сопротивления. В рекомендациях ERS/ATS, опубликованных в 2023 году, рекомендуют проводить отдельно измерение сопротивления и оценку статических легочных объемов [Bhakta N.R., et al.2023].

На этапе определения легочных объемов и емкостей сначала производят измерение ФОЕ посредством проведения дыхательных маневров при перекрытии потока («дыхания против заслонки»), затем не отрываясь от загубника пациент выполняет маневр спокойной жизненной емкости легких (ЖЕЛ). Это так называемый «связанный» маневр измерения ОЕЛ и ее составляющих. При измерении ФОЕ дыхательный контур в конце спокойного выдоха перекрывается специальной заслонкой. С этого момента, придерживая руками щеки, в течение нескольких секунд необходимо имитировать дыхание: выполнять поверхностное (примерно ±1 кПа или ±10 см водн.ст.) и ритмичное дыхание с частотой 0,5-1 Гц (30-60 дыхательных движений в минуту) [Wanger J. et al., 2005, Quanjer Ph. H. et al, 1993]. Маневр может быть сложен для понимания обследуемым, поэтому целесообразно отрепетировать его до начала исследования, закрывая загубник рукой с противоположной стороны при дыхании. Показатель частоты дыхания во время маневра перекрытия потока целесообразно вывести на экран для контроля его величины во время выполнения попыток. От частоты дыхания, как было сказано выше, зависит бронхиальное сопротивление и распределение воздуха в легких, а следовательно, и измеряемые объемы. Во время маневра перекрытия потока у пациентов с бронхиальной обструкцией при увеличении частоты дыхательных движений более 60 в минуту может происходить завышение величины ФОЕ и ООЛ. Таким образом, для стандартизации исследования желательно добиваться дыхания обследуемого с частотой, близкой к рекомендованному диапазону. Использование метронома может помочь пациенту дышать с заданной частотой дыхания.

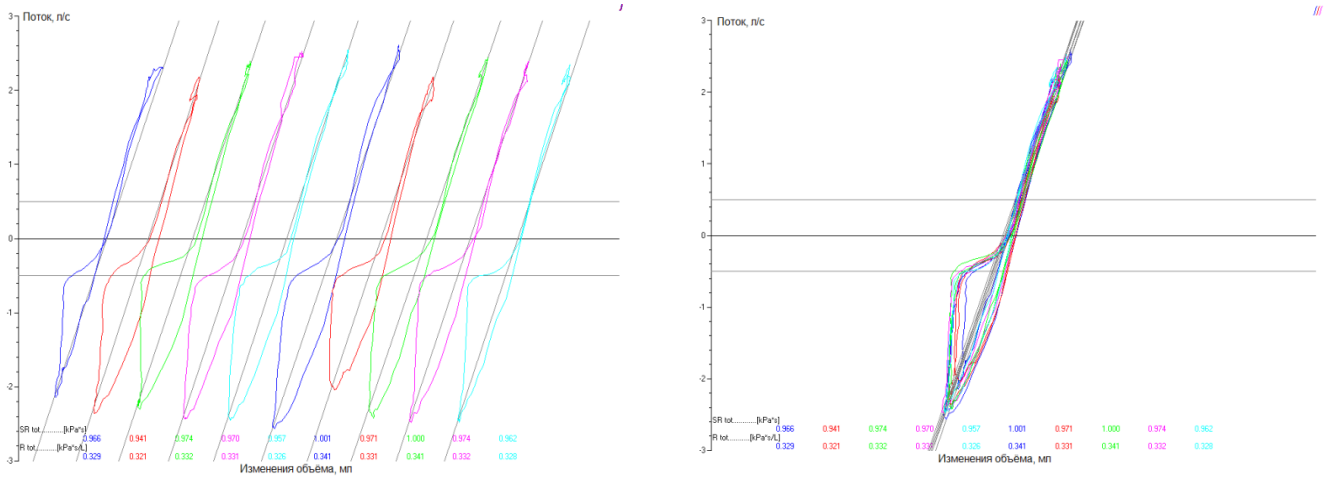
В «связанном» маневре по завершении каждого измерения ФОЕ и открытия заслонки, пациент по команде выполняет маневр ЖЕЛ. Для регистрации минимальных значений ООЛ рекомендуется измерять инспираторную ЖЕЛ (ЖЕЛвд): после открытия заслонки пациент не отрываясь от загубника делает максимально глубокий выдох (до уровня ООЛ), что позволяет измерить резервный объем выдоха ($РО_{выд}$), затем - максимально глубокий вдох (до уровня ОЕЛ) (рис.1а). Далее обследуемому предлагается сделать спокойный выдох и перейти к спокойному дыханию. Необходимо зарегистрировать **не менее** 3 технически приемлемых маневров перекрытия потока и последующих за ними маневров РОвыд и ЖЕЛвд. При необходимости пациент между попытками может отсоединиться от загубника и отдохнуть 5-10 с. Если пациент задыхается и ему трудно после определения ФОЕ выполнить маневр РОвыд, то возможен второй вариант «связанного» дыхательного маневра: после измерения ФОЕ и открытия заслонки пациент не отрываясь делает максимально глубокий вдох (до уровня ОЕЛ), что позволяет измерить емкость вдоха ($Е_{вд}$) и следующий за ним максимально глубокий выдох (до уровня ООЛ) – для измерения $ЖЕЛ_{выд}$. В рекомендациях ERS/ATS, опубликованных в 2023 году, рекомендуют использовать второй вариант «связанного» маневра ЖЕЛ [Bhakta N.R., et al.2023].

Альтернативой «связанному» маневру измерения ОЕЛ и ее составляющих является раздельное определение показателей; на первом этапе измеряется ФОЕ (не менее трех технически приемлемых попытки), а затем – ЖЕЛ и ее компоненты. При этом измерение ЖЕЛ выполняется в тех

же условиях, что и определение ФОЕ – т.е. с закрытой дверью кабины бодиплетизмографа. Этот метод лучше для больных с тяжелой ХОБЛ или с выраженной одышкой, которым достаточно сложно выполнить «связанный» маневр измерения ФОЕ+ЖЕЛ [Wanger J. et al., 2005]. Преимущество данного подхода заключается в оптимизации количества дыхательных маневров (и, соответственно, трудозатрат обследуемого); например, при выраженном разбросе полученных значений ВГО и составляющих ЖЕЛ. Недостатком данного метода является возможная разница между значениями ФОЕ, полученными в ходе разных дыхательных маневров. Поэтому рекомендуется использовать «связанный» маневр измерения ОЕЛ, однако в ПО аппаратуры некоторых производителей включена опция раздельного поэтапного проведения бодиплетизмографии. В клинической практике для получения технически приемлемых измерений статических легочных объемов следует проводить исследование с помощью «связанного» маневра.

5.4. Критерии качества бодиплетизмографии

Качественный контроль петель специфического бронхиального сопротивления можно осуществлять по их графическому представлению: правильно зарегистрированные петли должны идти параллельно друг другу (рис. 3) или накладываться друг на друга. Показатели считаются повторяемыми, если значения Raw и sGaw равны ±10% от среднего значения.



а) б)

Рисунок 3. Петли специфического бронхиального сопротивления
а) представление петель каждого дыхательного цикла по отдельности. б) возможность отображения петель друг поверх друга позволяет оценить повторяемость измерения. Вид экрана может отличаться в зависимости от модели оборудования и используемого ПО.

Далее оценивается качество измерения статических легочных объемов:

1. Перед тем как активировать заслонку для перекрытия потока, необходимо добиться спокойного дыхания обследуемого; дыхательный объем должен оставаться на изолинии (рис. 1а). В соответствии с международными рекомендациями по спирометрии устойчивым уровнем конечно-экспираторного объема является уровень как минимум трех дыхательных циклов с разницей между максимальным и минимальным объемом легких в конце выдоха в пределах 15% от ДО [Graham B.L. et al. 2019]. Только после достижения достоверного, устойчивого конечно-экспираторного уровня можно перейти к маневру перекрытия потока.
2. Во время выполнения маневров перекрытия потока следует обращать внимание на дыхание пациента: задержка дыхания, «довдыхание» (т.е. увеличение глубины вдоха непосредственно перед, либо в процессе маневра), отсоединение от загубника, недостаточное или избыточное давление, оказываемое на заслонку и т.д., ведут к получению петель ВГО различной формы и, как следствие, отсутствию повторяемости измерений.
3. Непосредственное перекрытие потока происходит не в момент активации заслонки в

конце выдоха, а в начале последующего вдоха, поэтому образуется разница между ВГО и ФОЕ. На рисунке 1а эта разница обозначается как $V_{t,occ}$; у различных производителей обозначение этого показателя может быть представлено как dVol, dVolVTG или switch-in error (ошибка заслонки). Для точного расчета величины ФОЕ программа автоматически вычитает величину $V_{t,occ}$ от ВГО.

4. При перекрытии потока заслонкой пациенту следует выполнить серию поверхностных вдохов-выдохов против закрытой заслонки (~±1 кПа) с частотой дыхания 0,5-1,0 Гц. Должны быть зарегистрированы приемлемые маневры дыхания (т. е. серия из двух-трех почти наложенных друг на друга прямых линий на графике давление-объем) (рис.4а,5а). При этом отсутствует температурный дрейф (рис.4б). Если регистрируется отклонение кривых «давления перекрытия» от средней линии (рис. 5б), то это говорит о том, что в момент перекрытия потока образуются утечка воздуха (зазор между мундштуком и губами или неплотно надет носовой зажим). В этом случае нужно попросить пациента плотнее сжимать мундштук губами, поправить носовой зажим и повторить маневр перекрытия потока.

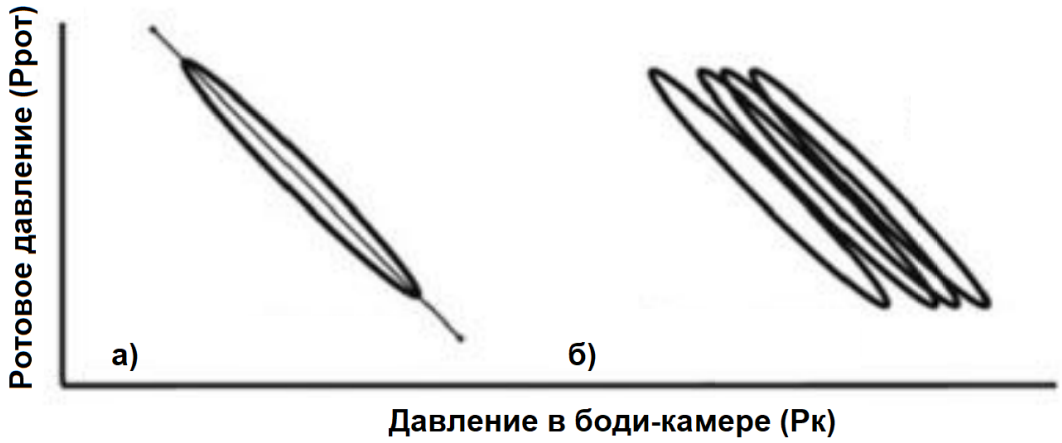
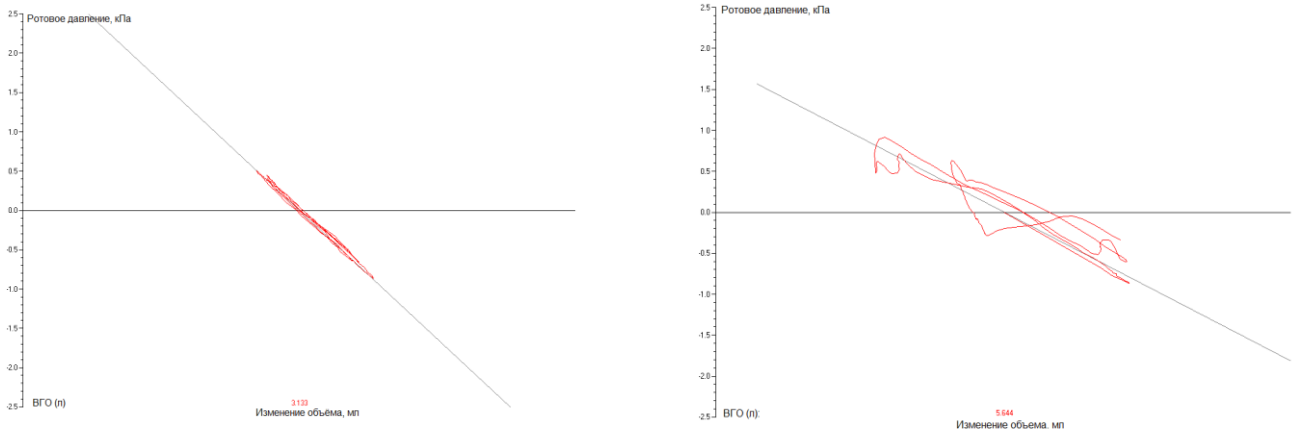


Рисунок 4. Кривые «давления перекрытия» при закрытой заслонке: а) без температурного дрейфа – кривые накладываются друг на друга – практически «закрытая» петля; б) с температурным дрейфом – «открытые» петли [Bhakta N.R., et al.2023].



