

УДК 616-091.0

## ГЕНДЕРНЫЕ И ВОЗРАСТНЫЕ АСПЕКТЫ БИОМЕХАНИКИ БОЛЬШОГО КРУГА КРОВООБРАЩЕНИЯ

© 2015 А.А. Гаранин, А.Е. Рябов, М.В. Пискунов

Самарский государственный медицинский университет

Статья поступила в редакцию 15.10.2015

В статье рассматривается проблема изменений биомеханики большого круга кровообращения в зависимости от пола и возраста посредством компьютерной реовазографии.

*Ключевые слова:* компьютерная реовазография, возрастно-половые особенности, биомеханика большого круга кровообращения, «периферическое сердце».

### ВВЕДЕНИЕ

Интерес к изучению периферического кровообращения не угасает с начала прошлого столетия с тех пор, как профессором М.В. Яновским была выдвинута теория «периферического сердца» [10, 12, 16]. Несмотря на бурное развитие науки и техники за последние 100 лет, накопленный на сегодняшний день значительный теоретический и практический материал является недостаточным для фактического обоснования данной теории. Длительное время существует концепция, согласно которой система кровообращения преподносится как замкнутая система трубок, в которой мотор, генерирующий пульсовый поток, представляет собой насос (сердце), связанный с пассивными трубками (артериями) [1, 2]. Однако ученые многих стран проводят свои исследования и в наши дни с целью опровержения данной научной сентенции, поскольку ряд полученных фактов указывает на ее несостоятельность.

Особое значение приобретает исследование сосудистого русла большого круга кровообращения (БКК) в связи со сложной его архитектоникой, значительной функциональной важностью. Важной проблемой медицины является изучение в процессе онтогенеза человека перестройки сосудистого русла, которая определяет ремоделирование системы кровообращения и развитие сосудистой патологии в процессе старения.

В настоящее время исследование различных аспектов периферического кровообращения выполняется рядом методик – определение жесткости сосудистой стенки, ее морфологии, скорости кровотока, оценка комплекса интим-медиа [8, 9, 13]. Все эти способы диагностики ограничены в своих возможностях избирательностью изучае-

мых параметров. Необходимо внедрение методик, позволяющих оценить функциональность сосудистой системы, как в комплексе, так и отдельных ее звеньев. Особое значение приобретают методики, где влияние человеческого фактора на результат исследования будет минимально.

**Цель работы:** изучить возрастно-половые особенности функционального состояния сосудов БКК у практически здоровых лиц по данным компьютерной периферической реографии.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе представлены результаты обследования 120 практически здоровых человек. Проведено распределение по четырем группам (по 30 человек): 1 группу составили женщины (средний возраст  $21 \pm 2$  года); 2 группа сформирована из женщин (средний возраст  $50 \pm 2$  года, находящиеся в менопаузе); 3 группа включала мужчин (средний возраст  $20 \pm 1$  год); 4 группу сравнения составили мужчины (средний возраст  $52 \pm 2$  года). В исследование не включались лица с факторами риска сердечно-сосудистых заболеваний, с отягощенной наследственностью по атеросклерозу, признаками патологии системы кровообращения.

Всем обследованным регистрировали реограммы верхней и нижней конечности. Показатели биомеханики изучали в процессе компьютерной обработки. Регистрация реограмм осуществлялась по разработанной нами методике с использованием продольной реографии на поликардиографе «Элон». Для регистрации реовазограмм использовали биполярные циркулярные электроды. Активный электрод (проксимальный) накладывали на верхней конечности на плечо между проксимальной и средней его третями, индифферентный (дистальный) – в области запястья, на нижней – активный электрод между проксимальной и средней третями бедра, индифферентный – непосредственно над лодыжками.

