

П.В. СТРУЧКОВ, Д.В. ДРОЗДОВ, О.Ф. ЛУКИНА

# СПИРОМЕТРИЯ

---

РУКОВОДСТВО ДЛЯ ВРАЧЕЙ

3-е издание



Москва  
ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА  
«ГЭОТАР-Медиа»  
2020

# Содержание

<b>Предисловие</b>	<b>5</b>
<b>От авторов</b>	<b>6</b>
<b>Список сокращений</b>	<b>8</b>
<b>1. История изучения показателей внешнего дыхания</b>	<b>9</b>
<b>2. Основы физиологии и патофизиологии внешнего дыхания. Обструктивный и рестриктивный синдромы</b>	<b>13</b>
2.1. Строение органов дыхания . . . . .	13
2.2. Механизмы газообмена в легких . . . . .	17
2.3. Дыхательная недостаточность . . . . .	18
<b>3. Легочные объемы и емкости. Оценка ФОЕ методами разведения гелия и вымывания азота</b>	<b>23</b>
<b>4. Показатели легочной вентиляции: ЧД, МОД, МАВ, проба ФЖЕЛ, МВЛ. Понятие о поглощении кислорода и эффективности вентиляции</b>	<b>30</b>
4.1. Понятие мертвого пространства . . . . .	31
4.2. Проба ФЖЕЛ . . . . .	33
4.3. Проба максимальной вентиляции легких . . . . .	36
4.4. Потребление кислорода и оценка эффективности вентиляции . . . . .	36
<b>5. Кривая поток–объем форсированного выдоха, основные показатели</b>	<b>38</b>
<b>6. Тест с форсированным вдохом. Подходы к выявлению обструкции верхних дыхательных путей</b>	<b>42</b>
<b>7. Технические аспекты спирометрии</b>	<b>45</b>
7.1. Основные типы спирометров . . . . .	45
7.2. Требования к спирометрам . . . . .	48
7.3. Калибровка . . . . .	50
7.4. Коррекция результатов измерений . . . . .	51
<b>8. Подготовка к исследованиям и обслуживание спирометрической аппаратуры</b>	<b>53</b>
<b>9. Методика проведения спирометрии. Маневры ЖЕЛ и ФЖЕЛ</b>	<b>56</b>

<b>10. Должные величины</b>	<b>63</b>
<b>11. Оценка спирометрических показателей</b>	<b>66</b>
11.1. Оценка спирометрических показателей и построение заключения на основе рекомендаций ATS/ERS (2005) . . . . .	66
11.2. Оценка результатов спирометрии по GLI-2012 . . . . .	68
11.3. Другие способы оценки результатов спирометрии . . . . .	71
<b>12. Критерии качества и дефекты спирометрического исследования</b>	<b>73</b>
<b>13. Бронходилатационные тесты</b>	<b>81</b>
<b>14. Бронхопровокационные тесты</b>	<b>84</b>
<b>15. Проведение спирометрии у детей</b>	<b>90</b>
<b>16. Примеры заключений спирометрических исследований</b>	<b>95</b>
<b>А. Обозначения основных параметров ФВД</b>	<b>108</b>
<b>Литература</b>	<b>110</b>

### 3. Легочные объемы и емкости. Оценка ФОЕ методами разведения гелия и вымывания азота

Спирометрическое исследование начинается с записи спокойного дыхания. При этом иногда 1–2 мин пациент адаптируется к спирометру (это прежде всего касается спирометров закрытого типа), затем после установления ровного спокойного дыхания включается запись. Ранее запись спокойного дыхания продолжалась 3–5 мин, теперь это время сокращено до полуминуты. На этом этапе измеряются следующие величины (рис. 5):

**Дыхательный объем** ( $ДО$ ) ( $V_t$  – Tidal volume) – объем воздуха, который вдыхается и выдыхается за каждый дыхательный акт.

**Частота дыхания** ( $ЧД$ ) ( $f$  – frequency) – число дыхательных движений в 1 мин.

**Минутный объем дыхания** ( $МОД$ ) ( $V$  – Minute ventilation) – объем, который вентилируется через легкие за 1 мин  $МОД = ДО \times ЧД$ .

У взрослого человека  $ДО$  составляет около 500 мл,  $ЧД$  – 16 в 1 мин, а  $МОД$  – около 8 л/мин. Необходимо отметить, что величины  $ЧД$  и  $ДО$  очень индивидуальны.

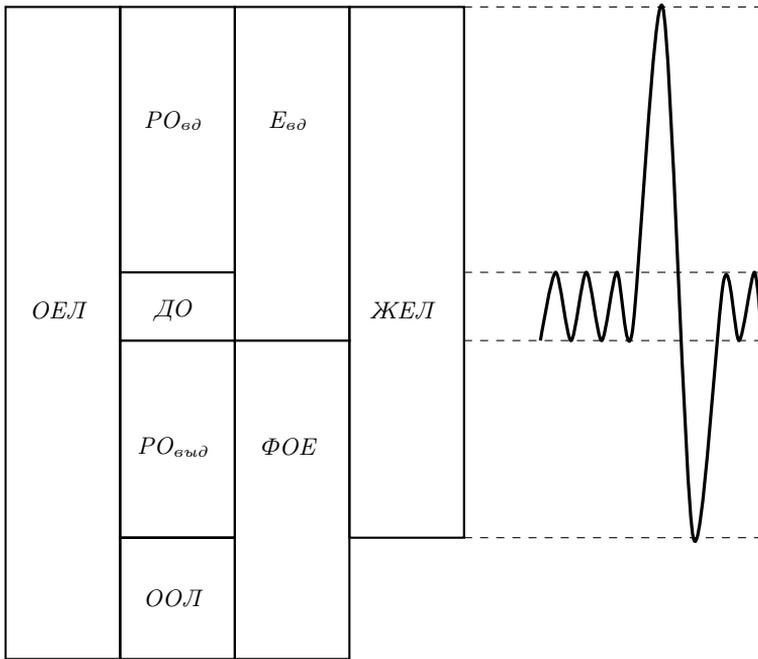
**Резервный объем вдоха** ( $РО_{вд}$ ) ( $IRV$  – inspiratory reserve volume) – максимально возможный объем, который можно дополнительно довдохнуть после спокойного вдоха. У взрослого человека небольшого роста он составляет около 2 л<sup>1</sup>.