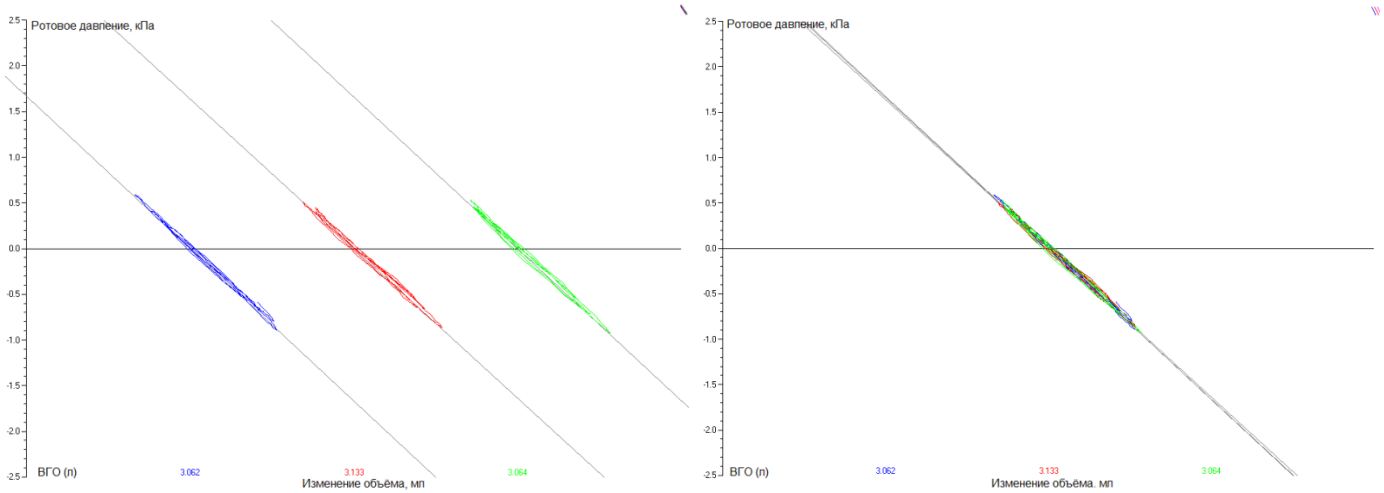
а) б)

Рисунок 5. Кривые изменения давления и объема при перекрытии потока: визуальный контроль измерения ВГО: а) – серия из двух-трех почти наложенных друг на друга прямых линий кривых «давления перекрытия» на графике давление-изменение объема, без температурного дрейфа; б) отклонение кривых «давления перекрытия» от средней линии из-за утечки воздуха (кривые вдоха и выдоха не параллельны и не прилежат друг к другу). Вид экрана может отличаться в зависимости от модели оборудования и используемого программного обеспечения.

5. Следует оценить повторяемость полученных результатов. Во время проведения бодиплетизмографии необходимо получить не менее 3 правильно выполненных маневров перекрытия потока. Из полученных показателей вычисляют среднее значение ФОЕ ($ФОЕ_{ср}$). Показатели считаются повторяемыми, если отношение разности между максимальным и минимальным

значениями ФОЕ к ФОЕср не превышает 5%. Для визуального контроля повторяемости результатов оценивается форма петель ВГО: замкнутые узкие петли должны отображаться параллельно друг другу, иметь максимально схожий угол наклона (рис.6а) и при наложении практически сливаться (рис.6б).

6. Основным критерием качества при спирометрии является повторяемость результатов. Для корректного определения ЖЕЛ необходимо выполнить минимум три технически приемлемых измерения, при этом разница между двумя наибольшими значениями ЖЕЛ не должна превышать 150 мл или 10% от величины ЖЕЛ, причем ориентироваться следует на большее по величине значение [Методические рекомендации по использованию метода спирометрии 2023 г.]. Из полученных показателей вычисляют среднее значение РОвыд (РОвыдср). Если после выполнения 8 попыток критерий повторяемости не достигнут, то исследование необходимо прекратить и повторить его после перерыва (20-30 мин) или в другой день. В протокол исследования вносят максимальное из полученных значений ЖЕЛ



а) б)

Рисунок 6. Кривые изменения давления и объема при перекрытии потока: визуальный контроль повторяемости показателя ВГО: а) – кривые параллельны и имеют практически одинаковый угол наклона; б) – кривые накладываются друг на друга. Вид экрана может отличаться в зависимости от модели оборудования и используемого программного обеспечения.

Дверь камеры должна быть обязательно закрыта при выполнении маневра перекрытия потока и регистрации петель бронхиального сопротивления для соблюдения условий закона Бойля−Мариотта.

Таким образом, при выполнении вышеперечисленных требований к проведению бодиплетизмографии будут получены показатели ФОЕ и бронхиального сопротивления оптимального качества, что позволит сравнивать результаты исследований между собой, даже если повторные освидетельствования будут проводиться в разных медицинских учреждениях.

5.5. Показатели бодиплетизмографии

Сопротивление дыхательных путей:

Специфическое сопротивление дыхательных путей (sRaw) рассчитывается исходя из давления газа и соотношения изменения объема грудной клетки к потоку воздуха во рту. sRaw обычно применяется для измерения сопротивления у детей, поскольку он не требует измерения объема легких с использованием дыхательного маневра против закрытой заслонки, что трудно выполнить у этой группы пациентов. Форма петли sRaw зависит от изменения скорости потока на вдохе и выдохе, поэтому существуют различные методы расчета величины удельного сопротивления дыхательных путей:

- *общее специфическое сопротивление* (sRawобщ) (рис. 7а). Определяется величиной

угла наклона прямой линии, проведенной между двумя точками максимального изменения объема на вдохе и выдохе [Islam M. et al., 1974]. Отличительной чертой sRawобщ является его чувствительность к обструкции периферических ДП. Потенциальным недостатком sRawобщ является высокая вариабельность между тестами, поскольку в расчетах используются экстремальные значения изменения объема во время дыхательных маневров;

- *эффективное специфическое сопротивление* (sRawэфф) (рис. 7б) рассчитывается из соотношения площади работы дыхания к площади петли поток-объем при нормальном дыхании [Matthys H. et al., 1964]. Это соотношение определяет наклон линии, представляющей sRawэфф. Данный показатель используется для интегральной оценки сопротивления ДП в течение всего дыхательного цикла, поэтому характеризует проходимость центральных дыхательных путей в большей степени, чем sRawобщ;
- *специфическое сопротивление между потоками 0,5 л/с* (sRaw0,5 или sR0.5) (рис. 7в) - определяется углом наклона линейной части петли sRaw между инспираторным и экспираторным потоками скоростью 0,5 л/с [DuBois A.B. et al., 1956; Hantos Z. et al., 1978]. Потенциальным преимуществом sRaw0,5 является то, что сопротивление измеряется с использованием заданного значения скорости потока, поскольку сопротивление зависит от скорости потока, особенно у пациентов с обструкцией дыхательных путей. Поэтому невысокое значение потока в 0,5 л/с повысило повторяемость и сопоставимость измерений. Однако sRaw0.5 отражает в основном сопротивление крупных бронхов и обладает гораздо меньшей чувствительностью к аномалиям периферических дыхательных путей [Goldman M.D. et al., 2005].

Важным параметром является величина, обратная сопротивлению дыхательных путей, – проводимость дыхательных путей. *Специфическую проводимость дыхательных путей* (sGaw) определяют по формуле: sGaw = 1/sRaw. Таким образом, sGaw – это «нормализованная по объему» проводимость дыхательных путей. Специфическая проводимость используется для надежной оценки состояния дыхательной системы у пациентов с тяжелой обструкцией дыхательных путей, у которых может возникнуть эмфизема [Goldman M.D. et al., 2005]. sGaw обладает большой чувствительностью к изменениям, вызывающим увеличение сопротивления в центральных отделах бронхиального дерева, но гораздо меньшей к диагностике обструкции периферических дыхательных путей [Kaminsky D.A. 2012].

В клинической практике обычно используют бронхиальное сопротивление (Raw) - отношение специфического бронхиального сопротивления (sRaw) к объему воздуха в легких в момент измерения, измеряемому во время дыхательных маневров с закрытой заслонкой:

Raw = sRaw / ВГО.

В исследованиях Briscoe и DuBois [Briscoe W. et al., 1958; DuBois A.B. et al., 1956] было показано, что у здоровых людей Raw определяют несколько факторов, из них одним из наиболее важных является объем легких. Величина сопротивления, выраженная в виде Raw, зависит от объема легких, в отличие от параметров sRaw и sGaw, которые относительно независимы от изменений объема легких. При этом взаимосвязь между объемом легких и проводимостью является линейной: с увеличением объема легких проводимость увеличивается. Следовательно, в случае увеличения ВГО Raw может оставаться в пределах нормы, несмотря на повышенное значение sRaw. Такая ситуация часто наблюдается у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких, у которых была выявлена эмфизема легких [Goldman M.D. et al., 2005].

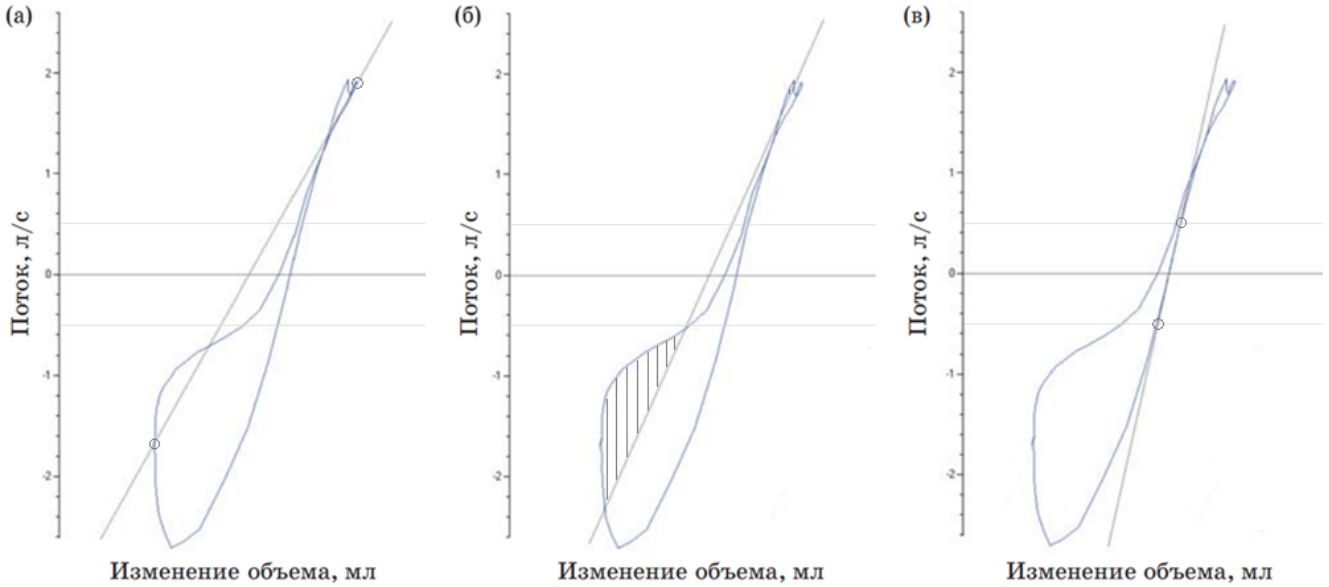


Рисунок 7. Петля специфического бронхиального сопротивления у больного с выраженными обструктивными нарушениями легочной вентиляции: а – общее специфическое сопротивление (sRawобщ) - точки максимального изменения объема на петле специфического сопротивления соединяются прямой: sRawобщ = 2,47 кПа с; б – эффективное специфическое сопротивление (sRawэфф) - значение параметра получается из отношения площади работы дыхания к площади петли поток-объем при нормальном дыхании: sRawэфф = 1,95 кПа с ; в – специфическое сопротивление между потоками 0,5 л/с (sRaw0,5) - прямая линия между значениями sRaw при плюс и минус 0,5 л/сек: sRaw0,5 = 0,91 кПа с.