На этапе регистрации автоматизация процесса проводилась с помощью пакета прикладных

*Гаранин Андрей Александрович, врач-кардиолог Клиник СамГМУ. E-mail: sameagle@yandex.ru*

*Рябов Алексей Евгеньевич, кандидат медицинских наук, доцент кафедры пропедевтической терапии.*

*E-mail: alexrjabov@mail.ru*

*Пискунов Максим Владимирович, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры пропедевтической терапии.*

программ «Reos», позволяющего адаптировать полиграф «Элон» к ЭВМ, проводить двухканальную регистрацию реовазограмм и кривых сопровождения и формировать базу данных на компьютере. Сотрудниками кафедры пропедевтической терапии СамГМУ (Рябов А.Е., Гаранин А.А.) разработан пакет прикладных программ «Rheograph», который дает возможность идентифицировать файл данных, содержащий числовые значения амплитуд кривых, провести его предобработку (сглаживание, нормировку) и выполнить ручную постановку реперных точек – границ фаз сосудистого цикла по представленной на экране первой и второй производной реограмм и получить копию результата в виде текстового файла.

В процессе анализа реограмм и их производных нами установлено, что график второй производной реограмм, зарегистрированных как на верхней, так и на нижней конечностях, содержит два всегда идентифицируемых минимума, три максимума и два перехода через ноль [4, 5]. При многократном воспроизведении записи реограмм у одного и того же обследуемого указанные характерные точки возникают в строго определенной временной последовательности. Причем эта последовательность чередования точек на второй производной прослеживается на реограммах различных сосудистых бассейнов БКК у разных лиц вне зависимости от пола и возраста: при регистрации верхней и нижней реовазограмм, реоэнцефалограмм, реогепатограмм.

Выявленная закономерность позволила выделить в сосудистом цикле БКК два периода – систолу и диастолу по аналогии с сердечным циклом. Систола БКК состоит (рис. 1) из фаз эластического (точки 3-4) и мышечного (точки 4-5) компонента оттока (ЭКО и МКО) и капиллярно-венозного оттока (точки 5-6) (КВО). Диастола БКК

включает метаболическую фазу (МБ) (точки 6-0), распространения пульсовой волны (РПВ) (точки 0-1), быстрого (точки 1-2) и медленного (точки 2-3) притока (БП и МП). Кроме того, на реовазограмме выделяются диастола (ДП) правого предсердия, которая совпадает по времени с фазой МКО (точки 4-5), и систола (СП), совпадающая по времени с фазой КВО (точки 5-6). Их деятельность не вносит существенного вклада в гемодинамику БКК, поэтому расчет параметров биомеханики в эти фазы отдельно не проводится.

В каждую выделенную фазу мы вычисляли значения первой и второй производной реовазограмм и с их помощью определяли следующие параметры биомеханики БКК:

$t$ , с – продолжительность фазы;

$v_{cp}$ , Ом/с – средняя скорость изменения сопротивления;

$a_{cp}$ , Ом/с<sup>2</sup> – среднее ускорение (сила);

$N_{cp}$ , Ом<sup>2</sup>/с<sup>3</sup> – средняя мощность;

