

УДК 612.2

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ МЕЖДУ СИСТЕМАМИ ДЫХАНИЯ И КРОВООБРАЩЕНИЯ

**В.И. Миняев, К.Г. Кичатов, Д.Е. Людоговская, А.В. Миняева,
Г.И. Морозов, Н.О. Орлова, М.Н. Петушков**

Тверской государственной университет

У молодых мужчин в положении стоя синхронно записывали временные, скоростные, объемные параметры дыхания и кровообращения. Корреляционный анализ выявил, что основными параметрами дыхательного цикла, влияющими на гемодинамику, являются глубина, скорость вдоха и их торакальные составляющие. Минутный объем кровообращения от фаз дыхания не зависит. Обсуждаются возможные механизмы.

Ключевые слова: дыхание, кровообращение, функциональные взаимоотношения

Введение. Функции дыхания и кровообращения в составе кардио-респираторной системы взаимосвязаны. Влияние дыхания на сердечную деятельность считается общепринятым фактом. Это влияние проявляется в дыхательной аритмии – в увеличении частоты сердечных сокращений на вдохе и уменьшением на выдохе [15; 16 и др.], в разнонаправленных изменениях систолического объема левого и правого желудочков сердца во время вдоха и выдоха [1], в дыхательных колебаниях давления в правом предсердии и кровотока в полых венах [11]. Одним из условий, обеспечивающих объем кровообращения, адекватный интенсивности метаболизма в организме, является возврат венозной крови к сердцу. Существенная роль в обеспечении венозного возврата к сердцу (до 40%) отводится «присасывающей функции грудной клетки» – отрицательному внутригрудному давлению, а также положительному внутрибрюшному давлению. Однако это устоявшееся мнение в последнее время подвергается сомнению [5; 12].

Литературные сведения о возможных механизмах взаимодействия систем дыхания и кровообращения, о роли центрально-нервных механизмов, о роли биомеханических факторов, связанных с дыханием в этом взаимодействии немногочисленны и нередко противоречивы [4; 10; 14; 15 и др.].

Все это свидетельствует об актуальности проблемы функциональных взаимоотношений систем дыхания и кровообращения для фундаментальной физиологии и клиники.

Целью работы явилось исследование функциональных

взаимосвязей между параметрами дыхания и кровообращения.

Материал и методика. В исследовании в качестве испытуемых приняли участие 10 практически здоровых мужчин 18–25 лет, привычных к экспериментальной обстановке. Во время обследования испытуемые находились в положении стоя. После закрепления датчиков и 3–5-минутной адаптации на протяжении 3 мин. регистрировались параметры дыхания и кровообращения (при предварительном инструктаже внимание испытуемых на дыхании не акцентировалось).

Для регистрации временных, объемных, скоростных параметров дыхания использовался разработанный на кафедре анатомии и физиологии человека и животных Тверского государственного университета оригинальный (защищенный патентом) компьютерный трехканальный безмасочный пневмограф с соответствующим программным обеспечением, позволяющий регистрировать, расшифровывать и анализировать временные, объемные и их производные характеристики дыхания человека, не нарушая его естественного паттерна, а также определять торакальные и абдоминальные составляющие объемных (в мл), скоростных (мл/с) параметров дыхания [7].

Учитывались следующие показатели дыхания:

– частота дыхания (f , цикл/мин); время вдоха (T_I , с); время выдоха (T_E , с); время постэкспираторной паузы (T_P , с);

– дыхательный объем (V_T , мл), его торакальная (ThV_T , мл) и абдоминальная (AbV_T , мл) составляющие;

– минутный объем вентиляции легких (\dot{V} , л/мин), его торакальная ($Th \dot{V}$, л/мин) и абдоминальная ($Ab \dot{V}$, л/мин) составляющие;

– объемная скорость вдоха (\dot{V}_I , мл/с), объемная скорость торакальной ($Th \dot{V}_I$, мл/с) и абдоминальной ($Ab \dot{V}_I$, мл/с) составляющих вдоха;

– объемная скорость выдоха (\dot{V}_E , мл/с), объемная скорость торакальной ($Th \dot{V}_E$, мл/с) и абдоминальной ($Ab \dot{V}_E$, мл/с) составляющих выдоха.