**Резервный объем выдоха** ( $РО_{выд}$ ) ( $ERV$  – expiratory reserve volume) – максимального возможный объем, который можно дополнительно выдохнуть после спокойного выдоха. В нашем примере он составляет около 1,5 л,

**Жизненная емкость легких** ( $ЖЕЛ$ ) ( $VC$  – vital capacity) – максимально возможный объем, который можно выдохнуть после максимально глубокого вдоха ( $ЖЕЛ$  выдоха), или максимальный объем, который можно вдохнуть после максимально глубокого выдоха ( $ЖЕЛ$  вдоха). Нередко проводят последовательно определение  $ЖЕЛ$  вдоха и  $ЖЕЛ$  выдоха. Редко у тяжелых больных проводят прерывистый маневр определения  $ЖЕЛ$ , сначала определяя  $E_{вд}$ , а потом  $РО_{выд}$ . Тогда  $ЖЕЛ$  определяют как сумму  $E_{вд}$  и  $РО_{выд}$ . Эти варианты определения  $ЖЕЛ$  представлены на рис. 6. В норме эти величины одинаковые, но при бронхиальной обструкции за счет экспираторного

---

<sup>1</sup>Здесь и далее приводятся условные значения объемов для некоторого абстрактного примера. В реальных условиях у каждого обследуемого эти значения индивидуальны.



**Рис. 5.** Схематическое изображение легочных объемов и емкостей

Штриховые линии обозначают (сверху вниз) уровни: максимально глубокого вдоха, спокойного вдоха, спокойного выдоха, максимально глубокого выдоха.

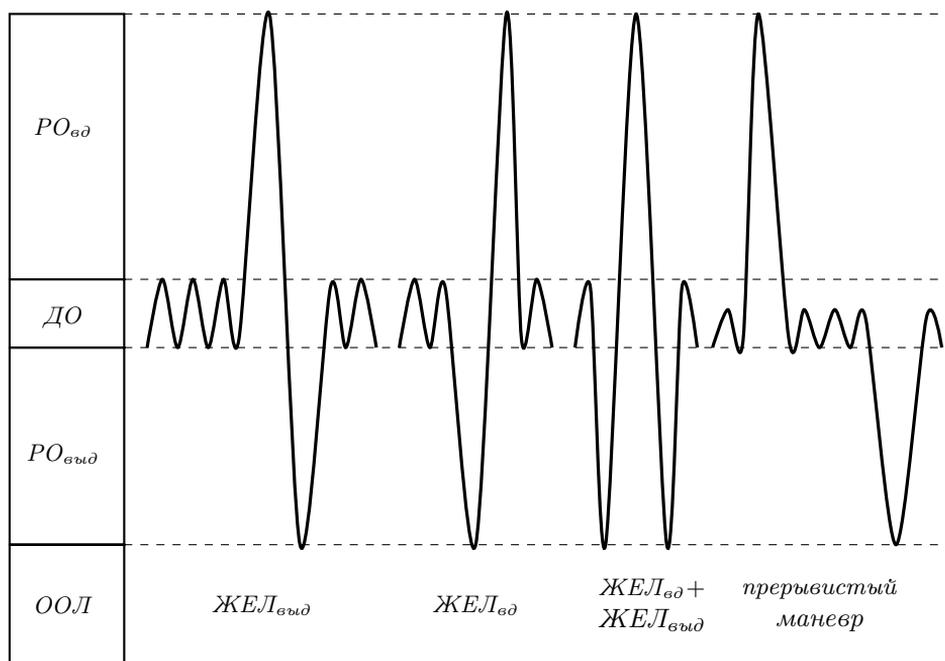
закрытия бронхов *ЖЕЛ* выдоха может быть меньше, чем *ЖЕЛ* вдоха. Во всех случаях  $ЖЕЛ = PO_{вд} + ДО + PO_{выд}$ .

**Остаточный объем легких (*ООЛ*)** (*RV* – residual volume) – объем воздуха, остающийся в легких после максимально глубокого выдоха. Этот объем не может быть определен при спирометрии, его измеряют при бодиплетизмографии или конвекционным методом разведения инертного газа (гелия).

**Функциональная остаточная емкость легких (*ФОЕ*)** (*FRC* – functional residual capacity) – объем воздуха в легких на глубине спокойного выдоха.  $ФОЕ = PO_{выд} + ООЛ$

**Емкость вдоха (*E<sub>вд</sub>*)** (*IC* – inspiratory capacity) – максимальный объем, который можно вдохнуть после спокойного выдоха.  $E_{вд} = ДО + PO_{вд}$ . У здорового человека величины *E<sub>вд</sub>* и *ФОЕ* примерно равны. При обструкции *ФОЕ* обычно превышает *E<sub>вд</sub>*. При рестриктивных нарушениях уменьшаются как *ФОЕ*, так и *E<sub>вд</sub>*.

**Общая емкость легких (*ОЕЛ*)** (*TLC* – total lung capacity) – объем воздуха в легких на глубине максимально глубокого вдоха. Уменьшение *ОЕЛ* – это основной признак рестриктивного синдрома. При обструкции *ОЕЛ* часто увеличивается за счет увеличения *ООЛ*.  $ОЕЛ = ЖЕЛ + ООЛ = ФОЕ + E_{вд}$ .



**Рис. 6.** Различные варианты определения ЖЕЛ

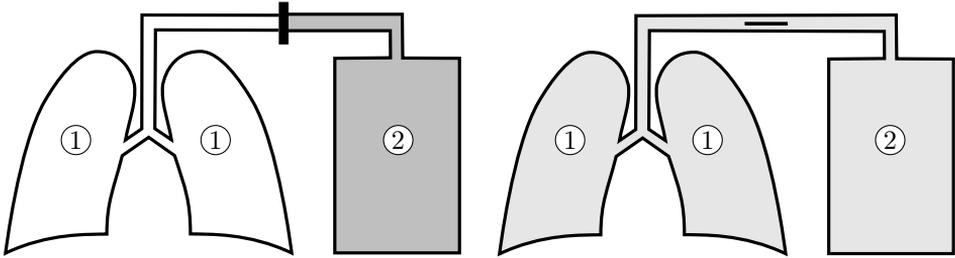
Таким образом, выделяют 4 объема:  $ДО$ ,  $RO_{вд}$ ,  $RO_{выд}$ ,  $ООЛ$  и 4 емкости:  $ЖЕЛ$ ,  $ОЕЛ$ ,  $E_{вд}$ ,  $ФОЕ$ . Как видно, легочные емкости включают два легочных объема и более. Из них  $ДО$ ,  $RO_{вд}$ ,  $RO_{выд}$ ,  $ЖЕЛ$  определяют при спирометрии непосредственно путем выполнения соответствующего маневра.