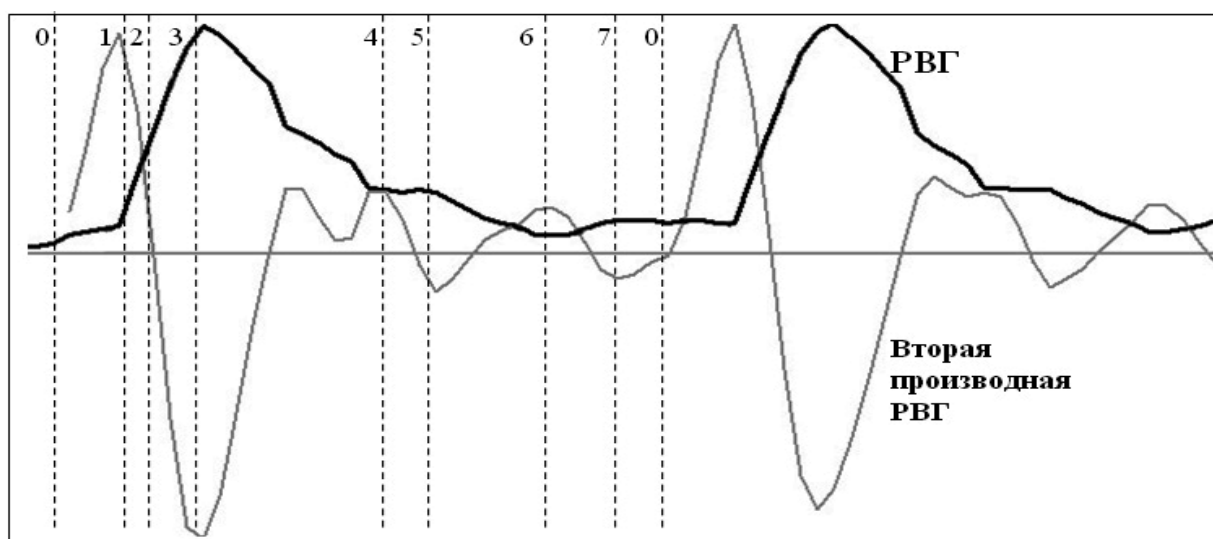
$W$ , Ом<sup>2</sup>/с<sup>2</sup> – работа.

Все значения параметров биомеханики, приведенные в таблице, представляют собой абсолютные значения изменения сопротивления.

Статистический анализ наших результатов был построен на применении непараметрических методов с использованием критерия Вилкоксона при помощи программы «Statistica 6.0 for Windows» (Statsoft, USA). При оценке достоверности различий между исследуемыми параметрами биомеханики исходили из 5%-ого уровня значимости.

## ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Биомеханика БКК и детальная интерпретация его фазовой структуры подробно описаны ранее [4, 5, 15].



**Рис. 1.** Фазовая структура большого круга кровообращения (реограмма верхней конечности и ее вторая производная)

Анализ параметров биомеханики БКК по данным реографии верхней конечности (табл. 1) показал достоверное их изменение во все фазы сосудистого цикла в различных сочетаниях между исследуемыми группами.

Систола начинается фазой ЭКО из артериальной части БКК. Обусловлена она сокращением эластических структур стенок аорты и ее ветвей и поступлением крови в микроциркуляторное русло. Наблюдалось удлинение данной фазы в группе 3 по сравнению с группами 1 и 4 на 133% (p=0,0003 и 0,025 соответственно), что обусловлено более выраженным тонусом артериальной стенки у мужчин молодого возраста. Средняя скорость в эту фазу характеризовалась депрессией в группе 2 в сравнении с группой 1 на 32% (p=0,025) и в группе 4 в сравнении с группой 3 на 47% (p=0,012). Кроме того, данный показатель возрос в группе 3 по сравнению с группой 1 на 27% (p=0,002), что коррелирует с увеличением продолжительности фазы ЭКО. Среднее ускорение менялось соответственно средней скорости – отмечено его снижение в группах 2 и 3 в сравнении с группой 1 на 48% (p=0,011) и 36% (p=0,0008) соответствен-

но. Аналогичная динамика прослеживалась при анализе силовых показателей биомеханики БКК. Средняя мощность снизилась в группах 2 и 3 по сравнению с группой 1 на 52% (p=0,012) и 30% (p=0,033) соответственно. Увеличение силы и мощности у молодых женщин на фоне более выраженной эластичности сосудистой стенки носит компенсаторный характер для адекватного продвижения ударного объема крови от проксимальных отделов сосудистого русла к дистальным. Работа уменьшилась в группе 2 по сравнению с группой 1 на 34% (p=0,017) и в группе 4 по сравнению с группой 3 на 61% (p=0,011).