Статические легочные объемы.

При измерении статических легочных объемов (посредством определения ВГО с последующим маневром спокойной спирометрии) оценивают следующие показатели:

- ФОЕпл — *функциональная остаточная емкость легких*, измеренная методом бодиплетизмографии. Показатель вычисляется как среднее значение из полученных в каждом маневре значений разницы между ВГО и $V_{t,occ}$. Величину ФОЕ оценивают по среднему значению ФОЕ (ФОЕср), полученному из технически приемлемых маневров перекрытия потока (не менее 3).

- *ЖЕЛ — жизненная емкость легких, измеренная при спокойной спирометрии*

В итоговый протокол выносится максимальное значение ЖЕЛ (ЖЕЛмакс) из всех приемлемых маневров.

- *$РО_{выд}$ — резервный объем выдоха*

В итоговый протокол выносится среднее значение РОвыд (РОвыд ср) всех приемлемых маневров (если ПО позволяет это сделать).

- *ОЕЛ — общая емкость легких*

Значение ОЕЛ является расчетной величиной; используют два способа его расчета:

ОЕЛ = ООЛ + ЖЕЛмакс

и

ОЕЛ = ФОЕср + Евд ср

Рекомендуется использовать первую формулу для расчета (если ПО позволяет это сделать), для этого необходимо предварительно вычислить остаточный объем легких (ООЛ) - см. ниже.

• *ООЛ — остаточный объем легких*

Значение ООЛ также является расчетной величиной; используется два способа расчета:

$$ООЛ = ФОЕ_{ср} – РО_{выд\ ср}$$

и

$$ООЛ = ОЕЛ – ЖЕЛ_{макс}$$

Рекомендуется использовать первую формулу для расчета (если ПО позволяет это сделать).

• *ООЛ/ОЕЛ — отношение ООЛ к ОЕЛ*

Данный показатель является важным признаком наличия или отсутствия т.н. «воздушных ловушек» - см. ниже.

• *$Е_{вд}$ – инспираторная емкость легких и отношение $Е_{вд}$/ОЕЛ.* Было показано, что гиперинфляция легких в покое, оценивавшаяся по величине отношения $Е_{вд}$/ОЕЛ, была независимым предиктором респираторной и общей смертности у пациентов с ХОБЛ [Casanova C. et al., 2005].

6 Интерпретация результатов бодиплетизмографии

6.1 Должные величины

Количественную оценку данных бодиплетизмографии, как и спирометрии, проводят путем сопоставления измеренных величин с их должными значениями, полученными при обследовании здоровых некурящих лиц. Должные величины зависят от антропометрических параметров (в основном роста), пола, возраста и популяции (этнической групы). Масса тела влияет на величину измеряемых объемов лишь в условиях значительного ее повышения. Так, при индексе массы тела (ИМТ) > 30 кг/м² отмечается снижение $РО_{выд}$ и ФОЕ [Jones R.L. et al., 2006]. (У детей и подростков также отмечается снижение ФОЕ и $РО_{выд}$ при ожирении с массой тела выше верхней границы нормы (ВГН), точнее, выше 97-го процентиля [Winck A.D. et al., 2016]). Тем не менее, другие измеренные объемы легких, у большинства пациентов с ожирением по-прежнему находятся в пределах нормы, в частности ОЕЛ обычно не снижается до тех пор, пока ИМТ не превысит 40 кг/м² [Jones R.L. et al., 2006]. Избыточный вес может оказывать влияние на легочные объемы, искажая типичные изменения, наблюдаемые при обструктивных нарушениях, что может затруднять интерпретацию полученных результатов [Tan E.K. et al., 2013]. Сложности в интерпретации результатов могут возникнуть при обследовании женщин в 3-м триместре беременности как следствие уменьшения легочных объемов [McAuliffe F. et al., 2002].

Существует множество систем должных величин, из которых при обследовании лиц старше 18 лет наиболее часто использовалась система, предложенная еще в 1993 году Европейским сообществом угля и стали [European Community for Coal and Steel: ECCS, 1993]. Недостатком данных должных величин является то, что они разработаны для европейской популяции для пациентов от 25 до 70 лет, поэтому должные величины, выходящие за эти пределы могут, быть ошибочными.

У детей должные значения рассчитывали по уравнениям регрессии, разработанным Zapletal и соавт. Однако, эта система должных величин основана только на измерении роста обследуемого без учета возраста [Zapletal A. et al., 1987], что может приводить к искажению результатов в период полового созревания [Koopman M. et al., 2011]. Эти системы были разработаны для европейской популяции на основе единой методологии.

Возможность применения системы должных величин ограничена параметрами здоровых лиц, обследованных в рамках ее разработки. Наиболее важна популяционная идентичность, также важно соответствие обследуемых по росту и возрасту. Следует избегать экстраполяции должных величин за пределы указанных диапазонов роста и возраста. Если показатели возраста или роста пациента выходят за границы популяции, исследовавшейся для разработки должных величин, то в итоговом протоколе исследования следует указать, что при определении должных значений была проведена экстраполяция данных.

В 2021 году экспертная группа ERS опубликовала работу по расчету должных значений для

показателей бодиплетизмографии (ФОЕ, ОЕЛ, ООЛ, ООЛ/ОЕЛ, $РО_{выд}$, $Е_{вд}$, ЖЕЛ) (Global Lung function Initiative — GLI) в возрастном диапазоне от 5 до 80 лет. Следует упомянуть, что популяция для вычисления должных значений GLI была ограничена обследованием европейцев. В связи с этим при использовании должных величин статических объемов системы GLI популяционная (расовая) принадлежность должна быть отражена в итоговом протоколе исследования [Hall G.L. et al., 2020].

Система должных величин характеризует диапазон нормальных значений показателя в здоровой популяции. Для определения этого диапазона используют уравнение регрессии и соответствующую ему величину стандартного отклонения (SD). С помощью уравнения рассчитывают референсное (должное) значение величины (долж.), представляющую собой среднее арифметическое значение показателя, и SD, характеризующее разброс (дисперсию) его значений в обследуемой популяции. При оценке показателей функции системы дыхания за диапазон нормальных значений принимают интервал от 5 до 95 процентиля – 90% доверительный интервал (рис.7). Для анализа показателей бодиплетизмографии используют нижнюю границу нормы (НГН – 5 процентиль) и верхнюю границу нормы (ВГН – 95 процентиль), их значение определяют по формулам:

НГН = должное значение – 1,645 x SD,
ВГН = должное значение + 1,645 x SD.

Современные системы позволяют выводить на экран и в протокол не только значения должных величин, но и значения НГН и ВГН.

Наличие патологических отклонений каждого из показателей предлагается определять с одновременным использованием следующих критериев границы нормы: НГН и/или z-оценки. По z-оценке определяют, насколько измеренная величина показателя отличается от его должного значения, при этом мерой отклонения служит SD. Значения z-оценки от – 1,645 до +1,645 соответствуют диапазону нормальных значений (рис.8). ERS/ATS рекомендует использовать для оценки тяжести снижения функциональных показателей значение z-оценки: значения z-оценки >-1,645 характеризуют норму, значения z-оценки от -1,65 до -2,5 – нарушения легкой степени, значения z-оценки от -2,51 до -4 – средней степени, а значения z-оценки <-4,1 – тяжелые нарушения. Следует учитывать, что не все системы для проведения бодиплетизмографии имеют ПО, обеспечивающее отображение z-оценки на экране или при печати. В этом случае необходимо сравнивать полученное значение со значением 5 или 95 процентилей, а не использовать фиксированное значение (например, 80% от должного значения в качестве НГН). Следует помнить об упоминании в заключении использовавшихся должных величин и стандартов выполнения исследования.

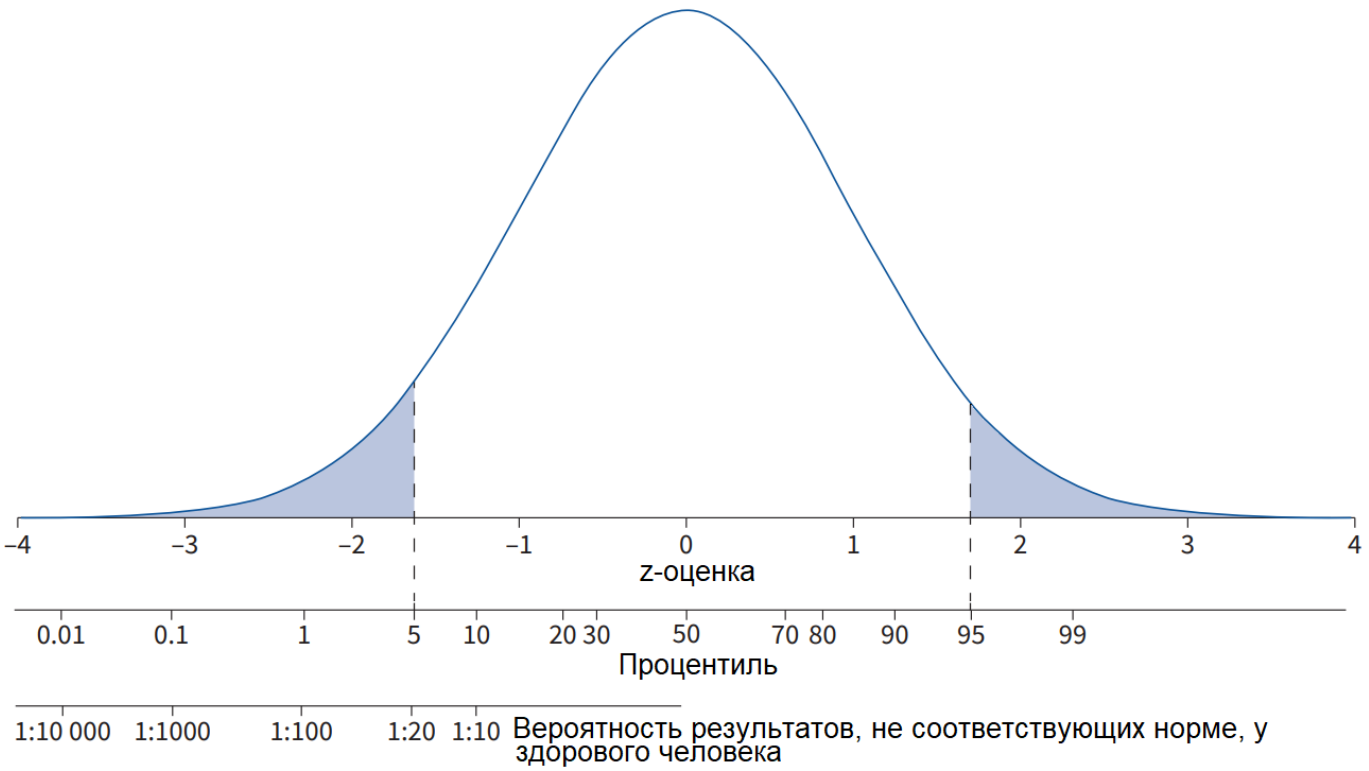


Рисунок 8. Нормальное распределение с отображенными z-оценки и процентилей. Процентиль можно интерпретировать как вероятность того, что у здорового человека результаты находятся в пределах нормы (т. е. частота ложно-положительных результатов). [Stanojevic S et al. 2022]

6.2 Анализ результатов бодиплетизмографии

Выявленное при спирометрии снижение ЖЕЛ либо ФЖЕЛ является лишь косвенным признаком рестриктивных вентиляционных нарушений и часто встречается при выраженной обструкции; для подтверждения рестриктивных нарушений обязательно измерение ОЕЛ.

Роль бодиплетизмографии в диагностике обструктивных нарушений невелика, однако, в ряде случаев сужение дыхательных путей может проявляться повышением ФОЕ, ООЛ или их доли в структуре нормальной или повышенной ОЕЛ (ФОЕ/ОЕЛ, ООЛ/ОЕЛ) без изменения показателей спирометрии.

6.2.1. Рестриктивный тип вентиляционных нарушений

Снижение ОЕЛ ниже НГН (менее 5-го процентиля) (рис. 9; таб.2) является доказательством наличия рестриктивных нарушений вентиляции.

