



www.svetlanasuvorova.ru

**МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ И МЕДИЦИНСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
МЕДИКО-СТОМАТОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**КАФЕДРА ЛЕЧЕБНОЙ ФИЗКУЛЬТУРЫ И СПОРТИВНОЙ МЕДИЦИНЫ
С КУРСОМ ФИЗИОТЕРАПИИ ФАКУЛЬТЕТА ПОСЛЕДИПЛОМНОГО ОБРАЗОВАНИЯ**

С. С. СУВОРОВА, В. А. ЕПИФАНОВ, В. С. ЗАДИОНЧЕНКО

**ЕМКОСТНО-РЕЗИСТИВНАЯ МОДЕЛЬ ГЕМОДИНАМИКИ
И ЕЕ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ
ДОЗИРОВАННОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ
НА СОСТОЯНИЕ СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ**

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ДЛЯ ВРАЧЕЙ

МОСКВА

2001

АННОТАЦИЯ

В методических указаниях описывается неинвазивный метод оценки упруго-вязких свойств сердечно-сосудистой системы с применением ряда параметров, характеризующих депонирующие свойства миокарда и сосудов, а также величину сосудистых сопротивлений, определяющих постнагрузку на левый желудочек. Индивидуальные особенности гемодинамики, определяемые по характеру взаимовлияния емкостных и резистивных характеристик артериальной системы, помогают оценить степень влияния на кровообращение различных воздействий: дозированной физической нагрузки при ЛФК, спортивной тренировки, а также медикаментозного и физиотерапевтического лечения. Методические указания предназначены для врачей — терапевтов, кардиологов, реабилитологов, специалистов по спортивной медицине.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка физиологического воздействия физической нагрузки на организм в значительной степени сводится к оценке эффективности функционирования системы транспорта кислорода. Ведущая роль при этом отводится определению функционального состояния сердечно-сосудистой системы. Изменения состояния миокарда и сосудистых стенок, возникающее при систематическом воздействии физических нагрузок, являющиеся результатом возникающих неспецифических физиологических реакций. Объективизация степени выраженности этих изменений позволяет оценить эффективность применения нагрузок заданной длительности и интенсивности.

Упруго-вязкие свойства камеры левого желудочка и стенки крупных артерий, формирующих аортальную компрессионную камеру (АКК), являются чувствительными критериями, изменяющимися уже на ранних стадиях развития различных физиологических и патологических механизмов [1]. Количественная оценка динамики этих показателей под влиянием дозированной физической нагрузки дает объективную информацию об эффективности примененной методики ЛФК, курса физиотерапии или цикла тренировочных нагрузок.

Емкостные свойства биологических камер (левый желудочек, стенки сосудов) оцениваются по величине их податливости (compliance). Поскольку биологическая камера обладает свойством изменять свой объем пропорционально величине приложенного давления, коэффициент пропорциональности в этом соотношении и есть податливость (аналогичный термин — растяжимость, distensibility). По физиологическому смыслу она является величиной, обратной эластичности. Для оценки эластических свойств артериальной стенки в клиническую практику показатель податливости был введен R. Gosling в 1976 г. [2].

Оценка системы сосудистых сопротивлений в комплексе с емкостными свойствами камеры левого желудочка описывает работу сердца как насоса с

учетом сократимости миокарда левого желудочка в зависимости от рабочей нагрузки, которую он при этом испытывает. Постнагрузка определяется по величине резистивных показателей: входного сопротивления (импеданса), отражающего величину нагрузки на уровне выводящего тракта левого желудочка, и периферического сопротивления, характеризующего нагрузку в дистальном участке артериального дерева.

Входной (эффективный) импеданс (input impedance) — величина, обратная эффективной проводимости всей системы кровообращения, соответствующая волнам заданной частоты и равная комплексному отношению компонент расхода и давления в восходящей аорте. В лабораторных условиях эта величина получается при Фурье-анализе пульсовых волн, полученных в эксперименте. В лабораторных и клинических исследованиях чаще пользуются величиной характеристического импеданса (characteristic impedance) — отношения давления к расходу в данном сосуде, когда в нем распространяется с постоянной скоростью и в одном направлении синусоидальная волна [3]. В настоящее время считается одним из главных критериев постнагрузки на левый желудочек [4].

