

УДК 616.713:616.12-089; 681.3

АППАРАТНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И АПРОБАЦИЯ НЕИНВАЗИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ГЕМОДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ ТЕНЗОМЕТРИИ И РАСШИРЕННОЙ ТОНОМЕТРИИ

Шилько С.В.¹, Кузьминский Ю.Г.¹, Борисенко М.В.²

¹ Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, г. Гомель, Республика Беларусь

² Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель, Республика Беларусь
e-mail: shilko_mpri@mail.ru

Изложены результаты разработки специализированного программно-аппаратного комплекса «СПАС» для биомеханической диагностики сердца и сосудов методом осциллометрии. Дана оценка возможностей реализации аппаратной части на базе тензометрической станции TS-32.

Ключевые слова: диагностика, гемодинамика, осциллометрия, тензометрия, тонометр.

Введение

Как известно, распространение заболеваний сердечно-сосудистой системы (ССС) среди людей трудоспособного возраста значимо влияет на демографическую ситуацию, экономическую и многие другие сферы общественной жизни. К сожалению, сердечно-сосудистые заболевания часто развиваются бессимптомно, не проявляясь клинически. Актуально создание мобильных и недорогих автоматизированных программно-аппаратных комплексов для превентивной диагностики (скрининга) кардиопатологий, способствующей снижению риска серьезных сбоев гемодинамики и даже летальных исходов, зачастую происходящих на рабочем месте или в ходе спортивной деятельности (тренировок, состязаний).

Существующие методы и технические решения для диагностики и мониторинга функционального состояния ССС, основанные на применении электрофизиологических, ультразвуковых, рентгеновских и т.п. методов, реализованы в стационарных и дорогостоящих приборах. Они используются, как правило, в клинической практике и малоприспособны для массовых и регулярных обследований, а также самодиагностики. Вместе с тем, исследования в области физиологии сердечных сокращений выявляют значительные возможности биомеханических методов, в особенности методов тоно-

метрии и осциллометрии [1–11]. В частности, для повышения информативности измерений представляет интерес модификация описанного в работах авторов [9, 10] программно-аппаратного комплекса (ПАК) «СПАС», реализующего классическую тонометрию.

Целью настоящего исследования является расширение диагностических возможностей ПАК «СПАС» на основе совместного использования методов осциллометрии и тонометрии, соответствующей модификации программного обеспечения, а также применения современной тензометрической приборной базы.

Аппаратная реализация

Как показано в работах [9, 10], использование специализированного ПАК «СПАС» позволяет быстро и при минимальных затратах определить большую группу параметров гемодинамики сердца и сосудов. Целесообразно использовать эту разработку для проведения еще более информативной биомеханической диагностики, основанной на анализе пульсовой волны, получаемой методом осциллометрии.

В настоящем исследовании для получения первичной информации производилась регистрация осцилляций давления в манжете полуавтоматического тонометра с последующим преобразованием сигнала при помощи электронных тензометров, широко применяемых в эксперименталь-

ной механике для усиления и нормирования сигналов датчиков деформации. В частности, авторы использовали серийный тонометр *LD-1* и многоканальную тензометрическую станцию (тензостанцию) *TS-32* (Институт прикладной физики НАНБ) со специально модифицированным каналом, позволяющим обрабатывать динамический барометрический сигнал, обеспечивая диагностику сердечно-сосудистой системы в режиме реального времени.

Аппаратная часть экспериментального образца модифицированного комплекса включает следующие функциональные блоки: тонометр *LD-1*; тензостанцию *TS-32*, оснащенную *Bluetooth*; внешний *Bluetooth* ноутбука; драйвер тензостанции и кабель соединения тензостанции непосредственно с манометрическим датчиком тонометра. Измеряемые осцилляции давления преобразуются тензостанцией в цифровой код; данные по *Bluetooth*-интерфейсу с частотой 120 Гц передаются в компьютер, где регистрируются и отображаются драйверной программой тензостанции, а затем переносятся в архивный *EXCEL*-файл для хранения и последующей обработки. Перечисленные блоки допускают миниатюрные аппаратные решения для автономной работы, что важно для применения в спорте и других мобильных приложениях.

