

## БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ ОККЛЮЗИОННОЙ ТОНОМЕТРИИ В УСЛОВИЯХ СТАНДАРТНОГО НАГРУЗОЧНОГО ТЕСТА

к.т.н. Шилько С.В., ст.н.с. Кузьминский Ю.Г.

*Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси*

**Введение.** При оценке трудоспособности и профпригодности спортсменов и работников, подверженных значительным физическим и психоэмоциональным нагрузкам, широкое распространение получил нагрузочный тест в виде 30 приседаний в течение 30 секунд с трехкратной процедурой тонометрии – в начальном положении покоя, сразу после прекращения нагрузки и после 3-х минут отдыха (восстановления). Исходя из получаемых тонометрических данных, рассчитываются индексы и показатели функционального состояния организма. В большинстве случаев, существующие методики и реализующие их мобильные программно-аппаратные комплексы не позволяют детально проанализировать профиль пульсовой волны и выявить вклад аэробных и анаэробных (алактатных и лактатных) источников энергообеспечения. По мнению авторов, совместное использование метода окклюзионной осциллометрии и «быстрого» биомеханического анализа получаемых при осциллометрии данных в виде профиля пульсовой волны (пульсограммы) позволяет определить не только базовые тонометрические параметры (диастолическое и систолическое давление, частоту сердечных сокращений (ЧСС)), но и целый ряд других, весьма информативных при оценке трудоспособности и профпригодности, параметров гемодинамики.

**Целью исследования** являлось получение информации о гемодинамике сердечно-сосудистой системы по данным окклюзионной осциллометрии, проводимой в условиях стандартного нагрузочного теста.

**Методы исследования.** При проведении исследования использовался программно-аппаратный комплекс (ПАК) «БИОСПАС» [1,2]. Диагностические возможности комплекса основаны на сопоставлении профиля пульсовой волны обследуемого с альбомом из 25-ти пульсограмм, соответствующих физиологической норме, функциональным отклонениям и кардиопатологиям (рисунок 1).

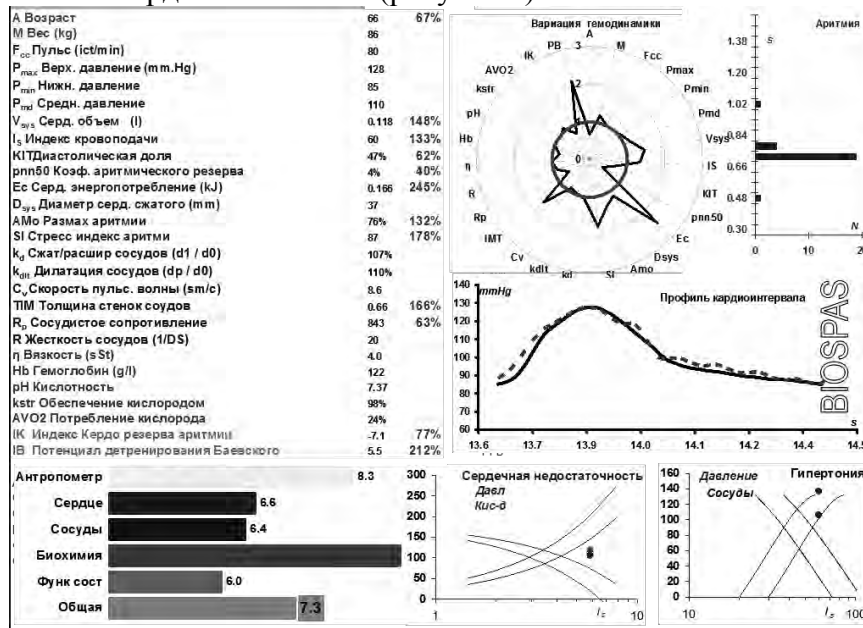


Рис. 1. Выходные данные ПАК «БИОСПАС»

Аппаратная часть ПАК «БИОСПАС» состоит из полуавтоматического тонометра LD1 и тензометрической станции TSL L1 для передачи данных от датчика давления тонометра на персональный компьютер с частотой 120 Гц [2]. Вычисление параметров гемодинамики производится по методике [3,4] с использованием их статистических зависимостей от длительности систолической части кардиоинтервала  $t_s$  и времени прихода отраженной волны  $t_r$ :