#### Схема определения величины $ООЛ$ методом разведения гелия

Гелий, обладая малой плотностью, легко проникает во все участки легких, быстро смешиваясь во всем объеме легких, не попадая в кровь, кроме того, он безвреден для организма. На первом этапе емкость спирографа закрытого типа заполняется газовой смесью с небольшим количеством гелия. Газоанализатором измеряется его концентрация —  $C_1$ . Поскольку объем спирометра ( $V_{сп}$ ) известен по паспортным данным прибора, то известно количество введенного гелия:  $C_1 \times V_{сп}$ . Далее открывается дыхательный кран, и гелиевая смесь начинает поступать в легкие пациента. Газоанализатор позволяет установить момент, когда концентрация гелия установится на новом уровне —  $C_2$ . Поскольку гелий не покидает легкие, не поступает в кровь, то количество гелия остается одинаковым как до смешивания, так и после него (рис. 7).

Т.е.  $C_1 \cdot V_{сп} = C_2 \cdot (V_{сп} + V_{легких})$ . Из этого выражения вычисляется величина  $V_{легких}$ :

$$V_{легких} = \frac{C_1 - C_2}{C_2} \times V_{сп}$$



**Рис. 7.** Схема определения  $\Phi OE$  методом разведения гелия

1 — легкие пациента, 2 — емкость спирометра.

Слева: до открытия крана весь индикаторный газ находится в спирометре; справа: после открытия газа он распределяется равномерно в легких и спирометре.

Поскольку подключение пациента к спирометру проводится на уровне спокойного выдоха, то величина  $V_{легких}$  будет равна  $\Phi OE$ .

Далее рассчитывают:

$$OOL = \Phi OE - PO_{выд}, OEL = ЖЕЛ + OOL$$

Информативными являются также соотношения:  $OOL/OEL$  и  $\Phi OE/OEL$ .

$\Phi OE$  также можно измерить методом вымывания азота кислородом. При заполнении емкости спирометра чистым кислородом (в закрытой системе) непрерывно регистрируют концентрацию азота в выдыхаемом газе с помощью азотографа (или масс-спектрометра) с последующим расчетом величины  $\Phi OE$ .

Наиболее современным является определение  $\Phi OE$  методом вымывания азота кислородом в открытой системе. Для пациента дыхательный маневр сводится к спокойному дыханию чистым кислородом. При этом концентрация азота в выдыхаемой газовой смеси постепенно уменьшается за счет перемешивания вдыхаемого чистого кислорода с остатком азота в легких. Концентрация азота определяется спектрометрическим методом. Открытый дыхательный контур оказывает минимальное влияние на параметры легочной вентиляции, санитарная обработка таких приборов максимально проста и эффективна.

Альтернативой методам разведения индикаторного газа для определения  $OOL$  является метод бодиплетизмографии, основанный на законе Бойля–Мариотта.

В норме  $OOL$  составляет 20–35% от  $OEL$  в зависимости от возраста (у молодых лиц он меньше, с возрастом  $OOL$  увеличивается в связи с развитием возрастной эмфиземы легких). При выраженной обструкции характерно увеличение  $OOL$ , увеличение  $\Phi OE$ , уменьшение  $PO_{выд}$ . При тяжелой обструкции уменьшается и  $ЖЕЛ$ , сначала преимущественно за счет снижения  $PO_{выд}$  (при выраженной эмфиземе возможно уменьшение и емкости вдоха). При рестрикции отмечается уменьшение  $OEL$ , при этом уменьшаются все составляющие ее объемы, хотя и в разной степени. При смешанных нарушениях

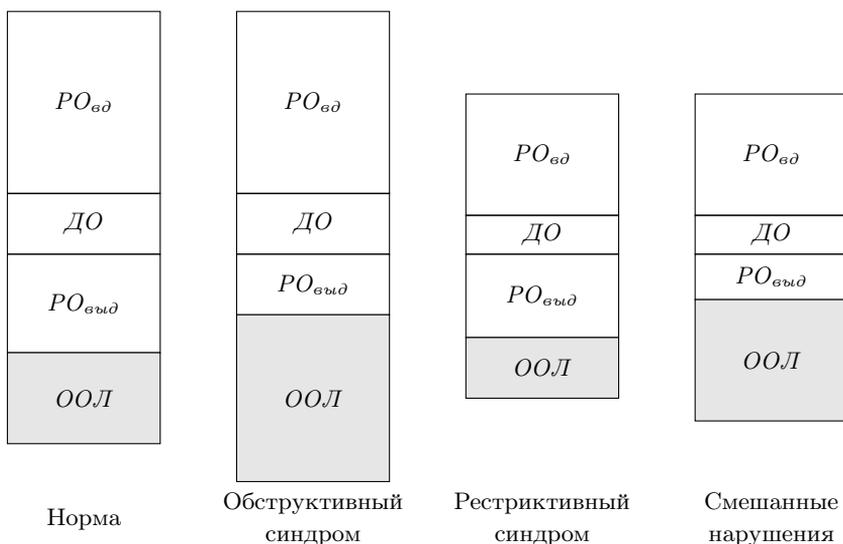
уменьшается и  $ОЕЛ$ , и изменяется структура  $ОЕЛ$  по аналогии с обструктивным синдромом.

Соотношение  $\Phi ОЕ / ОЕЛ$  в норме у молодых людей составляет около 50%, отражая то, что уровень спокойного выдоха является уровнем равновесия эластических сил аппарата дыхания: легочной паренхимы, которая стремится к сжатию, и грудной клетки, которая стремится к расширению. Конкретное значение соотношения  $\Phi ОЕ / ОЕЛ$  у лиц разного возраста можно найти в специальных таблицах. Уровень спокойного выдоха соответствует равновесию этих сил, когда  $\Phi ОЕ$  равна емкости вдоха.

На рис. 8 представлена схема изменений структуры  $ОЕЛ$  в норме, при обструкции (например, ХОБЛ), рестриктивных и смешанных нарушениях.

