

СВОЙСТВА КРИВЫХ РАБОТЫ ДЫХАНИЯ, ПРОТИВОРЕЧАЩИЕ ОБСТРУКТИВНОЙ ТЕОРИИ НАРУШЕНИЯ ВЕНТИЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ЛЕГКИХ

Тетенев Ф.Ф., Агеева Т.С., Бодрова Т.Н., Карзилов А.И., Месько П.Е., Тетенев К.Ф.,
Тетенева А.В.

*ФГБОУ ВО «Сибирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения РФ,
Томск, e-mail: ts.ageeva@mail.ru*

Кривая работы дыхания (КРД) отражает зависимость между увеличением работы дыхания (РД) по преодолению внутрилегочного сопротивления и минутного объема дыхания (МОД) от уровня спонтанного дыхания до максимальной вентиляции легких. При обструктивных нарушениях вентиляции легких работа дыхания увеличивается главным образом за счет преодоления неэластического сопротивления, которое рассматривается как бронхиальное. В связи с этим КРД имеет параболическую форму. При обструктивных нарушениях вентиляции легких КРД должны более круто подниматься, а РД увеличиваться в большей степени, чем у здоровых людей. Степень крутизны КРД оценивали по приросту РД в % к таковой при спонтанном дыхании при увеличении МОД также в %. Степень крутизны КРД у больных, однако, в среднем была такой же, как у здоровых людей. Кроме того, у половины больных ХОБЛ КРД имели либо прямолинейную характеристику, либо имели парадоксальный изгиб. У части больных бронхиальной астмой КРД в дистальном отделе заходили в нормальные пределы, а у 4 больных полностью располагались в пределах нормы. Форму КРД определяют не законы физики в чистом их виде. Высказывается суждение о влиянии на КРД внутрилегочного источника механической энергии и влиянии пока неизвестных свойств легких при жизни в нормальных условиях и при патологии.

Ключевые слова: работа дыхания, кривая работы дыхания, обструктивная теория, свойства кривых работы дыхания.

CHARACTERISTICS OF BREATH PROCESS CURVES THAT CONFLICT WITH OBSTRUCTIVE THEORY OF DISTURBANCE IN VENTILATION FUNCTION OF LUNGS

Tetenev F.F., Ageeva T.S., Bodrova T.N., Karzilov A.I., Mesko P.E., Tetenev K.F.,
Teteneva A.V.

Siberian State Medical University, Tomsk, e-mail: ts.ageeva@mail.ru

Breath process curves (BPC) reflect a dependence of increase in breath work (BR) according to intrapulmonic resistance and minute breath volume (MBV) on level of spontaneous breath up to maximum ventilation of lungs. In case of obstructive disturbance in lungs' ventilation breath process increases mainly due to overriding non-elastic resistance that can be considered as bronchial. In this regard BPC has a certain parabolic form. In case of obstructive disturbance in lungs' ventilation BPC must rise sharply, and BR should increase in greater degree than among health people. Besides, for more than half of patients with HOPD BPC had either linear shape, or paradoxal curve. Among certain patients with bronchial asthma BPC in distal section were located within normal limits, and for 4 patients they were placed within the limits of norm. Form of BPC is defined not by laws of physics in their natural form. There is a concept that suggests influence of intrapulmonic source of mechanical energy and yet unknown characteristics of lungs in terms of normal life and pathology upon BPC.

Keywords: work of breathing curve, work of breathing, bronchial resistance, obstructive theory.

Внедрение методов исследования механики дыхания в практику физиологических и клинических исследований породило оптимизм в отношении возможностей детальной, наиболее точной с позиции физических законов, диагностики внутрилегочных патологических состояний без какой-либо зависимости от внелегочных причин нарушений функции аппарата внешнего дыхания. Одновременная регистрация дыхательных колебаний

транспульмонального давления и объема воздуха, вентилирующего легкие, позволяет с высокой точностью измерить работу дыхательной мускулатуры по преодолению суммарного внутрилегочного сопротивления и его основные компоненты: эластическое и неэластическое сопротивление.