- скорость пульсовой волны  $C_v = H / t_r$ ;
- доля диастолической части кардиоинтервала  $KIT = 1 - t_s / K$ ;
- толщина стенок крупных артерий  $IMT = 0,29 + 0,025 C_v$ ;
- содержание гемоглобина  $Hb = 374Ht$ ,

где

$$Ht = \frac{1,872}{KIT} \frac{60}{F_{cc}} \frac{66,03}{(P_{max} - P_{min})^{-0,41}} \frac{P_{max} \cdot F_{cc}}{100 \left( \frac{C_v}{10} \right)^{-0,2}}.$$

Оптимизационная задача идентификации биомеханической модели артериального кровотока с целью определения искомым значений характеристик гемодинамики  $V_{sys}$ ,  $k_d$ ,  $\eta$ ,  $pH$ ,  $k_{str}$  по входным данным  $L$ ,  $H$ ,  $M$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $F_{cc}$ ,  $P_{max}$ ,  $P_{min}$ ,  $C_v$ ,  $KIT$  решалась методом перебора с параметризуемым количеством шагов в допустимых интервалах изменения. Формулировались следующие оптимизационные условия: сумма невязок значений входных и модельных давлений не должна превышать заданных ограничений; сумма отклонений значений искомым параметров от норм с учетом весовых коэффициентов должна быть минимальной. При проведении настоящего исследования архив диагностик с применением ПАК «БИОСПАС» содержал 200 результатов и являлся основой для выявления необходимых корреляционных зависимостей.

В аппаратной части ПАК «БИОСПАС» использовался управляемый клапан [5]. Длительность процедуры регистрации давлений была увеличена: вместо 40 с, как в классической тонометрии, она составляла 240 с в соответствии с продолжительностью стандартного нагрузочного теста. Постоянное давление в манжете выбиралось в интервале 90-120 мм рт. ст., в котором не происходит существенных изменений просвета плечевой артерии [6] (фрагмент графика давлений в манжете показан на рисунке 2).

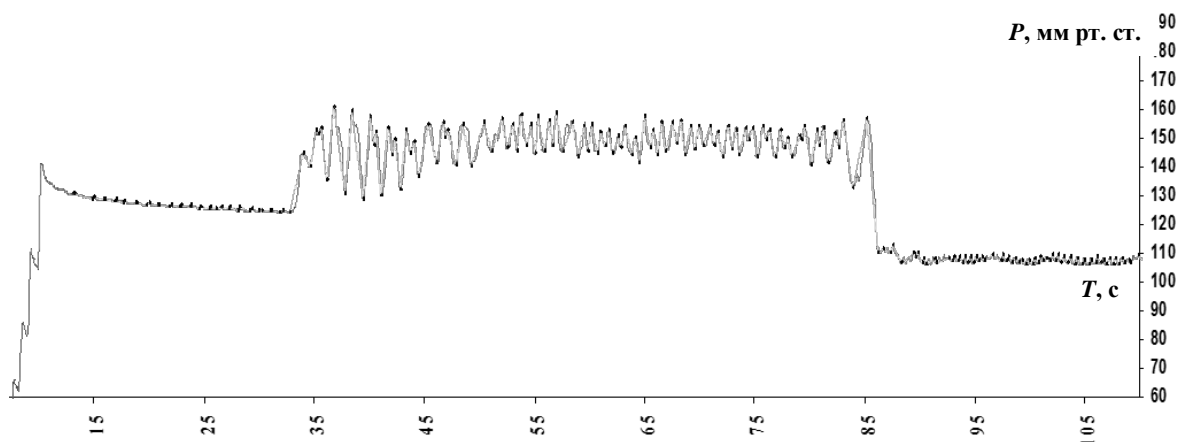


Рис. 2. Изменение окклюзионного давления в манжете с выделенными пиками осцилляций

После выделения отдельных пульсограмм строились временные зависимости амплитуд осцилляций и частоты сердечных сокращений.

Далее для каждой выделенной пульсограммы, так же, как и на предыдущем этапе (методом перебора искомых значений параметров с задаваемым количеством шагов в рамках допустимых границ изменений), определялись значения выходных параметров  $P_{min}$ ,  $k_d$ ,  $\eta$  по входным параметрам  $L$ ,  $H$ ,  $M$ ,  $A$ ,  $S$ ,  $F_{cc}$ ,  $V_{sys}$ ,  $P_{max}$ ,  $Hb$ ,  $C_v$ ,  $KIT$ ,  $k_{str}$  с выполнением вышеуказанных оптимизационных условий.