В случае выявления при спирометрии сниженной ФЖЕЛ в условиях нормального отношения ОФВ$_1$/ФЖЕЛ следует исключить наличие рестриктивных вентиляционных нарушений (при условии качественного выполнения пробы ФЖЕЛ). Однако снижение ФЖЕЛ само по себе не свидетельствует о рестриктивном нарушении вентиляционной способности легких; падение ОЕЛ сопровождает снижение ФЖЕЛ менее, чем в половине случаев [Aaron S.D. et al., 1999]. И наоборот, у взрослых нормальная ФЖЕЛ и отношение ОФВ1/ФЖЕЛ с большой степенью вероятности исключают рестриктивные нарушения вентиляции [Aaron S.D. et al., 1999]. В большинстве случаев при рестриктивных нарушениях отмечается пропорциональное снижение ОФВ1, ФЖЕЛ и ОЕЛ; такой тип вентиляционных нарушений в рекомендациях ERS/ATS определяют как «простая рестрикция» [Stanojevic S. et al., 2022]. Однако у некоторых пациентов наблюдается снижение ЖЕЛ непропорционально снижению ОЕЛ, обусловленное непропорционально высоким ООЛ или ФОЕ. Этот паттерн в рекомендациях ERS/ATS определяется как «сложная рестрикция»; полагают, что такие

изменения связаны с процессами, нарушающими опустошение легких, такими как нервно-мышечное заболевания, ограничение подвижности грудной клетки или скрытая обструкция с формированием «воздушных ловушек» [Stanojevic S et al., 2022].

При рестриктивных вентиляционных нарушениях часто наблюдается снижение ООЛ. Однако при ряде заболеваний (например, при саркоидозе и пневмонии), нередко встречается изолированное снижение ООЛ, что, по мнению некоторых экспертов, обусловлено препятствующей спадению бронхов на выдохе радиальной тягой эластических элементов легких, и, следовательно, уменьшению воздушности легочной ткани [Шик Л.Л., Канаев Н.Н., 1980]. Кроме того, снижение ООЛ иногда является единственным физиологическим отклонением у пациентов с заболеваниями грудной клетки (например, при деформации таковой), или патологией внутренних органов (например, при застойной сердечной недостаточности) [Quanjer P. et al., 1993].

Одним из ранних признаков рестриктивной патологии легких является снижение $Е_{вд}$. Однако в этом случае показатель ОЕЛ также становится ниже НГН [Савушкина О.И., Черняк А.В., 2017].

Изолированное снижение РОвыд может быть следствием избыточной массы тела, слабости дыхательных мышц, наличия свободной жидкости в брюшной полости, а также нередко наблюдается при беременности [Jones R. et al., 2006; Littleton S. et al., 2017; Tan E. et al., 2017].

Сопротивление дыхательных путей может быть в пределах нормы или увеличенным.

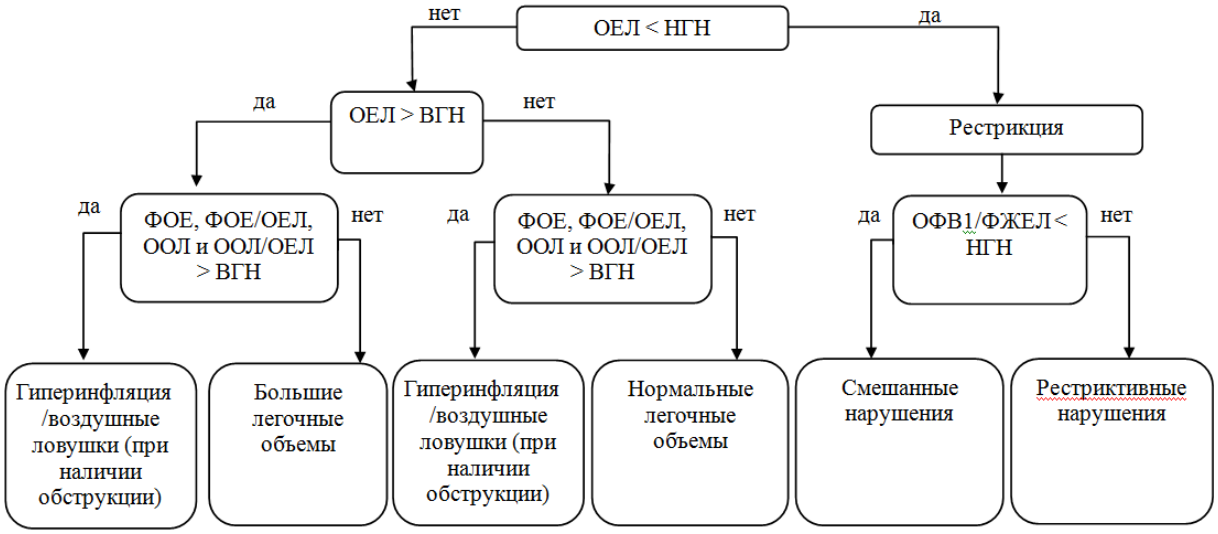


Рисунок 9. Упрощенный алгоритм интерпретации результатов измерения легочных объемов. По показателю ОЕЛ определяют наличие или отсутствие рестрикции; значение ОЕЛ менее нижней границы нормы (НГН) (правая часть схемы) указывает на наличие рестриктивных нарушений. При сопутствующей обструкции (ОФВ1/ФЖЕЛ < НГН при использовании набора должных значений GLI и/или ОФВ1/ЖЕЛ < НГН при использовании набора должных значений ECCS) говорят о смешанных нарушениях. При отсутствии обструктивных нарушений снижение ЖЕЛ непропорционально ОЕЛ (ФОЕ/ОЕЛ и ООЛ/ОЕЛ > верхней границы нормы (ВГН)) наблюдается при ожирении или нервно-мышечных заболеваниях. При нормальном показателе ОЕЛ рестриктивные нарушения исключаются (левая часть рисунка). Необходимо отметить, что при наличии обструкции гиперинфляция может наблюдаться при одновременном увеличении ОЕЛ, ООЛ и ФОЕ или же при увеличении только ФОЕ или ФОЕ и ООЛ. В первом случае увеличение ОЕЛ указывает на потерю эластичности легочной ткани, что, вероятно, связано с эмфиземой, тогда как во втором случае увеличение ФОЕ или ООЛ без увеличения ОЕЛ может наблюдаться при хроническом бронхите или бронхиальной астме. При наличии обструкции увеличение ООЛ и ООЛ/ОЕЛ свидетельствует о задержке воздуха в легких («воздушных ловушках»).

Таблица 2. Классификация вентиляционных нарушений вентиляции по данным бодиплетизмографии

	ОЕЛ	ФОЕ	ООЛ	ФОЕ/ОЕЛ	ООЛ/ОЕЛ	Комментарии
Большие легочные объемы	↑	↑	↑	Норма	Норма	Вариант нормы, при значениях выше ВГН
Обструкция	Норма / ↑	Норма / ↑	↑	Норма / ↑	↑	Повышение ФОЕ – гиперинфляция легких; повышение ООЛ и ООЛ/ОЕЛ – «воздушные ловушки» (например, при ХОБЛ)
Рестрикция	↓	↓	↓ / Норма / ↑	Норма	Норма / ↑	ИЗЛ (снижение ОЕЛ и ее составляющих) или дистальная обструкция с «воздушными ловушками» при ожирении (снижение ОЕЛ и увеличение ООЛ/ОЕЛ, непропорциональное снижение ФЖЕЛ)
Смешанные нарушения	↓	Норма / ↑	Норма / ↑	Норма / ↑	Норма / ↑	Комбинация ХОБЛ и ИЗЛ
Слабость дыхательных мышц	↓	Норма / ↑	↑	↑	↑	Парез диафрагмы
Недостаточное усилие	↓	Норма	↑	↑	↑	Недостаточное усилие при выполнении маневров
Ожирение	Норма / ↓	↓	Норма / ↓	Норма / ↓	Норма / ↓	Снижение РОвыд; ФОЕ, снижение ОЕЛ при ИМТ > 40 кг/м² [Jones R.L. et al., 2006]

?

6.2.2. Обструктивный тип вентиляционных нарушений

Основным методом диагностики обструктивного синдрома нарушений является спирометрия, поскольку обструкция дыхательных путей чаще всего проявляется снижением отношений $ОФВ_1$/ЖЕЛ при использовании набора должных значений ECCS или $ОФВ_1$/ФЖЕЛ при использовании набора должных значений GLI и не всегда сопровождается увеличением легочных объемов. Роль бодиплетизмографии в диагностике обструктивных нарушений вентиляции невелика, тем не менее, в ряде случаев сужение дыхательных путей может проявляться повышением ООЛ или его доли в структуре нормальной или повышенной ОЕЛ (ООЛ/ОЕЛ) без изменения показателей спирометрии.

При выраженной бронхиальной обструкции происходит увеличение ОЕЛ. При увеличении ОЕЛ определяются также увеличенные ООЛ и ФОЕ [Шик Л.Л., Канаев Н.Н., 1980]. При выраженных обструктивных нарушениях также может снижаться ЖЕЛ за счет увеличения ООЛ.

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 ДП, что препятствует выходу воздуха из альвеол и способствует возникновению «воздушных ловушек» [Черняк А. В. и соавт., 2016]. Таким образом, по результатам бодиплетизмографии делать заключение о «воздушных ловушках» можно в том случае, если при наличии признаков бронхиальной обструкции увеличивается ООЛ и его доля в ОЕЛ, т.е. повышается показатель ООЛ/ОЕЛ. Нормальные данные спирометрии и увеличение ООЛ [Воробьева З. В. И соавт., 2008], а также сочетание увеличенного ООЛ с нормальным бронхиальным сопротивлением на выдохе [Кольцун С.С. и соавт., 2003] могут наблюдаться при изолированной обструкции мелких (менее 2 мм в диаметре) воздухоносных путей [Шик Л.Л., Канаев Н.Н., 1980].

Увеличение ФОЕ чаще всего обусловлено нарушением бронхиальной проходимости. Увеличение ФОЕ при наличии бронхиальной обструкции свидетельствует о статической гиперинфляции легких [Черняк А. В. и соавт., 2016]. Одновременно с увеличением ФОЕ при гиперинфляции легких могут быть также увеличены и ООЛ, и ОЕЛ или только ООЛ.

Показатель $Е_{вд}$ позволяет косвенно судить о величине ФОЕ: при гиперинфляции легких $Е_{вд}$/ОЕЛ снижается, при этом ОЕЛ остается в пределах нормы или увеличивается.

Измерение сопротивления дыхательных путей позволяет детализировать характер выявленных обструктивных нарушений. Величина Raw в основном определяется величиной просвета центральных отделов дыхательных путей — их первых 8-10 генераций. При сопоставлении результатов спирометрии и бодиплетизмографии можно определить вовлеченность различных отделов трахео-боронхиального дерева в формировании обструктивных нарушений. При дисфункции мелких дыхательных путей может наблюдаться только увеличение ООЛ и ООЛ/ОЕЛ [Kraft M.2001].

Относительно небольшое число исследований посвящено определению должных значений Raw у взрослых. Было установлено, что в отличие от детей, у взрослых возраст не оказывает существенного влияния на величину Raw [Шик Л.Л., Канаев Н.Н., 1980; Ulmer W.T. et al., 2001]. В качестве ВГН для мужчин и женщин было выбрано значение, равное 0,30 кПа/л/с [Quanjer P. Et al., 1983]. У детей по мере роста и увеличения размера легких Raw снижается. Должные значения для детей были вычислены M. Zapletal и соавт. [Zapletal M. et al., 1987]. Сопоставление величин Raw на вдохе и выдохе позволяет определить наличие экспираторного коллапса дыхательных путей — функционального признака эмфиземы легких. Экспираторный коллапс дыхательных путей диагностируется при значениях отношения $Raw_{выд}$ / $Raw_{вд}$ ≥ 2,5 [Каменева М.Ю., 2017].

Помимо анализа величины показателя сопротивления, оценке подлежит и графическое представление соответствующего дыхательного маневра (петля sRaw). У здорового человека петли sRaw узкие, практически вертикально расположенные, с небольшим наклоном к оси абсцисс (рис. 10а). Повышение бронхиального сопротивления проявляется увеличением наклона петель, а их форму определяет характер обструктивных нарушений (рис. 10б–е). Для стеноза внегрудных дыхательных путей характерна S-образная изогнутость узкой или немного расширенной петли sRaw (рис. 10е). Нелинейность формы петель в виде перекрестов, булавовидных расширений в области выдоха является функциональным признаком неравномерности вентиляции различных зон легких, связанной с формированием «воздушных ловушек» (рис. 10в-д). Обструкция дыхательных путей, не сопровождающаяся неравномерностью вентиляции, проявляется только увеличением наклона петель sRaw (рис.10б). Наличие или отсутствие неравномерности вентиляции является важной характеристикой обструкции любого генеза; в наибольшей степени распределение вентиляции нарушается при разрушении эластического каркаса легких при эмфиземе, что проявляется наиболее заметным изменением формы петель sRaw (рис. 10г,д).

