**Лекция 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 (ПО2) и рассчитывались показатели эффективности вентиляции: коэффициент использования $O_2$ - *КИО2 = ПО2/МОД* -и обратная величина - эффективность вентиляции *ЭВ = МОД/ П*О2. 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 ( *ЖЕЛвыд* , аналогично проводится определение *ЖЕЛвд),* 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*\. На этом этапе, кроме *ФЖЕЛ*, вычисляется объем форсированного выдоха за первую секунду $ОФВ_1$(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 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 *МАВ*.

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

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

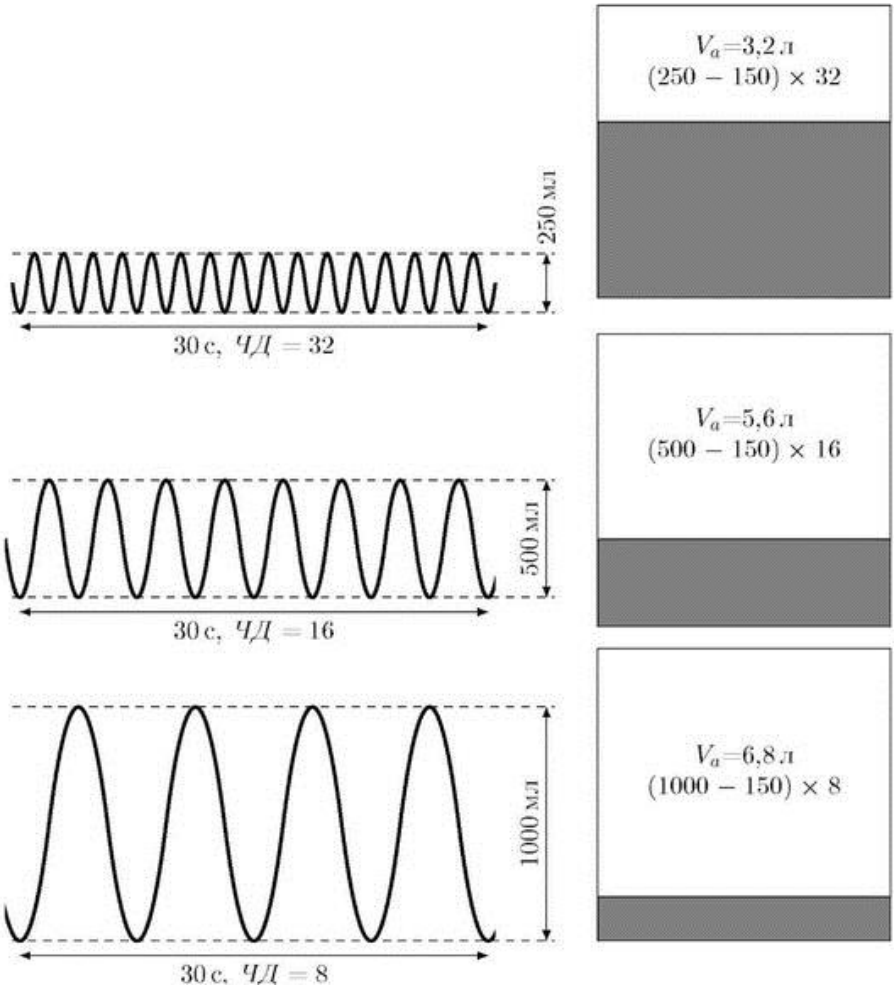


Рис. 10. Схема соотношения общей минутной и альвеолярной вентиляции

($V_a$) при разных соотношениях *ДО* и *ЧД* [1,7]

*ЧД* указана под спирограммой, ДО - справа от нее, во всех случаях *МОД* равен 8 л/мин. Объем альвеолярной вентиляции рассчитывается: $V_a$ = *(ДО - МП)* х 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 проходимостью дыхательных путей, то проба ФЖЕЛ позволяет выявлять обструктивные нарушения.

Кривая ФЖЕЛ может быть описана экспоненциальной зависимостью:

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

где Vo -объем *ФЖЕЛ*, t - текущий момент времени, τ - постоянная времени опорожнения легких. $V_t$ -объем воздуха, выдохнутый к моменту t. τ = *R x 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)