С позиции дондерсовской концепции механизма дыхательных движений легких такое ожидание от методики исследования механики дыхания было вполне понятным. Никто из исследователей механики дыхания не ожидал от механических свойств легких неожиданных парадоксов, что определялось силой дондерсовской парадигмы, рассматривающей легкие как пассивный эластический орган. В пятидесятые годы XX столетия общепринято было легкие рассматривать как пассивный эластический орган, параметры которого изменяются только на вдохе и выдохе в связи с изменением количества воздуха в трахеобронхиальном дереве и в респираторной зоне. Дыхательные трубки (bronхи) представлялись жесткими, а упругость респираторной зоны постоянной. Таким образом, существовала гипотеза, что расход воздуха по трахеобронхиальному дереву создает постоянную (фиксированную) характеристику сопротивления. При увеличении расхода воздуха бронхиальное сопротивление должно нарастать по параболе, и она должна быть постоянной характеристикой легких. Эта гипотеза не получила подтверждения и была оставлена и исследования не проводились. Интерес к исследованию кривых РД исчез. Отчасти это связано с тем, что для практического использования спирографии стали использовать объем форсированного выдоха за 1 сек (ОФВ1), а другой показатель – максимальную вентиляцию легких (МВЛ) использовать перестали.

При этом, однако, исследователи не обратили внимание на явные парадоксальные свойства кривых работы дыхания (КРД), анализ которых ставит под сомнение обструктивную теорию нарушения бронхиальной проходимости при патологии. Сейчас пришло время систематизировать многочисленные парадоксальные явления, которые возникают при исследовании механики дыхания у здоровых людей, при различных формах патологии и в эксперименте на животных. В связи с этим актуальным стал вопрос о природе парадоксов, которые выявляются при исследовании КРД у здоровых людей и больных с обструктивными формами патологии.

Работа дыхания (РД) – наиболее объективный показатель степени повышения суммарного внутрилегочного сопротивления при нарушениях механики дыхания. При обструктивных нарушениях повышается неэластическое сопротивление легких (преимущественно бронхиальное). При рестриктивных изменениях в легких снижается их растяжимость. В покое у здоровых людей РД не превышает 0,5 кгм/мин [1,4]. При увеличении вентиляции РД нарастает в большей степени, чем минутный объем дыхания

(МОД), поэтому зависимость между увеличением МОД и РД имеет форму параболы. Эту зависимость называют КРД. Считается, что при МОД, близком к МВЛ, КРД имеет почти вертикальное положение. Это показывает, что дальнейшее увеличение МОД невозможно в результате резкого повышения работы по преодолению внутрилегочного сопротивления.

Принято считать также, что при патологии в случае повышения РД в покое при увеличении МОД она нарастает в большей степени, чем у здоровых людей. КРД при этом имеют более крутую характеристику [2,3]. Больше, чем в норме, увеличение РД обуславливает снижение МВЛ – одного из показателей вентиляционной функции легких, по которому судят о степени повышения сопротивления, обусловленного главным образом обструктивными нарушениями в легких [4,6].

Цель исследования – сопоставить кривые работы дыхания у здоровых людей и у больных с обструктивными формами патологии легких.

Материал и методы исследования. Проводилось проспективное когортное исследование. Когорта формировалась во время исследования, прослеживалась до его окончания. После подписания информированного согласия в исследование были включены 50 практически здоровых лиц, 40 больных ХОБЛ с эмфиземой легких, 35 больных бронхиальной астмой в фазе ремиссии. Средний возраст здоровых людей составлял $43,3 \pm 3,2$ года, больных – $48,7 \pm 4,2$ года.