Для регистрации параметров кровообращения использовался поликардиографический комплекс, включающий шестиканальный электрокардиограф, сфигмоприставку, линейный резисторный пневмодатчик. Посредством данного комплекса синхронно записывались электрокардиограмма (в II стандартном отведении),

сфигмограмма сонной артерии, пневмограмма, что позволяло сравнивать параметры кровообращения на фазах вдоха и выдоха.

Учитывались следующие показатели кровообращения:

– частота сердечных сокращений (ЧСС, уд./мин) по интервалу R-R электрокардиограммы;

– давление крови в плечевой артерии – систолическое (СД), диастолическое (ДД), пульсовое (ПД = СД-ДД), среднединамическое (СДД) = $ДД + 0,43ПД$, мм рт. ст.;

– систолический объем крови ($СО = 100 + 0,5ПД - 0,6ДД - 0,6В$), мл/с, где В – возраст;

– минутный объем кровообращения ($МОК = СО * ЧСС$), л/мин;

– периферическое сопротивление ($ПС = СДД * 1333 * 60 / МОК$), $дин * с * см^{-5}$;

– скорость изгнания крови из левого желудочка ($Ve = СО / ПИ$), мл/с.

Расчетные параметры кровообращения определялись по формулам Стара [10].

Достоверность различий параметров оценивалась с использованием критерия Вилкоксона по сравнению парных вариантов, достоверность коэффициентов корреляции по Рокицкому [6].

Результаты и обсуждение. Показатели спонтанного дыхания (объемные, скоростные и временные) и их соотношения были близкими среднестатистическим [9; 13] (табл. 1). Вентиляция легких в этом случае практически в равной степени обеспечивалась торакальным ($r = 0,63$ при $P < 0,05$) и абдоминальным ($r = 0,77$ при $P < 0,01$) вкладами в дыхательный объем. Временная структура дыхательного цикла соответствовала литературным данным для спонтанного дыхания [2; 3; 8]: вдох был несколько короче выдоха, у всех испытуемых отмечалась постэкспираторная пауза. Продолжительность дыхательного цикла корреляционно определялась в большей степени временем выдоха ($r = 0,91$ при $P < 0,01$), чем вдоха ($r = 0,71$ при $P < 0,05$).

При этом отмечалась типичная отрицательная корреляционная взаимосвязь между величинами глубины и частоты дыхания ($r = -0,72$ при $P < 0,05$). Объемная скорость вдоха и выдоха в большей степени зависела от скорости торакальных составляющих вдоха ($r = 0,75$ при $P < 0,05$) и выдоха ($r = 0,64$ при $P < 0,05$).

Изучаемые показатели кровообращения также были близкими среднестатистическим [10] (табл. 2).

Корреляционные связи между систолическим и диастолическим давлением отсутствовали. Пульсовое давление корреляционно определялось в большей степени систолическим ($r = 0,73$ при $P < 0,05$), среднединамическое – в равной степени систолическим ($r = 0,80$ при $P < 0,01$) и диастолическим ($r = 0,81$ при $P < 0,01$) давлением. Диастолическое давление корреляционно зависело от периферического

сопротивления (ПС) ($r=0,76$ при $P<0,05$). Величина систолического объема была тем меньшей, чем больше периферическое сопротивление ($r=-0,91$ при $P<0,01$) и диастолическое давление ($r=-0,84$ при $P<0,01$) и тем большей, чем больше скорость изгнания крови из левого желудочка ($r=0,76$ при $P<0,01$). В свою очередь, скорость изгнания находилась в обратной корреляционной зависимости от периферического сопротивления на фазе вдоха ($r=-0,61$ при $P<0,05$) и на фазе выдоха ($r=-0,90$ при $P<0,01$), и как следствие, – от величины диастолического давления на фазе вдоха ($r=-0,70$ при $P<0,05$) и на фазе выдоха ($r=-0,74$ при $P<0,05$). Величина минутного объема крови корреляционно зависела от систолического объема ($r=0,83$ при $P<0,01$) при отсутствии корреляции с частотой сердечных сокращений.