При различных вариантах нарушений внешнего дыхания отмечаются следующие изменения объемных показателей:

1. При обструкции внегрудных дыхательных путей изменения напоминают таковые при рестриктивных нарушениях: пропорциональное уменьшение всех легочных объемов.
2. При обструкции центральных отделов бронхиального дерева увеличиваются  $ООЛ$  и соотношение  $ООЛ / ОЕЛ$  при малом изменении  $ОЕЛ$ .  $ЖЕЛ$  может уменьшиться преимущественно за счет  $Р О_{\text{выд}}$ .
3. При дистальной обструкции характерно еще более значимое увеличение  $ОЕЛ$ ,  $ООЛ$ ,  $ООЛ / ОЕЛ$ .  $ЖЕЛ$  может уменьшаться за счет  $Р О_{\text{выд}}$ . При выраженной дистальной обструкции, в частности, при эмфиземе легких, возможно значительное уменьшение  $ЖЕЛ$  при резком снижении  $Р О_{\text{выд}}$ ,



**Рис. 8.** Схема изменений структуры  $ОЕЛ$  при обструкции, рестрикции и смешанных нарушениях

**Таблица 2.** Типичные изменения спирометрических показателей при обструктивных и рестриктивных нарушениях

Показатель	Синдром	
	Обструктивный	Рестриктивный
<i>ОЕЛ</i>	<i>N</i> ↑	↓
<i>ЖЕЛ</i>	<i>N</i> ↓	↓
<i>РО<sub>вд</sub></i>	<i>N</i>	↓
<i>РО<sub>выд</sub></i>	↓	↓
<i>Е<sub>вд</sub></i>	<i>N</i>	↓
<i>ФОЕ</i>	<i>N</i> ↑	↓
<i>ООЛ</i>	↑	<i>N</i> ↓
<i>ООЛ/ОЕЛ</i>	↑	<i>N</i>
<i>ОФВ<sub>1</sub></i>	↓	↓
<i>ОФВ<sub>1</sub>/ЖЕЛ</i>	↓	<i>N</i> ↑
<i>ОФВ<sub>1</sub>/ФЖЕЛ</i>	↓	<i>N</i> ↑
<i>ДО</i>	<i>N</i> ↑	<i>N</i> ↓
<i>ЧД</i>	<i>N</i> ↑	<i>N</i> ↑
<i>МВЛ</i>	↓	↓

*N* — показатель не меняется или меняется незначительно, стрелки указывают на уменьшение или увеличение показателя.

а также и снижения емкости вдоха. При этом наибольшую часть *ОЕЛ* составляет *ООЛ*. При всех трех вариантах уменьшаются *ОФВ<sub>1</sub>* и скоростные показатели кривой форсированного выдоха.

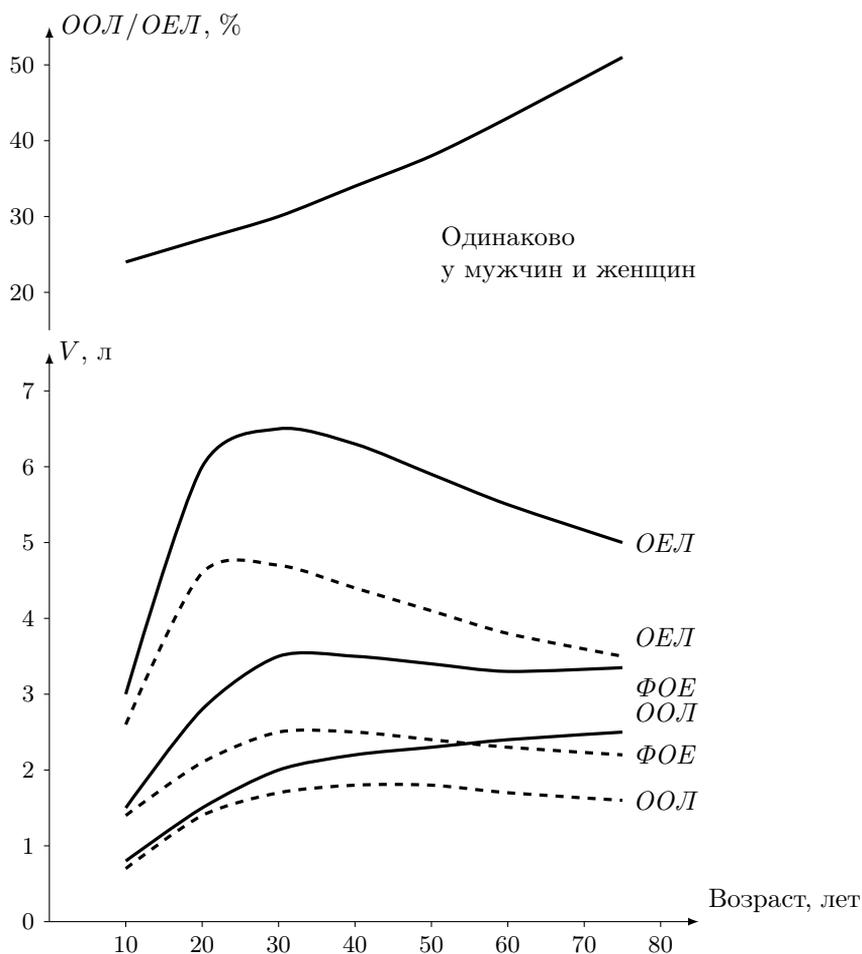
4. При рестриктивных нарушениях основным показателем является уменьшение *ОЕЛ* и всех ее составляющих, хотя часто и не в равной степени. Уменьшение только *ЖЕЛ* не может служить однозначным признаком рестрикции, так как при выраженных обструктивных нарушениях *ЖЕЛ* также уменьшается.
5. Смешанные нарушения могут быть выявлены только при анализе структуры *ОЕЛ*. При этом будет уменьшаться *ОЕЛ* и изменяться ее структура с уменьшением *РО<sub>выд</sub>* и увеличением *ООЛ*.

Схематичное представление изменений легочных объемных показателей при обструктивных и рестриктивных нарушениях представлено в табл. 2.

На рис. 9 представлена возрастная динамика показателей *ОЕЛ*, *ООЛ*, *ЖЕЛ*. После 20 лет *ОЕЛ* и *ЖЕЛ* постепенно снижаются, а *ООЛ* и *ФОЕ* увеличиваются. С возрастом увеличивается соотношение *ООЛ/ОЕЛ*, что отражает развитие возрастной эмфиземы легких.