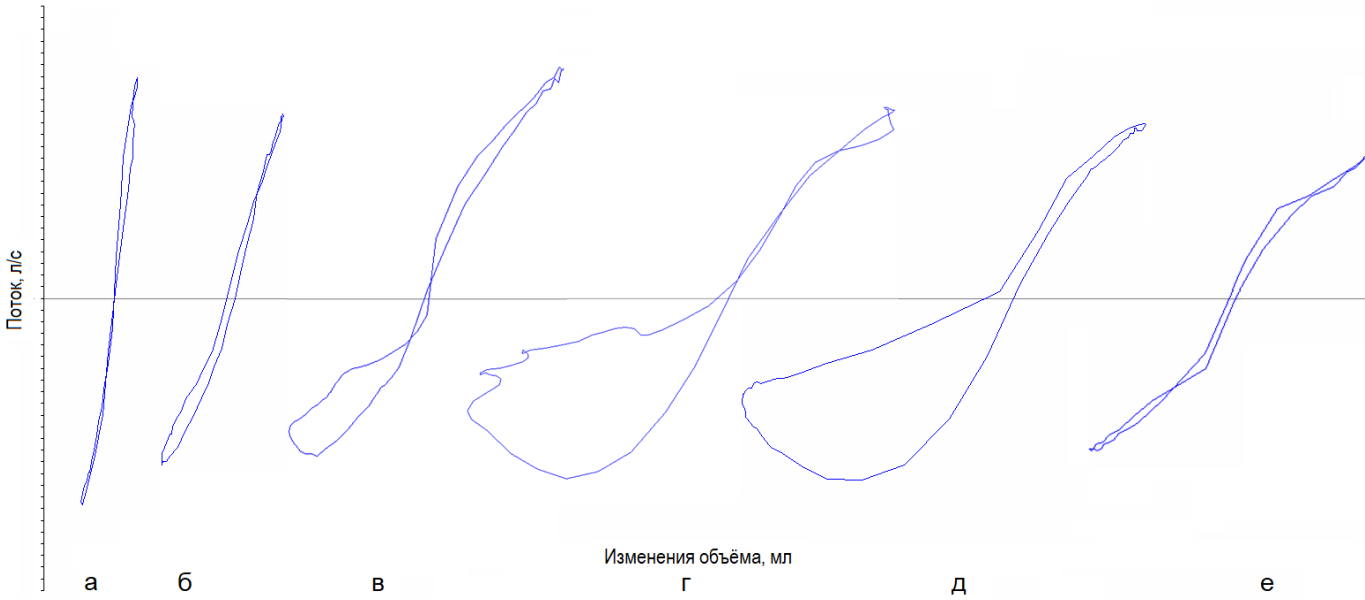


Рисунок 10. Схематическое изображение петель специфического бронхиального сопротивления (sRaw): а – в норме, при отсутствии бронхиальной обструкции, б – при легкой обструкции, в, г, д – при выраженной обструкции с неравномерной вентиляцией различных зон легких, е – при фиксированной обструкции верхних дыхательных путей. Участок кривой выше оси абсцисс соответствует фазе вдоха, ниже оси абсцисс – фазе выдоха.

6.2.3. Смешанный тип вентиляционных нарушений

Смешанный тип вентиляционных нарушений диагностируется в случаях, когда отклонения базовых диагностических показателей соответствуют критериям рестриктивного (ОЕЛ ниже НГН) и критериям обструктивного типа ($ОФВ_1$/ФЖЕЛ<НГН при использовании набора должных значений GLI или $ОФВ_1$/ЖЕЛ<НГН при использовании набора должных значений ECCS). Данный тип нарушений обычно встречается при сочетании легочного паренхиматозного заболевания и внелегочного заболевания, например, при ХОБЛ и застойной сердечной недостаточности. При смешанном типе вентиляционных нарушений чувствительность ОФВ1/ЖЕЛ или ОЕЛ для идентификации обструкции и рестрикции снижается. Сочетание снижения ЖЕЛ, ОФВ1/ЖЕЛ (или $ОФВ_1$/ФЖЕЛ в зависимости от используемого набора должных

значений) и ОЕЛ свидетельствует о смешанном вентиляционном нарушении.

В таблице 3 представлены сводные данные о спирометрических характеристиках и характеристиках объема легких при обструктивных, рестриктивных и смешанных нарушениях вентиляции. [Stanojevic S. et al., 2022]

Таблица 3. Типы вентиляционных нарушений, определяемые методом спирометрии и бодиплетизмографии

Вентиляционные нарушения	**Паттерны**
Обструктивные нарушения	• ОФВ1/ФЖЕЛ <НГН при использовании набора должных значений GLI или ОФВ1/ЖЕЛ <НГН при использовании набора должных значений ECCS • Снижение потока на низких объемах легких встречается при заболевании мелких дыхательных путей [1*,2*,3*] • Сочетанное снижение ОФВ1 и ФЖЕЛ наиболее часто наблюдается при недостаточном усилии обследуемого, но может встречается как при обструктивных, так и при рестриктивных вентиляционных нарушениях; в подобных случаях рекомендуется измерение статических легочных объемов. • Оценка абсолютных значений легочных объемов может помочь в диагностике гиперинфляции/«воздушных ловушек» [3*] • Исследование бронхиального сопротивления способно улучшить качество диагностического заключения [4*]
Рестриктивные нарушения	• ОЕЛ <НГН • Снижение ЖЕЛ ниже НГН не является критерием рестрикции, однако в этом случае есть высокая вероятность наличия рестриктивных нарушений вентиляции, особенно при отсутствие обструктивных нарушений ($ОФВ_1$/ФЖЕЛ выше НГН и $ОФВ_1$/ЖЕЛ выше НГН в зависимости от используемого набора должных значений – см.выше) (при условии качественного выполнения проб ЖЕЛ и ФЖЕЛ). Необходимо оценить ОЕЛ • Нормальное значение ЖЕЛ в большинстве случаев исключает рестриктивные нарушения [5*] • Сниженное значение ФЖЕЛ и/или ЖЕЛ может встречаться при некачественном выполнении проб – преждевременном завершении маневров, а также при выраженных обструктивных нарушениях
Смешанные нарушения	• ОЕЛ < НГН и наличие обструктивных нарушений (ОФВ1/ФЖЕЛ < НГН или ОФВ1/ФЖЕЛ < НГН в зависимости от используемого набора должных значений – см.выше)

1* Bates D.V. et al., 1989; 2* Wilson A. et al., 1985; 3* Pride N.B. et al., 1986; 4* Kaminsky D.A. et al., 2012; 5* Aaron S.D. et al., 2005.

7. Протокол бодиплетизмографии

Унификация оформления протокола каждого метода исследования функции системы дыхания позволяет повысить информативность и качество исследования, а также сделать возможным сопоставление результатов, полученных в разных лабораториях [Pellegrino R. et al., 2005; Graham B.L. et al., 2019]. Следует разделить требования к объему информации о каждом исследовании, доступном через ПО диагностической системы и таковым, содержащимся в версии для печати. Первый вариант должен содержать максимально полную информацию; второй – оптимизированный ее объем. По мере обновления аппаратуры единые требования к содержанию протоколов становятся обязательным, для старых приборов следует в максимально возможной степени обеспечить соответствие предлагаемым правилам. Ниже представлен минимальный объем информации по каждому проведенному исследованию, который должно обеспечивать ПО современных систем:

Данные пациента

1. фамилия, имя, отчество
2. идентификационный номер (номер в базе данных лаборатории)
3. пол
4. дата рождения
5. возраст (годы)
6. рост (см)
7. масса тела (кг)
8. индекс массы тела (ИМТ = кг/м^2)
9. популяция (этническая принадлежность)
10. статус курения
11. дата исследования
12. время исследования
13. диагноз/жалобы

Данные лаборатории

14. название медицинского учреждения, подразделения
15. идентификатор специалиста, проводившего исследование
16. модель диагностической системы
17. дата калибровки
18. время калибровки
19. температура воздуха (°C)
20. влажность воздуха (%)
21. атмосферное давление (мм рт. ст. или кПа)

Данные о каждом маневре измерения бронхиального сопротивления ФОЕ и ЖЕЛ

22. время начала маневра
23. для ФОЕ — приемлемость, неудовлетворительное качество измерения
24. для ЖЕЛ — приемлемость, неудовлетворительное качество измерения
25. для Raw — приемлемость, неудовлетворительное качество измерения
26. ОЕЛ (л)
27. ООЛ (л)
28. ООЛ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
29. ФОЕ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
30. $РО_{выд}$ (л)
31. $Е_{вд}$ (л)

32. ЧД (1/мин)
33. ДО (л)
34. Raw (см водн.ст./л/с или ед.СИ кПа/л/с))
35. sGaw (1/(см водн.ст. *с) или ед.СИ 1/(кПа*с))

Итоговые данные всех маневров измерения бронхиального сопротивления, ФОЕ и ЖЕЛ

36. графическое представление всех маневров в координатах «объем-время»
37. графическое представление измерения бронхиального сопротивления в координатах «поток-изменение объема»
38. графическое представление измерения ВГО в координатах «давление-изменение объема»
39. ФОЕ (л)
40. НГН и ВГН для ФОЕ (л)
41. z-оценка для ФОЕ
42. % долж. для ФОЕ
43. ЖЕЛ (л)
44. НГН и ВГН для ЖЕЛ (л)
45. z-оценка для ЖЕЛ
46. % долж для ЖЕЛ
47. ОЕЛ (л)
48. НГН и ВГН для ОЕЛ (л)
49. z-оценка для ОЕЛ
50. % долж для ОЕЛ
51. ООЛ (л)
52. НГН и ВГН для ООЛ (л)
53. z-оценка для ООЛ
54. % долж для ООЛ
55. ООЛ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
56. НГН и ВГН для ООЛ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
57. z-оценка для ООЛ/ОЕЛ
58. % долж для ООЛ/ОЕЛ
59. ФОЕ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
60. НГН и ВГН для ФОЕ/ОЕЛ (десятичная дробь, два знака после запятой)
61. z-оценка для ФОЕ/ОЕЛ
62. % долж для ФОЕ/ОЕЛ
63. $РО_{выд}$ (л)
64. НГН и ВГН для $РО_{выд}$ (л)
65. z-оценка для $РО_{выд}$
66. % долж для $РО_{выд}$
67. $Е_{вд}$ (л)
68. НГН и ВГН для $Е_{вд}$ (л)
69. z-оценка для $Е_{вд}$
70. % долж для $Е_{вд}$
71. Raw (смН2О/л/с или ед. СИ)
72. ВГН для Raw
73. sGaw (1/(см водн.ст. *с) или ед.СИ)
74. комментарии оператора:
    - критерии приемлемости и/или повторяемости не были достигнуты
    - пациент не смог выполнить все необходимые маневры из-за усталости

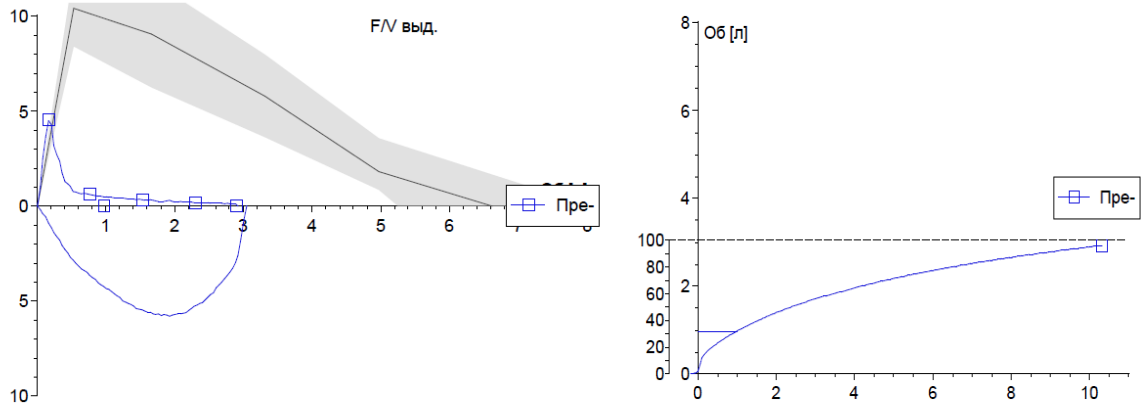
- неудовлетворительная/недостаточная мотивация пациента
- другие обстоятельства, повлиявшие на результаты бодиплетизмографии

Заключение

75. указывается система должных величин, на основании которой сделано заключение (если это не было отражено в результатах спирометрии)
76. наличие или отсутствие рестриктивных нарушений
77. наличие / отсутствие изменений ФОЕ, ОЕЛ, ЖЕЛ, ООЛ, ООЛ/ОЕЛ, $РО_{выд}$, $Е_{вд}$, бронхиального сопротивления.
78. подпись врача

Приложение 1. Клинические примеры

Пример 1. Пациент: мужчина 43 лет европеоидной группы. Диагноз: ХОБЛ (недостаточность α1-антитрипсина). Рост — 197 см, масса тела — 106,0 кг, ИМТ — 27 кг/м^2. Не курит/не курил прежде. Результаты спирометрии представлены в таб. 1 и на рис. 1, бодиплетизмографии в таб. 2 и на рис. 2.