Следующая систолическая фаза – МКО из БКК характеризуется сокращением мышечных волокон стенок аорты и ее разветвлений и увеличением кровенаполнения артериол и капилляров в результате превалирования притока крови над оттоком и увеличением скорости кровотока в БКК. Наблюдалось увеличение продолжительности данной фазы в группе 3 по сравнению с группой 1 и 4 на 83% (p=0,017) и 38% (p=0,028) соответственно, что характеризует более высокий тонус меди артериальной стенки у молодых

**Таблица 1.** Показатели биомеханики большого круга кровообращения по данным реовазографии верхней конечности в исследованных группах

Фазы Группы	МБ	РПВ	БП	МП	ЭКО	МКО	КВО
<b>Продолжительность фаз (t, с)</b>							
Группа 1	<b>0,10**</b>	<b>0,08**</b>	0,04	0,04	<b>0,16**</b>	<b>0,06**</b>	<b>0,26**</b>
Группа 2	0,16	0,08	0,04	0,04	0,19	0,06	0,27
Группа 3	<b>0,06#</b>	<b>0,06**</b>	0,04	0,04	<b>0,24#</b>	<b>0,11#</b>	<b>0,31**</b>
Группа 4	<b>0,14*</b>	0,08	0,04	0,04	<b>0,16*</b>	<b>0,08*</b>	0,26
<b>Средняя скорость (v<sub>ср</sub>, Ом/с)</b>							
Группа 1	0,63	0,75	<b>8,01*</b>	<b>11,28*</b>	<b>3,90#</b>	<b>5,11**</b>	<b>1,31**</b>
Группа 2	0,66	0,65	<b>7,03*</b>	<b>9,15*</b>	<b>2,66*</b>	4,64	1,44
Группа 3	0,59	0,80	8,08	<b>10,67*</b>	<b>4,95#</b>	<b>2,06#</b>	<b>2,13#</b>
Группа 4	0,66	0,73	8,43	<b>9,93*</b>	<b>2,62*</b>	<b>4,27*</b>	<b>0,99*</b>
<b>Среднее ускорение (a<sub>ср</sub>, Ом/с<sup>2</sup>)</b>							
Группа 1	<b>22,17**</b>	<b>48,80#</b>	<b>139,32*</b>	<b>105,05*</b>	<b>172,25#</b>	<b>34,81**</b>	33,28
Группа 2	12,86	<b>39,47*</b>	<b>101,83*</b>	<b>69,79#</b>	<b>90,40*</b>	27,94	31,98
Группа 3	<b>6,51#</b>	<b>65,20**</b>	138,22	107,75	<b>110,99**</b>	<b>51,85#</b>	31,82
Группа 4	<b>12,86*</b>	48,80	138,22	<b>105,05**</b>	110,99	<b>34,81*</b>	31,98
<b>Средняя мощность (N<sub>ср</sub>, Ом<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>)</b>							
Группа 1	<b>15,71**</b>	<b>60,86*</b>	<b>1004,24*</b>	<b>1037,61*</b>	<b>543,12#</b>	<b>165,47**</b>	<b>57,67**</b>
Группа 2	10,26	<b>43,58*</b>	<b>740,61*</b>	<b>636,28*</b>	<b>261,31*</b>	115,07	52,91
Группа 3	<b>2,87#</b>	62,52	1082,19	1156,10	<b>378,61**</b>	<b>93,89#</b>	<b>70,48#</b>
Группа 4	<b>14,05*</b>	67,35	1024,56	989,73	259,21	<b>131,97*</b>	<b>35,26*</b>
<b>Работа (W, Ом<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>)</b>							
Группа 1	<b>1,61**</b>	<b>5,34*</b>	36,07	<b>44,29*</b>	<b>39,12#</b>	12,19	<b>5,52**</b>
Группа 2	1,52	<b>3,55*</b>	35,58	<b>27,86*</b>	<b>25,84*</b>	8,13	4,33
Группа 3	<b>0,15#</b>	4,41	41,88	46,25	<b>54,27#</b>	12,48	<b>7,21#</b>
Группа 4	<b>1,54*</b>	4,58	40,98	39,59	<b>21,08*</b>	9,07	<b>3,18*</b>