Число гемоглобина  $Hb$ , не подверженное мгновенным изменениям, определялось по параметрам пульсограммы в конце периода восстановления. Остальные входные параметры вычислялись на основании корреляционных зависимостей, установленных по базе данных АПК «БИОСПАС»:

- систолический объем сердечного выброса  $V_{sys} = (0,0114 \Delta P_{rest} + 0,079) F_{cc} / F_{rest}$ ,

где  $F_{cc}$  – текущая ЧСС,  $F_{rest}$  – ЧСС конца периода восстановления,  $\Delta P_{rest}$  – амплитуда осцилляций конца периода восстановления;

- систолическое давление  $P_{max} = -5883,8 V_{sys}^2 + 1731,6 V_{sys} + 39,779$ .

Результаты биомеханического анализа приведены в таблице 1. Особого пояснения требует определение доли аэробного энергообеспечения  $k_{str}$ , обеспечиваемого минутным объемом кровообращения и артеровенозным дифференциалом содержания связанного гемоглобином кислорода. Эта доля определяется текущей физической нагрузкой и частотой пульса. В положении покоя  $k_{str} = 100\%$ . Потребный секундный объем потребления кислорода (в мл)  $V_{O2-R} = 250 (M / 70) (L / L_{rest})$ , а поставляемый  $V_{O2} = 250 (M / 70) (F_{cc} / F_{rest})$ . Здесь  $L$  – текущая нагрузка,  $L_{rest}$  – нагрузка покоя,  $F_{cc}$  – текущий пульс,  $F_{rest}$  – пульс в покое,  $M$  – масса тела. После осреднения результатов моделирования для 5-ти соседних пульсограмм устанавливаются окончательные значения искомых параметров текущей пульсограммы.

Таблица 1

А) Фиксированные параметры гемодинамики при тестировании

$Hb$	$L$	$pnn50$	$k_{alakt}$	$k_{lakt}$
127	31	69%	73%	53%

Б) Изменение параметров гемодинамики при тестировании

$T, c$	35	46 ( $F_{min}$ )	101 ( $F_{max}$ )	238	%
	(Rest)	(After load)		(Restoration)	
$F_{cc}$	63	60	103	74	105
$P_{max}$	143	141	167	153	102
$P_{min}$	90	94	113	87	108
$V_{sys}$	0,08	0,08	0,14	0,10	105
$KIT$	87%	82%	74%	84%	108
$D_{sys}$	33,7	33,7	33,7	33,7	100
$k_d$	99%	99%	99%	99%	100
$C_v$	9,7	10,7	5,5	17,2	121
$k_{str}$	100%	18%	323%	143%	22
$pH$	7,37	7,29	7,28	7,29	99
$\eta$	3,8	3,5	3,3	3,0	82
$V_{O2}$	225	215	727	323	117
$I_K$	-43,8	-56,4	-9,2	-17,6	–
$P_B$	4,9	4,9	5,5	5,1	–

Примечание: «Rest» – состояние покоя, «After load» – состояние в конце нагрузочного теста, «Restoration» – состояние в момент завершения этапа восстановления,  $F_{min}$  – минимальная ЧСС при нагрузке,  $F_{max}$  – максимальная ЧСС при нагрузке. В последнем столбце дано процентное соотношение текущих значений параметров и значений параметров в состоянии покоя.

Соотношение долей энергообеспечения в текущий момент устанавливается на основе линейных аппроксимаций анаэробных составляющих (с привлечением известной зависимости [7]) и амплитуд буферных источников (алактатных и лактатных) в долевом отношении к нормам. Используется концепция полного энергообеспечения нагрузки и ликвидации кислородного долга к концу этапа полного восстановления, который может не совпадать с моментом окончания теста. Соотношение длительности реального и тестового этапа восстановления является определяемым параметром модели.