Таблица 1
 Параметры вентиляции легких при спонтанном дыхании ($M \pm m$)

Параметры	Значения	Параметры	Значения
VTI, мл	574+74	$\overline{\dot{V}}_I$, мл/с	286+42
ThVT, мл	296+47	Th \dot{V}_I , мл/с	147+26
ThVT/VT (%)	51,6+6,3	Ab \dot{V}_I , л/с	138±16
Ab VTI, мл	278+57	$\overline{\dot{V}}_E$, мл/с	279+35
Ab VT/VT (%)	48,4+6,3	Th \dot{V}_E , мл/с	144+21
f, цикл/мин	13,8+1,2	Ab \dot{V}_E , мл/с	135+21
\dot{V} , л/мин	8,0±0,7	TI, с	2,01+0,19
Th \dot{V} , л/мин	4,1+0,6	TE, с	2,06+0,25
Ab \dot{V} , л/мин	3,8+0,6	TE, с	0,27+0,09

Корреляционный анализ выявил статистически достоверные зависимости между параметрами дыхания и кровообращения (табл. 3), что позволяет определить основные параметры дыхательного цикла, влияющие на гемодинамику и более детально судить о функциональных связях между этими системами. Чем глубже и с большей скоростью выполняется вдох, чем больше торакальные составляющие объема и скорости вдоха, тем больше отрицательное внутригрудное давление и присасывающее действие грудной клетки, тем больше систолическое и диастолическое давление в плечевой артерии, тем больше сопротивление току крови из грудной клетки, меньше скорость

изгнания крови, меньше систолический объем.

Таблица 2
Параметры гемодинамики при спонтанном дыхании ($M \pm m$)

Параметры	Значения	Параметры	Значения
Систолическое давление, мм рт.ст.	130,3±4,4	Систолический объем, мл	60,5±5,2
Диастолическое давление, мм рт.ст.	84,0±3,4	ЧСС на вдохе, уд/мин	88,6±4,9
Пульсовое давление, мм рт.ст.	46,3±4,7	ЧСС на выдохе, уд/мин	81,8±5,1*
Среднединамическое давление, мм рт.ст.	103,9±3,1	МОК на вдохе, л/мин	5,4±0,5
ПС, дин*с*см-5 на вдохе	1688±230	МОК на выдохе, л/мин	5,0±0,6
ПС, дин*с*см-5 на выдохе	1839±247	Скорость изгнания на вдохе, мл/с	398±62
Скорость изгнания на выдохе, мл/с	384±55		

Примечание. * – степень достоверности различий параметров на вдохе и на выдохе при $P < 0,05$.

Корреляционные связи между параметрами дыхания и кровообращения на фазе выдоха были менее выраженными (табл. 3). Характерно, что частота сердечных сокращений на вдохе была больше, чем на выдохе, дыхательные колебания минутного объема кровообращения не отмечались (табл. 2).

Таким образом, вопреки существующему мнению о значении присасывающей функции грудной клетки на величину возврата венозной крови непосредственно к сердцу, полученные результаты данного исследования свидетельствуют о том, что при спонтанном, спокойном дыхании ударный объем сердца на фазе вдоха имеет тенденцию к уменьшению (вместо ожидаемого увеличения).

Этому может быть ряд причин. По законам биомеханики при увеличении отрицательного внутригрудного давления конвективный поток венозной крови в грудную клетку, действительно, должен увеличиваться. Однако в этих условиях под действием повышенного отрицательного давления находятся внутригрудные сосуды. В результате значительная часть крови, поступающей в грудную клетку на фазе вдоха, может депонироваться в не обладающих высоким тонусом полых венах и сосудах венозной части малого круга кровообращения, и не поступать в полном объеме в левое предсердие. Заправка левого сердца и систолический объем в данных условиях уменьшаются.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции (r) между параметрами дыхания и кровообращения при спонтанном дыхании
(P<0,05 при r>0,38; P<0,01 при r>0,49)

