

УДК 616.713:616.12-089

Эргономическая оценка спортивных лыж на основе анализа гемодинамики спортсмена по данным тонометрии и электрокардиографии в условиях нагрузочного теста

С.В. Шилько¹, Ю.Г. Кузьминский¹, К.К. Бондаренко², Н.С. Богданова³

Исследованы параметры гемодинамики спортсмена в реальном масштабе времени по данным синхронно проводимой тонометрии и электрокардиографии в процессе трехэтапного нагрузочно-скоростного тестирования «покой – нагрузка – восстановление». Показано, что на основе использования указанных диагностических методов, одномерной биомеханической модели гемодинамики и экспериментально полученных статистических зависимостей возможен мониторинг весьма важных и информативных показателей энергоэффективности движения человека, в том числе для эргономической оценки спортивного снаряжения. Разработанный авторами мобильный программно-аппаратный комплекс и биомеханические критерии, характеризующие энергозатраты спортсмена, предложено использовать для оценки качества спортивно-беговых лыж.

Ключевые слова: биомеханика сердечно-сосудистой системы, моделирование гемодинамики, эргономика спортивного снаряжения, окклюзионная тонометрия, электрокардиография.

The hemodynamics parameters of the athlete were studied in real time according to the data of synchronously performed tonometry and electrocardiography during the three-stage load-speed testing «rest – load – recovery». It is shown that based on the use of these diagnostic methods, one-dimensional biomechanical model of hemodynamics and experimentally obtained statistical dependencies, it is possible to monitor very important and informative indicators of the energy efficiency of human movement, including assessing the ergonomics of sports equipment. It is proposed to use the mobile software and hardware complex developed by the authors and the biomechanical criteria characterizing the athlete's energy consumption for assessing the quality of cross-country skiing.

Keywords: biomechanics of the cardiovascular system, modeling of hemodynamics, ergonomics of sports equipment, occlusal tonometry, electrocardiography.

Введение. Для оценки функционального состояния организма в процессе подготовки спортсменов массовых разрядов достаточно часто применяется стандартный нагрузочный тест (СНТ), включающий 30 приседаний в течение 30 с. и сопровождаемый тонометрией артериального давления на 3 этапах – в начальном состоянии покоя, непосредственно после завершения нагрузки и через 3 минуты отдыха (для определения скорости восстановления до исходного состояния покоя). На основании полученных данных рассчитываются принятые в спортивной практике индексы функционального состояния организма [1], [2]. Дополнительные возможности диагностики и мониторинга функционального состояния организма предоставляет метод одномерного биомеханического моделирования гемодинамики сердечно-сосудистой системы в реальном масштабе времени по данным тонометрии [3], [4], [5].

Актуально расширение списка диагностируемых параметров, в первую очередь, характеризующих энергоэффективность движения. К ним относятся показатели потребления кислорода, динамики кислородного долга, долевого распределения аэробных и анаэробных источников энергообеспечения.

Нужно заметить, что классическая тонометрия в сочетании с СНТ не определяет вклады аэробных и анаэробных источников энергообеспечения, профиль пульсовой волны и вариабельность сердечного ритма. Для преодоления этих методических ограничений целесообразно использовать метод окклюзионной осциллометрии и соответствующие аппаратные средства [6], позволяющие существенно расширить перечень диагностируемых параметров гемодинамики. Однако технические и методические особенности классической тонометрии и окклюзионной осциллометрии снижают мобильность биомеханической диагностики и ограничивают ее использование в условиях спортивных тренировок. Метод электрокардиогра-

фии не позволяет непосредственно регистрировать ряд параметров гемодинамики, но при программно-аппаратной реализации в смартфонах делает контроль состояния ССС более доступным, быстрым и экономичным.

Представляется, что взаимодополняющее использование вышеуказанных диагностических методов, одномерного биомеханического моделирования гемодинамики и экспериментально полученных статистических зависимостей, программно реализуемых в портативных и мобильных смартфонах, позволяет достаточно полно и в реальном масштабе времени охарактеризовать «биомеханическую энергоэффективность» человека, определить адаптационные механизмы к физической нагрузке. Эта информация востребована не только для выявления профессиональной пригодности, оценки квалификации, силовых и скоростных возможностей спортсменов, но и для оценки эргономичности спортивного снаряжения. Но в настоящее время соответствующий мониторинг фитнеса, спортивных тренировок и состязаний возможен лишь с применением сложных и дорогостоящих приборов.