Условные обозначения: \* - достоверное различие по возрасту; \*\* - достоверное различие по полу; # - достоверное различие по полу и возрасту

мужчин. Вместе с тем, средняя скорость в группе 3 снизилась при сопоставлении результатов с группами 1 и 4 на 60% ( $p=0,0002$ ) и 52% ( $p=0,012$ ) соответственно, что коррелирует с изменением продолжительности фазы МКО в группе молодых мужчин. Схожая динамика выявлена при анализе изменений среднего ускорения – произошло его увеличение в группе 3 по сравнению с группами 1 и 4 на 49% ( $p=0,04$  и  $0,036$  соответственно), что можно рассматривать как компенсацию сосудистого русла в ответ на вазоконстрикторные факторы, существующие у молодых мужчин. Отмечено также снижение средней мощности в группе 3 по сравнению с группами 1 и 4 на 43% ( $p=0,005$ ) и 29% ( $p=0,025$ ) соответственно.

Заключительная систолическая фаза – КВО обусловлена активным присасывающим действием правого желудочка в фазу медленного наполнения и усилением оттока из БКК с преобладанием его над притоком. Выявлено увеличение длительности данной фазы в группе 3 по сравнению с группой 1 на 50% ( $p=0,035$ ). Отмечено увеличение средней скорости в группе 3 по сравнению с группами 1 и 4 на 63% ( $p=0,0005$ ) и 115% ( $p=0,012$ ) соответственно. Схожую динамику имела средняя мощность – наблюдалось ее увеличение в группе 3 в сравнении с группами 1 и 4 на 22% ( $p=0,016$ ) и 100% ( $p=0,017$ ) соответственно. Произошло также возрастание работы в группе 3 при сопоставлении результатов с группами 1 и 4 на 31% ( $p=0,006$ ) и 127% ( $p=0,036$ ) соответственно, что коррелирует с изменениями рассмотренных выше параметров биомеханики БКК.

Диастола БКК начинается МБ фазой, которая имеет большой физиологический смысл. В эту фазу изгнание крови из левого желудочка и посылаемые импульсы из синусового узла [1, 2, 11] способствуют продвижению крови по *vasa vasorum* из проксимальных отделов к дистальным [3], что позволяет артериям подготовиться к принятию ударного объема крови. Кроме того, это обеспечивает трофику тканей стенки магистральных артерий – к ним поступает кровь, насыщенная кислородом и энергетическими продуктами, что позволяет синтезировать АТФ для последующего активного сокращения. Наблюдалось укорочение данной фазы в группе 3 по сравнению с группами 1 и 4 на 40% ( $p=0,0003$ ) и 57% ( $p=0,012$ ) соответственно. Аналогично изменялись остальные параметры биомеханики: средние ускорение, мощность и работа в группе 3 снизились по сравнению с группой 1 на 71% ( $p=0,004$ ), 82% ( $p=0,023$ ) и 91% ( $p=0,012$ ) соответственно, а по сравнению с группой 4 – на 49% ( $p=0,017$ ), 80% ( $p=0,012$ ) и 90% ( $p=0,011$ ) соответственно.

Следующая диастолическая фаза – фаза РПВ, которая характеризует в большей степени механические свойства артериального русла и в меньшей – биомеханику левого желудочка. В группе 3 по сравнению с группой 1 наблюдалось укорочение данной фазы на 25% ( $p=0,008$ ) и уве-

личение среднего ускорения на 34% ( $p=0,03$ ). Кроме того, отмечено снижение средних ускорения, мощности и работы в группе 2 при сопоставлении результатов с группой 1 на 19% ( $p=0,012$ ), 28% ( $p=0,011$ ) и 33% ( $p=0,049$ ) соответственно.