Периферическое сопротивление — это величина гидравлического сопротивления, которую испытывает движущаяся кровь главным образом на уровне артериол. Его колебания связаны с регулирующим воздействием центральной нервной системы, направленным на поддержание определенного уровня артериального давления. Чаще всего оно рассматривается как отношение среднего давления и потока в системе.

Исследование взаимовлияния этих двух групп параметров зависимости от различных возмущающих воздействий на организм представляет собой основу предлагаемого нами метода оценки состояния упруго-вязких свойств миокарда левого желудочка и стенки крупных артерий. В данном пособии приводятся методики расчета входящих в модель параметров и способы интерпретации полученных результатов для оценки эффективности неме-

дикаментозных методов лечения (ЛФК, физиотерапия) и определения функционального состояния сердечно-сосудистой системы спортсменов.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ

В основе предлагаемой нами модели лежит расчет основных параметров, характеризующих упруго-вязкие свойства миокарда и стенок артерий с последующим определением типа гемодинамики по соотношению величин емкостных и резистивных параметров. Расчет осуществляется на основе ряда физиологических показателей, получаемых при применении стандартных эхокардиографических методик.

Впервые предложенные нами методики расчета показателей для оценки депонирующих свойств миокарда и крупных артерий, ранее не применялись в отечественной терапевтической практике. Расчет этих параметров дает представление о функциональном состоянии миокарда и стенки сосудов, а также об индивидуальных особенностях взаимовлияния миокарда левого желудочка и резистивных свойств сосудов, формирующих постнагрузку. Оптимизация гемодинамики под влиянием медикаментозного и немедикаментозного лечения, а также под влиянием систематической спортивной тренировки, четко отражается динамикой величин параметров модели.

Материально-техническое обеспечение. Для применения методики необходимы: эхокардиограф, позволяющий проводить доплер-эхокардиографию полостей сердца (любой модели), электрокардиограф, тонометр. Для обработки данных желателен IBM-совместимый компьютер.

Измеряемые параметры получают при проведении стандартных методик эхокардиографии — эхолокация в *B*-режиме (для измерения размеров камер может применяться и *M*-режим) и доплер-эхокардиография (для исследования потока через аортальный клапан), то есть применение данной методики возможно при наличии эхокардиографа любой модели, пригодного

для проведения доплер-эхокардиографии (SIM-5000, Aloka-630, АДР-4000 и др.). Необходима также регистрация синхронной записи ЭКГ (достаточно одного отведения) либо ее предварительная запись.

Измерение артериального давления производится стандартным аускультативным методом Н. С. Короткова, в положении лежа, непосредственно перед эхокардиографическим исследованием.

ИЗМЕРЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ

При применении методики для оценки эффективности курса лечения исследование проводится перед началом курса и при его окончании. При оценке эффективности применяемых тренировочных нагрузок у спортсменов исследование проводится на каждом из этапов тренировочного цикла. Регистрация морфофункциональных параметров должна производиться в условиях, максимально приближенных к основному обмену (в утренние часы, натощак, в условиях физического и психологического покоя).

При проведении эхолокации камер сердца определяются конечно-диастолический и конечно-систолический размеры левого желудочка.

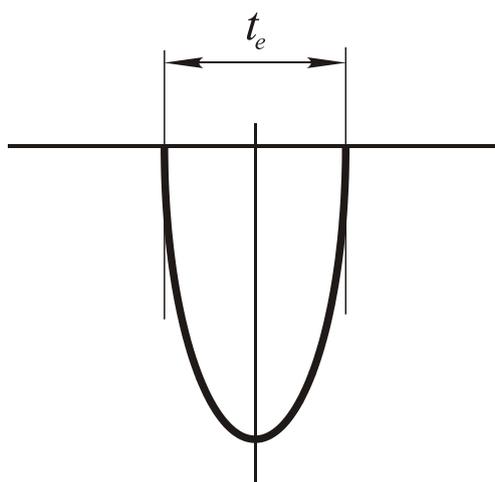


Рис. 1. Определение длительности периода изгнания по доплер-эхокардиограмме

При доплер-эхокардиографии проводится исследование кровотока через аортальный клапан для определения длительности периода изгнания (рис. 1).