Комплекс аппаратуры для исследования механики дыхания состоял из пневмотахографа, дифференциального датчика давления для измерения транспульмонального давления и самописца. Производили одновременно регистрацию спирограммы и транспульмонального давления при спокойном дыхании, при различных степенях произвольной гипервентиляции и при МВЛ. По кривым давления и объема строили дыхательные петли, соответствующие РД при различных МОД до МВЛ, всего 5–10 циклов. По величинам МОД и РД строили КРД.

Статистическая обработка результатов проводилась с использованием пакета прикладных программ STATISTICA 6 for Windows. Проверку на нормальность распределения признака определяли с помощью W-теста Шапиро – Уилка. Анализ включал определение среднего арифметического значения (\bar{X}), ошибки среднего значения (m). Уровень статистической значимости различий в исследовании задавался величиной 0,05.

Все проводимые исследования были одобрены этическим комитетом ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России.

Результаты и обсуждение. У здоровых лиц РД в покое в среднем составляла $0,27 \pm 0,04$ кгм/мин, при МОД, равном $8,30 \pm 0,25$ л/мин. Это соответствовало данным литературы. При определении МВЛ, МОД достигал $98,01 \pm 1,54$ л/мин, а РД при этом

достигала $29,10 \pm 1,42$ кгм/мин. КРД у здоровых людей имели параболическую форму. Степень крутизны их была различной и не зависела от возраста и пола. Был взят предел нормального положения КРД по наиболее высоким величинам РД при различных уровнях гипервентиляции. Таким образом, была получена интегральная кривая, характеризующая верхний предел нормальных величин РД от уровня МОД покоя до МВЛ (рис. 1).

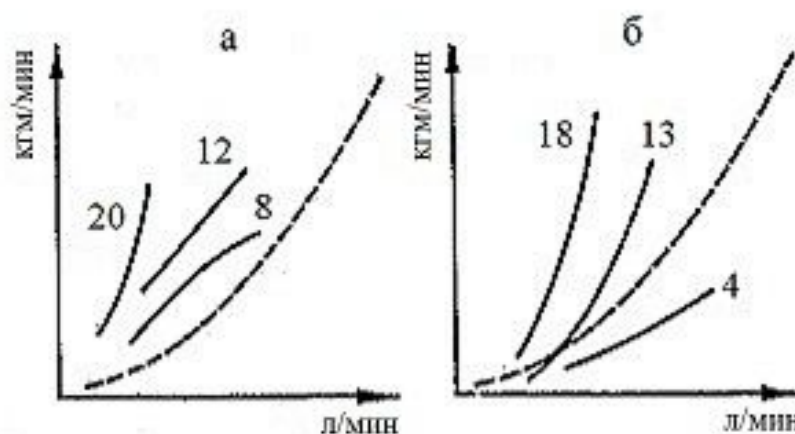


Рис. 1. Схематическое изображение разных форм КРД при эмфиземе легких (а), бронхиальной астме (б). По оси ординат – РД, по оси абсцисс – МОД. Пунктир – предел положения КРД у здоровых лиц. Цифрами обозначено количество пациентов, у которых выявлялся данный тип КРД

У больных ХОБЛ с эмфиземой легких и бронхиальной астмой МОД составлял $9,40 \pm 0,34$ и $10,20 \pm 0,36$ л/мин, соответственно, и был существенно, одинаково повышен по сравнению со здоровыми ($p < 0,01$), а РД в покое составляла соответственно $1,24 \pm 0,053$ и $1,21 \pm 0,163$ кгм/мин и была одинаково и значительно повышена по сравнению со здоровыми людьми ($p < 0,01$). При определении МВЛ у больных эмфиземой легких, МОД достигал $25,0 \pm 1,52$ л/мин, а у больных бронхиальной астмой – $36,7 \pm 2,05$ л/мин. МВЛ у больных бронхиальной астмой была больше, чем у больных эмфиземой легких ($p < 0,01$), а у обеих групп больных МВЛ была значительно снижена по сравнению со здоровыми людьми. РД при этом была существенно и одинаково была снижена по сравнению со здоровыми людьми ($p < 0,001$) – $9,60 \pm 0,98$ и $10,00 \pm 0,11$ кгм/мин. Традиционный анализ результатов исследования не дает повода для размышления, все представляется ясным. Анализ КРД, однако, выявляет некоторые особенности механики дыхания, в том числе и те, которые нужно отнести к парадоксальным по отношению к общепринятому представлению о механике дыхания.