В этой связи целесообразно использовать мобильные программно-аппаратные комплексы и биомеханические критерии (частоту сердечных сокращений до и после нагрузки, объем потребляемого кислорода, величину кислородного долга), характеризующие энергозатраты спортсмена и описанные в публикациях [7], [8], [9], для оценки качества спортивного снаряжения, в частности, беговых лыж, при проведении соответствующего нагрузочно-скоростного тестирования.

Цель исследования. Целью исследования является разработка метода эргономической оценки спортивного снаряжения на основе биомеханического анализа результатов окклюзионной осциллометрии и электрокардиографии, выполняемых в процессе нагрузочно-скоростного тестирования.

Методы исследования. В работе применяли методы окклюзионной осциллометрии и электрокардиографии, а также одномерного биомеханического моделирования общей артериальной гемодинамики, реализованные в программно-аппаратном комплексе (ПАК) «БИОСПАС» [10]. Для записи аналитических соотношений между входными и выходными параметрами использовали корреляционные зависимости, выявленные при формировании базы данных ПАК «БИОСПАС».

Распределение вкладов аэробных и анаэробных источников энергообеспечения в текущий момент времени определялось по методике В.Л. Карпмана [11]. Доля аэробного энергообеспечения k_{str} рассчитывалась в зависимости от текущей физической нагрузки, частоты пульса, минутного объема кровообращения и артеровенозного градиента содержания связанного гемоглобином кислорода (в положении покоя $k_{str} = 100\%$). Потребный и поставляемый секундный объем потребления кислорода (мл) вычислялись по формулам $V_{O_2-R} = 250(M/70)(L/L_{rest})$ и $V_{O_2} = 250(M/70)(F_{cc}/F_{rest})$ соответственно. После осреднения результатов моделирования для 5-ти последовательных пульсограмм определялись окончательные значения искомых параметров.

В исследовании принимали участие студенты Белорусского государственного университета транспорта (15 юношей и 10 девушек), имеющие массовые разряды по различным видам спорта, 5 студентов факультета физической культуры Гомельского государственного университета им. Ф. Скорины, имеющих звание «Мастер спорта Республики Беларусь» и лица старшего возраста в возрасте 63–65 лет без спортивной квалификации. Все участники эксперимента выполняли стандартный нагрузочный тест (30 приседаний за 30 с) с последующим периодом восстановления в течение 3 минут. Файлы электрокардиограмм I-го отведения с частотой 200 Гц, полученные при помощи соответствующих устройств андроидных смартфонов, обрабатывались с использованием программного обеспечения ПАК «БИОСПАС».

Результаты исследований и их обсуждение. Рассмотрим особенности экспертной оценки взаимосвязи технических характеристик спортивного снаряжения в виде спортивно-беговых лыж, показателей функциональной подготовленности спортсменов и особенностей трассы.

Результат прохождения соревновательной дистанции определяется физическими и функциональными, в том числе адаптационными возможностями спортсмена [12], [13]. Скорость передвижения на лыжах зависит от материала и текстуры слоя скольжения лыжи, вида и консистенции смазки (парафин, жидкая мазь, паста, эмульсия или аэрозоль), изгибной жесткости лыжи и внешних условий (состояние снежного наста, рельеф местности, ветровая нагрузка и т. д.).

В исследовании принимают участие несколько лыжников в естественных условиях лыжной трассы (эллипсоидный участок трассы длиной 500 м) с движением в максимально высоком темпе при стабильной температуре воздуха окружающей среды. В зависимости от температуры снежного наста на скользящую поверхность лыжи выбирается и наносится смазка (необходимо учитывать, что постепенное удаление смазки при скольжении лыжи приводит к изменению, как правило, увеличению коэффициента трения между лыжей и снежным настом). Увеличение времени прохождения трассы означает снижение мощности полезной работы по перемещению массы тела и одновременно увеличение мощности работы по преодолению трения. Этот факт дает возможность связать реакцию функциональных систем организма, включая сердечно-сосудистую систему с изменением условий скольжения лыжи.

Таким образом, предлагаемая методика оценки качества спортивно-беговых лыж конкретизируется следующим образом:

- назначается длина трассы, равная 500 м. Аппаратура электрокардиографического контроля располагается в центре эллипса трассы для обеспечения устойчивой связи смартфона и кардиографа iQube;

- в процессе тестирования участвует 10 спортсменов, каждый из которых использует все варианты лыж;

- каждое испытание включает этапы покоя (30 с), нагрузки и восстановления (5 мин). Требование к величине нагрузки – максимальная скорость лыжного хода.