По синхронной записи электрокардиограммы определяется длительность сердечного цикла (интервал $R-R$).

Артериальное давление измеряется дважды (при разнице более 5 мм рт. ст. — трижды) на левой руке в положении лежа. В расчетах используют максимальные из полученных цифры.

РАСЧЕТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Емкостные и резистивные параметры кровообращения рассчитываются по приводимым ниже формулам на IBM-совместимых компьютерах либо с помощью электронных таблиц Microsoft Excel 97. Параметры математического обеспечения емкостно-резистивной модели кровообращения могут быть рассчитаны также с помощью программ на языках программирования BASIC, Pascal, Delphi и др.

Объем левого желудочка. Конечный систолический (KCO) и диастолический ($KДО$) объемы рассчитывались по формулам L. Teicsholz [5]:

$$\dot{V} = \frac{7}{2.4 + D} \cdot D^3,$$

где D — переднезадний размер желудочка в систолу или диастолу, V — объем желудочка.

Ударный объем ($УО$) определялся как разность этих объемов:

$$УО = KДО - KCO,$$

Среднее давление в данном исследовании было расчетной величиной. Для ее определения использовалась известная формула К. Wezler и А. Böger (1939):

$$P_m = P_d + 0,43\Delta P,$$

где P_m — среднее, ΔP — пульсовое, P_d — диастолическое давление.

Длительность диастолы. В нашем исследовании длительность диастолы (D) принималась равной разности между длительностью сердечного цикла (T) и длительностью периода изгнания (t_e), так как изменение объема камеры происходит именно во время изгнания крови из сердца:

$$D = T - t_e.$$

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

$$R = \frac{P_m}{i} = \frac{P_m \cdot 60}{\dot{Q}} = \frac{P_m \cdot T}{Q_s},$$

где R — периферическое сопротивление, i — приток крови в аортальную компрессионную камеру, \dot{Q} — минутный объем кровотока, Q_s — ударный объем, T — длительность сердечного цикла.

Характеристический импеданс. Для расчета величины характеристического импеданса (Z) существует множество формул. Для клинического применения наиболее удобна формула В. Л. Карпмана и соавт. [4], так как взаимоотношения давления и потока в аорте описываются с помощью действительных чисел:

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

где:

$$\delta = \frac{P_d}{P_s},$$

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

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

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.

Давление в левом желудочке. Давление в полости левого желудочка обычно определяется только с помощью инвазивных методов. Формула для косвенного вычисления максимального внутрижелудочкового давления (P_v) по величине систолического артериального давления (P_s) получается преобразованием основного закона гемодинамики:

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

По В. Л. Карпману [6], R. Gorlin и S. Gorlin [7], величина конечного диастолического давления в левом желудочке при проведении неинвазивных исследований обычно принимается равной 5 мм. рт. ст. Такое допущение оказалось приемлемым даже для определения предсердно-желудочкового градиента. Тем не менее, мы воздерживались от применения методики для контингента с предполагаемым повышением конечно-диастолического давления (пороки сердца).

Податливость левого желудочка. Величина податливости любой биологической камеры представляет собой отношение изменения ее объема к приросту давления, прилагаемого к ее стенкам. Если в качестве исследуемой камеры рассматривать левый желудочек, то изменение его объема в течение одного сердечного цикла будет соответствовать величине систолического выброса, а перепад давлений — разнице между максимальным и конечно-диастолическим давлением в нем:

$$C_v = \frac{Q_s}{P_{\text{макс}} - P_{\text{диаст}}}, \quad (3)$$

где C_v — податливость левого желудочка, Q_s — ударный объем, $P_{\text{макс}}$ — максимальное, $P_{\text{диаст}}$ — диастолическое давление в левом желудочке. При использовании величины максимального и конечно-диастолического давления, определенных косвенным путем, расчет ведется по следующей формуле:

$$C_v = \frac{Q_s}{P_v - 5}.$$

Податливость аорты и крупных артерий. Формула для расчета податливости аорты (C_a) была получена нами с использованием формулы Н. Н. Савицкого для расчета фактора демпфирования на основе легко определяемых неинвазивных показателей:

$$C_a = \frac{Q_s \cdot D}{\Delta P \cdot T}, \quad (12)$$

где T — длительность сердечного цикла, D — длительность диастолы, ΔP — пульсовое давление [8].

