Лекция 7. Технические аспекты спирометрии

7.1. Основные типы спирометров

Техника измерения в спирометрии оказывает существенное влияние на результаты измерений, на комфорт проведения исследования, на удобство работы персонала, на обеспечение выполнения требований санитарного режима.

Все спирометрические приборы можно подразделить на приборы открытого и закрытого типов. В приборах первого типа вдох и выдох производятся фактически из атмосферы. Такие приборы работают по принципу пневмотахографа, первично измеряя скорость движения воздуха, а объемные показатели получаются путем интегрирования потока по времени. Такая конструкция более проста, снижается сопротивление дыханию, облегчается санитарная обработка прибора.

В приборах закрытого типа пациент производит выдох в прибор или дышит из некоторого замкнутого (закрытого) резервуара переменного объема. Такая конструкция позволяет, помимо измерения дыхательных объемов и расчета потоков, проводить анализ газового состава дыхательной смеси, что является основным преимуществом приборов закрытого типа. Вместе с тем такие приборы достаточно массивны и требуют очень четкого соблюдения мер по соблюдению санитарного режима. Первичной измеряемой величиной является объем или его изменение. Иногда приборы закрытого типа называют *волюмоспирометрами,* чтобы подчеркнуть именно ориентацию на измерение объема.

Большинство спирометров для рутинных клинических исследований в настоящее время являются цифровыми (микропроцессорными) приборами открытого типа (см. рис. 2) с первичным измерением потока. Термин *флоуспирометры* подчеркивает первичность измерения потока. Объем рассчитывается путем интегрирования потока по времени.

Однако принцип измерения потока дыхания в приборах открытого типа может быть реализован по-разному. Это косвенно свидетельствует, что ни один из методов не имеет решающих преимуществ перед другими и выбор определяется компромиссами между реализацией взаимоисключающих требований. Выбор решения в таких вопросах всегда остается за разработчиками и производителем прибора. Поэтому важно понимать основные принципы работы спирометров различных типов, их преимущества и ограничения, чтобы своевременно и правильно выявлять источник ошибочных или сомнительных результатов исследований.

Перечисление основных видов спирометров открытого типа по принципу действия первичного измерительного элемента представлено на рис. 20. Наиболее распространены в настоящее время преобразователи потока на основе дифференциального манометра и с турбинным преобразователем. Весьма перспективны ультразвуковые приборы.

Рис. 20. Виды спирометров открытого типа. Разные варианты преобразователей потока

Принцип работы приборов на основе дифференциального манометра (рис. 21) состоит в том, что дыхательный поток направляется в трубу, в которой имеется препятствие (фактически сужение). Другим вариантом может быть так называемая трубка Пито, в которой в основной трубе имеется дополнительная измерительная трубка с отверстием, направленным параллельно потоку. При движении потока газа давление перед препятствием возрастает, а после него уменьшается. Между объемной скоростью потока и величиной перепада давления имеется зависимость, которая определяется конструкцией препятствия и рядом других факторов. Измеренная разность давлений может быть затем путем относительно несложных вычислений преобразована в величину потока, вызвавшего перепад давлений. Для измерения перепада давлений используют датчики различных типов, наиболее распространенными из которых в настоящее время являются термоанемометрические и тензодатчики. Первые обладают большей

чувствительностью, но более инерционны, могут требовать непродолжительного прогрева, чтобы их характеристика стала стабильной.