Фаза БП в БКК отражает преимущественно биомеханику левого желудочка и расширение аорты и ее ветвей под воздействием ударного объема крови. Выявлено снижение средних скорости, ускорения и мощности в группе 2 при сопоставлении результатов с группой 1 на 12% ( $p=0,017$ ), 27% ( $p=0,036$ ) и 26% ( $p=0,017$ ) соответственно, что отражает снижение эластических свойств сосудистой стенки у женщин с наступлением климактерического периода.

Фаза МП соответствует фазе максимального изгнания 2 сердца и отражает сопротивление мелких сосудов БКК. Динамика изменений параметров биомеханики сосудистого русла в данную фазу во многом схожа с изменениями, выявленными в фазу БП. Так, во 2 группе по сравнению с первой наблюдалось снижение средних скорости, ускорения, мощности и работы на 19% ( $p=0,012$ ), 34% ( $p=0,025$ ), 39% ( $p=0,012$ ) и 37% ( $p=0,049$ ) соответственно. Кроме того, выявлено снижение средней скорости в группе 4 по сравнению с группой 3 на 7% ( $p=0,049$ ) и среднего ускорения в группе 2 по сравнению с группой 4 на 34% ( $p=0,025$ ).

Таким образом, сосудистое русло БКК характеризуется повышенным тонусом артериальной его части у мужчин молодого возраста в сравнении с молодыми женщинами. У женщин, находящихся в климактерическом периоде, отмечено снижение эластичности сосудистой стенки по сравнению с женщинами молодого возраста. У мужчин среднего возраста наблюдается изменение параметров биомеханики в диастолу, связанное преимущественно со снижением податливости артериальной стенки под воздействием ударного объема крови. У молодых женщин наблюдаются наиболее благоприятные гемодинамические условия в сосудистой части БКК и сбалансированные биомеханические характеристики артериальной стенки.

Динамика биомеханических показателей сосудистого русла бассейна бедренной артерии, исследованных при помощи реографии нижней конечности, в общем имела схожие изменения в сравнении с биомеханикой сосудистого русла бассейна плечевой артерии, что показывает единство процессов, протекающих в системе кровообращения в процессе онтогенеза человека.

Ранее рядом авторов были выявлены различия между полом и возрастом в отношении биомеханики миокарда, малого круга кровообращения и магистральных артерий [6, 7]. Полученные нами данные коррелируют с результатами указанных исследований.

Обращаясь к теории профессора М.В. Яновского и рассматривая ее с позиций современной

экспериментальной и практической кардиологии, обладая новыми инструментальными возможностями изучения периферического кровообращения, можно утверждать, что в организме человека существует комплекс анатомо-физиологических условий, который можно назвать «периферическим сердцем» [12, 14, 16].

### ВЫВОДЫ

1. Компьютерная реовазография может быть с успехом применена при анализе различных аспектов биомеханики сосудистых бассейнов БКК.

2. Наиболее благоприятные гемодинамические и биомеханические условия в сосудистом русле БКК существуют у молодых женщин. В процессе онтогенеза, с наступлением климактерического периода, прослеживается снижение эластичности артериальной стенки.