Процедура измерения

Источником первичного сигнала является датчик давления, расположенный в окклюзионной манжете полуавтоматического тонометра. В соответствии с методом осциллометрии [2–6, 10] на стадии компрессии в манжете создается давление, при котором происходит окклюзия (закрытие) плечевой артерии. Используемый в полуавтоматическом тонометре алгоритм управления обеспечивает снижение давления (декомпрессию) с постоянной скоростью до величины, достаточной для определения среднединамического артериального давления пациента. При этом в окклюзионной манжете появляются слабые пульсации давления (осцилляции), отражающие гемодинамические процессы в артерии.

Метод осциллометрии обычно подразумевает непосредственное определение среднего гемодинамического давления P_{cp} , при котором амплитуда пульсаций в окклюзионной манжете достигает максимума. Значение систолического давления P_{max} регистрируется в момент резкого увеличения амплитуды пульсаций, а значение

диастолического давления P_{min} – в момент резкого снижения амплитуды. В большинстве методик систолическое давление P_{max} определяется исходя из максимального значения производной функции амплитуд осцилляций по давлению в манжете тонометра, среднее гемодинамическое давление P_{cp} – по нулевому значению производной, а диастолическое давление вычисляется по известным формулам.

На рисунке 1 приведены зависимости амплитуды осцилляций и ее первой производной от давления в манжете в покое и при нагрузочном тестировании физически подготовленного обследуемого (спортсмена). Их сопоставление свидетельствует о значительном изменении состояния сердечно-сосудистой системы обследуемого при нагрузочном тестировании.

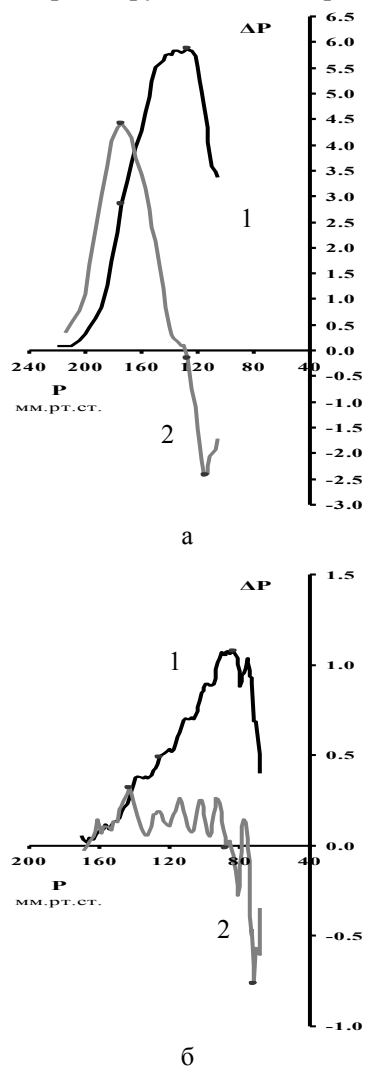


Рисунок 1 – Зависимости амплитуды осцилляции давления ΔP (1) и ее первой производной $d(\Delta P)/dP$ (2) от давления в манжете тонометра в состоянии покоя (а) и при значительной физической нагрузке (б)

Для анализа получаемых осциллометрических данных в разработанном ПАК используется компьютерная программа СПАС 1.0 [12], в которой считывается адресуемая часть вышеназванного архива, выполняется анализ осцилляций давления в манжете и определяются гемодинамические параметры, включая:

- обычные результаты тонометрии: частоту сердечных сокращений F_{cc} , максимальное и минимальное значения артериального давления P_{max} и P_{min} ;

- показатели variability сердечного ритма: вариационный размах VR , модуль Mo , амплитуду моды AMo и показатель $pnn50$, определяющий долю кардиоинтервалов, отличающихся по длительности от предшествующего интервала, более чем на установленную величину;

- показатель KIT , определяющий продолжительность диастолической части кардиоинтервала по отношению к его общей длительности;

- скорость распространения пульсовой волны C_v и толщину интим-медиа сосудов TIM ;

- параметры, найденные исходя из опубликованных в [6] статистических зависимостей, а именно, вязкость крови η , содержание гемоглобина Hb и объем сердечного выброса V_{sys} .