При ХОБЛ характерно изменение соотношения легочных объемов, отражающих обструктивные нарушения и развитие эмфиземы легких: увеличение *ООЛ*, *ФОЕ* и *ОЕЛ*. При физической нагрузке за счет значительных колебаний давления в грудной клетке происходит нарастание экспираторного закрытия бронхов, мелкие бронхи играют роль клапана, происходит «накачка» воздуха в легкие: еще большее увеличение *ООЛ*, *ФОЕ* и *ОЕЛ*. Улучше-

ние бронхиальной проходимости под действием бронхолитических препаратов уменьшает указанную тенденцию.



**Рис. 9.** Возрастная динамика показателей легочных объемов (по Neetham, 1954)

Сплошная линия — мужчины, пунктирная — женщины.

## 4. Показатели легочной вентиляции: ЧД, МОД, МАВ, проба ФЖЕЛ, МВЛ. Понятие о поглощении кислорода и эффективности вентиляции

Спирометрическое исследование включает следующие последовательные этапы:

1. Запись спокойного дыхания в течение 3–5 мин, этот режим в некоторых приборах называют режимом «МОД». На этом этапе измеряются  $ДО$ ,  $ЧД$ , рассчитывается  $МОД$ . В спирографах закрытого типа измерялось также поглощение кислорода ( $ПО_2$ ) и рассчитывались показатели эффективности вентиляции: коэффициент использования  $O_2$  —  $КИO_2 = ПО_2/МОД$  — и обратная величина — эффективность вентиляции  $ЭВ = МОД/ПО_2$ . В современных условиях запись спокойного дыхания проводится в начале маневра  $ЖЕЛ$ . Ранее проводился анализ показателей спокойного дыхания: времени вдоха, времени выдоха (соотношение  $T_{выд}/T_{вд}$  в норме около 1,3), скоростных показателей вдоха и выдоха. Сегодня этот анализ в рутинной практике не проводится.
2. Маневр  $ЖЕЛ$ . Пациента просят проводить медленный вдох и медленный полный выдох до уровня остаточного объема легких ( $ЖЕЛ_{выд}$ , аналогично проводится определение  $ЖЕЛ_{вд}$ ), когда сначала производится медленный полный глубокий выдох до уровня  $ООЛ$  и потом медленный полный глубокий вдох до уровня  $ОЕЛ$ . Маневр проводится 2–3 раза, принимается наибольшее значение. Как было сказано выше, возможно определение  $ЖЕЛ$  вдоха,  $ЖЕЛ$  выдоха, последовательное выполнение обоих маневров или прерывистое выполнение  $ЖЕЛ$ . Маневр  $ЖЕЛ$  в любом случае предполагает медленное движение воздуха с постоянной скоростью на вдохе и на выдохе.
3. Маневр  $ФЖЕЛ$ . В отличие от маневра  $ЖЕЛ$ , при выполнении маневра  $ФЖЕЛ$  после максимально глубокого вдоха (до уровня  $ОЕЛ$ ) без последующей задержки (возможна задержка не более 1 с) пациент выполняет форсированный глубокий полный выдох с максимальным напряжением экспираторной мускулатуры. Пациенту объясняют, что выдох должен быть с резким началом, с максимальным постоянным усилием до конца. Продолжительность форсированного выдоха у взрослого человека должна быть не менее 6 с и не менее 3 с у детей. Маневр повторяется не

менее 2–3 раз, но не более 8. Выбирают результат с наибольшими значениями *ФЖЕЛ* и *ОФВ<sub>1</sub>*. На этом этапе, кроме *ФЖЕЛ*, вычисляется объем форсированного выдоха за первую секунду *ОФВ<sub>1</sub>* (рис. 11).

4. Маневр максимальной вентиляции легких (МВЛ) в клинических условиях проводится редко, так как не имеет особой диагностической значимости в пульмонологической практике, и не лишен серьезных осложнений. Его иногда применяют для выявления слабости дыхательной мускулатуры при ряде нервно-мышечных заболеваний.

Подробно методика проведения спирометрического исследования представлена в главе 9.

На сегодняшний день спирометрия состоит обычно из двух этапов: *ЖЕЛ* и *ФЖЕЛ*. Режим МОД используется редко, величины *ЧД*, *ДО* и *МОД* определяются на начальном этапе маневра *ЖЕЛ*.

## 4.1. Понятие мертвого пространства

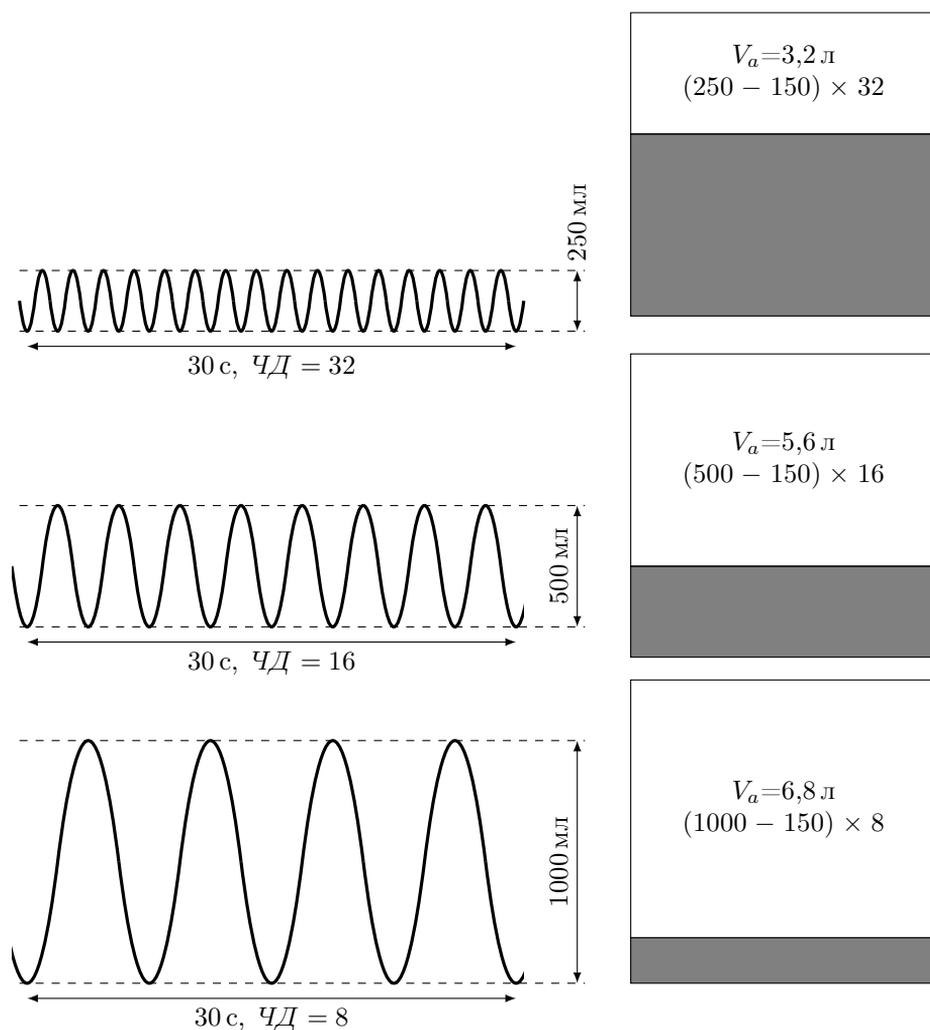
Не весь воздух, который вдыхается, доходит до альвеол. **Мертвым пространством** (*МП*) называют объем воздуха, который вдыхается, но не попадает в альвеолы и не участвует в газообмене. На рис. 10 представлено соотношение величин вентиляции альвеол и вентиляции *МП* при разных сочетаниях величин *ДО* и *ЧД*.