У 18 больных бронхиальной астмой КРД располагались полностью за пределами нормы. Следовательно, у этой группы больных повышение РД в покое было связано с увеличением бронхиального сопротивления наряду с другими сопротивлениями, о которых в настоящем сообщении не идет речь. При гипервентиляции кривые принимают параболическую форму. У 13 больных бронхиальной астмой КРД в начальном отделе располагались в пределах нормы. Следовательно, у этой группы больных в покое не было повышения бронхиального сопротивления. Однако при гипервентиляции оно увеличивалось в большей степени, чем у здоровых людей, и КРД располагалась за пределами нормы. Только у 4 больных КРД полностью располагались в пределах нормы. Стало быть, снижение МВЛ у этих 4 больных не было связано с увеличением бронхиального сопротивления. По форме КРД были параболическими, или приближались к таковым. МВЛ у описанных подгрупп была снижена одинаково ($p < 0,5$).

У всех больных эмфиземой легких РД в покое и при гипервентиляции превышала пределы нормы и КРД полностью располагались за пределами нормы. Обнаружено три разновидности форм КРД: у 20 больных они были параболическими и имели более крутой, чем у здоровых, подъем, у 11 – прямолинейными, и у остальных 8 имели парадоксальный изгиб. В рамках общепринятой теории механики дыхания параболические КРД не вызывают вопросов. Прямолинейные кривые противоречили фундаментальному закону физики о нарастании турбулентности воздушного потока при его ускорении и возникновении параболической зависимости между увеличением скорости воздушного потока и силы, обеспечивающей увеличение воздушного потока. Парадоксальный изгиб КРД указывает на вмешательство какой-то дополнительной силы внутри легких, соучаствующей с работой дыхательной мускулатуры.

Средние величины РД у здоровых людей, полученные КРД в настоящем исследовании, соответствуют данным литературы. У здоровых людей работа дыхания в покое и при гипервентиляции варьирует весьма широко, но при среднем МОД покоя не превышает 0,5 кгм/мин. Эти данные вполне укладываются в общеизвестные положения.

С помощью КРД оказалось возможным дифференцировать, в каких случаях увеличение РД обусловлено повышением бронхиального сопротивления, в каких случаях – повышением МОД или обоих факторов. Если КРД больных находилась в пределах нормы, то увеличение РД было связано с повышением МОД. Если же РД выходила за пределы нормы, это указывало на увеличение бронхиального сопротивления. Возможно влияние обоих факторов: и повышение бронхиального сопротивления и МОД.

Изучение положения КРД в дистальном отделе показало, что увеличение внутрилегочного сопротивления способствует снижению МВЛ у всех больных эмфиземой

легких и только у части больных бронхиальной астмой. Если КРД в дистальных отделах располагались в пределах нормы, это указывало, что уменьшение МВЛ было обусловлено внелегочными причинами (слабость дыхательной мускулатуры, утомление, нарушение регуляции дыхания, сопротивление грудной клетки и др.).

Объяснение формы и положения КРД представляет серьезные затруднения. Параболическую форму КРД объясняют с помощью уравнений Otis и соавт. [10,11] нарастанием турбулентного сопротивления воздушного потока при его ускорении. Согласно такой математической модели, РД при МВЛ должна достигать 132 кгм/мин. Тем не менее, при МВЛ даже у здоровых людей, как показали исследования, она в среднем не достигала 30 кгм/мин, а при патологии была значительно снижена. КРД хотя и были параболическими, но не имели ожидаемой степени крутизны. На основании этих данных можно предположить, что при гипервентиляции внутрилегочное сопротивление увеличивается не по тем законам, которые известны в механике.