Важное диагностическое расширение классической тонометрии, обеспечиваемое в данной разработке, заключается в построении профиля давлений выделенного кардиоинтервала при заданном значении давления в манжете. Кроме того, авторы дополнили приведенный в работе [1] альбом контрольных нормотонических и гипертонических кардиопрофилей профилями, типичными для ряда заболеваний (диабет, атеросклероз, аортальный стеноз, аортальная регургитация, сердечная недостаточность), оказывающих существенное влияние на гемодинамику. Это позволяет автоматизировать этап сопоставления кардиопрофиля обследуемого с контрольными профилями для различных кардиопатологий и функциональных отклонений, выполняемый в настоящее время непосредственно врачом с той или иной степенью субъективности.

Так как уровень амплитуды осцилляций зависит от систолического давления, при сопоставлении кардиопрофиля пациента с контрольным кардиопрофилем в ПАК «СПАС» выполняется масштабирование последнего и вычисляется интеграл площади отклонения. Необходимо отметить, что профили кардиоинтервалов при давлении в манжете, существенно меньшем P_{max} , оказываются малоинформативными, так

как публикуемые контрольные профили кардиоинтервалов соответствуют давлению P_{max} .

Объединение ПАК «СПАС» с программным модулем «БИОДИС» [13], реализованное в комплексе «БИОСПАС», обеспечивает дополнительные возможности, включая расширение диагностического списка с 3 до 9 независимых гемодинамических показателей. В этом случае в программу «БИОДИС» из программы «СПАС» передаются следующие данные (рисунок 2): частота сердечных сокращений F_{cc} , диастолическое P_{min} и систолическое давление P_{max} , скорость пульсовой волны C_v , показатель KIT и содержание гемоглобина Hb .

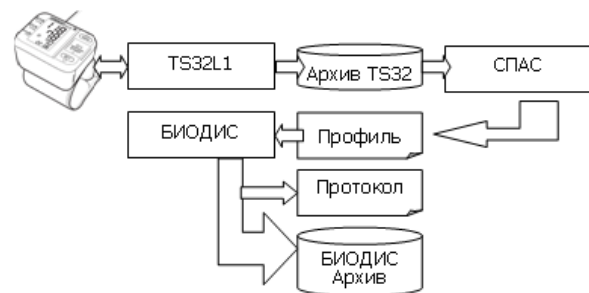


Рисунок 2 – Передача данных в программно-аппаратном средстве «БИОСПАС» с дополнительным подключением программы «БИОДИС»

К числу информативных параметров, определяемых в программе «БИОДИС», относятся коэффициент деформации сосудов и модуль упругости ткани стенок сосудов, влияющие на скорость пульсовой волны. Для проверки расчетных значений указанных параметров в программе «СПАС» вычисляется толщина стенок артерий, которая может быть определена методом ангиографии и другими экспериментальными методами. При отсутствии взаимодействия программ «СПАС» и «БИОДИС» последняя программа имеет интерфейс замещения импортируемых данных в ручном режиме (в настоящее время встроенный архив «БИОДИС» содержит результаты более 2000 расчетов).