А Б

Рисунок 1. Форсированная спирометрия: А — кривые форсированных выдоха и вдоха в координатах "поток–объем"; Б — кривые форсированного выдоха в координатах «объем-время».
Примечание: синий цвет — данные пациента; черный цвет – должная кривая «поток-объем», серым выделен диапазон нормальных значений.

Таблица 1

Показатель	Значение				
	долж*	НГН	полученное	z-оценка	%долж
ФЖЕЛ, л	6,62	5,24	2,90	-4,49	44
ОФВ1, л	5,17	4,09	0,97	-5,76	19
ОФВ1/ФЖЕЛ, %	78,81	68,46	33,27	-5,08	42

*долж. – должные значения GLI, 2012

Заключение:
Референсные (должные) значения GLI, 2012.
Нарушение вентиляции легких по обструктивному типу крайне тяжелой степени.
Снижение ФЖЕЛ.

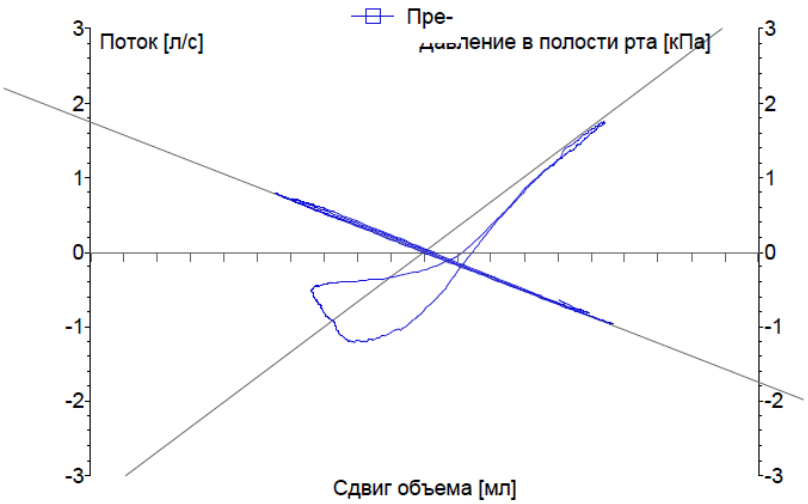


Рисунок 2. Бодиплетизмография: петли sRaw и ВГО.

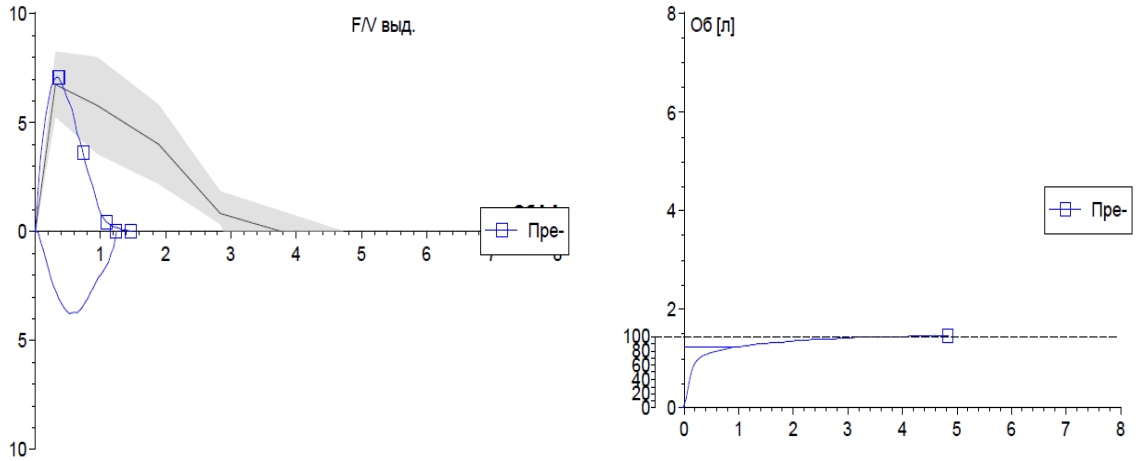
Таблица 2

Показатель	Значение					
	долж*	НГН	ВГН	полученное	z-оценка	%долж
ОЕЛ, л	9,11	7,37	10,88	11,06	1,81	121
ЖЕЛ, л	6,99	5,60	8,42	3,33	-4,46	48
ФОЕ, л	4,46	3,05	6,26	9,08	3,69	203
ФОЕ/ОЕЛ, %				82,15		
Евд, л	4,84	3,45	6,17	1,97	-3,29	41
РОвыд, л	2,20	0,96	3,88	1,35	-1,06	61
ООЛ, л	2,16	1,22	3,30	7,73	6,49	358
ООЛ/ОЕЛ, %	23,14	14,32	32,44	69,91	7,76	302
Rawобщ, кПа/л/с			0,30	0,59		

*долж. – должные значения GLI, 2020

Заключение по бодиплетизмографии:
Референсные (должные) значения GLI, 2020.
Общая емкость легких не снижена - Данных за нарушение легочной вентиляции по рестриктивному типу не выявлено. ЖЕЛ снижена, отмечается увеличение ФОЕ, ФОЕ/ОЕЛ и ОЕЛ, снижение емкости вдоха (Евд) - гиперинфляция легких, также отмечается увеличение остаточного объема легких и его доли в структуре ОЕЛ - наличие воздушных ловушек. РОвыд – в пределах нормы.
Увеличение бронхиального сопротивления.

Пример 2. Пациент: женщина 57 лет европеоидной группы. Диагноз: идиопатический легочный фиброз. Рост — 174 см, масса тела — 85 кг, ИМТ — 28 кг/м^2. Не курит/не курила прежде. Результаты спирометрии представлены в таб. 3 и на рис. 3, бодиплетизмографии в таб. 4 и на рис. 4.



А Б

Рисунок 3. Форсированная спирометрия: А — кривые форсированных выдоха и вдоха в координатах "поток–объем"; Б — кривые форсированного выдоха в координатах «объем-время».
Примечание: синий цвет — данные пациента; черный цвет – должная кривая «поток-объем», серым выделен диапазон нормальных значений.

Таблица 3

Показатель	Значение				
	долж*	НГН	полученное	z-оценка	%долж
ФЖЕЛ, л	3,78	2,89	1,46	-4,50	39
ОФВ1, л	2,96	2,26	1,23	-3,89	42
ОФВ1/ФЖЕЛ, %	79,03	67,35	84,41	0,86	107

*долж. – должные значения GLI, 2012

Заключение:
Референсные (должные) значения GLI, 2012.
Нарушение вентиляции легких тяжелой степени.
Снижение ФЖЕЛ. Отношение ОФВ1/ФЖЕЛ не снижено. -> Данных за нарушение легочной вентиляции по обструктивному типу не выявлено.
Для уточнения типа вентиляционных нарушений рекомендуется измерение общей емкости легких.

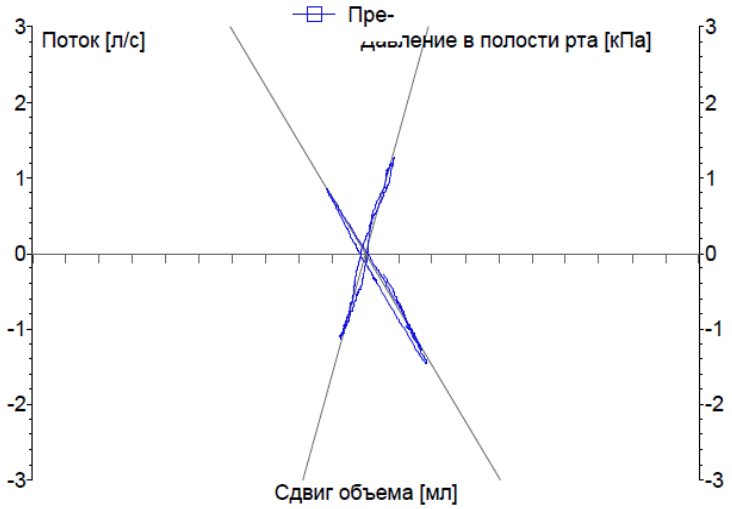


Рисунок 4. Бодиплетизмография: петля специфического сопротивления и кривая ВГО.

Таблица 4

Показатель	Значение					
	долж*	НГН	ВГН	полученное	z-оценка	%долж
ОЕЛ, л	5,97	4,84	7,23	3,24	-4,39	54
ЖЕЛ, л	4,02	3,17	4,87	1,56	-4,67	39
ФОЕ, л	3,22	2,29	4,40	1,92	-2,43	60
ФОЕ/ОЕЛ, %				59,16		
Евд, л	2,87	1,94	3,81	1,32	-2,75	46
РОвыд, л	1,07	0,39	2,06	0,24	-2,15	23
ООЛ, л	1,96	1,19	2,95	1,68	-0,55	86
ООЛ/ОЕЛ, %	32,10	21,45	43,50	51,73	2,78	161
Rawобщ, кПа/л/с			0,30	0,43		

*долж. – должные значения GLI, 2020

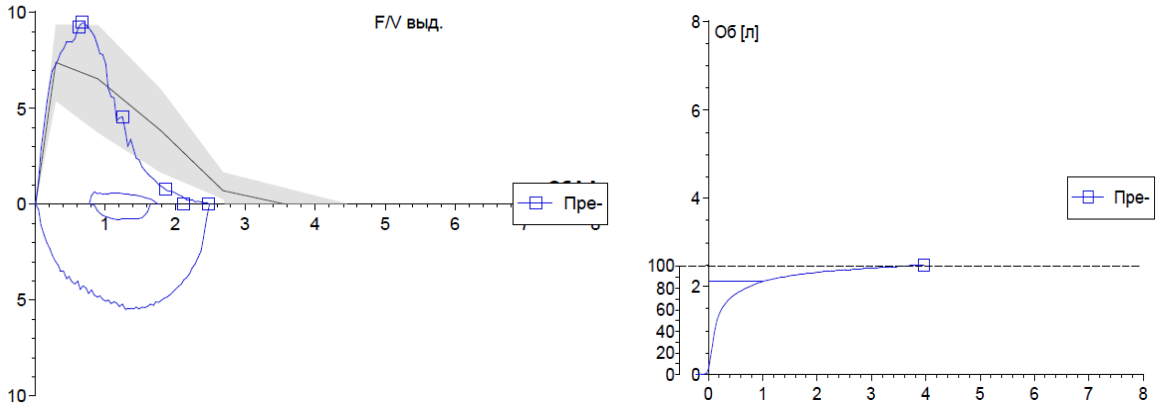
Заключение по бодиплетизмографии:
Референсные (должные) значения GLI, 2020.
Рестриктивные нарушения вентиляции легких: снижение общей емкости легких (ОЕЛ). Статические легочные объемы и емкости снижены, за исключением остаточного объема легких. Отмечается увеличение ООЛ в структуре ОЕЛ.

Увеличение бронхиального сопротивления.

Комментарий:

Увеличение отношения ООЛ/ОЕЛ при снижении ОЕЛ, ЖЕЛ и при нормальном значении ОФВ$_1$/ФЖЕЛ указывает на ухудшение опустошения легких, что может быть связано с дисфункцией мелких дыхательных путей с «воздушными ловушками» при ожирении (ИМТ=28 кг/м^2). Увеличение бронхиального сопротивления, по-видимому, обусловлено снижение объема легких.

Пример 3. Пациент: мужчина 62 лет европеоидной группы. Диагноз: идиопатический легочный фиброз. Рост — 161 см, масса тела — 79 кг, ИМТ — 30 кг/м^2. Не курит/не курил прежде. Результаты спирометрии представлены в таб. 5 и на рис. 5, бодиплетизмографии в таб. 6 и на рис. 6.



А Б

Рисунок 5. Форсированная спирометрия: А — кривые форсированных выдоха и вдоха в координатах "поток–объем"; Б — кривые форсированного выдоха в координатах «объем-время».