Анализируемые параметры: длительность прохождения дистанции, частота пульса, скорость пульсовой волны, время восстановления частоты пульса, систолическое и диастолическое значения артериального давления, систолический объем сердечного выброса, мощность работы сердца, исходная деформация артерий, общая вязкость крови, параметр кислотного равновесия, потребление кислорода, артеровенозный градиент по кислороду, доля аэробного энергообеспечения, накопленный кислородный долг, время компенсации кислородного долга. Производится осреднение результатов испытаний по каждому варианту лыж методом постобработки данных в программе EKG_SPAS_v2.sport.xls. Путем сопоставления показателей выбирается оптимальный вариант лыжи. Для минимизации фактора вариативности свойств трассы (уплотнение снега и т. п.) и других случайных факторов проводятся повторные тесты.

Вычисление ключевых параметров гемодинамики производится согласно методике В.И. Шульгина [8] по статистическим зависимостям при последующем биомеханическом моделировании. В привязке к выделенным точкам ЭКГ временные интервалы t_r и t_s вычисляются, как длительности сегментов rt и $p+t$ соответственно [14]. Для расчета артериального давления в данной методике используются зависимости

$$\begin{aligned} P_{max} &= a - b F_{cc} - c P_{min} \\ P_{min} &= d - e F_{cc} - f t_r, \end{aligned}$$

где F_{cc} – частота пульса, P_{max} – систолическое давление, P_{min} – диастолическое давление. Использование приведенных статистических зависимостей для давлений не является единственно возможным, однако, по мнению авторов, они предпочтительнее аналогичных соотношений, предложенных в работе [15].

Информационной основой исследования служит база данных антропометрических параметров и электрокардиограмм в wav-формате из 6000 записей [16]. В частности, по данным анализа данных синхронной тонометрии и электрокардиографии 6-ти сформированных групп пользователей была получена таблица весовых коэффициентов, которые подбирались методом перебора до выполнения условия минимума критерия:

$$k_{MxDMn} * \Delta_{MxDMn} + k_{Midl} * \Delta_{Midl} - k_{Correl} * Correl$$

Задача по определению значений выходных параметров (k_d , η , pH , k_{str}) по входным параметрам (L , H , M , A , S , F_{cc} , P_{max} , P_{min} , C_v , KIT) решается методом перебора искомых значений параметров с параметризуемым числом шагов в допустимых границах изменений с применением оптимизационных условий. При моделировании рассматривается задача нелинейного программирования: минимизируя функционал в виде суперпозиции невязок с весовыми коэффициентами

$$m_{Hb} \left| 1 - \frac{Hb}{Hb_0} \right| + m_{pH} \left| 1 - \frac{pH}{pH_0} \right| + m_E \left| 1 - \frac{E}{E_0} \right| + m_{sys} \left| 1 - \frac{F_{cc}}{V_{sys}^0} \right| + m_{\eta} \left| 1 - \frac{\eta}{\eta_0} \right| + m_d |1 - k_d| + m_{str} |1 - k_{str}| \rightarrow \min ,$$

по заданным значениям входных параметров $X \equiv \{A, H, M, L, F_{cc}, P_{max}^0, P_{min}^0\}$, вычисляются выходные параметры (переменные) $Y \equiv \{V_m, pH, Hb, k_{\eta}, E_v, k_{str}, k_d, P_{max}, P_{min}\}$, варьируемые в области их допустимых значений

$$\left| 1 - \frac{pH}{pH_0} \right| \leq S_{pH}, \quad \left| 1 - \frac{Hb}{Hb_0} \right| \leq S_{Hb}, \quad \left| 1 - \frac{E}{E_0} \right| \leq S_E, \quad |1 - k_{str}| \leq S_{str}, \quad |1 - k_{\eta}| \leq S_{\eta}, \quad |1 - k_d| \leq S_d,$$

с критерием точности $|P_{max} - P_{max}^0| + |P_{min} - P_{min}^0| \leq \Delta_p$.