В соответствии с [11] алгоритм программы «БИОДИС» формализует решение следующей задачи нелинейного программирования: найти $Y \equiv \{V_m, pH, Hb, k_\eta, E_v, k_{sv}, k_d, P_{max}, P_{min}\}$ в области их допустимых значений по входным данным $X \equiv \{A, H, M, L, F_{cc}, P_{max}^o, P_{min}^o\}$ с критерием точности по значениям артериального давления $|P_{max} - P_{max}^o| + |P_{min} - P_{min}^o| \leq \Delta_p$. При минимизации невязок значений искоемых параметров и их норм

Средства измерений

используются адаптационные параметры $K_{opt} \equiv \{\Delta_P, m_{Hb}, m_{pH}, m_{\eta}, m_{str}, m_{sys}, m_E, S_{pH}, S_{Hb}, S_E, S_{str}, S_{\eta}, S_d\}$

весовых коэффициентов m_{xx} , пределов изменения искомых параметров S_{xx} и гемодинамические нормы:

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

Упомянутые адаптационные параметры уточнялись путем верификации модели по результатам 4000 расчетов.

Приведем характеристики программно-аппаратного средства «СПАС» в предлагаемом комбинированном варианте:

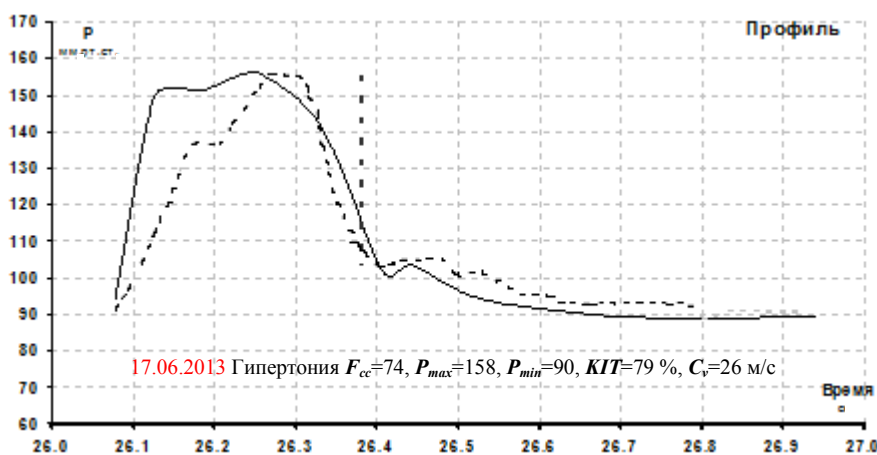
- число точек каждого профиля кардиоинтервала – 30...60;
- средняя скорость снижения давления в тонометре – 3 мм рт. ст./с;

– отклонение значений давлений серийного тонометра LD-1 и давлений, определенных в «СПАС», не более чем на 5 мм рт. ст., что составляет 3–7 % и соответствует тонометрической точности измерений [3].

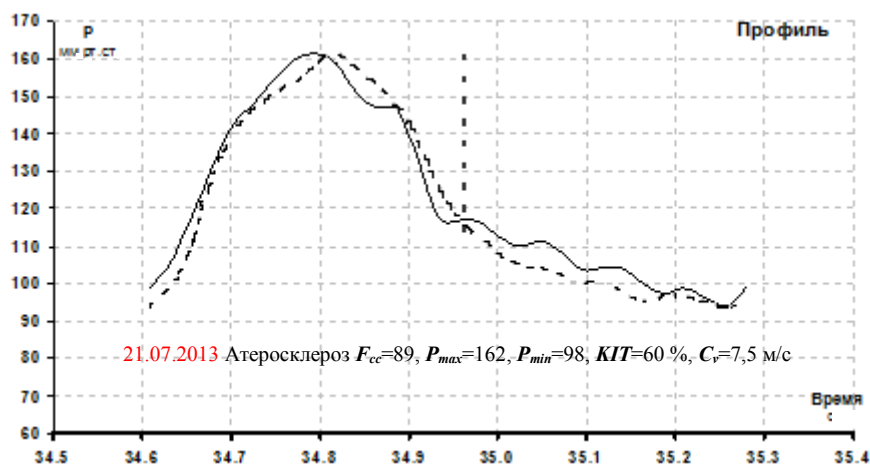
Так как в микроконтроллере тонометра и в программе «СПАС» производится обработка данных, получаемых с одного датчика давления, различия в результатах объясняются применением различных алгоритмов обработки данных и анализа.