Параметры	ThV _T	AbV _T	V _T	Ti	Te	Tp	Tt	f	Th \dot{V}	Ab \dot{V}	\dot{V}	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
												Th \dot{V}_I	Ab \dot{V}_I	\dot{V}_I	Th \dot{V}_E	Ab \dot{V}_E	\dot{V}_E
СД		0,44	0,50	0,50	0,77		0,71	-0,70				-0,11	0,42				
ДД	0,52	0,44	0,67			0,49			0,47	0,41	0,72	0,64	0,51	0,83		0,42	0,53
ПД				0,62	0,46	-0,64	0,47	-0,45	-0,47			-0,57		-0,47	-0,41		-0,39
СДД	0,48	0,55	0,73		0,71		0,62	-0,61		0,46	0,55		0,58	0,61	0,10	0,46	
ПС на вдохе	0,63		0,41	-0,50		0,68			0,74		0,65	0,92		0,87	0,56		
ПС на выдохе	0,75		0,63			0,72			0,76		0,76	0,92		0,90	0,61		0,53
Ve выд	-0,59	-0,34	-0,64		-0,41	-0,78	-0,34	0,34	-0,53		-0,68	-0,72		-0,86			-0,46
Ve выд	-0,59	-0,34	-0,64		-0,41	-0,78	-0,34	0,34	-0,53		-0,68	-0,72		-0,86			-0,46
СО	-0,51		-0,49	0,53		-0,75			-0,63		-0,72	-0,84		-0,91	-0,47		-0,48
Чсс на вдохе	-0,42	0,42							-0,41	0,46		-0,43	0,42			0,48	
Чсс на выдохе	-0,76		-0,54		-0,50	-0,43	-0,65	0,64				-0,48			-0,47		
МОК на вдохе	-0,67		-0,41	0,42		-0,75			-0,73		-0,57	-0,91		-0,80	-0,56		
МОК на выдохе	-0,81		-0,67		-0,40	-0,79	-0,40	0,40	-0,74		-0,69	-0,88		-0,82	-0,60		-0,45

Второй механической причиной уменьшения ударного объема является тот факт, что на вдохе сердце также находится под влиянием повышенного отрицательного давления, что может сопровождаться снижением сократимости миокарда. В результате остаточный объем левого желудочка может возрасти, а ударный объем уменьшиться [11]. В этих условиях собственные механизмы регуляции сердечной деятельности в ответ на уменьшение ударного объема компенсаторно увеличивают частоту сердечных сокращений, в результате чего необходимый объем кровообращения сохраняется.

При выдохе внутригрудное давление повышается. По биомеханическим законам возврат венозной крови в грудную клетку затрудняется. В этих условиях под действием внешнего (внутригрудного) давления поступление в левое предсердие крови, депонированной в сосудах легких во время вдоха, усиливается. Заправка левого сердца и ударный объем крови увеличиваются. Увеличению систолического объема может способствовать увеличение сократимости миокарда левого желудочка, поскольку сердце в этих условиях также находится под действием повышенного внешнего (внутригрудного) давления. В результате остаточный объем левого желудочка уменьшается, систолический объем увеличивается [11; 5]. Частота сердечных сокращений несколько уменьшается. Минутный объем кровообращения сохраняется.

Заключение. Таким образом, можно полагать, что дыхательные колебания внутригрудного давления приводят к колебаниям систолического объема. Собственные механизмы регуляции сердечной деятельности в каждый конкретный момент в соответствии с изменениями внутригрудной механики и степени заправки сердца кровью компенсаторно изменяют частоту сердечных сокращений, тем самым обеспечивают относительную независимость минутного объема кровообращения от фаз дыхания.

Список литературы

1. *Баевский Р.М.* Основы практической баллистокардиографии. М.: Медгиз, 1962. 174 с.
2. *Блохин И.П.* Фазовый анализ дыхательного акта // Физиол. журн. СССР. 1980. Т. 65, № 12. С. 1783–1789.
3. *Бреслав И.С.* Паттерны дыхания. Л.: Наука, 1984. 206 с.
4. *Евлахов В.И., Поясов И.З.* Артериальный и венозный кровоток при глубоком дыхании в условиях орто- и антиортостатического воздействий // Рос. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2001. Т. 87, № 1. С. 37–42.
5. *Евлахов В.И., Поясов И.З., Ткаченко Б.И.* Различный характер изменений показателей кардио- и гемодинамики при стимуляции правого и левого блуждающих нервов // Медицинский