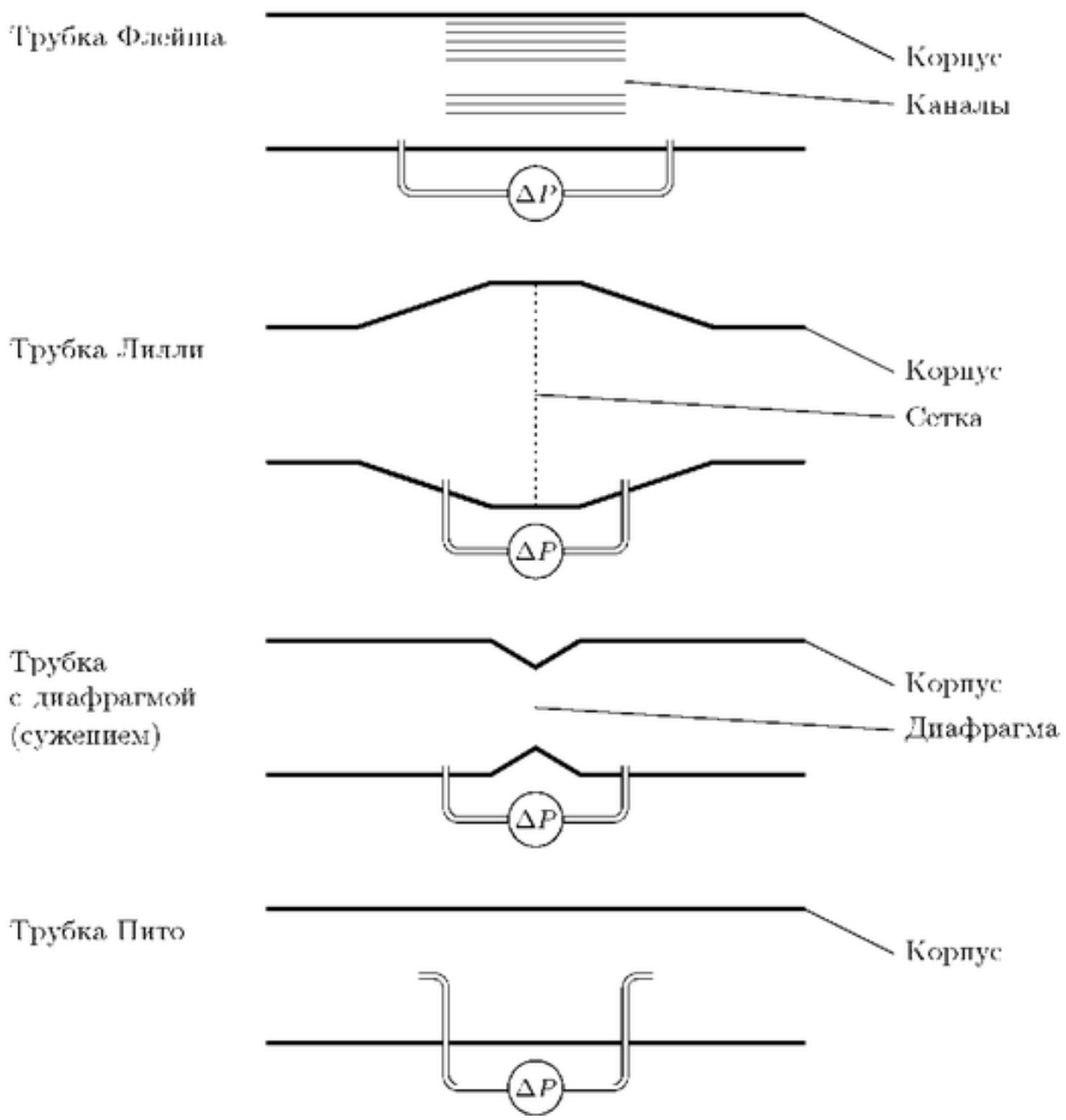

Рис. 21. Схемы измерительных преобразователей с дифференциальным манометром. ΔP - место подключения дифференциального манометра.

