

УДК 612.2; 612.13

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ СИСТЕМ ДЫХАНИЯ И КРОВООБРАЩЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ДЫХАНИЯ С ДОБАВОЧНЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

**В.И. Миняев, Р.А. Калашникова, 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 в условиях дыхания с добавочным инспираторным, либо экспираторным сопротивлением. Увеличенные дыхательные колебания внутригрудного давления сопровождаются колебаниями систолического объема. В соответствии с изменениями систолического объема изменяется частота сердечных сокращений. Тем самым обеспечивается в каждый конкретный момент оптимальный для данных условий минутный объем кровообращения. Основными параметрами дыхательного цикла, влияющими на гемодинамику, являются глубина, скорость вдоха и выдоха, их торакальные и абдоминальные составляющие.

***Ключевые слова:** дыхание, кровообращение, функциональные взаимоотношения, добавочное сопротивление*

Введение. Функциональная взаимосвязь систем дыхания и кровообращения – основной фактор, поддерживающий газовый гомеостаз организма. Функция дыхания – вентиляция легких, обеспечивающая постоянство парциального напряжения кислорода и углекислого газа в альвеолярном воздухе (и артериальной крови). Функция сердечнососудистой системы – постоянный кругооборот крови, обеспечивающий кровоснабжение органов и тканей – с интенсивностью, соответствующей интенсивности метаболизма в каждый конкретный момент [1; 2; 7; 8; 10; 11; 18; 19; 23 и др.].

Величина минутного объема крови определяется внутрисердечными факторами, зависящими от деятельности сердца, и периферическими факторами, обеспечивающими возврат крови к правому и левому сердцу. К внутрисердечным факторам относятся, прежде всего, ударный объем сердца и частота сердечных сокращений. Одним из основных периферических факторов является возврат крови к сердцу. По Б.И. Ткаченко [19], возврат крови к сердцу обеспечивается силами, «действующими сзади» – остаточная энергия сокращения миокарда, гидростатическое давление в сосудистой системе, тонус венозных сосудов, функционирование венозных клапанов, сокращение скелетных мышц. К «силам, действующим спереди», относятся

присасывающая функция грудной клетки, присасывающая функция сердца, взаимоотношения встречных потоков по полым венам.

На биомеханических факторах, способствующих (или препятствующих) возврату крови к сердцу, могут сказываться дыхательные колебания внутригрудного (и внутрибрюшного) давления. Так, считается, что отрицательное внутригрудное давление («присасывающая функция грудной клетки») обеспечивает до 40% венозного возврата к сердцу.

Однако 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 достаточно противоречивы [10; 19; 22; 23; см. обзоры: 17; 8].

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

В связи с этим целью данного исследования явилось изучение влияния дыхательных колебаний внутригрудного давления на объемно-временные характеристики сердечного цикла в условиях искусственного уменьшения внутригрудного давления на вдохе (при дыхании с добавочным инспираторным сопротивлением) и в условиях искусственного увеличения внутригрудного давления на выдохе (при дыхании с добавочным экспираторным сопротивлением).

Методика. В исследовании в качестве испытуемых приняли участие 10 практически здоровых мужчин 18-25 лет, привычных к экспериментальной обстановке.

С целью увеличения размаха дыхательных колебаний внутригрудного (внутриротового) давления использовался следующий методический подход. Добавочное сопротивление потоку воздуха на вдохе и на выдохе создавалось посредством приспособления с системой клапанов и диафрагмой, позволяющей изменять диаметр дыхательного отверстия. Проведено 2 серии исследования.

После регистрации исходных объемно-временных параметров вентиляции легких и параметров кровообращения в первой серии исследования испытуемых переключали на дыхание через диафрагму с отверстием диаметром 3 мм, что создавало добавочное сопротивление потоку воздуха на вдохе (от 90 до 100 мм вод. ст.). Выдох при этом осуществлялся через систему клапанов и был ненагруженным.

Во второй серии испытуемые выдыхали через диафрагму того же диаметра, что создавало добавочное экспираторное сопротивление (от 60 до 80 мм вод. ст.). Вдох был ненагруженным.