Взаимовлияние эластических свойств левого желудочка и сосудов аортальной компрессионной камеры оценивалось по величине “емкостного коэффициента” — отношению величины податливости аорты и крупных артерий и податливости левого желудочка (C_a/C_v).

ОЦЕНКА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для здоровых нетренированных людей характерны следующие типы гемодинамики:

1. *Резистивный тип.* При относительно низких емкостных величинах (C_v , C_a) регистрируются относительно высокие сосудистые сопротивления: как характеристический импеданс (Z), так и периферическое сопротивление (R). Коэффициент соотношения между величинами податливости левого желудочка и крупных артерий («емкостной коэффициент», C_a/C_v) колеблется около 1,96–2,0. У здоровых людей до 20 лет этот тип наблюдается примерно в 10 % случаев, с возрастом этот процент увеличивается (после 35 лет — до 25 %), что связано с нарастанием склеротических процессов в миокарде и сосудистой стенке. У больных гипертонической болезнью он является преобладающим (наблюдается примерно у 90 %).

2. *Сбалансированный тип.* Эта группа, включающая наиболее близкие к средним величины гемодинамических параметров. Для любых возрастных категорий здоровых нетренированных людей этот тип является преобладающим (до 20 лет он наблюдается примерно в 65 % случаев, после 35 — в 59 %).

3. *Емкостной тип.* Высоким показателям растяжимости соответствует относительно сниженная постнагрузка. У молодых нетренированных людей наблюдается в 25 % случаев, у лиц старшего возраста — у 17 %. Этот тип гемодинамики наблюдается преимущественно у тренированных лиц (до 75 % у тренирующихся на выносливость).

Очевидно, что наиболее благоприятные гемодинамические условия наблюдаются при емкостном типе гемодинамики. Относительное увеличение притока крови в крупные артерии сопровождается снижением постнагрузки на левый желудочек, обусловленным облегченным прохождением периферического артериального русла. Напротив, относительный рост сосудистых сопротивлений и уменьшение депонирующих свойств аорты при резистивном типе гемодинамики, возможно, является предрасполагающим фактором для развития артериальной гипертонии.

Таблица 1.

*Ориентировочные критерии для определения типа гемодинамики
у лиц старше 35 лет*

<i>Тип гемодинамики</i>	<i>C_v, мл/мм рт. ст.</i>	<i>C_a, мл/мм рт. ст.</i>	<i>C_a/C_v^*</i>	<i>R, дин·с·см⁻⁵</i>	<i>Z, дин·с·см⁻⁵</i>
<i>Резистивный</i>	<i><0,5</i>	<i><1,0</i>	<i>≤1,8</i>	<i>>1600</i>	<i>>140</i>
<i>Сбалансированный</i>	<i>0,51-0,70</i>	<i>1,0-1,5</i>	<i>1,8-2,05</i>	<i>1400-1500</i>	<i>90-140</i>
<i>Емкостной</i>	<i>>0,7</i>	<i>>1,5</i>	<i>≥2,0</i>	<i><1350</i>	<i><90</i>

**«Емкостной коэффициент» у здоровых лиц достаточно постоянен и мало зависит от типа гемодинамики.*

Необходимо заметить, что границы величин параметров кровообращения, применяемые для оценки типов гемодинамики, являются относительными; в каждом конкретном случае необходима индивидуальная оценка полученных результатов. При этом наиболее важным критерием является соотношение между емкостными и резистивными характеристиками. Ориентировочные величины для лиц старше 35 лет приведены в табл. 1.

Адекватная медикаментозная терапия приводит к улучшению гемодинамических условий, что отражается в росте емкостных и снижению резистивных показателей. Формирование оптимальных типов гемодинамики (сбалансированного и емкостного) можно считать критерием эффективности проводимой терапии. Если же этого не происходит, можно ориентироваться на динамику абсолютных величин обеих групп показателей. Снижение “емкостного коэффициента”, наблюдающееся только при патологии, указывает на неадекватность реакции сосудистой стенки на изменение депонирующих свойств камеры левого желудочка.

Таблица 2.

