



С. С. СУВОРОВА, В. А. ЕПИФАНОВ

**ЕМКОСТНЫЕ И РЕЗИСТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ
СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ СПОРТСМЕНОВ
И ИХ ДИНАМИКА ПРИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ СПОРТИВНОЙ ТРЕНИРОВКЕ**

*Вопросы курортологии, физиотерапии и лечебной физической культуры,
2001; № 1, с. 12-15.*

Оценка эффективности системы транспорта кислорода является одной из основных задач физиологии спорта и спортивной медицины. Оптимальность функционирования сердечно-сосудистой системы является ведущим звеном механизма обеспечения работающих мышц кислородом. Поэтому чрезвычайно важной задачей является комплексная оценка взаимовлияния насосной функции сердца и различных компонентов, составляющих постнагрузку. Необходимость использования комплекса статических характеристик желудочка, отражающих влияние предварительной нагрузки, рабочей нагрузки и сократимости указывалась физиологами, в частности, К. Каро и соавт., еще в середине 80-х годов [1]. Однако в клинической практике до сих пор подобные модели не разработаны. В настоящее время применяются отдельные показатели, характеризующие либо насосную функцию сердца (ударный объем, фракция выброса и т. п.), либо величину постнагрузки (артериальная податливость, характеристический импеданс, периферическое сопротивление).

Целью данной работы было создание модели кровообращения, отражающей взаимовлияние емкостных и резистивных показателей гемодинамики и ее применение в широкой клинической практике для оценки состояния функционального состояния спортсменов, а также динамического наблюдения за формированием долговременной адаптации к физическим нагрузкам высокой интенсивности. Применяемые показатели вычисляются по величинам, определяемым наиболее часто применяемыми в функциональной диагностике методами — эхокардиографии и электрокардиографии.

Материал и методика. Исследование проводилось на базе Московского училища олимпийского резерва № 1. Обследовано 30 спортсменов-мужчин — кандидатов в мастера и мастеров спорта по современному пятиборью в соревновательный период тренировоч-

ного цикла. Возраст испытуемых — от 15 до 20 лет ($18,3 \pm 1,53$ лет), спортивный стаж — 4–7 лет. Контрольную группу составили молодые люди того же возраста ($17,6 \pm 1,86$ лет), отрицавшие систематические спортивные тренировки в течение жизни. Все испытуемые проходили полное диспансерное обследование (осмотр терапевта и специалистов, регистрация ЭКГ, эхокардиография, клинический анализ крови и мочи) и были признаны практически здоровыми. Спортсменам также определялась физическая работоспособность по тесту PWC₁₇₀ [2], нетренированным по показаниям проводилось чреспищеводное ЭФИ для исключения эпизодов пароксизмальных нарушений ритма. Все обследования проводились в первой половине дня.

При проведении эхокардиографии определялись размеры камер сердца и длительность периода изгнания. Рассчитывались конечный систолический и диастолический объемы и систолический выброс по формулам L. Teischolz [3], масса миокарда по формуле В. Трой в модификации Ю. Н. Беленкова [4], а также фракция выброса. По синхронной записи ЭКГ определялась длительность сердечного цикла. Артериальное давление измерялось по стандартной методике аускультативным методом Н. С. Короткова (1905).

Расчет податливости миокарда левого желудочка и податливости крупных артерий проводился по впервые предложенной нами методике.

Статистическая обработка данных проводилась при помощи электронных таблиц Microsoft Excel 97.

Методика определения податливости левого желудочка. Общая формула для оценки эластичности биологических камер была предложена еще О. Frank в 1899 г. [5]. Рассматривая артериальную систему как эластический резервуар, он ввел понятие коэффициента эластичности:

$$E = \Delta P / \Delta V, \quad (1)$$

где ΔP — прирост давления, ΔV — прирост объема в резервуаре.

Поскольку податливость является величиной, обратной эластичности, ее величина может быть вычислена как отношение изменения объема камеры (левого желудочка, аорты и крупных артерий) к изменению давления, прилагаемого к ее стенкам:

$$C = \Delta V / \Delta P, \quad (2)$$

где C — податливость камеры, ΔV — прирост ее объема, ΔP — прирост давления.

Таким образом, податливость в физиологическом смысле — это коэффициент зависимости изменений объема от величины приложенного давления.

Если в качестве исследуемой камеры рассматривать левый желудочек, то изменением его объема (ΔV) будет систолический выброс, а изменением давления — разность

между максимальным систолическим и конечным диастолическим давлением в нем. Однако указанные величины давления могут быть измерены только инвазивно. Для того, чтобы предложить неинвазивную методику определения податливости, для расчета величины максимального систолического давления в левом желудочке мы применили следующий подход.