Порядок серий для каждого испытуемого был рандомизированным.

Изучаемые параметры регистрировались в исходном состоянии, на протяжении трех минут дыхания с добавочным сопротивлением.

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. Пневмограф позволяет 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) и скоростных параметров дыхательного цикла [9; 14; 16].

Учитывались показатели дыхания: частота дыхания (f , цикл/мин); время вдоха (T_I , с); время выдоха (T_E , с); время постэкспираторной паузы (T_P , с); 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; объем вдоха (V_{TI} , мл), его торакальная ($Th V_{TI}$, мл) и абдоминальная ($Ab V_{TI}$, 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.

Для регистрации параметров кровообращения использовался поликардиографический комплекс, включающий шестиканальный электрокардиограф, сфигмоприставку, линейный резисторный пневмодатчик. Посредством данного комплекса синхронно записывались электрокардиограмма (в II 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), мм рт. ст.
- пульсовое давление (ПД = СД-ДД) мм рт. ст.
- срединамическое давление (СДД) = $ДД + 0,43ПД$, мм рт. ст.;
- систолический объем крови ($CO = 100 + 0,5ПД - 0,6ДД - 0,6В$), мл/с, где В – возраст;
- минутный объем кровообращения (МОК = $CO * ЧСС$), л/мин;

– периферическое сопротивление ($PS = CDD * 1333 * 60 / MOK$), $дин * с * см^{-5}$;

– время систолы, время диастолы левого желудочка, с; период изгнания (ПИ) по кардиоинтервалам электрокардиограммы;

– скорость изгнания ($Ve = CO / ПИ$), мл/с.

Расчетные параметры кровообращения определялись по формулам Стара.

Был проведен анализ динамики параметров дыхания и кровообращения и корреляционных связей между ними при спонтанном дыхании и при дыхании с добавочным сопротивлением.

Достоверность различий параметров оценивалась с использованием критерия Вилкоксона по сравнению парных вариантов, достоверность коэффициентов корреляции по Рокицкому [12].

Результаты и обсуждение. К основным параметрам дыхания, от которых зависят дыхательные колебания внутригрудного давления следует отнести объем и скорость вдоха и выдоха.

Объем вдоха определяет размах колебаний внутригрудного давления, от чего зависит присасывающее действие грудной клетки. Немаловажное значение имеет и соотношение торакального (грудного) и абдоминального (диафрагмального) вкладов в объем вдоха, поскольку от этого соотношения зависит разница между внутригрудным и внутрибрюшным давлением, а, следовательно, и скорость возврата крови в грудную клетку.

Объемная скорость воздушного респираторного потока определяет интенсивность уменьшения внутригрудного давления на вдохе и увеличения – на выдохе, что может сказываться на состоянии внутригрудных сосудов, прежде всего полых вен, сосудов легких, не обладающих высоким тонусом [6], а следовательно и на скорости конвективного потока венозной крови в грудную клетку.

Анализ результатов проведенного исследования показал следующее (табл. 1–4).

Исходно объемные, скоростные и временные показатели спонтанного дыхания и их соотношения были близкими среднестатистическим [13; 21]. 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 [4; 5; 14]. Вдох 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 исходно также были близкими среднестатистическим [19].

Корреляционные связи между систолическим и диастолическим давлением отсутствовали. Пульсовое давление корреляционно зависело от систолического ($r=0,73$ при $P<0,05$), среднединамическое – в равной степени от систолического ($r=0,80$ при $P<0,01$) и диастолического ($r=0,81$ при $P<0,01$) давления. Диастолическое давление корреляционно зависело от периферического сопротивления (ПС) ($r=0,76$ при $P<0,05$). Величина систолического объема была тем меньше, 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 $P<0,05$). Продолжительность сердечного цикла на вдохе корреляционно определялась в большей степени временем диастолы ($r=0,93$ при $P<0,01$), чем систолы ($r=0,57$ при $P>0,05$). Продолжительность сердечного цикла на выдохе корреляционно определялась в большей степени временем систолы ($r=0,90$ при $P<0,01$), чем диастолы ($r=0,74$ 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.