Ориентировочные критерии для определения типов гемодинамики у лиц до 20 лет

Тип гемодинамики	C_v , мл/мм рт. ст.	C_a , мл/мм рт. ст.	C_d/C_v	R , дин·с·см ⁻⁵	Z , дин·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

Емкостной тип гемодинамики, как наиболее благоприятный, формируется в процессе систематической спортивной тренировки. При оценке эффективности воздействия тренировочных занятий на организм оценивается

степень роста емкостных и снижение резистивных показателей. Нужно учитывать также и возраст тренирующихся (табл. 2).

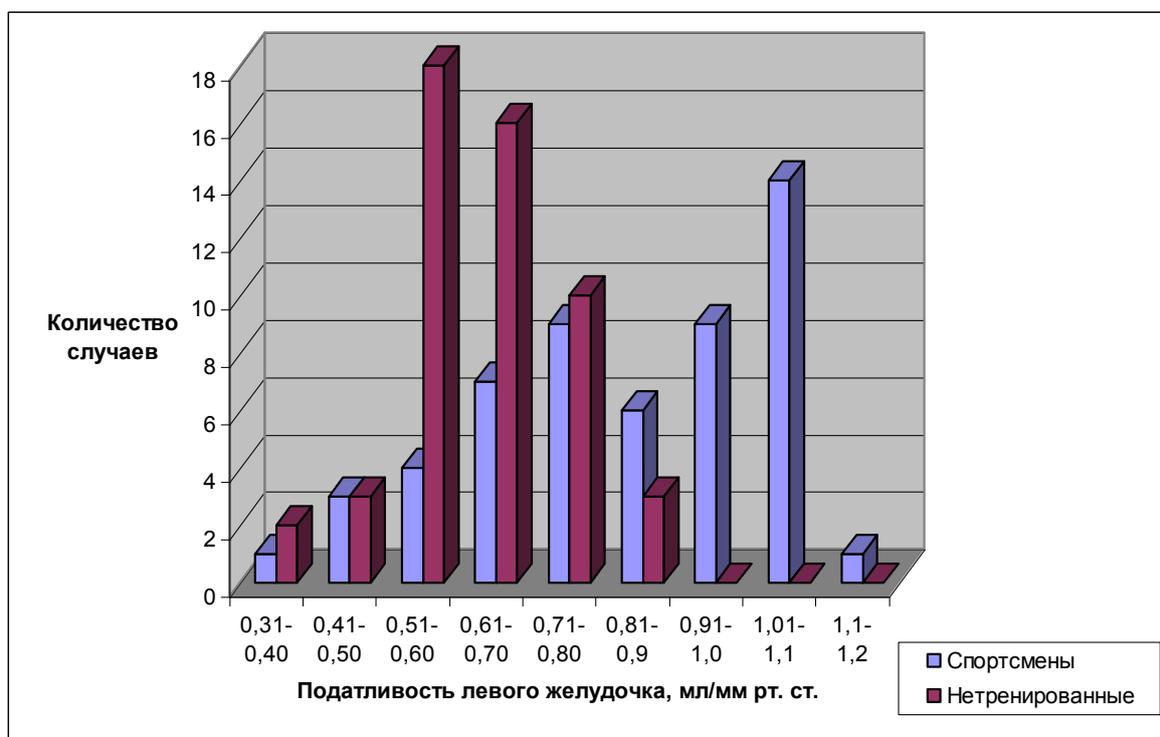


Рис. 2. Колебания величины податливости левого желудочка у высококвалифицированных спортсменов и нетренированных лиц.

Необходимо заметить, что у высококвалифицированных спортсменов, особенно тренирующихся на выносливость, исходные величины емкостных показателей могут значительно превышать нормальные величины (рис. 2). Так, податливость левого желудочка у тренированных лиц достигала 1,1 мл/мм рт. ст., артериальная податливость — 3,5 мл/мм рт. ст. (у нетренированных — не выше 0,9 и 2,2 мл/мм рт. ст. соответственно).

ПОКАЗАНИЯ И ПРОТИВОПОКАЗАНИЯ

Оценка гемодинамики с применением предложенной методики может применяться для оценки степени воздействия на систему кровообращения медикаментозных средств, курса ЛФК или физиотерапии, цикла тренировоч-

ных нагрузок. В прогностическом плане имеет значение выявление резистивного типа гемодинамики у здоровых людей.