В процедуре минимизации невязок используются адаптационные параметры весовых коэффициентов m_{xx} , пределов изменения искомых параметров S_{xx} и гемодинамических норм XX_0 :

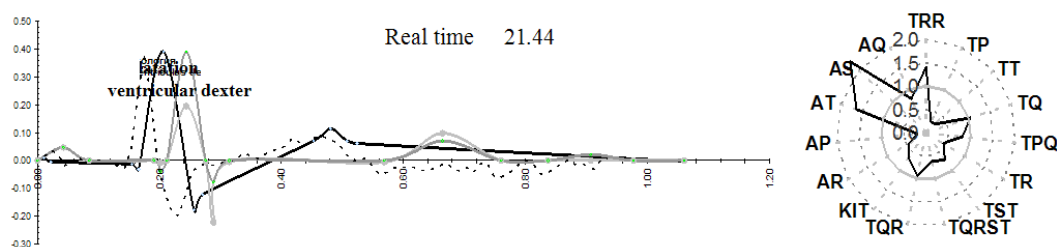
$$K_{opt} \equiv \{\Delta_p, P_{cap}, N, m_{Hb}, m_{pH}, m_{\eta}, m_{str}, m_{sys}, m_E, S_{pH}, S_{Hb}, S_E, S_{str}, S_{\eta}, S_d\};$$

$$Norma \equiv \left\{ V_{sys}^0 = 70 \text{ мл}, pH_0 = 7,37, Hb_0 = 150 \text{ г/л}, \eta_0 = 5 \text{ сСт}, E_0 = 12 \cdot 10^5 \text{ Па} \right\},$$

которые уточняются путем верификации модели по результатам 4000 расчетов.

Результаты расчета в EXCEL-программе «ЭКГ_СПОРТ» включают частоту сердечных сокращений, систолическое и диастолическое давление, коэффициент интегральной тоничности, систолический объем, мощность пульсовой волны, конечный систолический диаметр, толщину интимедиа сосудов, коэффициент тонусной деформации сосудов, скорость пульсовой волны, периферическое сопротивление, содержание гемоглобина, вязкость крови, артеровенозный градиент по кислороду, уровень кислородообеспечения, индексы функционального состояния Кердо и Баевского, профиль отклонения этих значений от норм, пятибальную оценку числа значительных отклонений параметров гемодинамики от норм, фазовый профиль кардиоинтервалов [17].

Инструментом первичного анализа ЭКГ – профилей кардиоинтервалов служит сопоставление усредненного ЭКГ – профиля обследуемого с текущим, «нормальным» и «патологическим» (по критерию минимума отклонений) профилями. Анализ включает следующие этапы: осреднение временных и амплитудных параметров контрольных точек ЭКГ на контролируемом интервале; построение нормальной ЭКГ по амплитуде и длительности осредненной ЭКГ; выделение текущей ЭКГ по заданному времени; поиск в базе данных «патологического» профиля ЭКГ, наиболее близкого к осредненному по интегралу отклонений с учетом амплитудных и временных пределов осредненной ЭКГ; построение графика отклонений параметров осредненной ЭКГ от норм амплитудных (обозначения начинаются с буквы А) и временных (буква Т) параметров ЭКГ в норме (рисунок).



б –

Рисунок – Результаты сопоставления ЭКГ – профилей по данным программы «ЭКГ_СПАС_СПОРТ»

Профили: сплошной черный – осредненной ЭКГ, пунктирный – фактический профиль, Серый – ЭКГ в норме, серый с точками – «патологический» профиль. Справа показан график отклонений параметров осредненной ЭКГ от нормы

Описанный метод предварительной оценки гемодинамических параметров ориентирован на применение смартфонов, оснащенных элементарными аппаратными средствами снятия ЭКГ I-го отведения. Предоставляемые расчетные данные облегчают контроль функционального состояния спортсменов массовых квалификаций и других пользователей. Авторы не претендуют на клиническое применение данного метода, требующее тщательной верификации и сертификации специалистами.

Исходя из постоянства расчетных параметров гемодинамики, можно предположить, что на этапе покоя у тестируемых спортсменов без признаков аритмии длительность временного интервала пульсограммы изменяется незначительно, как и время прихода отраженной волны и длительность систолической части пульсограммы. Однако при нагружении временные параметры пульсограммы претерпевают значительные изменения, что может вызвать необоснованные скачки значения параметров гемодинамики. Для устранения этих артефактов применяется фильтрация временных параметров пульсограмм на этапах нагрузки и восстановления.

Изменение локальных норм параметров pH и k_{str} на этапах нагрузки и восстановления определяется по формулам

$$pH^{norm} = 7.37 (1 + 0.033 O_{2Dept}^{loc} / (21M));$$

$$k_{str}^{norm} = 1 - f * O_{2Dept}^{loc} / (21M),$$

где величина $21M$ равна норме минутного потребления кислорода, а коэффициент f отражает период тестирования и равен $-0,2$ на этапе нагрузки и 5 на остальных этапах теста.