Проведенный корреляционный анализ между параметрами дыхания и кровообращения в исходном состоянии подтверждает наличие функциональных связей между этими системами при свободном дыхании (табл. 3-4). Чем глубже и с большей скоростью выполняется вдох, 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. При этом вследствие компенсаторного увеличения частоты сердечных сокращений минутный объем кровообращения не меняется.

Сразу после переключения испытуемых на дыхание с добавочным **инспираторным** сопротивлением (при ненагруженном выдохе) увеличение объема вдоха и его торакальной и абдоминальной составляющих сопровождается существенным увеличением отрицательного внутригрудного давления (присасывающего действия

грудной клетки) и, как следствие – увеличением давления в плечевой артерии, особенно диастолического, увеличением сопротивления току крови из грудной клетки, уменьшением скорости изгнания крови из левого желудочка, уменьшением систолического объема, которое компенсируется увеличением частоты сердечных сокращений.

В результате минутный объем кровообращения и в этих условиях сохраняется. При этом отмеченные при свободном дыхании корреляционные связи между параметрами дыхания и кровообращения нарушаются. Одной из вероятных причин этого нарушения является, по-видимому, разнонаправленность динамики объема вдоха и его скорости. В процессе дыхания с добавочным **инспираторным** сопротивлением (на второй минуте функциональной пробы) отмечено дальнейшее увеличение объема вдоха за счет торакальной его составляющей при уменьшении абдоминальной. Вдох выполняется с большей скоростью. Отрицательное внутригрудное давление, а, следовательно, и присасывающее действие грудной клетки несколько повышается. Систолическое давление в плечевой артерии не меняется, диастолическое несколько снижается, пульсовое увеличивается. Сопротивление току крови из грудной клетки становится меньше, в результате скорость изгнания крови из левого желудочка и систолический объем увеличиваются. Частота сердечных сокращений компенсаторно снижается, исходный минутный объем кровообращения сохраняется. При этом отмеченные в исходном состоянии корреляционные связи между параметрами дыхания и кровообращения восстанавливаются.

Сразу после переключения испытуемых на дыхание с добавочным **экспираторным** сопротивлением (при ненагруженном выдохе) объем выдоха и его торакальная и абдоминальная составляющие увеличиваются при снижении скорости выдоха за счет торакальной и абдоминальной составляющих выдоха. Внутригрудное давление существенно повышается. Систолическое давление в плечевой артерии увеличивается, диастолическое не меняется, в результате пульсовое давление увеличивается. Сопротивление току крови от сердца имеет тенденцию к уменьшению. Скорость изгнания крови из левого желудочка и систолический объем увеличиваются. Частота сердечных сокращений не меняется. В результате существенно увеличивается минутный объем кровообращения. При этом большинство отмеченных при свободном дыхании корреляционных связей между параметрами дыхания и кровообращения нарушается. И в этом случае вероятной причиной нарушения корреляционных связей между параметрами кровообращения и дыхания является разнонаправленность динамики объема выдоха и его скорости.

Таблица 1

Сравнительная характеристика динамики параметров вентиляции легких в условиях дыхания с добавочным инспираторным (1) и экспираторным (2) сопротивлением ($M \pm m$)