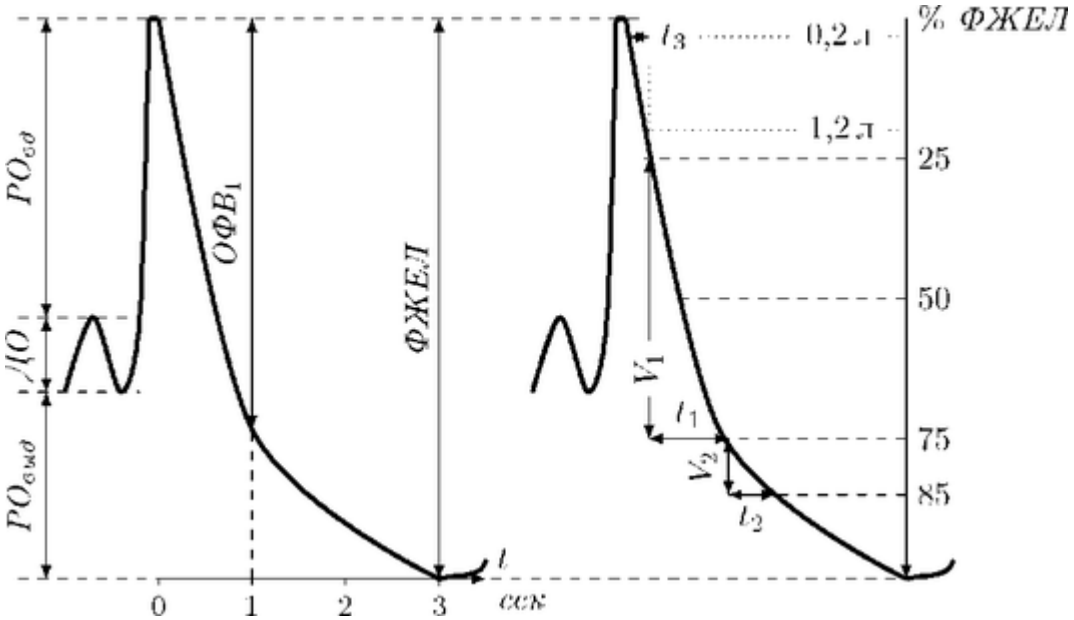


Рис. 11. Кривая ФЖЕЛ

Слева - схема определения *ОФВ₁* и *ФЖЕЛ*, справа - схема расчета скоростных показателей. Представлены уровни уже выдохнутой части *ФЖЕЛ*. Расчет средних объемных скоростей проводится по формулам: $СОС_{25-75} = V_1/t1$, $СОС_{75-85} = V_2/t_2$ , $СОС_{0,2-1,2} = 1л/t_3$

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?).* 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\/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* по сравнению с *ЖЕЛ* . При рестриктивном синдроме за счет примерно пропорционального уменьшения всех легочных объемов *ОФВ\/ЖЕЛ* не меняется или увеличивается, поскольку малый объем *ОФВ* выдыхается за меньшее время.

Иногда рассчитывается показатель *ОФВ\/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\/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* (СОС25-75). Вся величина *ФЖЕЛ* делится на участки выдоха 25, 50, 75% *ФЖЕЛ.* Могут быть определены мгновенные скоростные показатели ($МОС_{25}$, *МОС50* и *МОС75,* о чем будет сказано в гл. 5, посвященной кривой поток-объем). Наибольшее диагностическое значение имеет величина СОС25-75: 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* 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\.* В связи с этим снижение

показателя СОС25-75 наряду с *ОФВ*\ является важнейшим индикатором обструкции. Показатели мгновенной скорости форсированного выдоха на уровнях выдоха 25, 50 и 75% *ФЖЕЛ* будут рассмотрены далее.

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.