Мертвое пространство включает анатомическое *МП* и альвеолярное *МП*, которые в сумме составляют функциональное *МП*. Анатомическое *МП* включает объем верхних дыхательных путей, трахеи и бронхов до 17-й генерации, где отсутствуют альвеолы. В анатомическом *МП* происходит подготовка воздуха к газообмену: согревание, увлажнение, очистка от пыли и инфекционных агентов. Объем анатомического *МП* у взрослого человека составляет около 150–200 мл — примерно  $\frac{1}{3}$  *ДО*. Альвеолярное *МП* включает объем альвеол, которые вентилируются, но не перфузируются или недостаточно перфузируются кровью.

Объем воздуха в альвеолах составляет альвеолярный объем (*АО*), минутная альвеолярная вентиляция обозначается как *МAB*.

$$МОД = ЧД \times ДО = ЧД \times (МП + АО) = МAB + ЧД \times МП$$

В обычных условиях *МП* составляет примерно  $\frac{1}{3}$  *ДО*, соответственно *МAB* составляет примерно  $\frac{2}{3}$  от *МОД*. При частом поверхностном дыхании (малая величина *ДО*) в основном вентилируется *МП*, в альвеолы попадает меньшая часть *ДО*. При глубоком дыхании, наоборот, увеличивается *МAB* и она составляет большую часть *МОД*. Таким образом, изменяя величины *ЧД* и *ДО*, можно регулировать величину *МAB*, что и происходит как в физиологических, так и в патологических условиях (рис. 10).



**Рис. 10.** Схема соотношения общей минутной и альвеолярной вентиляции ( $V_a$ ) при разных соотношениях  $DO$  и  $ЧД$  [2, 8]

$ЧД$  указана под спирограммой,  $DO$  — справа от нее, во всех случаях  $МОД$  равен 8 л/мин. Объем альвеолярной вентиляции рассчитывается:  $V_a = (DO - МОД) \cdot ЧД$  и указан справа в прямоугольнике. Серым показана доля мертвого пространства в  $МОД$ .

## 4.2. Проба ФЖЕЛ

Это наиболее ответственный этап спирометрического исследования. От правильности его проведения зависит правильность врачебного заключения. Поскольку скорость выдоха, особенно форсированного, определяется проходимость дыхательных путей, то проба ФЖЕЛ позволяет выявлять обструктивные нарушения.

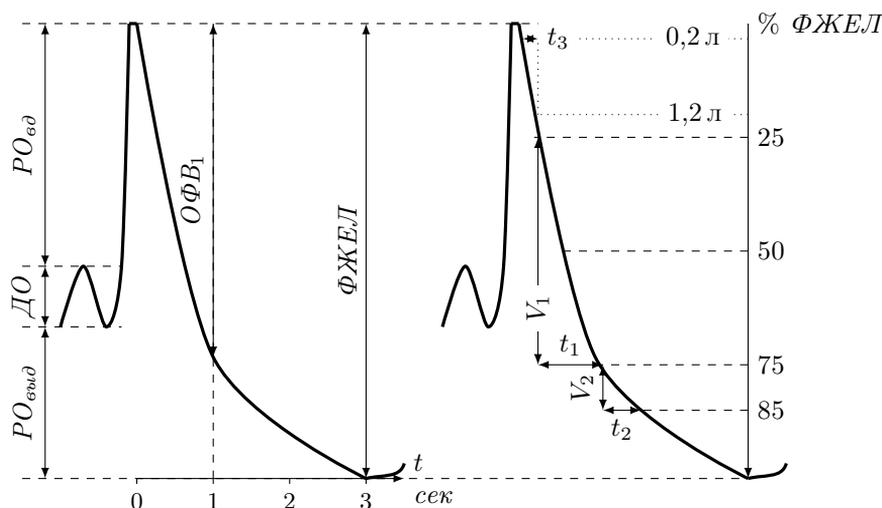
Кривая ФЖЕЛ может быть описана экспоненциальной зависимостью:

$$Vt = V_0 \times (1 - e^{-t/\tau}),$$

где  $V_0$  — объем ФЖЕЛ,  $t$  — текущий момент времени,  $\tau$  — постоянная времени опорожнения легких.  $V_t$  — объем воздуха, выдохнутый к моменту  $t$ .  $\tau = R \cdot C$ , где  $R$  — аэродинамическое сопротивление,  $C$  — растяжимость легких.

В норме при гомогенности ткани легких процесс форсированного выдоха может быть описан одной экспоненциальной кривой с одной постоянной времени. В патологических условиях легкие становятся неоднородными по структуре с различными механическими свойствами в разных участках легкого (различные значения  $R$  и  $C$  в разных зонах легкого). Тогда кривая ФЖЕЛ описывается серией экспонент с различными величинами постоянной времени.