Параметры	Спонтанное дыхание	Дыхание с добавочным сопротивлением							
		1-я минута		2-я минута		3-я минута			
			P<		P<		P<		
\dot{V}_I , мл/с	1	286+42		197+14	0,01	222+20	0,05	226+16	0,05
	2	303+22		357+39**		375+74*		382+113*	
Th \dot{V}_I , мл/с	1	147+26		101+23		128+30		129+22	
	2	165+29		187+46*		189+45		197+51	
Ab \dot{V}_I , л/с	1	138±16		96+15	0,01	94+18	0,01	96+22	0,05
	2	139+27		170+20**		186+34*		185+66*	
\dot{V}_E , мл/с	1	279+35		309+31		300+25		303+24	
	2	296+30		237+8*	0,05	234+13*	0,05	219+11*	0,01
Th \dot{V}_E , мл/с	1	144+21		159+31		173+29		174+34	
	2	161+28		125+19		118+16*	0,05	113+17*	0,05
Ab \dot{V}_E , мл/с	1	135+21		150+27		128+33		129+35	
	2	136+24		113+18		116+23		106+20	
T _I , с	1	2,01+0,19		3,80+0,56	0,01	3,53+0,46	0,01	3,10+0,32	0,01
	2	2,17+0,19		2,22+0,17		2,09+0,19*		2,21+0,36*	
T _E , с	1	2,06+0,25		2,42+0,31		2,61+0,47		2,31+0,31	
	2	2,22+0,28		3,34+0,58*	0,01	3,35+0,58	0,01	3,86+0,85	0,01
T _P , с	1	0,27+0,09		0,18+0,02		0,25+0,04		0,24+0,06	
	2	0,33+0,05		0,25+0,06		0,31+0,08		0,28+0,11	
f, цикл/мин	1	13,8+1,2		9,4+1,3	0,01	9,4+1,4	0,01	10,6+1,5	0,05
	2	12,7+1,1		10,3+1,4	0,05	10,4+1,4	0,05	9,4+1,8	0,05
V _T , мл	1	574+74		748+134		784+130		700+98	
	2	658+71		793+123		784+140		844+142	
Th V _T , мл	1	296+47		384+78		451+115		401+92	
	2	357+77		416+125		396+121		435+160	
Th V _T /V _T (%)	1	51,6+6,3		51,3+8,4		57,5+8,9		57,0+9,7	
	2	54,3+8,1		52,5+7,7		50,5+8,1		51,5+5,3	
Ab V _T , мл	1	278+57		364+96		333+96		299+86	
	2	301+62		377+50		388+82		409+84	
Ab V _T /V _T (%)	1	48,4+6,3		48,7+8,4		42,5+8,9		42,7+9,7	
	2	45,7+8,1		47,5+7,7		49,5+8,1		48,5+5,3	
f, цикл/мин	1	13,8+1,2		9,4+1,3	0,01	9,4+1,4	0,01	10,6+1,5	0,05
	2	12,7+1,1		10,3+1,4	0,05	10,4+1,4	0,05	9,4+1,8	0,05
\dot{V} , л/мин	1	8,0±0,7		7,0±0,4		7,3+0,4		7,4+0,5	
	2	8,4±0,6		8,1+0,3*		8,1+0,7		8,1+0,9	
Th \dot{V} , л/мин	1	4,1+0,6		3,6+0,6		4,2+0,8		4,2+0,7	
	2	4,5+0,7		4,2+0,7		4,1+0,7		4,1+0,6	
Ab \dot{V} , л/мин	1	3,8+0,6		3,4+0,5		3,1+0,6		3,1+0,7	
	2	3,8+0,7		3,8+0,5		4,0+0,7		3,8+0,7	

Примечание. P< – достоверность различий относительно исходных данных.

Таблица 2

Сравнительная характеристика динамики параметров кровообращения
в условиях дыхания с добавочным инспираторным (1)
и экспираторным (2) сопротивлением ($M \pm m$)