Сопоставление линейной аппроксимации частоты сердечных сокращений для конкретного обследуемого с осредненными групповыми данными позволяет создать автоматизированное средство контроля функционального состояния на основе регистрации амплитудных значений давлений и соответствующих временных лагов. Целесообразность такого подхода показана исследованиями ЧСС при растущей нагрузке [8]. Из приведенных на рисунке 3 зависимостей следует, что максимум ЧСС достигается на этапе восстановления, а снижение ЧСС на этапе восстановления до уровня состояния покоя, как правило, достигается не менее, чем через 3 минуты.

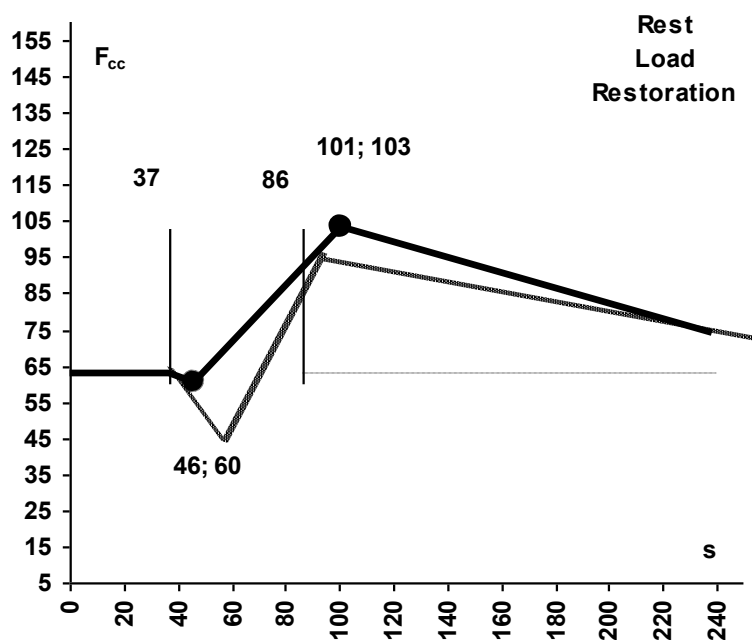


Рис. 3. Сопоставление временной зависимости ЧСС обследуемого (сплошная линия) и статистических данных (пунктир)

Завершающим этапом биомеханического анализа является построение графиков изменения параметров гемодинамики во время нагрузочного теста и наглядных диаграмм для быстрого выявления гемодинамических и функциональных отклонений от норм, включая признаки гипертонии и сердечной недостаточности. Таблица 3 содержит параметры тестирования с использованием диагностических программ «БИОСПАС» и «D\_СПАС», полученные с интервалом 3 месяца.

Таблица 2 – Параметры тестирования одного студента с использованием двух диагностических программ

	Rest		After Load		Restoration	
	<i>D_СПАС</i>	<i>БИОСПАС</i>	<i>D_СПАС</i>	<i>БИОСПАС</i>	<i>D_СПАС</i>	<i>БИОСПАС</i>
$F_{cc}$	63	67	103	103	74	72
$P_{max}$	143	116	167	140	153	123
$P_{min}$	90	59	113	91	87	56
$V_{sys}$	0,08	0,07	0,14	0,12	0,10	0,07
<i>KIT</i>	87%	69%	74%	67%	84%	73%
$D_{sys}$	33,7	28,0	33,7	32,0	33,7	28,0
$k_d$	99%	99%	99%	103%	99%	99%
$C_v$	9,7	7,6	5,5	8,4	17,2	8,7
$k_{str}$	100%	100%	323%	66%	143%	100%
<i>pH</i>	7,37	7,31	7,28	7,26	7,29	7,31
$\eta$	3,8	4,0	3,3	2,3	3,0	3,9
$V_{O_2}$	225	267	727	879	323	267
$I_K$	-43,8	12,4	-9,2	11,7	-17,6	21,6
$P_B$	4,9	4,3	5,5	4,9	5,1	4,4

Рассчитываются также принятые в спортивной практике индексы Кердо, Баевского, Кваса, Робинсона, физических кондиций и общего гемодинамического индекса, а также показатели выносливости и резерва.