Известно, что основной закон гемодинамики выражается следующим соотношением [6]:

$$Q=(P_A-P_B)/W, \quad (3)$$

где Q — минутный объем крови, $P_A - P_B$ — артериовенозная разница давлений, W — сопротивление кровеносной системы. Если рассматривать изменение давления на участке между левым желудочком и плечевой артерией в течение одного сердечного цикла, уравнение (3) будет выглядеть как:

$$Q_s=(P_v-P_s)/Z, \quad (4)$$

где Q_s — систолический выброс крови, $P_v - P_s$ — разница систолических давлений между левым желудочком и плечевой артерией, Z — характеристический импеданс аорты.

Отсюда величина внутрижелудочкового давления составит:

$$P_v=ZQ_s+P_s \quad (5)$$

Подставляем в это выражение величину импеданса аорты [7]:

$$Z = \frac{P_s \cdot t_e}{Q_s} \cdot \left(\frac{1 - \delta \eta}{1 - \eta} - \frac{1 - \delta}{\mu} - \delta \right), \quad (6)$$

$$\text{где: } \delta = P_d/P_s,$$

$$\mu = \frac{(P_s - P_d) \left(1 + \frac{P_s}{P_m \cdot D} \right)}{P_m \cdot T},$$

$$\eta = \exp(-\mu).$$

В этих формулах t_e — длительность периода изгнания, P_s и P_d — систолическое и диастолическое давление в плечевой артерии, определяемое методом Н. С. Короткова, P_m — среднее давление, вычисляемое по формуле Wezler и Böger (1939):

$$P_m = P_d + 0.43 \Delta P, \quad (7)$$

где ΔP — пульсовое давление.

Таким образом, из формулы (5) получаем окончательную формулу для вычисления максимального давления в левом желудочке:

$$P_v = (P_s \cdot t_e) \cdot \left(\frac{1 - \delta\eta}{1 - \eta} - \frac{1 - \delta}{\mu} - \delta \right) + P_s \quad (8)$$

Величина конечного диастолического давления в левом желудочке при проведении неинвазивных исследований, например, поликардиографии, обычно принимается равной 5 мм. рт. ст. [8, 9]. Поскольку у исследуемого контингента его повышение исключается, мы сочли такое приближение правомочным. Следовательно, из формулы (2) можно вывести формулу для расчета податливости левого желудочка (C_v):

$$C_v = \frac{Q_s}{P_v - 5} \quad (9)$$

Податливость аорты и крупных артерий (C_a) рассчитывалась по предложенной нами ранее формуле [10]:

$$C_a = \frac{Q_s \cdot D}{\Delta P \cdot T}, \quad (10)$$

где T — длительность сердечного цикла, D — длительность диастолы ($T - t_e$).

Периферическое сопротивление (R) рассчитывалось как отношение среднего давления и потока в системе:

$$R = \frac{P_m \cdot T}{Q_s},$$

где P_m — среднее давление, Q_s — ударный объем, T — длительность сердечного цикла.

Результаты и обсуждение. В контрольной группе испытуемых физиологический разброс величин податливости левого желудочка (C_v) составил 0,41-0,84 мл/мм рт. ст., артериальной податливости (C_a) — от 0,83 до 2,14 мл/мм рт. ст.; средние величины — соответственно $0,64 \pm 0,10$ и $1,29 \pm 0,35$ мл/мм рт. ст. Эти показатели тесно связаны друг с другом ($r = +0,8$), что отражает физиологический смысл взаимодействия между миокардом левого желудочка и стенкой аорты: чем больше сила сокращения левого желудочка и, соответственно, ударный объем, тем большее количество потенциальной энергии депонируется для дальнейшего продвижения крови по сосудистой системе. Взаимодействие между указанными показателями можно оценить по величине так называемого “емкостного коэффициента”: отношению артериальной податливости к податливости левого желудочка (C_a/C_v). В норме он составил $2,0 \pm 0,34$ (табл. 1).

Таблица 1

Емкостные и резистивные показатели гемодинамики у здоровых нетренированных лиц
(n=38; M±σ)

<i>C_v</i> , диапазон колебаний	<i>C_v</i> , мл/мм рт. ст.	<i>C_a</i> , мл/мм рт. ст.	<i>C_a/C_v</i>	<i>R</i> , дн·с·см ⁻⁵	<i>Z</i> , дн·с·см ⁻⁵
0,41-0,50	0,46±0,04	0,84±0,02	1,83±0,13	1688±300,9	150,7±5,10
0,51-0,60	0,55±0,03	1,04±0,15	1,88±0,25	1474±248,3	126,4±19,12
0,61-0,70	0,65±0,02	1,39±0,32	2,13±0,48	1296±342,8	94,4±21,49
0,71-0,80	0,74±0,03	1,46±0,13	1,97±0,17	1270±153,4	95,7±13,18
0,81-0,90	0,86±0,02	2,05±0,08	2,40±0,05	1246±77,3	67,7±0,20
Общая средняя	0,64±0,10	1,29±0,35	2,0±0,34	1376±286,8	108,2±27,1