Параметры		Спонтанное дыхание	Дыхание с добавочным сопротивлением					
			1-я минута		2-я минута		3-я минута	
				P<		P<		P<
Систолическое давление, мм рт.ст.	1	130,3±4,4	142,1±7,5	0,05	139,8±5,0		141,6±6,1	
	2	133,4±3,3	141,6±4,0		140,1±4,2		134,9±3,0	
Диастолическое давление, мм рт.ст.	1	84,0±3,4	96,5±8,9	0,05	90,8±3,8		98,6±8,6	
	2	87,0±3,1	87,8±3,3		90,0±4,4		89,1±4,1	
Пульсовое давление, мм рт. ст.	1	46,3±4,7	45,6±4,7		49±4,4		43,0±7,0	
	2	46,4±3,7	53,9±3,9*		50,1±4,6		45,8±3,1	
Среднединамическое давление, мм рт. ст.	1	103,9±3,1	116,1±8,0		111,8±3,8		117,1±6,8	
	2	106,9±2,6	110,9±3,1		111,6±3,7		108,8±3,3	
Систолический объем, мл	1	60,5±5,2	52,7±7,8	0,01	57,8±5,2	-	50,1±8,1	-
	2	58,8±4,8	62,1±5,0*		58,5±5,5		57,2±4,7	
ЧСС, уд/мин на вдохе	1	88,6±4,9	101,8±13,9	0,05	93,2±6,2	0,05	92,4±4,1	-
	2	82,0±3,5	89,1±7,2*		87,2±4,7		90,3±5,9	
ЧСС, уд/мин на выдохе	1	81,8±5,1	83,3±5,3	-	86,6±6,0	-	83,8±4,4	-
	2	78,0±5,6	80,0±6,9		85,1±5,9		86,4±6,4	
МОК мл\мин, на вдохе	1	5,4±0,5	5,5±0,2	-	5,4±0,6	-	4,5±0,6	0,05-
	2	4,8±0,5	5,5±0,7		5,1±0,4		5,1±0,4	
МОК мл\мин на выдохе	1	4,9±0,6	4,5±0,8	-	5,1±0,7	-	4,1±0,6	-
	2	4,5±0,5	5,0±0,7		5,0±0,5		4,9±0,4	
Скорость изгнания, мл на вдохе	1	398±62	320±63	0,05	337±67	-	290±38	0,05-
	2	329±34	348±49		324±42		339±41,9	
Скорость изгнания, мл на выдохе	1	384±55	337±60	0,05	344±47	0,05	252±33	-
	2	339±51	368±51		341±51		328±34	

Примечание. P< – достоверность различий относительно исходных данных.

На третьей минуте функциональной пробы при дыхании с **инспираторным** сопротивлением объем вдоха, его торакальная и абдоминальная составляющие уменьшаются, скорость нагруженного вдоха увеличивается. Отрицательное внутригрудное давление растет. При этом систолическое давление снижается, диастолическое увеличивается, как следствие, пульсовое давление уменьшается. Сопротивление току крови из грудной клетки становится больше, скорость изгнания крови из левого желудочка снижается, уменьшается и систолический объем. Частота сердечных сокращений не меняется. В результате отмечается тенденция к уменьшению минутного объема кровообращения. В этих условиях сохраняются лишь корреляционные связи между параметрами кровообращения и торакальными составляющими объема вдоха и скоростью торакальной составляющей вдоха.

Таблица 3

Значения коэффициентов корреляции (r) между параметрами дыхания и кровообращения в процессе дыхания с инспираторным сопротивлением (P<0,05 при r=0,39; P<0,01 при r=0,50)

Исходное состояние										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС вдох	-0,42	0,42			-0,43	0,42			0,48	
СД		0,44	0,50	-0,70		0,42				
ДД	0,52	0,44	0,67		0,64	0,51	0,83		0,42	0,53
ПД				-0,45	-0,57		-0,47	-0,41		-0,39
СО	-0,51		-0,49		-0,84		-0,91	-0,47		-0,48
МОК вдох	-0,67		-0,41		-0,91		-0,80	-0,56		
ПС вдох	0,63		0,41		0,92		0,87	0,56		0,39
Ve вдох	-0,47	-0,48	-0,67	0,46	-0,45	-0,52	-0,70		-0,55	-0,53
1 минута дыхания с инспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС вдох		0,41					-0,41	-0,48		
СД										
ДД						0,58		-0,46		
ПД		-0,54			0,63	-0,63				
СО		-0,46		0,46		-0,71				
МОК вдох						-0,44	-0,50			
ПС вдох						0,57		-0,46		
Ve вдох		-0,42	-0,36	0,45		-0,74	-0,44		-0,43	
2 минута дыхания с инспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС вдох										
СД										
ДД		0,48	0,50	0,79	-0,80			0,41		
ПД			-0,44						0,47	
СО		-0,51	-0,49	-0,81	0,84			-0,49		
МОК вдох		-0,47		-0,68	0,76			-0,53		
ПС вдох		0,59		0,73	-0,77	0,43		0,52		
Ve вдох	-0,51		-0,68	0,79	-0,42		-0,72			
3 минута дыхания с инспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС вдох				0,40						
СД								0,39		
ДД	0,47				0,58			0,66		
ПД	-0,49				-0,44			-0,47		
СО	-0,71		-0,41		-0,63			-0,65	0,41	
МОК вдох	-0,78		-0,49		-0,61			-0,63		
ПС вдох	0,75	-0,47			0,81			0,78	-0,48	
Ve вдох	0,71	-0,77	0,51			-0,89	0,43		-0,81	0,56