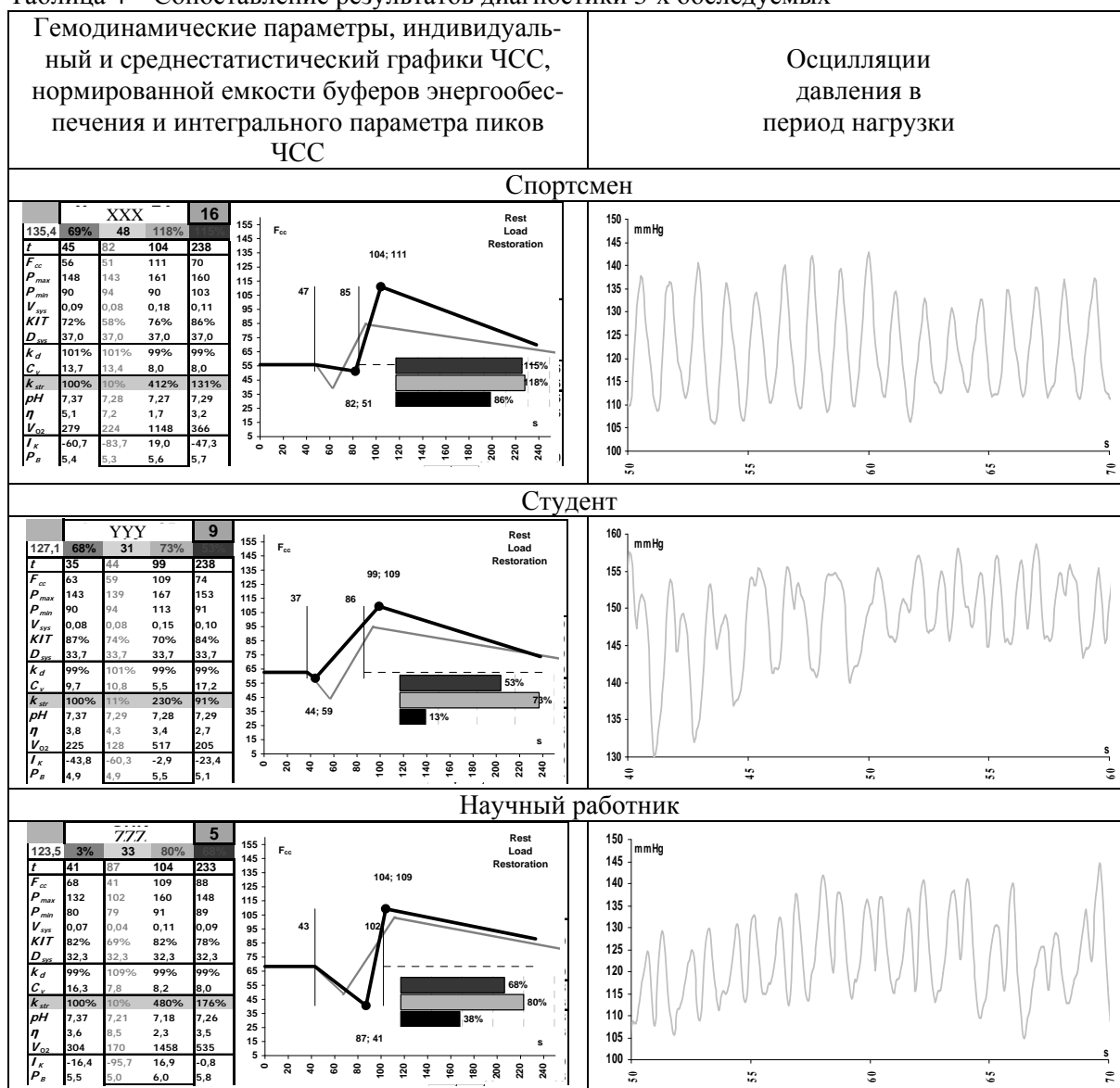
**Обсуждение результатов.** Диагностировалась группа 15 студентов военного факультета Белорусского государственного университета транспорта, прошедших при поступлении достаточно строгую медицинскую комиссию и признанных здоровыми. Часть обследуемых имела массовые спортивные разряды по различным видам спорта. Полученные статистические результаты приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Статистические данные гемодинамики группы