Примечание: синий цвет — данные пациента; черный цвет – должная кривая «поток-объем», серым выделен диапазон нормальных значений.

Таблица 5

Показатель	Значение				
	долж*	НГН	полученное	z-оценка	%долж
ФЖЕЛ, л	3,57	2,71	2,48	-2,08	69
ОФВ1, л	2,80	2,09	2,11	-1,61	75
ОФВ1/ФЖЕЛ, %	78,31	65,77	85,00	0,98	109

*долж. – должные значения GLI, 2012

Заключение:

Референсные (должные) значения GLI, 2012.

Нарушение вентиляции легких легкой степени. Снижение ФЖЕЛ.

Отношение ОФВ1/ФЖЕЛ не снижено. - Данных за нарушение легочной вентиляции по обструктивному типу не выявлено.

Для уточнения типа вентиляционных нарушений рекомендуется измерение общей емкости легких.

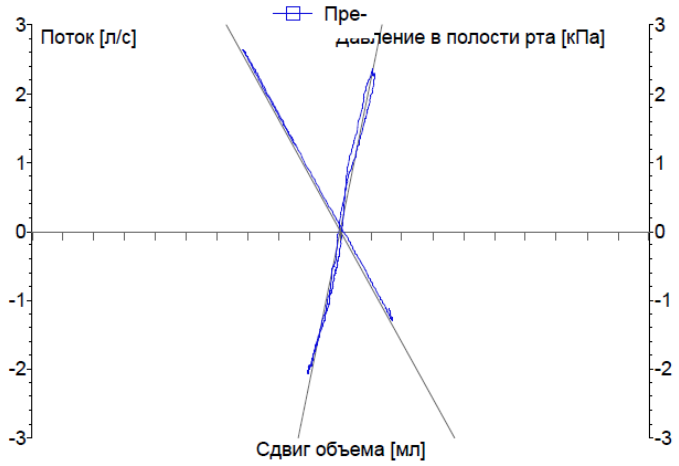


Рисунок 6. Бодиплетизмография: петля специфического сопротивления и кривая ВГО.

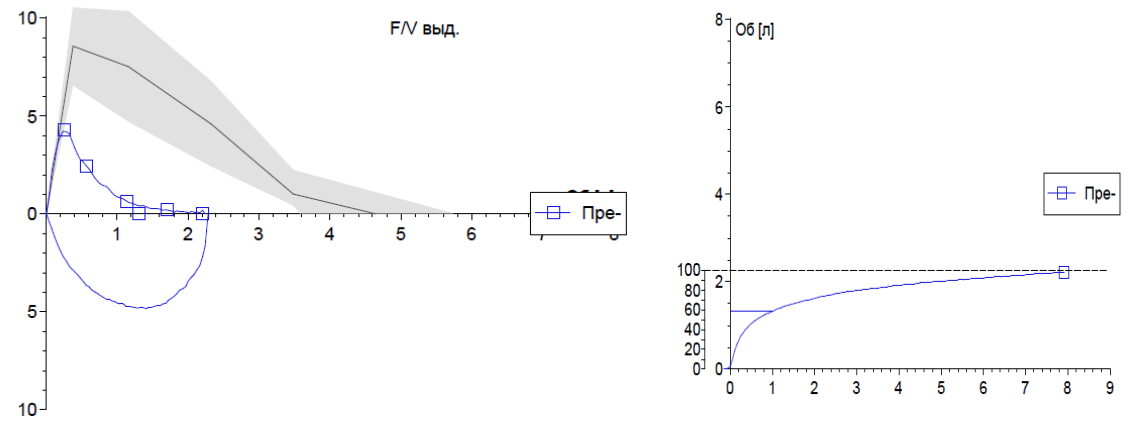
Таблица 6

Показатель	Значение					
	долж*	НГН	ВГН	полученное	z-оценка	%долж
ОЕЛ, л	5,72	4,58	6,88	3,22	-3,63	56
ЖЕЛ, л	3,95	3,15	4,78	2,41	-3,22	61
ФОЕ, л	2,81	1,95	3,90	1,81	-1,94	64
ФОЕ/ОЕЛ, %				56,29		
Евд, л	2,89	2,03	3,72	1,41	-2,77	49
РОвыд, л	0,93	0,33	1,78	1,00	0,17	108
ООЛ, л	1,84	1,13	2,69	0,81	-2,51	44
ООЛ/ОЕЛ, %	31,41	21,49	41,79	25,27	-1,01	80
Rawобщ, кПа/л/с			0,30	0,30		

*долж. – должные значения GLI, 2020

Заключение по бодиплетизмографии:
Референсные (должные) значения GLI, 2020.
Рестриктивные нарушения вентиляции легких: снижение общей емкости легких (ОЕЛ).
Статические легочные объемы и емкости пропорционально снижены.
Бронхиальное сопротивление не увеличено.

Пример 4. Пациент: мужчина 56 лет европеоидной группы. Диагноз: ХОБЛ. Состояние после пульмонэктомии. Рост — 176 см, масса тела — 75 кг, ИМТ — 24 кг/м^2. Не курит/не курил прежде. Результаты спирометрии представлены в таб. 7 и на рис. 7, бодиплетизмографии в таб. 8 и на рис. 8.



А Б

Рисунок 7. Форсированная спирометрия: А — кривые форсированных выдоха и вдоха в координатах "поток–объем"; Б — кривые форсированного выдоха в координатах «объем-время».

Примечание: синий цвет — данные пациента; черный цвет – должная кривая «поток-объем», серым выделен диапазон нормальных значений.

Таблица 7

Показатель	Значение				
	долж*	НГН	полученное	z-оценка	%долж
ФЖЕЛ, л	4,64	3,57	2,21	-3,77	48
ОФВ1, л	3,62	2,76	1,31	-4,14	36
ОФВ1/ФЖЕЛ, %	78,10	66,46	59,53	-2,49	76

*долж. – должные значения GLI, 2012

Заключение:

Референсные (должные) значения GLI, 2012.

Нарушение вентиляции легких тяжелой степени.

Обструктивные нарушения вентиляции: снижение ОФВ$_1$/ФЖЕЛ.

Снижение ФЖЕЛ.

Для уточнения типа вентиляционных нарушений рекомендуется измерение общей емкости легких.

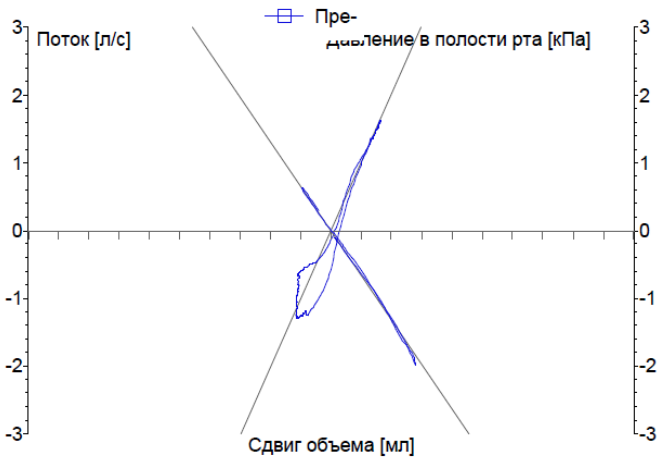


Рисунок 8. Бодиплетизмография: петля специфического сопротивления и кривая ВГО.

Таблица 8

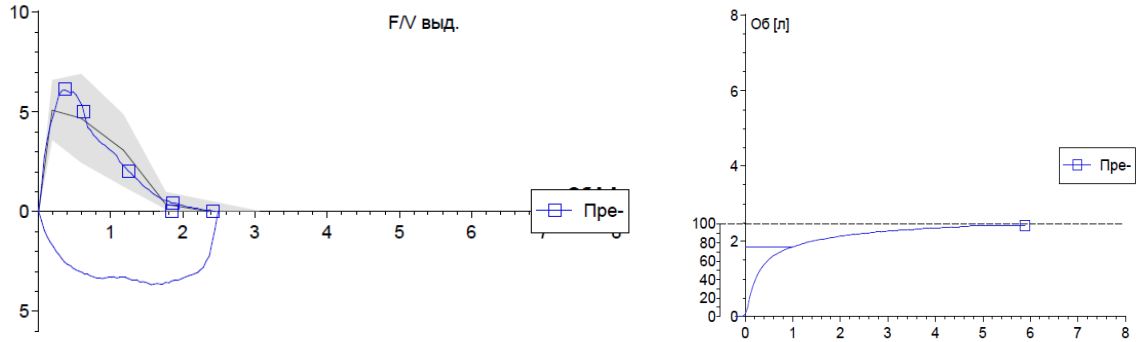
Показатель	Значение

	долж*	НГН	ВГН	Полученное	z-оценка	%долж
ОЕЛ, л	7,05	5,68	8,45	3,99	-3,70	57
ЖЕЛ, л	5,07	4,04	6,12	2,46	-4,33	48
ФОЕ, л	3,49	2,40	4,86	2,38	-1,69	68
ФОЕ/ОЕЛ, %				59,65		
Евд, л	3,65	2,57	4,69	1,61	-3,04	44
РОвыд, л	1,33	0,50	2,49	0,85	-0,87	64
ООЛ, л	2,05	1,26	3,00	1,53	-1,05	75
ООЛ/ОЕЛ, %	28,66	19,33	38,44	38,39	1,64	134
Rawобщ, кПа/л/с			0,30	0,54		

*долж. – должные значения GLI, 2020

Заключение по бодиплетизмографии:
Референсные (должные) значения GLI, 2020.
Рестриктивные нарушения вентиляции легких: снижение общей емкости легких (ОЕЛ).
Снижение ЖЕЛ, емкости вдоха и функциональной емкости легких.
Увеличение бронхиального сопротивления.

Пример 5. Пациент: женщина 74 лет европеоидной группы. Обследование. Рост — 153 см, масса тела — 80 кг, ИМТ — 34 кг/м^2. Не курит/не курила прежде. Результаты спирометрии представлены в таб. 9 и на рис. 9, бодиплетизмографии в таб. 10 и на рис. 10.



А Б

Рисунок 9. Форсированная спирометрия: А — кривые форсированных выдоха и вдоха в координатах "поток–объем"; Б — кривые форсированного выдоха в координатах «объем-время».
Примечание: синий цвет — данные пациента; черный цвет – должная кривая «поток-объем», серым выделен диапазон нормальных значений.

Таблица 9

Показатель	Значение				
	долж*	НГН	полученное	z-оценка	%долж
ФЖЕЛ, л	2,35	1,68	2,40	0,13	102
ОФВ1, л	1,82	1,30	1,84	0,08	101
ОФВ1/ФЖЕЛ, %	78,07	64,05	76,75	-0,17	98

*долж. – должные значения GLI, 2012

Заключение:

Референсные (должные) значения GLI, 2012.
Отношение ОФВ1/ФЖЕЛ не снижено. - Данных за нарушение легочной вентиляции по обструктивному типу не выявлено.
ФЖЕЛ – в пределах нормы.

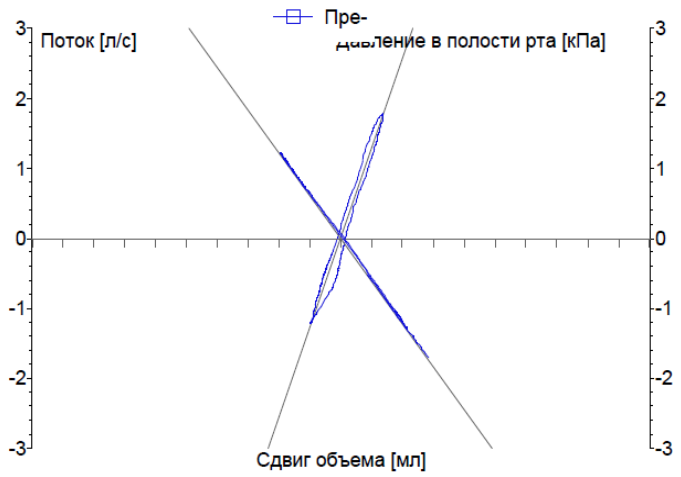


Рисунок 10. Бодиплетизмография: петля специфического сопротивления и кривая ВГО.