Крутизну КРД оценивали по приросту РД в % по отношению к приросту МОД тоже в %. Сравнение выявило парадоксальный факт. Крутизна КРД у больных ХОБЛ и бронхиальной астмой в среднем соответствовала таковой у здоровых людей. Согласно обструктивной теории большая величина РД при спонтанном дыхании должна возрастать в большей степени при увеличении расхода воздуха до МВЛ. Исследование показало, что крутизна КРД была одинакова у больных ХОБЛ с эмфиземой и у больных бронхиальной астмой. Кроме того, крутизна КРД у больных в среднем соответствовала таковой у здоровых людей (рис. 2). Этот факт можно отнести к парадоксальному, объяснение которому в настоящее время дать невозможно.

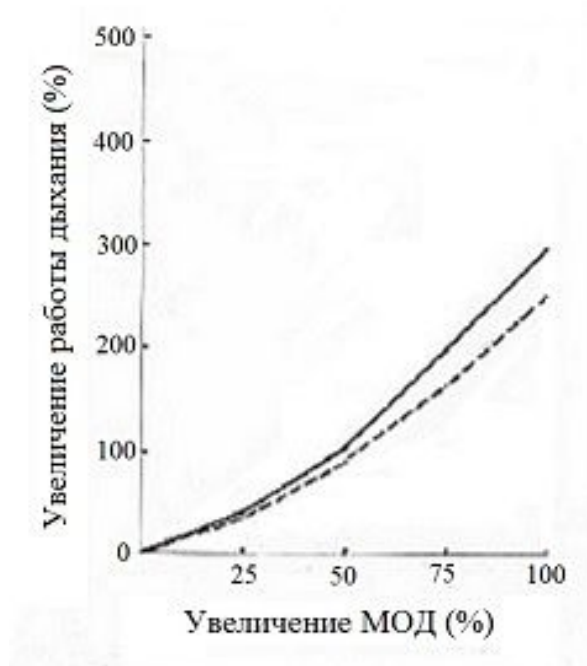


Рис. 2. Характеристика нарастания работы дыхания при произвольной гипервентиляции у здоровых лиц (сплошная линия), больных эмфиземой легких и бронхиальной астмой (пунктир)

Меньшее нарастание сопротивления при гипервентиляции лишь отчасти можно связать с расширением голосовой щели [9]. Более серьезные затруднения при объяснении данного явления возникли, когда была найдена линейная зависимость между увеличением РД и МОД при физической нагрузке [5]. Следовательно, нарастания турбулентности потока в этих условиях нет. Это дало основание высказать предположение, что параболическая форма КРД возникает только при гипервентиляции в результате активного сужения бронхов. При физической нагрузке сужения бронхов нет, либо даже происходит их расширение. Более крутые, чем в норме, КРД при патологии можно объяснить большим, чем в норме, активным сужением бронхов. Определенную роль в этом, вероятно, играют значительно меньшие величины аэродинамического сопротивления легких, исходя из результатов исследования роли асинфазного сопротивления легких в механике дыхания [8]. Все-таки причины меньшего нарастания РД при повышении МОД, по сравнению с расчетными почти на целый порядок, и при параболической форме КРД остаются неясными.

Атипичические же формы КРД (прямолинейные и имеющие парадоксальный изгиб) вообще нельзя объяснить с позиции общепринятых представлений о механике дыхания. Нельзя также объяснить случаи, когда при выраженных диффузных изменениях в легких КРД полностью либо в начальном или конечном отделе располагаются в пределах нормы. Непараболический тип КРД возможен при отсутствии турбулентного сопротивления, что

само по себе невероятно, по крайней мере, на уровне крупных бронхов. В этом случае увеличение РД в покое и при патологии нельзя объяснить увеличением бронхиального сопротивления. Можно предположить, что часть сопротивления преодолевается внутри легких, благодаря их самостоятельной механической активности [6].