Наибольшей чувствительностью в области малых потоков обладают приборы на основе трубок Флейша и Лилли. Однако они имеют и самое высокое пневматическое сопротивление. Узкие каналы или ячейки сетки имеют склонность к загрязнению, что приводит к изменению передаточной характеристики преобразователя. Для уменьшения вероятности образования конденсата на пневмосопротивлении трубки Флейша иногда используют подогрев резистивного элемента до 37°С. Преобразователи с диафрагмой

имеют более низкое пневматическое сопротивление, но их характеристика имеет существенную нелинейность, что повышает требования к датчику дифференциального манометра, однако эта проблема относительно легко решается в цифровой части прибора. Еще большей нелинейностью обладают трубка Пито и другие напорные преобразователи. С точки зрения санитарной обработки наибольшие сложности в этой группе возникают с трубками Флейша, а трубки Лилли часто имеют конструкции со сменными индивидуальными сетками.

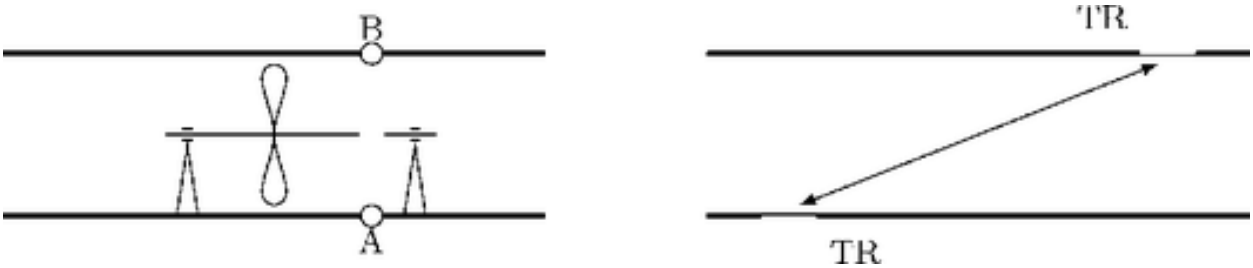

Рис. 22. Схема турбинного (слева) и ультразвукового (справа) измерительных преобразователей потока А, В - источник и приемник света. TR - ультразвуковой излучатель-приемник, стрелкой показано направление ультразвука.

Работа турбинного преобразователя (рис. 22 слева) основана на пропорциональности частоты вращения крыльчатки (ротора) скорости потока газа. В современных приборах число оборотов ротора, как правило, подсчитывается оптическим способом: ротор при вращении периодически перекрывает поток света, который улавливается фотоприемником. Электронная часть прибора подсчитывает число импульсов, сформированных фотоприемником. Очевидным преимуществом турбинного преобразователя является простота вычислений. Наиболее существенный недостаток - инерционность турбины: она продолжает вращение даже после прекращения воздействия потока воздуха (другими словами, при исследовании *ФЖЕЛ* могут наблюдаться завышенные показатели). Кроме этого, существенным фактором является сложность санитарной обработки деталей датчика, что привело к появлению приборов со сменными турбинками, индивидуальными для каждого пациента.

Ультразвуковой датчик потока (рис. 22 справа) использует допплеровский эффект для измерения линейной скорости потока газа. Ультразвуковые излучатели и приемники располагаются, как правило, под минимальным углом к оси трубки (стрелкой показано направление ультразвука по отношению к оси трубки). Существенным условием работы такого датчика, впрочем, выполняемым на практике, является наличие в воздухе достаточной концентрации мелких частиц, с которыми происходит

взаимодействие ультразвука. Недостатком ультразвукового датчика является низкая чувствительность, особенно при малых потоках. Самое существенное достоинство заключается в возможности создания такой конструкции, в которой пациент контактирует лишь с единственной сменной индивидуальной частью - собственно трубкой, через которую происходит дыхание. Это фактически решает проблему предотвращения передачи инфекций при проведении спирометрии, отсутствует необходимость в регулярной калибровке, однако необходимо учитывать высокую стоимость таких трубок.

На основе измерения объемной скорости путем интегрирования по времени производится расчет объемов. Эта операция производится прибором автоматически с учетом коррекции BTPS или иной, которая используется при проведении измерений.