В пробе ФЖЕЛ рассчитываются следующие показатели (рис. 11)



**Рис. 11.** Кривая ФЖЕЛ

Слева — схема определения  $ОФВ_1$  и  $ФЖЕЛ$ , справа — схема расчета скоростных показателей. Представлены уровни уже выдохнутой части  $ФЖЕЛ$ . Расчет средних объемных скоростей проводится по формулам:  $СОС_{25-75} = V_1/t_1$ ,  $СОС_{75-85} = V_2/t_2$ ,  $СОС_{0,2-1,2} = 1/t_3$

**Величина ФЖЕЛ** — максимальный объем, который форсированно выдыхается от уровня максимально глубокого вдоха до уровня максимально глубокого выдоха. У здорового человека она совпадает с величиной спокойной ЖЕЛ. Однако при обструктивных нарушениях при нарушении опорожнения легких срабатывает «воздушная ловушка»: при форсированном выдохе высокое транспульмональное давление приводит к сжатию мелких бронхов, лишенных хрящевого скелета, и экспираторному коллапсу мелких бронхов. При этом часть воздуха задерживается в легких. Разница значений ЖЕЛ и ФЖЕЛ может косвенно отражать величину «воздушной ловушки».

Иногда при фактическом измерении спирометрических показателей величина ФЖЕЛ может оказаться больше ЖЕЛ. Это свидетельствует о некачественном выполнении маневра ЖЕЛ. За величину ЖЕЛ тогда принимается наибольшее значение, в данном случае — ФЖЕЛ.

**Объем форсированного выдоха за первую секунду** форсированного выдоха ( $ОФВ_1$ ). Это важнейший спирометрический показатель, отражающий механические свойства легких. Его снижение отмечается как при обструктивных, так и при рестриктивных нарушениях: при обструкции за счет замедления форсированного выдоха, а при рестрикции за счет уменьшения всех объемных показателей (рис. 12)

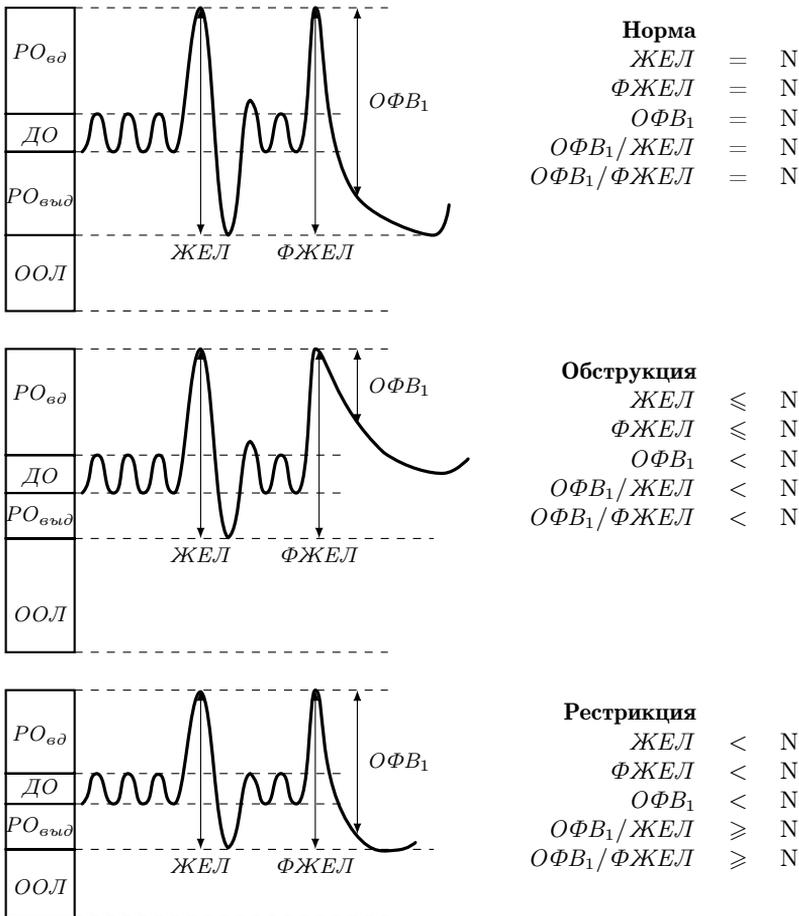
Соотношение  $ОФВ_1/ЖЕЛ$  (обычно выражается в процентах) — **индекс Тиффно** — главный показатель наличия бронхиальной обструкции. В норме его величина не менее 70% (у молодых не менее 75–80%). При обструктивном синдроме он снижается и служит главным индикатором обструктивного синдрома, что отражает большую степени снижения  $ОФВ_1$  по сравнению с ЖЕЛ. При рестриктивном синдроме за счет примерно пропорционального уменьшения всех легочных объемов  $ОФВ_1/ЖЕЛ$  не меняется или увеличивается, поскольку малый объем  $ОФВ_1$  выдыхается за меньшее время.

Иногда рассчитывается показатель  $ОФВ_1/ФЖЕЛ$  — **индекс Генслера**. Его значение в плане выявления обструкции уступает индексу Тиффно, так как при обструкции степень снижения ФЖЕЛ обычно больше, чем степень снижения ЖЕЛ, поэтому уменьшение индекса  $ОФВ_1/ФЖЕЛ$  менее чувствительно к обструкции. В норме индекс Генслера должен быть не менее 80%. Удобство этого показателя заключается в том, что для его расчета достаточно только одной пробы ФЖЕЛ, что существенно при скрининговых исследованиях.

**Средняя объемная скорость** на уровне выдоха от 25 до 75% ФЖЕЛ ( $СОС_{25-75}$ ). Вся величина ФЖЕЛ делится на участки выдоха 25, 50, 75% ФЖЕЛ. Могут быть определены **мгновенные скоростные показатели** ( $МОС_{25}$ ,  $МОС_{50}$  и  $МОС_{75}$ , о чем будет сказано в главе 5, посвященной кривой поток–объем). Наибольшее диагностическое значение имеет величина  $СОС_{25-75}$ : она хорошо повторяется и в меньшей степени зависит от усилия пациента по сравнению с другими показателями кривой ФЖЕЛ. Следует отметить, что оба показателя, и  $ОФВ_1$  и  $СОС_{25-75}$ , отражают скорость выдоха средней порции ФЖЕЛ, но вторая величина не включает начальный этап кривой ФЖЕЛ. Именно этот начальный момент часто плохо выполняется пациентом, при развитии слабого экспираторного усилия происходит занижение величины  $ОФВ_1$ . В связи с этим снижение показателя  $СОС_{25-75}$  наряду с  $ОФВ_1$  является важ-

нейшим индикатором обструкции. Показатели мгновенной скорости форсированного выдоха на уровнях выдоха 25, 50 и 75% ФЖЕЛ будут рассмотрены в главе 5.