Апробация программно-аппаратного комплекса «БИОСПАС»

Пример 1. На рисунке 3 приведены выборочные данные о гемодинамическом состоянии пациента с диагнозом «гипертония» в возрасте 65 лет в различные моменты амбулаторного лечения в Гомельской областной поликлинике под контролем кардиолога.



а



б

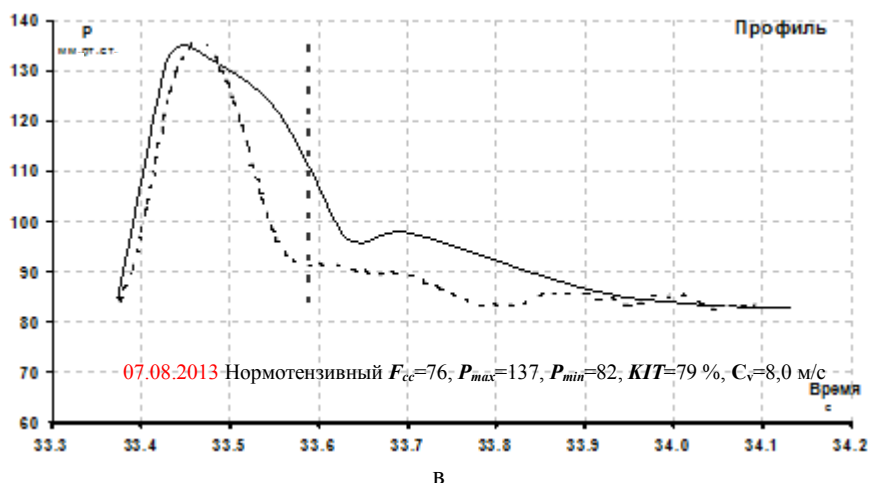


Рисунок 3 – Гемодинамические профили пациента (сплошные линии) в сравнении с профилями, типичными для гипертонии (а), атеросклероза (б) и возрастного нормотензивного состояния (в), показанными пунктирными линиями

Пример 2 относится к регулярному мониторингу состояния сердечно-сосудистой системы студентов БелГУТа в специально подобранных группах. Группа К1 состояла из 18 юношей 19–22 лет, признанных здоровыми и прошедших тщательное медицинское обследование, включавшее ЭКГ, УЗИ сердца и тестирование с дозированными нагрузками. Группа

К2 состояла из 18 юношей и девушек 18–20 лет, имевших особенности функционирования сердечно-сосудистой системы, но занимавшихся в группах общей физической подготовки. Помимо расширенной осциллометрии в состоянии покоя и расчета параметров гемодинамики, процедуры мониторинга включали функциональные пробы (нагрузочные тесты).

Таблица 1

Результаты нагрузочного тестирования группы студентов К1

Параметр	Значение		
	В покое	Сразу после нагрузки	После 3 мин восстановления
F_{cc}	64	83	67
P_{max}	122	141	123
P_{min}	73	80	71
KIT	73 %	67 %	74 %
$pnn50$	31 %	42 %	28 %
C_v	6,9	7,6	7,2
η	4,0	2,5	3,9
Hb	135	133	133
V_{sys}	0,075	0,136	0,069
TIM	0,65	0,70	0,68
E_c	0,067	0,171	0,065
k_d	100 %	100 %	100 %
E	15	18	16
R_p	48	38	45
pH	7,29	7,20	7,29
k_{str}	99 %	65 %	97 %
AVO_2	37 %	52 %	37 %
F_o	71 %	77 %	69 %
D_{sys}	29	32	28

В результате анализа состояния сердечно-сосудистой системы обследуемых из группы К1 можно заметить, что профили кардиоинтервалов в основном соответствуют нормотензии молодого человека.