Таблица 4

Значения коэффициентов корреляции (r) между параметрами дыхания и кровообращения в процессе дыхания с экспираторным сопротивлением (P<0,05 при r=0,39; P<0,01 при r=0,50)

Исходное состояние										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС выд	-0,76		-0,54	0,71	-0,48			-0,47		
СД		0,44	0,50	-0,70		0,42				
ДД	0,52	0,44	0,67		0,64	0,51	0,83		0,42	0,53
ПД				-0,45	-0,57		-0,47	-0,41		-0,39
СО	-0,51		-0,49		-0,84		-0,91	-0,47		-0,48
МОК выд	-0,81		-0,67	0,50	-0,88		-0,82	-0,60		-0,45
ПС выд	0,75		0,63		0,92		0,90	0,61		0,53
Ve выд	-0,59	-0,34	-0,64	0,44	-0,72	-0,37	-0,86		-0,35	-0,46
1 минута дыханитя с экспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС (выд)										
СД				-0,48						
ДД	0,54		0,65	-0,74	0,48		0,63		-0,42	
ПД						-0,48	-0,44			0,75
СО	-0,61		-0,61	0,60	-0,61		-0,67		0,60	0,51
МОК выд										
ПС выд			0,39	-0,47						
Ve выдох				0,29						0,41
2 минута дыханитя с экспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС (выд)										
СД	0,63	0,42	0,65	-0,84	0,48			0,64		
ДД	0,74	0,49	0,76	-0,75	0,67	0,41	0,68	0,70		0,48
ПД						-0,47	-0,42			
СО	-0,76	-0,47	-0,76	0,48	-0,76	-0,63	-0,85	-0,73		-0,60
МОК выд	-0,66		-0,46		-0,80		-0,57	-0,67		
ПС выд	0,83		0,74	-0,42	0,89	0,49	0,82	0,85		0,50
Ve выдох		-0,45				-0,54			-0,58	-0,39
3 минута дыханитя с экспираторным сопротивлением										
Параметры	ThVti	AbVti	Vti	f	Скорость вдоха			Скорость выдоха		
					Th	Ab	Vti	Th	Ab	Vte
ЧСС (выд)	0,40			-0,43				0,46		
СД		0,59		-0,57		0,57	0,40			0,54
ДД	0,45	0,83	0,69	-0,62	0,55	0,85	0,80			0,77
ПД	-0,53	-0,50	-0,59		-0,68	-0,55	-0,65			-0,48
СО	-0,67	-0,90	-0,86	0,62	-0,80	-0,88	-0,96			-0,64
МОК выд		-0,59	-0,47		-0,42	-0,63	-0,67			
ПС выд		0,72	0,52		0,44	0,85	0,83			0,42
Ve выдох	-0,40	-0,57	-0,53		-0,45	-0,41	-0,48			-0,27

В процессе дыхания с добавочным **эксираторным** сопротивлением (на второй минуте функциональной пробы) объем выдоха не меняется. При этом торакальная составляющая имеет тенденцию к уменьшению, абдоминальная – к увеличению. Выдох выполняется с несколько большей скоростью за счет скорости абдоминальной составляющей выдоха. Внутригрудное давление несколько повышается. Систолическое и диастолическое давление в плечевой артерии не меняется. Сопротивление току крови из грудной клетки становится больше, в результате скорость изгнания крови из левого желудочка и систолический объем уменьшаются. Частота пульса компенсаторно увеличивается, минутный объем кровообращения сохраняется. При этом отмеченные в исходном состоянии корреляционные связи между параметрами дыхания и кровообращения восстанавливаются.