7.2. Требования к спирометрам

Все спирометры независимо от типа преобразователя и других конструктивных особенностей должны отвечать ряду требований. Эти требования можно разбить на три группы: физиологичности исследования, метрологические и эргономические.

К требованиям физиологичности измерений относятся:

• минимальный объем МП, которое добавляет спирометр к физиологическому МП;

• минимальное сопротивление дыханию;

• высокая чувствительность при низком уровне собственных шумов. Метрологические требования:

• достаточные диапазоны измерений объемных скоростей и объемов;

• оптимальные величины допустимых погрешностей измерений;

• стабильность статических характеристик;

• способность регистрировать малые изменения потоков (адекватная динамическая характеристика).

Стандартизация метрологических требований к спирометрам исключительно важна, поскольку позволяет получить воспроизводимые и сравнимые между собой результаты исследований на приборах разных типов. Минимальные требования различных стандартов сведены в табл. 3. Как видно, в целом нормы различных стандартов практически совпадают, можно заметить некоторые различия между европейской и американской школами, которые устранены в гармонизированной редакции рекомендаций 2005 г. Важно, чтобы все эксплуатируемые спирометры отвечали указанным требованиям, хотя бы по большинству показателей.

Основные эргономические требования к спирометрам:

- достаточный набор измеряемых, расчетных параметров и графиков;
- удобство, простота и надежность санитарной обработки;
- удобство интерфейса;
- автоматизация рутинных процедур, таких как бронходилатационные тесты;
- собственно эргономические характеристики: габариты, масса, расположение и размеры дисплея, возможность автономной работы, подключение к принтеру и к компьютеру.

Современный спирометр должен, как минимум, иметь возможность проведения исследования ЖЕЛ и форсированного выдоха с формированием спирограммы и кривой поток-объем, автоматический и ручной выбор наилучшей попытки, а также проводить измерение ЖЕЛ, *ФЖЕЛ*, *ОФВ*\, потоки на разном уровне выдоха *ФЖЕЛ*, рассчитывать индекс Тиффно и/или Генслера и автоматически сопоставлять их с должными величинами. Результаты исследования должны формироваться в соответствующей таблице данных. Именно на основе этих показателей производится оценка результатов спирометрии по стандартным методикам.

Таблица 3. Соотношение требований стандартов к спирометрической аппаратуре

Нормируемый параметр	Редакции стандартов			
	ERS	ATS	РФ	ATS+ERS
Год публикации	1993	1994	2001	2005
Сопротивление дыханию, Па-л/с, не более	50	150	50	150
Порог реагирования по объему, л, не более	0,025	0,050	0,025	0,050
Порог реагирования по объемной скорости, л/с, не более	-	0,1	-	-
Верхний предел диапазона измерений объема, л, не менее	8,0	8,0	8,0	8,0
Верхний предел диапазона измерений объемной скорости, л/с, не менее	15,0	14,0	15,0	14,0
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений объема, %, не более	±3	±3	±3	±3
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений объемной скорости, %, не более	±3,5	±5	±5	±3,5
Нелинейность АЧХ, %, не более в диапазоне частот	±5 до 20 Гц	±10 до 4 Гц	±5 до 20 Гц	±5 до 15 Гц

Расширение набора измеряемых и расчетных параметров в спирометрах лишь незначительно улучшает диагностические возможности приборов, а дополнительные показатели или методики редко используются на практике. Тем более бессмысленно сравнение спирометров лишь по числу измеряемых параметров, без учета их применимости на практике.

При проведении спирометрического исследования практически всегда используются мундштуки (загубники). Мундштук служит для исключения прямого контакта пациента с частями преобразователя и датчика. В настоящее время используются пластиковые (как правило, многократного применения) и картонные одноразовые мундштуки. Мундштуки могут быть оснащены фильтрами или клапаном, который предотвращает возможность вдоха пациентом воздуха из спирометра. Мундштуки многократного применения подлежат стерилизации (как правило, химической, путем замачивания в дезинфицирующем растворе) после проведения исследования каждому пациенту. Использование мундштуков с фильтром заметно снижает, но не сводит к нулю вероятность перекрестного инфицирования во время спирометрии.