Относительным противопоказанием к проведению исследования служит наличие у больного врожденных и приобретенных пороков сердца, предполагающих повышение конечно-диастолического давления в левом желудочке.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Указанная методика применяется для оценки состояния тренированности у подростков от 15 до 20 лет в Московском училище Олимпийского резерва № 1 в течение трех лет. В год проводится около 500 обследований. Регулярные наблюдения (2 раза в год для всех учащихся, в каждой из фаз тренировочного цикла — для членов сборных Москвы и России) показывают, что рост спортивного мастерства сопровождается оптимизацией гемодинамики спортсменов и приводит к увеличению числа лиц с емкостным типом кровообращения в обследуемых группах.

В клинических условиях (амбулаторно и в стационаре) проведена оценка эффективности лечения у 362 больных ИБС (стенокардия напряжения различных функциональных классов, постинфарктный кардиосклероз, истинная аневризма левого желудочка) и гипертонической болезнью (в т. ч. с развитием гипертонического сердца). Использование методики позволило добиться оптимизации гемодинамики (с сопутствующей стабилизацией состояния и улучшением самочувствия) в 92 % случаев применения медикаментозной терапии, при сочетании фармакотерапии с методиками ЛФК и физиотерапевтическими методами лечения — практически в 100 % случаев. Простота применения, использование применяющегося повсеместно оборудования, информативность для лечащего врача позволяют рассчитывать на повышение эффективности проводимого лечения и облегчение индивидуаль-

ного подбора адекватных доз медикаментов и мощности тренировочных нагрузок при использовании предлагаемой методики.

ВЫВОДЫ

1. На основании эхокардиографических показателей, характеризующих структурные особенности сердца, могут быть вычислены показатели, характеризующие состояние упруго-вязких свойств миокарда и стенки крупных артерий. Описание взаимовлияний этих физиологических характеристик составляет основу емкостно-резистивной модели гемодинамики.
2. По состоянию упруго-вязких свойств миокарда и сосудов выделяются 3 типа гемодинамики: емкостной, сбалансированный и резистивный в зависимости от особенностей взаимовлияния величин, характеризующих депонирующие и резистивные свойства миокарда и сосудов.
3. Резистивный тип является наименее благоприятным с точки зрения условий гемодинамики; он отражает снижение депонирующих свойств камеры левого желудочка и стенки крупных артерий в сочетании с увеличением постнагрузки и наиболее характерен для артериальной гипертонии.
4. Нормализация условий гемодинамики при проведении адекватной терапии четко отражается оптимизацией соотношения величин емкостных и резистивных показателей, входящих в предлагаемую нами модель.
5. По мере роста тренированности происходит формирование емкостного типа гемодинамики.
6. Применение данной методики для оценки эффективности воздействия на организм различных методов лечения, а также при опре-

делении состояния тренированности помогает объективизировать степень реакции сердечно-сосудистой системы на проводимый курс лечения или цикл тренировочных нагрузок. Это позволяет корректировать проводимую терапию или интенсивность нагрузок в зависимости от индивидуальной реакции организма пациента.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lehmann E. D., Watts G. F., Fatemi-Langroudi B., Gosling R. G. Aortic compliance in young patients with heterozygote familial hypercholesterolemia. *Clin. Sci.*, 1992, 82 (suppl. 26): 32 (abstr.).
2. Gosling R. G. Extraction of physiological information from spectrum-analysed Doppler-shifted continuous-wave ultrasound signals. In: Hill P. W., Watson B. W., eds. *IEE Modern Electronics Monographs*. Stevenage: Peter Perigrinus; 1976; 21: 73-125.
3. Каро К., Педли Т., Шроттер Р., Сид У. *Механика кровообращения*. М., «Мир», 1981.
4. 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.
5. Teicsholz G. Problems in echocardiographic volume determinations. *Circulation*, 1972, Suppl. II, v. 46, p.75 (abstracts).
6. Карпман В. Л. *Фазовый анализ сердечной деятельности*. М., «Медицина», 1965.
7. Gorlin R., Gorlin S. Hydraulic formula for calculation of the area of the stenotic mitral valve, other cardiac valves and central circulatory shunts. *Am. Heart J.*, 41(1), 1-129, 1951.
8. 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.