3. У молодых мужчин наблюдается повышенный тонус артериальной части БКК, который с возрастом снижается, и биомеханические свойства сосудистого русла у женщин и мужчин среднего возраста достоверно не отличаются.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Волобуев А.Н. Возникновение флаттера на пульсовой волне / А.Н. Волобуев, В.П. Пирогов, В.И. Кошев, Е.С. Петров // Биофизика. 1988. Т. 33. № 4. С. 675.
2. Волобуев А.Н. Некоторые особенности нелинейного моделирования пульсовой волны / А.Н. Волобуев, В.И. Кошев, В.П. Пирогов, Е.С. Петров // Биофизика. 1996. Т. А1. № 2. С. 453.
3. Гайтон А., Холл Дж. Медицинская физиология. М.: Логосфера, 2008. 1273 с.
4. Гаранин А.А. Новые представления о фазовой структуре большого круга кровообращения / А.А. Гаранин, А.Е. Рябов // Российский кардиологический журнал. 2014. № 8 (112). С. 100–105.
5. Гаранин А.А. Новое в биомеханике большого круга кровообращения / А.А. Гаранин, А.Е. Рябов // Российский журнал биомеханики. 2014. Т. 18. № 3. С. 345–360.
6. Гаранин А.А. Возрастно-половые особенности биомеханики магистральных артерий / А.А. Гаранин, А.Е. Рябов // Врач-аспирант. 2012. Т. 51. № 2.5. С. 65–74.
7. Гаранин А.А. Возрастно-половые особенности биомеханики сердца и малого круга кровообращения / А.А. Гаранин, А.Е. Рябов // Врач-аспирант. 2014. Т. 62. № 1.1. С. 147–154.
8. Котовская Ю.В. Анализ пульсовой волны: новая жизнь старого метода / Ю.В. Котовская, Ж.Д. Кобалава // Сердце. 2007. № 6 (3). С. 35–39.
9. Кочкина М.С. Измерение жесткости артерий и ее клиническое значение / М.С. Кочкина, Д.А. Затейщиков, Б.А. Сидоренко // Кардиология. 2005. № 45 (1). С. 63–71.
10. Кошев В.И. Гидродинамический флаттер и антифлаттерная стабилизация в сердечно-сосудистой системе. Гидродинамическая модель и общая теория кровообращения: монография / В. И. Кошев, Е. С. Петров, А. Н. Волобуев. М-во здравоохранения и социального развития РФ, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования «Самарский гос. мед. ун-т». Самара: Офорт, 2007. 407 с.
11. Кошев В.И. Роль артерий в антифлаттерной стабилизации потока крови / В.И. Кошев, Е.С. Петров, А.Н. Волобуев // Вестник российской академии медицинских наук. 2007. № 6. С. 12–17.
12. Обрезан А.Г. Теория «периферического сердца» профессора М.В. Яновского: классические и современные представления / А.Г. Обрезан, Т.Н. Шункевич // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2008. № 3 (11). С. 14–23.
13. Орлова Я.А. Жесткость артерий как интегральный показатель сердечно-сосудистого риска: физиология, методы оценки и медикаментозной коррекции / Я.А. Орлова, Ф.Т. Агеев // Сердце. 2006. № 5 (2). С. 65–69.
14. Так называемое периферическое сердце. Вопросы экстракардиального кровообращения [под ред. Г.Ф. Ланга]. М.: Биомедгиз, 1935. 133 с.
15. Шукин Ю.В. Методические рекомендации по исследованию биомеханики кровообращения / Ю.В. Шукин, А.А. Гаранин. Самара: ООО «Издательство Ас Гард», 2014. 46 с.
16. Яновский М.В. Клинические данные по вопросу о периферическом артериальном сердце // Научн. мед. 1922. № 10. С. 121.

## GENDER AND AGE DIMENSIONS OF BIOMECHANICS SYSTEMIC CIRCULATION

© 2015 A.A. Garanin, A.E. Ryabov, M.V. Piskunov

Samara State Medical University

The article deals with the problem of changes in the biomechanics of the systemic circulation which depends on gender and age through computer rheovasography.

Keywords: computer rheovasography, age and gender features, biomechanics systemic circulation, “the peripheral heart”

Andrey Garanin, Cardiologist at Samara State Medical University Clinic. E-mail: sameagle@yandex.ru

Alexey Ryabov, Candidate of Medical Sciences, Associate Professor of the Department of Propaedeutic Therapy.

E-mail: alexrjabov@mail.ru

Maksim Piskunov, Candidate of Medical Sciences, Assistant of the Department of Propaedeutic Therapy.