7.3. Калибровка

Калибровка - периодическая процедура, необходимая для проверки точности прибора и коррекции его показаний при необходимости. Калибровку осуществляет персонал, эксплуатирующий прибор. Детально периодичность и процедура калибровки должна быть описана в руководстве по эксплуатации конкретного прибора; здесь приводятся лишь общие положения, применимые к большинству приборов.

Относительно периодичности калибровки существуют различные мнения: от требования обязательной калибровки перед каждой пробой до утверждения, что калибровка какому-то типу приборов вообще не требуется. Первый подход, очевидно, трудно осуществить на практике, поскольку работать с прибором будет неудобно. Также вызывает сомнения и диаметрально противоположная точка зрения, поскольку в силу разных причин метрологически важные характеристики измерительной части спирометра могут изменяться в процессе эксплуатации (прежде всего в результате загрязнения).

Если нет иных указаний производителя конкретного прибора, желательно проводить калибровку ежедневно или еженедельно, а также при значительном изменении внешних условий - температуры и влажности воздуха в кабинете, а также при замене преобразователя потока или замене его составляющих.

Чаще всего калибровка проводится путем пропускания через спирометр известного объема воздуха с помощью воздушного калибровочного шприца, но есть и другие виды калибраторов. Основным достоинством шприца является его простота и надежность, а значит, относительно небольшая стоимость.

С учетом требований к диапазону измерения объемов (табл. 3) спирометрами объем шприца или иного калибратора должен быть не меньше 3 л. Калибровка меньшим объемом может привести к ошибкам.

Как правило, для проведения калибровки требуется совершить несколько движений поршнем шприца. Движения должны быть равномерными, от одного крайнего положения до другого. Соблюдение последнего условия особенно важно. Поршень должен перемещаться плавно, без каких-либо затруднений. Как правило, производители спирометров рекомендуют, чтобы перемещение поршня осуществлялось в течение 1-2 с (объемная скорость потока при этом составит 1,5-3л/с). Однако в соответствии с рекомендациями ATS/ERS рекомендуется проводить калибровку ежедневно с разной скоростью движения поршня: при использовании 3-литрового калибровочного шприца со скоростью от 0,5 до 12 л/с. В руководстве по эксплуатации прибора должны быть приведены сведения о критериях завершения калибровки.

Поскольку воздух в шприце находится все время при атмосферных условиях, в процессе калибровки BTPS коррекция (см. ниже) должна быть отключена. В большинстве приборов это производится автоматически.

Практику так называемого *физиологического контроля,* когда для проверки и подтверждения настроек прибора выполняется исследование одному и тому же субъекту, вряд ли можно считать оправданной. Такой способ в силу высокой вариабельности параметров дыхания даже у здоровых лиц, физиологической (в том числе возрастной) динамики показателей и других причин не может обеспечить достаточной точности настройки прибора. Кроме того, физиологический контроль требует больше времени, чем калибровка с использованием шприца или иного технического средства.

7.4. Коррекция результатов измерений

Объем, занимаемый некоторым количеством (числом молей) газа, зависит от температуры и давления. Поскольку температура воздуха в легких в общем случае отличается от температуры окружающего атмосферного воздуха, то для соблюдения точности измерений необходимо проводить коррекцию измеренных величин с учетом изменения температуры, давления и влажности вдыхаемого и выдыхаемого воздуха. В легких температура

воздуха составляет 37 °С, он насыщен парами воды, также обычно принимают, что давление воздуха в легких составляет 760 мм рт. ст. (т. е. равно атмосферному давлению на уровне моря).