Значения параметров гемодинамики индивидуальны, но все они попадают в диапазон референсных значений для рассматриваемой возрастной группы. Полученные значения (таблица 1) были сопоставлены с литературными данными. В результате была получена зависимость скорости распространения пульсовой волны (СРПВ) от среднего артериального давления $СРПВ = 2,31 + 0,0473 \cdot P_{ср}$, соответствующая табличным нормам для взрослых моложе 30 лет.

Характеристики гемодинамики студентов группы К2 в 45 % случаев содержали одно или более отклонений от нормы (таблица 2) и этим студентам было рекомендовано углубленное обследование.

Пример 3. Использование комплекса «БИОСПАС» в практике спортивных тренировок

по данным 4 измерений (покой, 30 приседаний за 30 с, восстановление через 3 и 5 мин) показано в таблице 3 на примере диагностики баскетболиста 1-го разряда, 1995 г. р., имеющего рост 195 см и массу тела 80 кг.

В результате проведенного исследования гемодинамики физкультурников и спортсменов можно заметить, что профили кардиоинтервалов в группе тестируемых в основном относятся к нормотензии. Изменения параметров гемодинамики индивидуальны, но имеют общие тенденции:

- функциональная нагрузка приводит к снижению индексов *KIT*, *pnn50*, вязкости крови и содержания гемоглобина;

- увеличение частоты сердечных сокращений при физической нагрузке происходит за счет уменьшения диастолического периода;

- кардио профили части обследуемых в период нагрузки оказались близки к контрольным профилям, соответствующим сердечной и аортальной недостаточности, а также атеросклерозу сосудов.

Таблица 2

Кардио профили студентов группы К2 с особенностями гемодинамики

	Тип кардио профиля		
	В покое	Сразу после нагрузки	После 3 минут восстановления
В-в Н.П.	<i>HF</i>	<i>ASC</i>	<i>NORMj</i>
Б-й С.М.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
В-а А.Н.	<i>HF</i>	<i>DP</i>	<i>NORMj</i>
Г-о В.Н.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>
Д-н В.И.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
К-в С.В.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>
К-м С.О.	<i>NORMj</i>	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>
М-а О.М.	<i>HF</i>	<i>NORMj</i>	<i>NORMe</i>

Примечание: *ASC* – атеросклероз, *HF* – сердечная недостаточность, *DP* – двойной пульс.

Таблица 3

Результаты диагностики гемодинамических показателей спортсмена-баскетболиста

Баскетбол-1 1995/184/80	F_{cc} уд/с	P_{max} мм рт.ст.	P_{min}	<i>KIT</i> %	<i>pnn50</i> %	C_v м/с	<i>Hb</i> г/л	η сСт
Покой	88	125	80	74	2	7,1	150	4,2
30 приседаний / 30 с	133	159	62	62	2	24,7	110	3,5
Восстановление 3 мин	118	154	56	59	0	12,4	126	3,7
Восстановление 5 мин	119	128	51	58	2	20,1	105	3,4

Заключение

1. Предложена новая техническая реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы в виде программно-аппаратного комплекса «БИОСПАС», основанная на объединении методов осциллометрии и классической тонометрии.

2. Применение ПАК «БИОСПАС» позволяет реализовать процедуру диагностики в режиме реального времени, расширить диагностический список с 3 до 9 независимых гемодинамических показателей, получить информативные графические зависимости в виде кардиопрофилей и автоматизировать процедуру их сопоставления с контрольными формами, характерными для нормального и патологических состояний сердечно-сосудистой системы.

3. Тестирование программы обработки осциллометрических данных ПАК «БИОСПАС» показало, что значения артериальных давлений P_{max}/P_{min} отличаются от аналогичных показателей сертифицированного тонометра на величину, сопоставимую с погрешностью тонометра (3–7 %).