Для сопоставления результатов тестирования удобно использовать таблицу границ изменения параметров гемодинамики и таблицу величины кислородного долга на этапах нагрузки и восстановления, из которой видно, что кислородный долг к концу теста не ликвидирован и требуется более длительный период для возвращения в исходное (до нагрузочного теста) состояние.

Результаты моделирования в реальном масштабе времени стандартного ЭКГ – тестирования группы студентов приведены в таблице.

Таблица – Результаты расчета параметров теста в реальном масштабе времени

	Студент 1			Студент 2			Студент 3			Студент 4		
	t (s)	F_{cc}	$O_{2=Dept}$	t (s)	F_{cc}	$O_{2=Dept}$	t (s)	F_{cc}	$O_{2=Dept}$	t (s)	F_{cc}	$O_{2=Dept}$
t_{strt}	78	59	0	52	51	0	30	52	0	27	65	0
$F_{cc = min}$	122	36	-563	74	37	-108	42	43	-98	37	46	-10
t_{fin}	123		-570	175		-536	81		-177	169		-24
$F_{cc = max}$	135	86	-547	205	81	-394	130	174	-170	170	195	-21
t_{rst}	209	59		276	51		260	52		392	65	
t_{end}	209	60	-311	305	39	-196	247	65	-32	305	115	-10
L (kJ)	32			20			30			14		
	<i>min</i>	<i>max</i>		<i>min</i>	<i>max</i>		<i>min</i>	<i>max</i>		<i>min</i>	<i>max</i>	
P_{max}	70	189		75	190		99	296		100	301	
P_{min}	73	133		74	133		92	142		92	120	
KIT	17 %	96 %		10 %	97 %		5 %	77 %		11 %	77 %	
V_{sys}	0,02	0,23		0,03	0,27		0,05	0,24		0,06	0,19	
k_d	90 %	103 %		90 %	104 %		90 %	101 %		90 %	98 %	
C_v	4,5	7,2		4,6	7,4		4,2	5,6		4,9	5,8	
pH	6,90	7,34		6,93	7,41		6,97	7,57		7,00	7,59	
η	2,0	7,3		2,0	6,6		2,9	88,0		3,9	7,8	
AV_{O_2}	28 %	73 %		19 %	73 %		5 %	3 %		5 %	73 %	
k_{str}	30 %	323 %		32 %	241 %		51 %	167 %		98 %	107 %	

Комментарии к проведенным тестам:

- упражнение выполнялось с разной скоростью, вследствие чего варьировалась затрачиваемая мощность;
- параметры кислородного долга не связаны с мощностью выполняемой работы;
- имеются существенные различия максимального ЧСС верхнего предела систолического давления;
- различаются пределы изменения параметра кислотного равновесия и связанных параметров (общей вязкости крови, уровня кислородообеспечения). Нижняя граница параметра

близка к критическому значению, однако отрицательное воздействие повышенной кислотности крови ограничено по времени;

– длительность периода восстановления ЧСС и снижение уровня кислородного долга к концу теста значительно различаются.

Заключение. Для объективной эргономической оценки спортивного инвентаря, помимо технических (деформационных, прочностных, трибологических и т. п.) критериев, необходим обобщенный критерий качества (бионический критерий адекватности). В частности, для оценки качества спортивно-беговых лыж предлагается проводить сравнительный мониторинг показателей энергозатрат спортсмена, определяемых в ходе нагрузочно-скоростного тестирования, а именно, прохождения типовой лыжной трассы с использованием различных вариантов лыж.

Предложенная диагностическая методика и мобильный программно-аппаратный комплекс основаны на анализе состояния сердечно-сосудистой системы спортсмена-лыжника по данным окклюзионной тонометрии и электрокардиографии, включая частоту сердечных сокращений до и после нагрузочно-скоростного теста, объем потребляемого кислорода и величину кислородного долга, т. е. показателей, достаточно полно характеризующих энергозатраты. Индивидуальный выбор бионически адекватных лыж конкретным спортсменом осуществляется на основе статистического анализа результатов нагрузочно-скоростного тестирования ряда вариантов лыж в различных условиях прохождения трассы. Расширение контингента участников тестирования и увеличение числа анализируемых биомеханических параметров (например, утомления мышц) позволит дифференцировать выбор спортивного инвентаря пользователями различной квалификации.