При исследовании состояния кровеносного русла в зависимости от изменения величины податливости левого желудочка (по поддиапазнам с шагом в 0,1 мл/мм рт. ст.) у 7,8 % здоровых нетренированных людей показатели, характеризующие емкостные свойства сердечно-сосудистой системы (податливость левого желудочка и артериальная податливость) были достаточно низкими: C_v — 0,46±0,04 мл/мм рт. ст., C_a — 0,84±0,02 мл/мм рт. ст. в сочетании с относительно высокими значениями показателей, характеризующих ее резистивные свойства (характеристический импеданс (Z) — 150,7±5,10 дн·с·см⁻⁵, периферическое сопротивление (R) — 1688,2±300,9 дн·с·см⁻⁵). Такой тип гемодинамики мы условно назвали резистивным.

У основной массы испытуемых (84 %) величины податливости левого желудочка находились в пределах от 0,51 до 0,80 мл/мм рт. ст., артериальная податливость — от 1,04 до 1,46 мл/мм рт. ст. Им соответствуют средние величины характеристического импеданса (от 126,4±19,1 дн·с·см⁻⁵ в подгруппе величин C_v 0,51-0,60 мл/мм рт. ст. до минимальных величин 94,4±21,5 дн·с·см⁻⁵, зарегистрированных в подгруппе с величиной C_v 0,61-0,70 мл/мм рт. ст.) и периферического сопротивления (от 1474±248,3 дн·с·см⁻⁵ при C_v 0,51-0,60 мл/мм рт. ст. до 1270±153,4 дн·с·см⁻⁵ при C_v 0,71-0,80 мл/мм рт. ст.). Это средний, или сбалансированный, тип гемодинамики, с физиологическими параметрами, средними для данного возраста (по нашим наблюдениям, с возрастом происходит снижение величин податливости левого желудочка и крупных сосудов, вероятно, связанное с развитием склеротических изменений).

Наконец, у двух испытуемых контрольной группы (5,3 %) величины C_v превысили 0,80 мл/мм рт. ст. ($0,86 \pm 0,02$ мл/мм рт. ст.), при этом величина C_a была больше 2 мл/мм рт. ст., “емкостного коэффициента” — более 2,3. Это сочеталось с относительно сниженными сосудистыми сопротивлениями ($Z — 67,7 \pm 0,20$ дн·с·см⁻⁵, $R — 1246 \pm 77,3$ дн·с·см⁻⁵). Этот, так называемый емкостной тип кровообращения, представляется наиболее оптимальным с точки зрения гемодинамики. Относительно увеличенный систолический выброс, максимальная реализация потенциальной энергии растяжения стенки аорты (отражаемая увеличением податливости крупных артерий), наилучшие условия для реализации механизма Франка-Старлинга (увеличение податливости левого желудочка характеризует увеличение способности к растяжению) и снижение постнагрузки (уменьшение величин резистивных показателей) обеспечивают оптимальные условия для кровоснабжения органов и тканей. Относительные критерии определения типов гемодинамики представлены в табл. 2.

Таблица 2

Ориентировочные критерии для определения типов гемодинамики*

Тип гемодинамики	C_v мл/мм рт. ст.	C_a мл/мм рт. ст.	C_a/C_v	R , дн·с·см ⁻⁵	Z , дн·с·см ⁻⁵
Резистивный	<0,5	<0,9	≤1,6 (до 2,0)	>1400-1500	>140
Сбалансированный	0,51-0,80	0,9-2,0	1,6-2,3	1250-1500	90-140
Емкостной	>0,8	>1,9	≥2,5	<1250	<90

*Примечание. Данные величины применимы без поправок только для здоровых людей не старше 30 лет.

Вышесказанное подтверждается результатами, полученными нами в группе спортсменов высокой квалификации. Во-первых, имеет место рост абсолютных значений границ вариабельности величины податливости левого желудочка — от 0,65 до 1,18 мл/мм рт. ст. (у нетренированных — 0,41-0,84 мл/мм рт. ст.), и артериальной податливости — 1,11-3,41 мл/мм рт. ст. (у нетренированных — 0,82-2,14). Средние величины составили соответственно $0,91 \pm 0,13$ и $1,80 \pm 0,51$ мл/мм рт. ст. (табл. 3). Во-вторых, у спортсменов в условиях покоя имеет место снижение постнагрузки, отражающееся в снижении величин характеристического импеданса ($Z — 84,0 \pm 22,8$ дн·с·см⁻⁵) и периферического сопротивления ($R — 1097 \pm 157,3$ дн·с·см⁻⁵). Емкостной тип кровообращения наблюдается у тренированных в 55,3 % случаев, и ни один из испытуемых не был отнесен к резистивному типу.