4. Целесообразна разработка миниатюрных и мобильных аппаратных решений диагностического комплекса для автономной работы в режиме мониторинга.

Список использованных источников

1. *Skinner, S.L.* SphygmoCor Clinical Guide. At the Heart of Cardiovascular Management / S.L. Skinner. – Australia [Электронный ресурс]. – 2001. – Р. 78. Режим доступа: www.artcormedical.com. – Дата доступа: 02.02.2013.
2. *Дегтярев, В.А.* Возможности комплексного исследования системы кровообращения у населения методом объемной компрессионной осциллометрии / В.А. Дегтярев // Российские медицинские вести. – 2003. – № 4. – С. 18–28.
3. *Иванов, С.Ю.* Точность измерения артериального давления по тонам Короткова в сравнении с осциллометрическим методом / С.Ю. Иванов, Н.И. Лившиц // Вестник аритмологии. – 2005. – № 40. – С. 55–58.
4. *Цупко, И.В.* Способ определения артериального давления, параметров гемодинамики и состояния сосудистой стенки с использованием осциллометрии высокого разрешения / И.В. Цупко // Патент RU 2360596. – 2006. – С. 1–12.
5. *Парашин, В.Б.* Техничко-метрологические аспекты измерения артериального давления осциллометрическим методом / В.Б. Парашин, М.Н. Симоненко // Медицинская техника. – 2010. – № 1. – С. 22–26.
6. *Babbs, C.F.* Oscillometric Measurement of Systolic and Diastolic Blood Pressures Validated in a Physiologic Mathematical Model / C.F. Babbs // BioMedical Engineering OnLine. – 2012. – <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56>.
7. *Gallagher, A.J.* Blood Gas, Oxygen Saturation, pH, and Lactate Values in Elasmobranch Blood Measured with a Commercially Available Portable Clinical Analyzer and Standard Laboratory Instruments / A.J. Gallagher // J. of Aquatic Animal Health. – 2010. – Vol. 22. – P. 229–234.
8. *Парфенов, А.С.* Ранняя диагностика сердечно-сосудистых заболеваний с использованием аппаратно-программного комплекса «Ангиоскан-01» / А.С. Парфенов // Поликлиника. – 2012. – № 2/1. – С. 70–74.
9. *Шилько, С.В.* Программно-аппаратный комплекс для мониторинга сердечно-сосудистой системы на основе тонометрии / С.В. Шилько, В.В. Шевцов // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2(3). – С. 53–60.
10. *Шевцов, В.В.* Аппаратная реализация биомеханической диагностики сердечно-сосудистой системы по данным осциллометрии / В.В. Шевцов, С.В. Шилько, М.В. Борисенко, Ю.Г. Кузьминский // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 2(5). – С. 51–55.
11. *Шилько С.В.* Математическая модель и программная реализация мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, М.В. Борисенко // Проблемы физики, математики и техники. – 2011. – № 3. – С. 104–112.
12. Свидетельство № 456 от 21.11.2012 о регистрации программного продукта СПАС V1.0 для биомеханической диагностики и мониторинга сердечно-сосудистой системы / С.В. Шилько, Ю.Г. Кузьминский, В.В. Шевцов // Заявка № С201210072 от 27.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтэл. уласнасці. – 2012.
13. Свидетельство № 455 от 21.11.2012 о регистрации компьютерной программы БИОДИС V2.5 / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько // Заявка С20120073 от 23.09.2012 // Реестр зарег. комп. программ / Нац. центр інтелектуал. уласнасці. – 2012.

APPARATUS REALIZATION AND APPROVAL OF NON-INVASIVE DIAGNOSTICS OF HEMODYNAMICS BASED ON TENSOMETRY AND EXTENDED TONOMETRY

Shil'ko S.V.¹, Kuzminsky Yu.G.¹, Borisenko M.V.²

¹V.A. Belyi Metal Polymer Research Institute of the National Academy of Science of Belarus,
Gomel, Belarus

²Byelorussian State University of Transport, Gomel, Belarus
e-mail: shilko_mpri@mail.ru

Abstract. The results of development of special program and apparatus unit «SPAS» for biomechanical diagnostics of cardiovascular system by oscillometry method have been presented. The estimation of possibilities of apparatus realization based on tensometric station TS-32 is been given.