Принято различать несколько систем измерений (табл. 4) в спирометрии. Они различаются по приведению состояния газа к различным условиям по температуре, давлению и влажности воздуха. Система BTPS соответствуют условиям в легких и в выдыхаемом воздухе непосредственно сразу после выдоха, а ATPS - охладившемуся до внешней температуры выдыхаемому воздуху.

В современных спирометрах приведение систем измерений производится автоматически. Для вычисления поправочных коэффициентов используют известные формулы. Например, между объемами воздуха в условиях BTPS и ATP имеется соотношение:

$$\frac{V_{BTPS}}{V_{ATP}} = \frac{T_{тела}}{T_{атм}} \times \frac{P_{атм} - P_{H_2O(T_a, H_a)}}{P_{тела} - P_{H_2O(T_m, H_m)}},$$

где V_{btps}и $V_{at\ \rho}$-объем воздуха в соответствующих условиях, $T_{тела}$и $T_{атм}$-температура тела и окружающего воздуха, PH_2O - парциальное давление водяного пара при соответствующих температуре и относительной влажности: $_a$ - атмосферной, $_т$ - тела.

Таблица 4. Стандартные условия измерений в спирометрии

Обозначение	Стандартизованное состояние
BTPS	температура и давление в легких, газ насыщен водяным паром Body temperature and pressure, saturated
ATPS	температура и давление атмосферное (внешнее), газ насыщен водяным паром Ambient temperature and pressure, saturated
ATP	температура и давление атмосферное, не насыщен водяным паром, соответствует обычному окружающему воздуху Ambient temperature and pressure
STPD	стандартная температура (0°С) и давление (760мм рт. ст.), сухой газ Standard temperature and pressure, dry

Если провести расчеты по приведенной формуле, то для комнатного воздуха с температурой 20 °С и относительной влажностью 50% корректирующий коэффициент составит порядка 12%. Другими словами, вдохнув 500 мл воздуха, пациент выдохнет за счет расширения газа при нагреве и повышения влажности 560 мл, если измерения провести непосредственно на выходе из дыхательных путей. На спирограмме в результате этого будет наблюдаться, что объем выдоха регулярно превышает объем вдоха.

Современные спирометры производят необходимую коррекцию автоматически.

Потребление кислорода и выделение углекислого газа принято представлять только в системе STPD, в соответствие с которой пересчитываются все измеренные величины.

Подготовка к исследованиям и обслуживание спирометрической аппаратуры

Точность получаемых при спирометрии данных зависит от соблюдения ряда условий. Поэтому важно, чтобы специалисты, участвующие в исследовании, знали соответствующие правила, неукоснительно выполняли бы их сами и могли бы объяснить важность соблюдения методики исследования пациентам.

Для эффективной работы и соблюдения методических требований кабинет спирометрии должен иметь следующее оснащение:

1. Рабочий стол с размещенным спирометром.
2. Стул для исследователя и пациента.
3. Весы и ростомер для измерения веса и роста пациента, эти данные используются для расчета должных величин.
4. Термометр, барометр и прибор для измерения влажности воздуха (гигрометр, психрометр).
5. Шкаф для медикаментов, в котором хранятся бронходилатационные препараты: Сальбутамол (Вентолин), Ипратропиума бромид (Атровент). Эти препараты используются при проведении бронходилатационного теста, а также могут использоваться для оказания помощи при развитии бронхиальной обструкции.
6. Лотки или другие емкости с дезинфицирующими растворами для замачивания мундштуков, спейсеров, деталей измерительного блока.
7. Бактерицидная лампа или другой аппарат для санитарной обработки воздуха в кабинете.

Перед началом исследований ФВД необходимо проверить оборудование и подготовить кабинет к работе. Ниже излагаются общие принципы подготовки к работе, которые необходимо скорректировать с учетом особенностей конкретных приборов, которые должны быть изложены в инструкции по эксплуатации.