Эта гипотеза основана на изучении известного явления – значительного преобладания амплитуды колебания давления в альвеолах над амплитудой внутриплеврального давления и связанного с ним явления деформации плато транспульмонального давления [7]. При ускорении воздушного потока преобладание амплитуды альвеолярного давления над таковой в плевральной полости нарастает, т. е. увеличивается механическая активность легких. Таким образом, все большая часть сопротивления легких преодолевается благодаря функционированию внутрилегочного источника механической энергии.

Остальная часть сопротивления преодолевается дыхательной мускулатурой, но она не так велика, и зависимость между МОД и работой по преодолению этой части сопротивления становится прямолинейной. Она может быть извращенной, если в дистальной части кривой прирост работы дыхательных мышц уменьшится за счет еще более интенсивного функционирования внутрилегочного источника механической энергии.

Выводы

При исследовании работы дыхания учитывается только величина внутрилегочных сопротивлений и не учитываются внелегочные сопротивления. Вероятно, повышение прироста РД в значительной степени ограничивает предполагаемый рост РД при МВЛ. Высказывается суждение о влиянии на КРД внутрилегочного источника механической энергии и влиянии пока неизвестных свойств легких при жизни в нормальных условиях и при патологии. Исследование КРД позволяет получить полезную информацию о состоянии механики дыхания при патологии и для практической медицины. Это возможность определения механизма повышения РД: сопротивления, преимущественно бронхиального и его роли, и роли повышения МОД в патогенезе одышки. Если КРД расположена в пределах нормы, бронхиальное сопротивление нормальное, но при этом повышен МОД, тогда его повышение вызывает увеличение РД и одышку. Если КРД располагается за пределами нормы при нормальной величине МОД, повышение РД происходит только за счет повышения бронхиального сопротивления. Возможно сочетание влияния повышения и МОД и бронхиального сопротивления.

Список литературы

1. Комро Д., Форстер Р., Дюбуа А. и др. Легкие. Клиническая физиология и

функциональные пробы: пер. с англ. – М.: Медицина, 1961.

2. Магазаник Н.А. Клапанный механизм нарушения бронхиальной проходимости // Тер. арх. – 1962. – Т. 34, № 9. – С. 53 – 61.
3. Магазаник Н.А. Дыхательная работа при бронхиальной астме // Тер. арх. – 1964. – № 2. – С. 95–100.
4. Руководство по клинической физиологии дыхания / под ред. Л.Л. Шика, Н.Н. Канаева. – Л.: Медицина, 1980. – 376 с.
5. Тетенев Ф.Ф. Работа дыхания при эмфиземе легких // Тер. арх. – 1968. – № 11. – С. 29 – 35.
6. Тетенев Ф.Ф. Биомеханика дыхания. – Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. – 152 с.
7. Тетенев Ф.Ф. Кривые работы дыхания при различных формах патологии легких // Тер. арх. – 1983. – № 3. – С. 101 – 104.
8. Тетенев Ф.Ф., Бодрова Т.Н. Новое о структуре неэластического сопротивления легких // Сибирский мед. журнал (Иркутск). – 1999. – № 3. – С. 23–27.
9. Bartlett D., Remmers G., Gantier H. Laryngeal regulation of respiratory airflow // *Respirat. Physiol.* – 1973. – V.18, № 2. – P. 194–204.
10. Otis A., Fenn W. Mechanics of Breathing in man // *G. Appl. Physiol.* – 1950. – № 2. – P. 592–607.
11. Otis A. The work of breathing // *Physiol. Rev.* – 1954. – V. 34, № 3. – P. 449–458.