Емкостные и резистивные показатели гемодинамики
у спортсменов высокой квалификации ($M \pm \sigma$)

C_v , диапазон колебаний	C_v , мл/мм рт. ст.	C_a , мл/мм рт. ст.	C_a/C_v	R , дн·с·см ⁻⁵	Z , дн·с·см ⁻⁵
0,71-0,80	0,75±0,03	1,24±0,11	1,66±0,17	1177±141,6	118,6±6,90
0,81-0,90	0,86±0,02	1,61±0,10	1,91±0,09	1160±132,1	100,0±7,03
0,91-1,0	0,96±0,02	1,91±0,13	1,98±0,12	1036±69,8	85,4±4,11
1,01-1,1	1,05±0,03	2,28±0,49	2,17±0,44	991±110,4	76,2±5,06
Общая средняя	0,91±0,13	1,80±0,51	1,95±0,32	1097±157,3	84,0±22,8

Таким образом, на основании полученных данных можно утверждать, что формирование долговременной адаптации к физической нагрузке отражается в повышении емкостных свойств миокарда и сосудов, в условиях покоя сочетающихся со снижением постнагрузки на левый желудочек, количественно выражающемся в уменьшении величин резистивных показателей гемодинамики. Взаимовлияние комплекса параметров, характеризующих функциональное состояние миокарда и сосудистого русла, четко отражается предложенной нами емкостно-резистивной моделью кровообращения. Формирование емкостного типа гемодинамики в результате тренировочного процесса является следствием оптимизации функционирования кровеносной системы у тренированных лиц и может служить критерием эффективности применяемых тренировочных нагрузок.

ВЫВОДЫ

1. В норме у здоровых нетренированных лиц можно выделить три основных типа гемодинамики в зависимости от взаимовлияния податливости левого желудочка и крупных артерий с физиологическими параметрами, определяющими постнагрузку: резистивный, сбалансированный и емкостной.
2. Емкостной тип гемодинамики является оптимальным для реализации насосной функции сердца.
3. В процессе долговременной адаптации к физической нагрузке происходит перестройка гемодинамики по емкостному типу.
4. Определение типа гемодинамики с использованием функциональных показателей, рассчитанных на основе морфологических характеристик (измеря-

емых эхокардиографически), может служить критерием эффективности тренировочного процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каро К., Педли Т., Шроттер Р., Сид У. Механика кровообращения. М., “Мир”, 1981.
2. Карпман В.Л., Белоцерковский З.Б., Гудков И.А. Тестирование в спортивной медицине. М., “Физкультура и спорт”, 1988.
3. Teiccholz G. Problems in echocardiographic volume determinations. Circulation, 1972, Suppl. II, v. 46, p.75 (abstracts).
4. Мухарлямов Н. М., Беленков Ю. Н. Ультразвуковая диагностика в кардиологии. М., “Медицина”, 1981.
5. Frank O. Die Grundformen des Arteriellen Pulses. Z. f. Biol., 1899, s. 483-526.
6. Гинецинский А. Г., Лебединский А. В. Основы физиологии человека и животных. М., “Медгиз”, 1947.
7. Клинико-физиологические характеристики сердечно-сосудистой системы у спортсменов. Сборник, посвященный 25-летию кафедры спортивной медицины им. проф. В. Л. Карпмана. М., 1994, с. 92-116.
8. Карпман В. Л. Фазовый анализ сердечной деятельности. М., “Медицина”, 1965.
9. Gorlin R., Gorlin S. Hydraulic formula for calculation of the area of the stenotic mitral valve, other cardiac valves and centralcirculatory shunts. Am. Heart J., 41(1), 1-129, 1951.
10. Карпман В. Л. , Никитина С. С., Любина Б. Г., Белоцерковский З. Б. Податливость артериальной системы у спортсменов. Физиология человека, 1995, т. 21, № 5, с. 144-149.

В. А. Епифанов, С. С. Суворова

ЕМКОСТНЫЕ И РЕЗИСТИВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ СПОРТСМЕНОВ И ИХ ДИНАМИКА ПРИ СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ СПОРТИВНОЙ ТРЕНИРОВКЕ

В статье описывается новая методика исследования состояния упруго-вязких свойств сердечно-сосудистой системы, основанная на изучении взаимосвязи депонирующих свойств камеры левого желудочка и стенки аорты с величинами сосудистых сопротивлений различных участков артериального дерева. Применение этой методики позволя-

ет оценить индивидуальные особенности гемодинамики здоровых нетренированных людей и изменения в системе кровообращения, возникающие под влиянием систематической спортивной тренировки.