1. Включить спирометр. Целесообразно начинать именно с включения прибора, чтобы дать всем измерительным элементам выйти на рабочие

режимы, пока будут производиться другие операции по подготовке к работе. Если прибор требует заземления, то наличие и целостность проводника заземления проверяются перед каждым включением аппарата.

2. Убедиться, что расходных материалов (мундштуков, салфеток) достаточно для проведения запланированного числа исследований. Желательно иметь запас порядка 15-20% на различные непредвиденные ситуации.

3. Убедиться в исправности всего оборудования кабинета, которое используется для проведения исследований.

4. Убедиться в наличии средств экстренной помощи, особенно при проведении бронхопровокационных (бронхоконстрикторыных) проб (гл. 14).

5. Измерить температуру воздуха и атмосферное давление, для этого в кабинете должны быть достаточно точные (не бытовые) термометр и барометр.

6. Ввести в спирометр значения температуры воздуха и атмосферного давления, или убедиться, что эти величины измерены спирометром правильно. Точность ввода этих сведений позволяет приводить результаты к системам BTPS или ATPS.

7. Провести калибровку спирометра. Хорошей практикой является проведение калибровки ежедневно или не реже 1 раза в неделю, в соответствии с инструкцией по эксплуатации конкретного прибора.

Перед началом исследования очередного пациента необходимо проинструктировать его об особенностях проб и максимально мотивировать на достижение максимальных результатов. Последний момент является ключевым, особенно при обследовании детей и в экспертной деятельности.

Перед началом исследования необходимо ввести пол, возраст и рост пациента. Наличие в кабинете спирометрии ростомера позволяет при необходимости измерить рост, если пациент его не знает или возникают сомнения в точности анамнестических данных. В случае если возраст или рост пациента выходит за пределы выбранной системы должных величин (гл. 10), допустимо ввести ближайшее предельное значение. Например, при проведении исследования пациенту старше 70 лет при использовании должных величин по Клементу допустимо, чтобы обеспечить расчет наиболее близких значений должных величин, ввести возраст 70 лет. Такую ситуацию необходимо отметить в протоколе исследования.

Непосредственно перед проведением исследования на воздухоприемник устанавливается индивидуальный мундштук, при необходимости - фильтр, а пациенту накладывается носовой зажим.

По завершении всех проб многоразовый мундштук замачивается в дезинфицирующем растворе в емкости с соответствующей маркировкой. Обращение с мундштуками однократного применения после использования производится соответственно правилам работы с биологическими отходами класса Б (в большинстве случаев) или В (при проведении исследований у пациентов с установленным диагнозом туберкулеза легких или подозрении на него).

По завершении всех исследований в конце рабочего дня:

1. Произвести санитарную обработку всех частей спирометра, с которыми контактирует пациент в процессе исследований. Детальные рекомендации по санитарной обработке должны быть приведены в инструкции по эксплуатации прибора. Обработка предполагает обязательное обеззараживание поверхностей.

2. Мундштуки однократного применения подготовить к утилизации и утилизировать согласно правилам обращения с биологическими отходами соответствующего класса. Мундштуки многократного применения обработать в соответствии с инструкцией.

3. Провести уборку и санитарную обработку всего кабинета.

С целью обеспечения длительного срока службы целесообразно ежеквартально осматривать прибор и кабель питания для выявления механических повреждений, даже если такие рекомендации отсутствуют в руководстве по эксплуатации. Одновременно оценивается состояние (упругость, целостность подушечек) носового зажима. Потерявшие упругость зажим и подушечки лучше заменить до окончательного разрушения.

Спирометры отнесены к средствам измерений, подлежащим обязательной периодической поверке. Как правило, межповерочный интервал равен одному году. Поверка, согласно законодательству, осуществляется специально уполномоченными поверителями. Детально подготовка прибора к поверке должна быть отражена в инструкции по эксплуатации.