	$P_{rest}$	$P_{min}$	$P_{min}$	$P_{restoration}$
<i>t</i>	32	53	92	216
$F_{cc}$	69	50	106	74
$P_{max}$	147	127	164	151
$P_{min}$	93	89	95	89
$V_{sys}$	0,09	0,07	0,14	0,10
<i>KIT</i>	73%	63%	77%	82%
$D_{sys}$	33,1	33,1	33,1	33,1
$k_d$	100%	104%	99%	99%
$C_v$	10,7	10,5	8,5	10,2
$k_{str}$	100%	21%	556%	163%
<i>pH</i>	7,37	7,25	7,18	7,30
$\eta$	4,4	7,2	2,4	3,8
$V_{O_2}$	272	275	1560	449
$I_K$	-37,9	-81,5	7,8	-24,0
$P_B$	5,2	4,9	5,5	5,3

Информативность предложенного биомеханического анализа можно оценить сравнением гемодинамических показателей 3-х лиц – обследуемого, входящего в состав группы; сотрудника факультета физического воспитания Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины и научного работника пенсионного возраста (таблица 4).

Таблица 4 – Сопоставление результатов диагностики 3-х обследуемых



Наиболее очевидное различие гемодинамики обследуемых студента и спортсмена наблюдается в профиле пульсовой волны периода нагрузки. Пульсограмма студента имеет все признаки аритмии двойного пульса, которых в периоде покоя не наблюдалось. В отличие от профессионального спортсмена, гемодинамика студента характеризуется быстрым возрастанием ЧСС и не столь значительным увеличением ЧСС на пике нагрузки, увеличением кислородного долга и периода восстановления, сниженным увеличением систолического объема и вязкости крови.

Процедура нагрузочного тестирования позволяет выявить ранние признаки кардиопатологий гораздо раньше, чем это почувствует сам индивидуум. Так, тестирование названной группы с использованием программы «БИОСПАС» [6] по результатам трех измерений выявило заметные функциональные отклонения профиля ряда членов группы обследуемых.

**Выводы.** Предложена новая реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы в виде АПК «D\_СПАС», основанная на объединении методов окклюзионной осциллометрии и стандартного нагрузочного тестирования. Применение предложенной диагностической методики позволяет оценить динамику изменения параметров и адаптационные возможности сердечно-сосудистой системы при нагрузке.

Методика может использоваться при подготовке спортсменов массовых квалификаций и периодическом контроле здоровья работников, подверженных значительным физическим и психоэмоциональным нагрузкам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кузьминский, Ю.Г. Метод диагностики сердечно-сосудистой системы на основе одномерной модели гемодинамики / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько // Информатика. – 2014. – № 4. – С. 19–33.
2. Шилько, С.В. Аппаратная реализация и апробация неинвазивной диагностики гемодинамики на основе тензометрии и расширенной тонометрии / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко // Приборы и методы измерения. – 2015. – № 1. – С. 39–46.
3. Муравьев, А.В. Исследование роли отдельных реологических характеристик крови в изменении ее текучести и транспортного потенциала / А.В. Муравьев [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2012. – № 16. – С. 32–41.
4. Babbs, C.F. Oscillometric Measurement of Systolic and Diastolic Blood Pressures Validated in a Physiologic Mathematical Model / C.F. Babbs // BioMedical Engineering Online, 2012. – P. 1–22. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56> – Дата доступа: 26.04.2014.
5. Шилько, С.В. Биомеханическая диагностика гемодинамики сердечно-сосудистой системы в кн / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко // Инновационные аспекты современной медицины, часть II. – Новосибирск: СибАК, 2014. – С. 11–41.
6. Борисенко, М.В. Биомеханическая модель окклюзии артерии в процессе осциллометрии / М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Тезисы междунауч.-практ. конф. «Поликомтриб-2015». – Гомель, 2015. – С. 254.
7. Карпман, В.Л. Динамика кровообращения у спортсменов / В.Л. Карпман – М.: Физкультура и спорт, 1982. – 182 с.
8. Босенко, А.І. Оцінювання рівня мобілізації функціональних резервів студенток молодших курсів педагогічного університету при дозованих фізичних навантаженнях / А.І. Босенко, І.І. Самокиш [и др.] // Педагогіка, психол. та мед.-біол. пробл. фізичн. виховання і спорту. – 2013. – № 11. – С. 3–9.

E-mail: [shilko\\_mpri@mail.ru](mailto:shilko_mpri@mail.ru)  
[guk49mpri@mail.ru](mailto:guk49mpri@mail.ru)

Поступила в редакцию 30.10.2016