Литература

1. Белоцерковский, З.Б. Эргометрические и кардиологические критерии физической работоспособности у спортсменов / З.Б. Белоцерковский. – М. : Советский спорт, 2005. – 319 с.
2. Бондаренко, А.Е. Влияние функционального состояния организма на формирование механизма «срочной» адаптации / А.Е. Бондаренко // Совр. технол. физ. восп. и спорта в практике деятел. физк.-спорт. организаций : сб. научн. тр. Всеросс. н/п конф. и Всеросс. конкурса научн. работ в области физ. культ., спорта и безопасн. жизнедеятельности / Елецкий гос. ун-т им. И.А. Бунина ; под общ. ред. А.А. Шахова. – Елец, 2019. – С. 226–231.
3. Хмельницкая, Ю.К. Моделирование реализации функциональных возможностей лыжников-гонщиков при прохождении лыжных трасс разной сложности / Ю.К. Хмельницкая // Педагогіка, психологія та медикобіологічні пробл. фіз. виховання і спорту. – 2016. – № 4. – С. 42–49.
4. Шилько, С.В. Математическая модель и программная реализация биомеханического мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3. – С. 104–112.
5. Shil'ko, S.V. Hemodynamics of the training process: biomechanical model, diagnostic techniques and their software and hardware implementation / S.V. Shil'ko, Yu.G. Kuzminsky / Акт. пробл. медико-біол. забезп. фіз. культ., спорту та фіз. реабілітації (пам. О.В. Пешкової) : зб. ст. III Міжнар. н/п конф. – Харків : ХДАФК, 2017. – С. 451–457.
6. Gesche, H. Continuous blood pressure measurement by using the pulse transit time: comparison to a cuff-based method / H. Gesche, D. Grosskurth, G. Kuchler, A. Patzak // European Journal of Applied Physiology. – 2012. – Vol. 112, № 1. – P. 309–315.
7. Кузьминский, Ю.Г. Метод диагностики сердечно-сосудистой системы на основе одномерной модели гемодинамики / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько // Информатика. – 2014. – № 4. – С. 25–34.
8. Шульгин, В.И. Измерение артериального давления на основе совместной обработки набора физиологических показателей / В.И. Шульгин [и др.] // Клиническая информатика и телемедицина – 2012. – Т. 8, № 9. – С. 38–44.
9. Golli, S. Cuffless continuous non-invasive blood pressure measurement using pulse transit time measurement [Electronic resource] / S. Golli // Int. Journal of Recent Development in Engineering and Technology. – 2014. – Vol. 2, № 1. – Access mode : www.ijrdet.com. – Date of access : 26.04.2014.
10. Babbs, C.F. Oscillometric measurement of systolic and diastolic blood pressures validated in a physiologic mathematical model [Electronic resource] / C.F. Babbs // BioMedical Engineering Online. – Access mode : <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56>. – Date of access : 26.04.2014.

11. Горшков-Кантакузен, В.А. О биомеханике кровообращения / В.А. Горшков-Кантакузен // Бюллетень науки и практики: Медицинские науки – 2016. – № 6. – С. 65–74.
12. Босенко, А.І. Оцінювання рівня мобілізації функціональних резервів студенток молодших курсів педагогічного університету при дозованих фізичних навантаженнях / А.І. Босенко [и др.] // Педагогіка, психол. та медикобіологічні пробл. фіз. виховання і спорту. – 2013. – № 11. – С. 3–9.
13. Карпман, В.Л. Динамика кровообращения у спортсменов / В.Л. Карпман. – М. : Физкультура и спорт, 1982. – 212 с.
14. Исаков, Р.В. Исследование нейронных сетей в задаче идентификации личности по электрокардиосигналу, зарегистрированному устройством CardioQVARK [Электронный ресурс] / Р.В. Исаков, О.В. Сунцова. – Режим доступа : <http://cardioqvark.ru/science/identification.html>. – Дата доступа : 26.09.2015.
15. Padilla, J.M. Pulse wave velocity and digital volume pulse as indirect estimators of blood pressure: pilot study of healthy volunteers / J.M. Padilla [et al.] // Cardiovascular Engineering. – 2009. – Vol. 9, № 3. – P. 104–112.
16. Головина, Л.Л. Физиологическая характеристика лыжного спорта / Л.Л. Головина. – М. : Физкультура и спорт, 1981. – 186 с.
17. Шилько, С.В. Аппаратная реализация и апробация неинвазивной диагностики гемодинамики на основе тензометрии и расширенной тонометрии / С.В. Шилько, М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1. – С. 39–46.

¹Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого

²Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины

³Гомельский государственный технический университет им. П.О. Сухого

Поступила в редакцию 06.03.2020