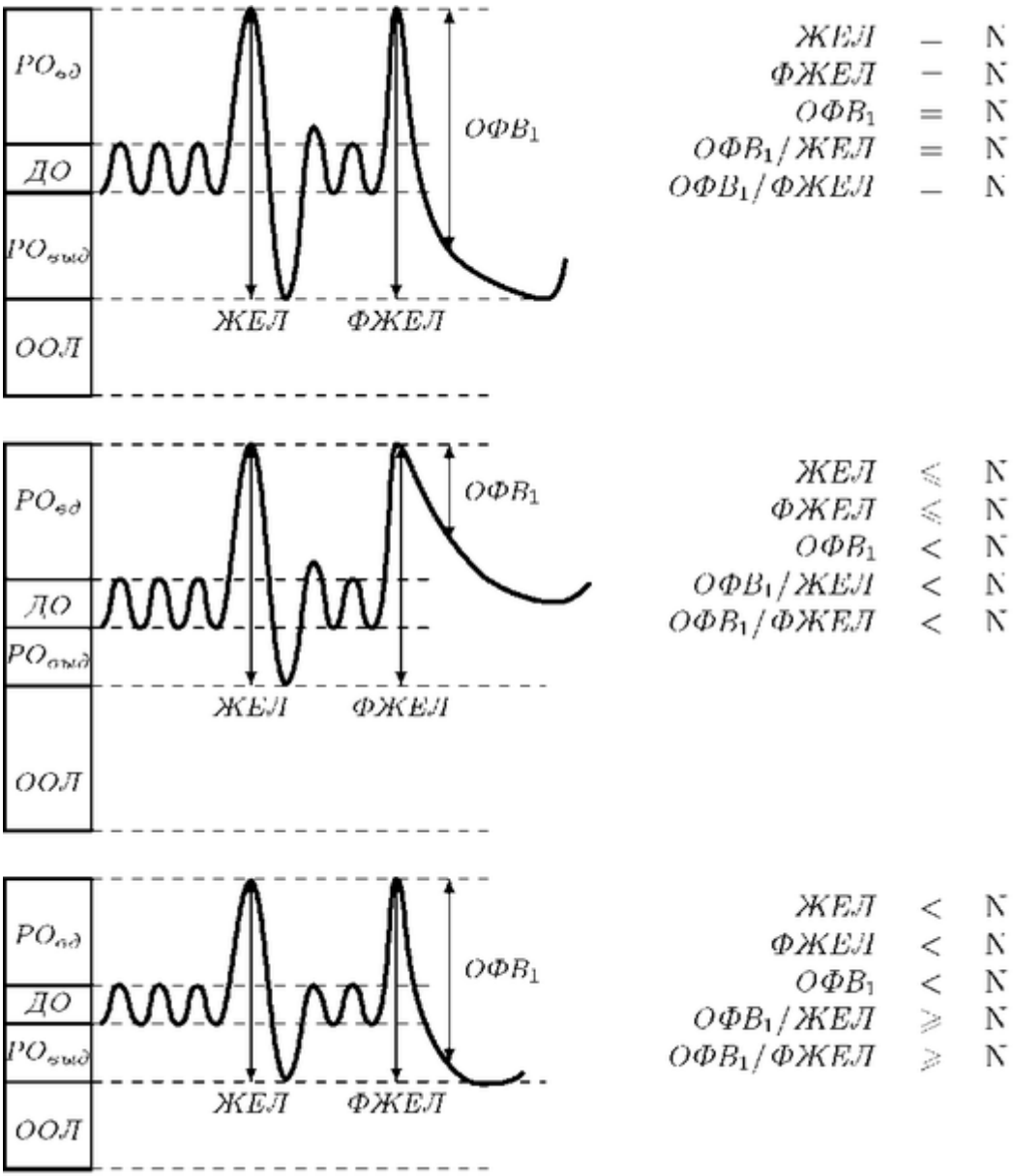


Рис. 12. Схемы спирограмм *ЖЕЛ* и *ФЖЕЛ* в норме (сверху), при обструк-тивном (посередине) и рестриктивном (внизу) синдромах

Иногда, когда пациент не способен выдохнуть весь объем *ФЖЕЛ*, может быть определена, так называемая, «суррогатная» *ФЖЕЛ* - величина форсированного выдоха за 6с *($ОФВ_6$)*. Аналогично индексу Генслера рассчитывается показатель $ОФВ_1/ОФВ_6$. Считается, что в ряде случаев величина $ОФВ_6$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.

$МВЛ = ДО_{макс} \times ЧД_{макс}$

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 $ОФВ_1$(считается, что $МВЛ \approx ОФВ_1$? 40 или $ОФВ_1$? 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 $ПО_2$ требуется спокойное дыхание в течение 3-5 мин. За счет потребления кислорода организмом уменьшается емкость спирометра, предварительно заполненного обогащенной кислородом газовой смесью. В

норме *П*$O_2$составляет 200-300 мл в 1 мин. Схема записи спирограммы на спирографе закрытого типа представлена на рис. 13.

На основании измеренного потребления кислорода ($ПO_2$) и *МОД* рассчитываются показатели эффективности вентиляции.

Коэффициент использования кислорода *КИ*$O_2$ = *П*$O_2$/*МОД* мл/л. В норме *КИ*$O_2$ составляет 40 ± 5 мл/л.

Величина, обратная *КИО*2, называется вентиляционным эквивалентом: *ВЭ* = *МОД/П*$O_2$ л/мл. В норме *ВЭ* = 28 ± 3 л/мл.

*КИ* O2 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 уровнем метаболизма объему *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 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 бронхиальной 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*.

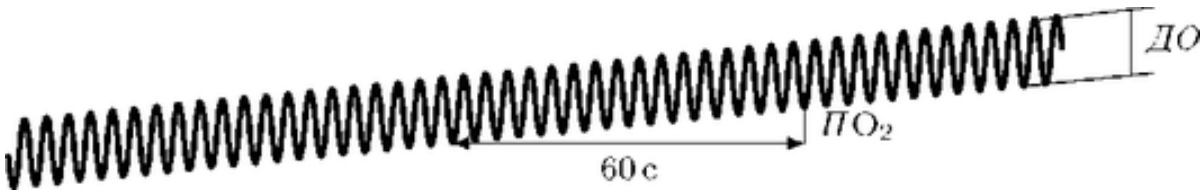


Рис. 13. Схема спирограммы спокойного дыхания, записанной на спирографе закрытого типа, расчет потребления кислорода.