Таблица 10

Показатель	Значение					
	долж*	НГН	ВГН	полученное	z-оценка	%долж
ОЕЛ, л	4,30	3,38	5,35	4,52	0,37	105
ЖЕЛ, л	2,46	1,91	3,01	2,31	-0,44	94
ФОЕ, л	2,40	1,71	3,27	2,62	0,45	109
ФОЕ/ОЕЛ, %				57,96		
Евд, л	1,83	1,21	2,46	1,90	0,19	104
РОвыд, л	0,57	0,14	1,27	0,41	-0,49	72
ООЛ, л	1,80	1,06	2,78	2,21	0,73	123
ООЛ/ОЕЛ, %	42,03	28,88	56,06	48,83	0,81	116
Rawобщ, кПа/л/с			0,30	0,39		

*долж. – должные значения GLI, 2020

Заключение по бодиплетизмографии:
Референсные (должные) значения GLI, 2020.
Общая емкость легких не снижена. - Данных за нарушение легочной вентиляции по рестриктивному типу не выявлено. ЖЕЛ – в пределах нормы.
Увеличение бронхиального сопротивления.
Комментарий:
Снижение резервного объема выдоха и увеличение бронхиального сопротивления может быть обусловлено ожирением (ИМТ=34 кг/м^2).

Приложение 2. Стандартные обозначения показателей

Показатель	Стандартное обозначение	Англоязычный вариант написания	Англоязычный вариант стандартного обозначения
Внутригрудной объем газа	ВГО	Thoracic gas volume	TGV
		Intrathoracic gas volume	ITGV
Должная величина	долж	Predicted value	pred
Дыхательный объем	ДО	Tidal volume	TV, VT
Емкость вдоха	$Е_{вд}$	Inspiratory capacity	IC
Жизненная емкость легких	ЖЕЛ	Vital capacity	VC
		Slow vital capacity	SVC
Жизненная емкость легких вдоха	$ЖЕЛ_{вд}$	Inspiratory vital capacity	IVC, VC_{in}
Жизненная емкость легких выдоха	$ЖЕЛ_{выд}$	Expiratory vital capacity	EVC
Нижняя граница нормы	НГН	Low limit of normal	LLN
Общая емкость легких	ОЕЛ	Total lung capacity	TLC
Остаточный объем легких	ООЛ	Residual volume	RV
Объем форсированного выдоха за первую секунду	$ОФВ_1$	Forced expiratory volume in one second	FEV_1
Резервный объем вдоха	$РО_{вд}$	Inspiratory reserve volume	IRV
Резервный объем выдоха	$РО_{выд}$	Expiratory reserve volume	ERV
Функциональная остаточная емкость легких	ФОЕ	Functional residual capacity	FRC
Форсированная жизненная емкость легких выдоха	ФЖЕЛ	Forced vital capacity	FVC
Форсированная жизненная емкость легких вдоха	$ФЖЕЛ_{вд}$	Forced inspiratory vital capacity	FIVC
Частота дыхания	ЧД	Breath frequency	BF
Аэродинамическое бронхиальное сопротивление	Raw	Aerodynamic bronchial resistance	Raw, R
Общее бронхиальное сопротивление	Rawобщ	Total bronchial resistance	Rawtot, Rtot
Специфическое бронхиальное сопротивление	sRaw	Specific bronchial resistance	sRaw. sR
Бронхиальная проводимость	Gaw	Bronchial conductance	Gaw, G
Специфическая бронхиальная проводимость	sGaw	Specific bronchial conductance	sGaw, sG
Специфическое эффективное бронхиальное сопротивление	sRawэфф	Specific effective bronchial resistance	sRaweff, sReff
Специфическое бронхиальное сопротивление между инспираторным и экспираторным потоками, равными 0,5 л/с	sRaw0,5	Specific bronchial resistance between inspiratory and expiratory flows equal to 0.5 l/s	sRaw0.5, sR0.5
z-оценка	—	z-score	—
Программное обеспечение	ПО		

Список литературы

1. Воробьева З. В. Исследование вентиляционной функции легких / М.: ЗАО «Книга и бизнес», 2008.
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. 50–58.
3. Каменева М.Ю. Тишков А.В., Трофимов В.И. Новые подходы к дифференциальной диагностике синдромов вентиляционных нарушений 2017 // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2017. Т. 1. №65. - С. 8. doi: 10.12737/article_59aca3bd1aa8e8.39408462
4. Кольцун С.С. Методы определения остаточного объема легких / С.С. Кольцун // Функциональная диагностика, - 2003. - №1. – С. 65-76.
5. Методические рекомендации по использованию метода спирометрии 2023 г. Российского респираторного общества/Российской ассоциации специалистов функциональной диагностики Доступно: https://spulmo.ru/upload/spirometriya_18_02_2022_extEd.pdf?t=1
6. Легочные функциональные тесты: от теории к практике. Под редакцией О. И. Савушкиной, А. В. Черняка. Руководство для врачей. — М.: 000 «Фирма СТРОМ», 2017.
7. Руководство по клинической физиологии дыхания / Под. ред. Л.Л. Шика, Н.Н. Канаева. — Л.: Медицина, 1980.
8. Функциональная диагностика. Национальное руководство. ГЭОТАР-Медиа, под ред. Н.Ф.Берестень, В.А.Сандрикова, С.И.Федоровой, 2019, С.784
9. Черняк А. В. Измерение легочных объемов. В кн.: Функциональная диагностика в пульмонологии / Под ред. З. Р. Айсанова, А. В. Черняка. – М.: ООО «АТМО», 2016. – С. 40-67
10. Aaron S., Dales R., Cardinal P. How accurate is spirometry at predicting restrictive pulmonary impairment? Chest 1999; 115: 869-873.
11. Glady C., Aaron S., Lunau M. et al. A spirometry-based algorithm to direct lung function testing in the pulmonary function laboratory. Chest 2003; 123: 1939-1946.
12. Bates D. Respiratory Function in Disease. Philadelphia: WB Saunders; 1989.
13. Bhakta N.R., McGowan A., Ramsey K.A., Borg B., Kivastik J., Knight S.L., Sylvester K., Burgos F., Swenson E.R., McCarthy K., Cooper B.G., García-Río F., Skloot G., McCormack M., Mottram C., Irvin C.G., Steenbruggen I., Coates A.L., Kaminsky D.A. European Respiratory Society/American Thoracic Society technical statement: standardisation of the measurement of lung volumes, 2023 update. Eur Respir J. 2023; 62 (4): 2201519. doi: 10.1183/13993003.01519-2022.
14. Briscoe W., DuBois A. The relationship between airway resistance, airway conductance and lung volume in subjects of different age and body size. J Clin Invest 1958; 37: 1279–1285.
15. Casanova C., Cote C., de Torres J. et al. Inspiratory-to-total lung capacity ratio predicts mortality in patients with chronic obstructive pulmonary disease. Am J Respir Crit Care Med 2005; 171: 591–597.
16. Clay R., Iyer V., Reddy D. et al. The "Complex Restrictive" Pulmonary Function Pattern: Clinical and Radiologic Analysis of a Common but Previously Undescribed Restrictive Pattern. Chest 2017; 152: 1258-1265.

17. DuBois A., Botelho S., Comroe J. Jr. A new method for measuring airway resistance in man using a body plethysmograph: values in normal subjects and in patients with respiratory disease. J Clin Invest 1956; 35(3): 327–335.
18. Dykstra B., Scanlon P., Kester M. et al. Lung volumes in 4774 patients with obstructive lung disease. Chest 1999; 115: 68–74.
19. Goldman M.D. Whole-body plethysmography / M. D. Goldman, H. J. Smith, W. T. Ulmer / In: Lung function testing. Ed. R. Gosselink, H. Stam // Eur Respir Monograph. – 2005. – Vol. 10, № 31 – P.15−43
20. Graham B., Brusasco V., Burgos F. 2017 ERS/ATS standards for single-breath carbon monoxide uptake in the lung. Eur Respir J 2017; 49: 1600016.
21. Graham B.L., Steenbruggen I., Miller M.R., et al. Standardization of spirometry 2019 update. An Official American Thoracic Society and European Respiratory Society technical statement. Am J Respir Crit Care Med 2019; 200 (8):e70-e88. doi: 10.1164/rccm.201908-1590ST.
22. Hall G., Filipow N., Ruppel G. et al. Official ERS technical standard: Global Lung Function Initiative reference values for static lung volumes in individuals of European ancestry. European Respiratory Journal 2020; 57: 2000289.
23. Hantos Z., Galgyczy G., Daryczy B. et al. Computation of the equivalent airway resistance: a comparison with routine evaluations of plethysmographic measurements. Respiration 1978; 36(2): 64–72.
24. Islam M., Ulmer W. Diagnostic value of “closing volume” in comparison to “airway resistance-lung volume plot”. Respiration 1974; 31(6): 449–458.
25. Jaeger M., Otis A. Measurement of airway resistance with a volume displacement body plethysmograph. J Appl Physiol 1964; 19: 813–820.
26. Jones R., Nzekwu M. The effects of body mass index on lung volumes. Chest 2006; 130: 827-833 ; Littleton SW, Tulaimat A. The effects of obesity on lung volumes and oxygenation. Respir Med 2017; 124: 15-20.
27. Kaminsky D. What does airway resistance tell us about lung function? Respir Care 2012; 57: 85-96; discussion: 96-89.
28. Koopman M. et al. Reference values for paediatric pulmonary function testing: The Utrecht dataset. Respir Med 2011 Jan; 105(1):15-23. doi: 10.1016/j.rmed.2010.07.020.
29. Kraft M., Pak J., Martin R.J., Kaminsky D., Irvin C.G. Distal lung dysfunction at night in nocturnal asthma. *Am J Respir Crit Care Med.* 2001. 163 (7): 1551-6. doi: 10.1164/ajrccm.163.7.2008013.
30. Littleton S., Tulaimat A. The effects of obesity on lung volumes and oxygenation. Respir Med 2017; 124: 15–20.
31. Lord P., Edwards J. Variation in airways resistance when defined over different ranges of airflows. Thorax 1978; 33(3): 401–405.
32. Matthys H., Orth U. Comparative measurements of airway resistance. Respiration 1975; 32(2): 121–134.
33. McAuliffe F., Kametas N., Costello J. et al. Respiratory function in singleton and twin pregnancy. BJOG 2002; 109: 765-769.
34. Pellegrino R., Viegi G., Brusasco V. et al. Interpretative strategies for lung function tests. Eur. Respir. J. 2005; 25: 948–968. DOI: 10.1183/09031936.05.00035205.
35. Pride N., Macklem P. Lung mechanics in Disease. Bethesda, MD: American Physiological Society; 1986.
36. Quanjer P. Standardized lung function testing. Bull Eur Physiopath Respir 1983; 19(Suppl. 5): 33–38

37. Quanjer P. Lung volumes and forced ventilator flows / Ph. H. Quanjer, G.J. Tammeling, J. E. Cotes et. Al. // Eur. Respir. J. − 1993, Mar. – Vol. 6, Suppl. 16. – P.5−40
38. Quanjer P., Stanojevic S., Stocks J. Global Lungs I. Changes in the FEV(1)/FVC ratio during childhood and adolescence: an intercontinental study. Eur Respir J 2010; 36: 1391-1399.
39. Quanjer P., Pretto J., Brazzale D. et al. Grading the severity of airways obstruction: new wine in new bottles. Eur Respir J. 2014 Feb;43(2):505-12. doi: 10.1183/09031936.00086313.
40. Roca J., Burgos F., Sunyer J. et al. References values for forced spirometry. Group of the European Community Respiratory Health Survey. Eur. Respir J. 1998 Jun;11(6):1354-62. doi: 10.1183/09031936.98.11061354.
41. Stanojevic S., Kaminsky D. Miller M. et al. ERS/ATS technical standard on interpretive strategies for routine lung function tests. Eur Respir J 2022; 60: 2101499 [DOI: 10.1183/13993003.01499-2021
42. Tan E., Tan E. Alterations in physiology and anatomy during pregnancy. Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol 2013; 27: 791-802.
43. Ulmer W., Nolte D., Lecheler J. et al. Die Lungen funktion. Methodik und klinische Anwendung [Lung function. Methodology and clinical application]. Thieme 2001; 6: 86–95.
44. Urbankowski T., Przybyłowski T. Methods of airway resistance assessment // Advances in Respiratory Medicine. - 2016; - Vol 84, No 2 45216.
45. Wanger J. Standartization of the measurement of lung volumes / J.Wanger, L. Clausen, A. Coates et al. // Eur. Respir. J. – 2005. – Vol.26, №3. – P.511−522
46. Wilson A. Pulmonary Function Testing, Indications and Interpretations. Orlando: Grune & Stratton; 1985.
47. Winck A., Heinzmann-Filho J., Soares R. et al. Effects of obesity on lung volume and capacity in children and adolescents: a systematic review. Rev Paul Pediatr 2016; 34: 510-517.
48. Zapletal A., Samanek M., Paul T. Lung function in children and adolescents. Methods, reference values 1987;22:114–218.