Keywords: diagnostics, hemodynamics, oscillometry, tensometry, tonometer.

References

1. Skinner S.L. SphygmoCor Clinical Guide. [At the Heart of Cardiovascular Management], 2001, p. 78: Available at: www.artcormedical.com: accessed 02.02.2013.
2. Degtyarev V.A. [Possibility of a comprehensive study of the circulatory system of the population by volumetric compression oscillometry]. *Rossijskie meditsinskie vesti*, 2003, no. 4, pp. 18–28 (in Russian).
3. Ivanov S.Yu., Livshits N.I. [The accuracy of blood pressure measurement on Korotkov's tones compared with oscillometric method]. *Vestnik aritmologii*, 2005, no. 40, pp. 55–58 (in Russian).
4. Tsupko I.V. *Sposob opredeleniya arterial'nogo davleniya, parametrov gemodinamiki i sostoyaniya sosudistoj stenki s ispol'zovaniem ostsilometrii vysokogo razresheniya* [A method for determination of blood pressure, hemodynamic parameters and the condition of the vascular wall using high resolution oscillometry]. Patent RF, no. 2360596, 2006.
5. Parashin V.B., Simonenko M.N. [Technical and metrological aspects of blood pressure measurement by the oscillometric method]. *Meditsinskaya tekhnika*, 2010, no. 1, pp. 22–26 (in Russian).
6. Babbs C.F. Oscillometric Measurement of Systolic and Diastolic Blood Pressures Validated in a Physiologic Mathematical Model. *BioMedical Engineering OnLine*. Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/56> (accessed 23.09.2014).
7. Gallagher A.J. Blood Gas, Oxygen Saturation, pH, and Lactate Values in Elasmobranch Blood Measured with a Commercially Available Portable Clinical Analyzer and Standard Laboratory Instruments // *J. of Aquatic Animal Health*, 2010, vol. 22, pp. 229–234.
8. Parfenov A.S. [Early diagnosis of cardiovascular disease with the use of hardware-software complex «Angioscan-01»]. *Poliklinika*, 2012, no. 2/1, pp. 70–74 (in Russian).
9. Shil'ko S.V., Shevtsov V.V. [Hardware and software system for monitoring the cardiovascular system based on tonometry]. *Pribory i metody izmerenij*, 2012, no. 2(3), pp. 53–60 (in Russian).
10. Shevtsov V.V., Shil'ko S.V., Borisenko M.B., Kuzminsky Yu.G. [Hardware implementation of biomechanical diagnosis of cardiovascular system according to the oscillometry]. *Pribory i metody izmerenij*, 2012, no. 2(5), pp. 51–55 (in Russian).
11. Shil'ko S.V., Kuzminsky Yu.G., Borisenko M.B. [Mathematical model and program realization of heart and vessel system monitoring]. *Problemy fiziki, matematiki i tekhniki*, 2011, no. 3, pp. 104–112 (in Russian).
12. Shil'ko S.V., Kuzminsky Yu.G., Shevtsov V.V. *Svidetel'stvo o registratsii programmnogo produkta SPAS V1.0 dlia biomekhanicheskoy diagnostiki i monitoringa serdechno-sosudistoj sistemy* [Certificate on the registration software SPAS V1.0 for biomechanical diagnosis and monitoring of cardiovascular system]. Certificate RB, no. 456, 2012.
13. Kuzminsky Yu.G., Shil'ko S.V. *Svidetel'stvo o registratsii komp'yuternoj programmy BIODIS V2.5* [Certificate of registration of a computer program BIODIS V2.5]. Certificate RB, no. 455, 2012.

Поступила в редакцию 11.02.2014.