На третьей минуте функциональной пробы при дыхании с **эксираторным** сопротивлением объем выдоха, его торакальная и абдоминальная составляющие увеличиваются, скорость нагруженного выдоха несколько уменьшается. Внутригрудное давление растет. При этом систолическое давление снижается, диастолическое не меняется, как следствие, пульсовое давление уменьшается. Сопротивление току крови из грудной клетки, скорость изгнания и систолический объем и частота сердечных сокращений на фазе нагруженного выдоха не меняются. Минутный объем кровообращения сохраняется. Большинство исходных корреляционных связей между параметрами дыхания и кровообращения также сохраняется.

Таким образом, полученные результаты данного исследования свидетельствуют о том, что при дыхании с добавочным инспираторным сопротивлением, т.е. при искусственном увеличении отрицательного внутригрудного давления ударный объем сердца на фазе вдоха уменьшается. 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 [3; 6]. 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 в данных условиях и систолический объем уменьшается.

Второй механической причиной уменьшения ударного объема является тот факт, что сердце также находится под влиянием повышенного отрицательного давления, что может сопровождаться снижением сократимости миокарда. Кроме того, левому желудочку в

этих условиях приходится выталкивать кровь против положительного артериального давления во внегрудных артериях. В результате остаточный объем левого желудочка может возрасти, а ударный объем уменьшается [20].

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. Продолжительное дыхание с сопротивлением на вдохе, сопровождающееся уменьшением объема вдоха и увеличением его скорости, влечет за собой уменьшение систолического объема, частоты сердечных сокращений и, как следствие, – уменьшение минутного объема кровообращения, до уровня меньше исходного.

При дыхании с экспираторным сопротивлением при ненагруженном вдохе внутригрудное давление на выдохе повышается. По биомеханическим законам возврат венозной крови в грудную клетку затрудняется. В этих условиях кровь, поступившая в грудную клетку на фазе ненагруженного вдоха и депонированная в сосудах легких, под действием внешнего давления выдавливается из них в левое предсердие. Заправка левого сердца и ударный объем крови увеличивается. Увеличению систолического объема может способствовать увеличение сократимости миокарда левого желудочка, поскольку сердце в этих условиях также находится под действием повышенного внешнего давления. В результате остаточный объем левого желудочка уменьшается, систолический выброс увеличивается [20]. Частота сердечных сокращений не изменяется. Минутный объем крови имеет тенденцию к увеличению. В процессе дыхания с экспираторным сопротивлением незначительное уменьшение систолического объема компенсируется увеличением частоты пульса. В результате минутный объем кровообращения остается большим исходного

Таким образом, можно полагать, что существенные дыхательные колебания внутригрудного давления (при увеличенном инспираторном и экспираторном сопротивлении) приводят к колебаниям ударного объема сердца. Собственные механизмы регуляции сердечной деятельности в каждый конкретный момент в соответствии с изменениями внутригрудной механики и степени заправки сердца кровью изменяют частоту сердечных сокращений, тем самым обеспечивая оптимальный для данных условий минутный объем кровообращения.

Список литературы

1. *Александрова Н.П.* Координация дыхательных мышц в реализации компенсаторных реакций дыхательной системы // Вопросы экспериментальной и клинической физиологии дыхания. Тверь, 2007. С. 3–15.
2. *Баевский Р.М.* Основы практической баллистокардиографии. М.: Медгиз, 1962. 174 с.
3. *Баранов В.М.* Газоэнергообмен и внешнее дыхание человека в космических полетах и модельных исследованиях // Серия Проблемы космической биологии. Т. 75. М.: Наука, 1993. 126 с.
4. *Блохин И.П.* Фазовый анализ дыхательного акта // Физиол. журн. СССР. 1980. Т. 65, № 12. С. 1783–1789.
5. *Бреслав И.С.* Паттерны дыхания. Л.: Наука, 1984. 206 с.
6. *Дворецкий Д.П.* Вентиляция, кровообращение и газообмен в легких // Физиология дыхания. Основы современной физиологии. СПб.: Наука, 1994. С. 197–257.
7. *Донина Ж.А., Лаврова И.Н., Тихонов М.А., Котов А.Н., Колесников В.И., Баранов В.М.* Влияние изменений внутригрудного и центрального венозного давлений на динамику наполнения сердца // Бюл. эксперим. биологии и медицины. 2003. Т. 136, № 12. С. 612–615.
8. *Донина Ж.А.* Межсистемные взаимоотношения дыхания и кровообращения // Физиология человека. 2011. Т. 37, № 2. С. 1–12.
9. *Дьяченко А.И., Миняев В.И., Миняева А.В.* Методы исследования торакального и абдоминального компонентов системы дыхания в вентиляции легких // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2007. Вып. 6, № 22 (50). С. 15–21.
10. *Евлахов В.И., Поясов И.З.* Артериальный и венозный кровоток при глубоком дыхании в условиях орто- и антиортостатического воздействий // Росс. физиол. журн. им. И.М. Сеченова. 2001. Т.87, № 1. С. 37–42.
11. *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.
12. *Лакин Г.Ф.* Биометрия. М.: Высшая школа, 1973. 319 с.
13. *Миняев В.И., Миняева А.В.* Зависимость соотношения и степени использования торакального и абдоминального дыхательных резервов от положения // Физиология человека. 1998. Т. 24? № 5. С. 11–15.
14. *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.
15. *Миняев В.И., Кичатов К.Г., Людоговская Д.Е., Миняева А.В.,*