На кривой ФЖЕЛ могут быть рассчитаны и другие скоростные показатели: на начальном участке выдоха первого литра воздуха ( $СОС_{0,2-1,2}$ ), в конце выдоха ( $СОС_{75-85}$ ). Однако они теперь не используются, так как плохо повторяются, а первый показатель значимо зависит от усилий пациента. Кроме того, отрезок кривой ФЖЕЛ, где рассчитывается показатель  $СОС_{0,2-1,2}$ , включается в участок расчета величины  $ОФВ_1$  и  $СОС_{25-75}$ , поэтому не имеет дополнительного диагностического значения.



**Рис. 12.** Схемы спирограмм ЖЕЛ и ФЖЕЛ в норме, при обструктивном и рестриктивном синдроме

Иногда, когда пациент не способен выдохнуть весь объем *ФЖЕЛ*, может быть определена, так называемая, «суррогатная» *ФЖЕЛ* — величина форсированного выдоха за 6 с (*ОФВ<sub>6</sub>*). Аналогично индексу Генслера рассчитывается показатель *ОФВ<sub>1</sub>/ОФВ<sub>6</sub>*. Считается, что в ряде случаев величина *ОФВ<sub>6</sub>* имеет большую воспроизводимость, чем величина *ФЖЕЛ*.

### 4.3. Проба максимальной вентиляции легких

**Максимальная вентиляция легких** (*МВЛ*) — максимальный объем, который человек может провентилировать за 1 мин.

$$МВЛ = ДО_{\text{макс}} \cdot ЧД_{\text{макс}}$$

Маневр *МВЛ* проводится не более 10–12 с и результат приводится к 1 мин. Пациента просят делать максимально быстрые и глубокие дыхательные маневры, часто задается ритм 40–60 дыхательных циклов в 1 мин. Необходимо следить за тем, чтобы величина *ДО* в этой пробе была больше, чем *ДО* при спокойном дыхании.

Величина *МВЛ* очень вариабельная, она сильно зависит от качества выполнения пробы и поэтому трудна для интерпретации. Кроме того, развивающаяся альвеолярная гипервентиляция может провоцировать бронхоспазм, вызвать коллапс, судорожный припадок при эпилепсии и другие нежелательные последствия. Поэтому в настоящее время проба используется редко, в основном при исследовании здоровых людей или для оценки силы и выносливости дыхательной мускулатуры при нервно-мышечных заболеваниях. По своему физиологическому смыслу проба *МВЛ* является многократно повторенной пробой *ФЖЕЛ* и величина *МВЛ* при качественном выполнении пропорциональна *ОФВ<sub>1</sub>* (считается, что  $МВЛ \approx ОФВ_1 \cdot 40$  или  $ОФВ_1 \cdot 60$ ).

Ранее разница *МВЛ* и *МОД* определялась как *резерв дыхания*. У здорового человека *МВЛ* в 10–20 раз превышает величину *МОД*, поэтому резерв дыхания может достигать у тренированных людей 150–180 л/мин. Снижение этого резерва отмечается как при обструктивных, так и при рестриктивных заболеваниях.

### 4.4. Потребление кислорода и оценка эффективности вентиляции

При использовании спирографа закрытого типа с заполненной кислородом емкостью можно определить скорость потребления кислорода организмом. Это определяется по наклону спирограммы или наклону отдельной кривой, отражающей потребление кислорода. Для правильного определения *ПО<sub>2</sub>* требуется спокойное дыхание в течение 3–5 мин. За счет потребления кислорода организмом уменьшается емкость спирометра, предварительно заполненного обогащенной кислородом газовой смесью. В норме *ПО<sub>2</sub>* составляет 200–300 мл

в 1 мин. Схема записи спирограммы на спирографе закрытого типа представлена на рис. 13.

На основании измеренного потребления кислорода ( $ПО_2$ ) и  $МОД$  рассчитываются показатели эффективности вентиляции.

Коэффициент использования кислорода  $КИО_2 = ПО_2/МОД$  мл/л.

В норме  $КИО_2$  составляет  $40 \pm 5$  мл/л.

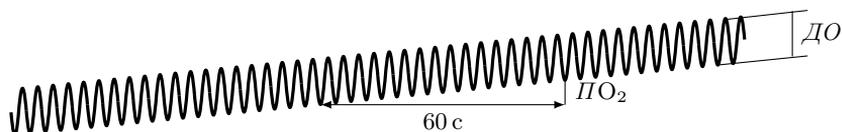
Величина, обратная  $КИО_2$ , называется вентиляционным эквивалентом:  $ВЭ = МОД/ПО_2$  л/мл.

В норме  $ВЭ = 28 \pm 3$  л/мл.

$КИО_2$  показывает, какое количество кислорода поглощается из 1 л вентилируемого воздуха. Уменьшение этого показателя свидетельствует об общей гипервентиляции, увеличение — об общей гиповентиляции (или о негерметичности системы спирометра и утечке воздушно-кислородной смеси).

Следует различать понятия общей и альвеолярной гипо- и гипервентиляции. Общая гипервентиляция определяется по избыточной величине  $МОД$  по отношению к требуемому уровню метаболизма объема  $ПО_2$  в данный момент, т.е. по снижению  $КИО_2$  или увеличению  $ВЭ$ . Альвеолярная гипервентиляция определяется по снижению напряжения углекислого газа в артериальной крови, т.е. по избыточному выведению  $CO_2$  из организма. Общая гиповентиляция определяется при увеличении  $КИО_2$ , а альвеолярная гиповентиляция — по увеличению  $pCO_2$  артериальной крови. Альвеолярная гиповентиляция возможна при общей гипервентиляции в случае избыточной вентиляции альвеолярного мертвого пространства, что нередко встречается при тяжелой бронхальной обструкции, например, при астматическом приступе.

На рис. 13 представлена схема спирограммы, зарегистрированная на спирографе закрытого типа. Запись спокойного дыхания производится в течение 3–5 мин. Виден подъем уровня спирограммы за счет поглощения кислорода. По величине этого подъема рассчитываются величина потребления кислорода  $ПО_2$  (мл/мин) и показатели эффективности вентиляции —  $КИО_2$  и  $ВЭ$ .



**Рис. 13.** Схема спирограммы спокойного дыхания, записанной на спирографе закрытого типа, расчет потребления кислорода.