- академический журн. СЗО РАМН. 2005. Т. 1, № 1. С. 28–38.
6. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1973. 343 с.
 7. *Миняев В.И., Гречишкин Р.М., Миняева А.В., Мухин И.А., Селянкина Л.А.* Особенности реакций брюшного и грудного компонентов дыхания на прогрессирующую гиперкапнию // Физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 1993. Т. 79, № 12. С. 74–78.
 8. *Миняев В.И., Миняева А.В.* Сравнительный анализ реакций торакального и абдоминального компонентов дыхания на гиперкапнию и мышечную работу // Физиол. журн. им. И.М.Сеченова. 1998. Т. 84, № 4. С. 323–329.
 9. *Миняев В.И., Визирь Я.Г., Давыдов В.Г., Калашикова Р.А., Маркова К.Б., Миняева А.В., Морозов Г.И., Петушков М.Н., Саакян С.А., Чапоров В.Н., Шляпников М.Ф.* Особенности регуляции дыхания и произвольного управления дыхательными движениями при различных функциональных нагрузках // Вопросы экспериментальной и клинической физиологии. Тверь, 2007. С. 139–149.
 10. *Ткаченко Б.И.* Системная гемодинамика // Избранные лекции по современной физиологии. Казань, 2010. С. 134–177.
 11. *Ткаченко Б.И., Евлахов В.И., Поясов И.З.* Артериальный кровоток при глубоком дыхании // Бюл. экспериментальной биологии и медицины. 2000. Т. 129, № 2. С. 129–132.
 12. *Ткаченко Б.И. Евлахов В.И., Поясов И.З.* Характер изменения кровотока в сосудах бассейна нижней поллой вены при увеличении отрицательного внутригрудного давления // Бюл. экспериментальной биологии и медицины. 2000. Т. 129, № 3. С. 248–251.
 13. *Уест Дж.* Основы физиологии дыхания. М.: Мир, 1988. 110 с.
 14. *Хаяутин В.М., Рогоза А.Н.* Регуляция кровеносных сосудов, порождаемая приложенными к ним механическими силами // Физиология кровообращения. Л., 1986. С. 37–66.
 15. *Чапоров В.Н., Тойменцева Ю.И.* Изменение кардиогемодинамики у человека в условиях ступенчатого понижения внутрилегочного давления // Пути оптимизации функций дыхания при нагрузках, в патологии и в экстремальных состояниях. Тверь, 1997. С. 126–131.
 16. *Katona F.G., Poitras J., Barnett O., Torry B.* Cardiac vagal efferent activity and heart period in the carotid sinus reflex // Am. J. Physiol. 1970. Vol. 218, № 14. P. 1030–1037.

**FEATURES OF FUNCTIONAL RELATIONSHIP
BETWEEN THE RESPIRATORY SYSTEM
AND THE CIRCULATORY SYSTEM**

**V.I. Minyaev, K.G. Kichatov, D.E. Lyudogovskaya, A.V. Minyaeva,
G.I. Morozov, N.O. Orlova, M.N. Petushkov**

Tver State University

Timing, speed and volume parameters of respiration and circulation of standing young man were recorded synchronously. Correlation analysis showed that depth, speed of inspiration and its thoracic component are the main parameters of respiratory cycle which influence circulatory dynamics. Minute volume of circulation does not depend on respiratory phases. Possible mechanisms discussed.

Keywords: *respiration, circulation, functional relationship*

Об авторах:

МИНЯЕВ Владимир Иванович—доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

КИЧАТОВ Кирилл Германович—аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

ЛЮДОГОВСКАЯ Дарья Евгеньевна—аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

МИНЯЕВА Арина Владимировна—кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

МОРОЗОВ Глеб Игоревич—кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

ОРЛОВА Надежда Олеговна—аспирант кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru

ПЕТУШКОВ Михаил Николаевич—кандидат биологических наук, доцент кафедры анатомии и физиологии человека и животных, ФГБОУ ВПО «Тверской государственный университет», 170100, Тверь, ул. Желябова, д. 33, e-mail: physiol@tversu.ru