- Морозов Г.И., Орлова Н.О., Петушков М.Н.* Особенности функциональных взаимоотношений между системами дыхания и кровообращения // Вест. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2012. Вып. 25, № 3. С. 19–27.
16. *Миняев В.И., Миняева А.В., Морозов Г.И., Маркова К.Б., Петушков М.Н., Золотухина Я.Г., Дуля Е.А., Некрасова С.Б., Орехова А.В., Фокина Е.В.* Роль торакального и абдоминального компонентов дыхательного аппарата в компенсаторной реакции и адаптации дыхания к добавочному сопротивлению // Вестн. Твер. гос. ун-та. Сер. Биология и экология. 2010. № 16. С. 16–25.
17. *Покровский В.М.* Формирование ритма сердца в организме человека и животных. Краснодар: Кубань-Книга, 2007. 144 с.
18. *Ткаченко Б.И., Евлахов В.И., Поясов И.З.* Характер изменения кровотока в сосудах бассейна нижней полой вены при увеличении отрицательного внутригрудного давления // Бюлл. exper. биол. и мед. 2000. Т. 129, № 3. С. 248–251.
19. *Ткаченко Б.И.* Системная гемодинамика // Избранные лекции по современной физиологии / под ред. М.А.Островского, А.Л.Зефирова. Казань, 2010. С. 134–177.
20. *Ткаченко Б.И., Евлахов В.И., Поясов И.З.* Артериальный кровоток при глубоком дыхании // Бюлл. exper. биол. и мед. 2000. Т. 129, № 2. С. 129–132.
21. *Уест Дж.* Основы физиологии дыхания. М.: Мир, 1988. 200 с.
22. *Хаятин В.М., Рогоза А.Н.* Регуляция кровеносных сосудов, порождаемая приложенными к ним механическими силами // Физиология кровообращения. Л.: Наука, 1986. С. 37–66.
23. *Чаноров 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.
24. *Aleksandrova N.P., Isaev G.G., Goloubeva E.V.* Mechanisms of genioglossus responses to inspiratory resistive load in rabbits // Acta Physiol. Scand. 2002. Vol. 175, № 3. P. 253–260.

**FEATURES OF FUNCTIONAL RELATIONSHIP
BETWEEN THE RESPIRATORY SYSTEM
AND THE CIRCULATORY SYSTEM IN RESPIRATION
WITH ADDITIONAL RESISTANCE**

**V.I. Minyaev, R.A. Kalashnikova, 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 in respiratory with inspiration or expiratory additional resistance synchronously. Increased respiratory variations in intrathoracic pressure are accompanied by fluctuations of systolic volume. The heart rate changes in accordance with the changes of systolic volume. Thus, the optimal for these conditions cardiac output is provided at any given moment. The main parameters of the respiratory cycle, affecting hemodynamics, are the depth, speed of inhalation and exhalation of thoracic and abdominal components.

Keywords: *respiration, circulation, functional relationship, additional resistance.*

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

КАЛАШНИКОВА Римма Алексеевна—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

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