



УДК 53.043,577.38

## Оценка величины обратного кровотока в артерии по второй производной пульсовой волны давления

Р. Т. Баатыров, М. Ю. Калинин, А. Д. Усанов,  
С. Ю. Добдин, Ан. В. Скрипаль



Баатыров Рахим Таалайбекович, аспирант кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, rahim\_baatyrov@mail.ru

Калинин Михаил Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kalinkinmyu@mail.ru

Усанов Андрей Дмитриевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры медицинской физики, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, aka\_norton@mail.ru

Добдин Сергей Юрьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, dobdinsy@info.sgu.ru

Скрипаль Анатолий Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики твёрдого тела, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, skripalav@info.sgu.ru

Приведены результаты моделирования формы пульсовой волны давления в двухэлементной модели виндкесселя. Диастолический участок пульсовой волны чаще всего анализировался ранее как результат отражения прямой волны от элементов периферических сосудов. Однако измерения отрицательной линейной скорости кровотока по ультразвуковым доплерограммам однозначно свидетельствуют о наличии обратного кровотока в артериях. Проведен расчет второй производной пульсовой волны давления с учетом возникающих в артериях прямого и обратного кровотока при различных величинах обратного кровотока. Получена линейная зависимость второй производной пульсовой волны на диастолическом участке от величины объема крови обратной волны. Сделан вывод о том, что вторая производная пульсовой волны давления может быть использована для определения величины обратного кровотока в артерии, который, в свою очередь, зависит от состояния периферической сосудистой системы.

**Ключевые слова:** пульсовая волна, вторая производная, объемный кровоток, артериальные сосуды, модель виндкесселя, периферическое сопротивление.

Поступила в редакцию: 14.05.2020 / Принята: 27.07.2020 /  
Опубликована: 31.08.2020

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-178-182>

### Введение

Как известно, величина обратного кровотока может служить критерием состояния периферической сосудистой системы [1–3]. Для оценки состояния периферических сосудов наиболее важным является участок диастолы на пульсовой волне. Немонотонность на этом участке, по мнению авторов ряда работ [4–6], обусловлена обратным кровотоком, который определяет амплитуду диастолического пика пульсовой волны.

Для определения взаимосвязи немонотонности на диастолическом участке пульсовой волны плечевой артерии с величиной обратного кровотока нами предлагается использовать вторую производную пульсовой волны давления диастолы.

Ранее в ряде работ [7–10] описано применение метода анализа пульсовой волны по величине второй производной. В работе [7] предлагается использовать вторую производную для диагностирования клапанного стеноза аорты. Авторы работы [8] сравнивали скорость пульсовой волны и вторую производную пальцевой фотоплетизмограммы у больных артериальной гипертензией. Установлено, что у пациентов с артериальной гипертензией эти параметры дают различную информацию о свойствах артерий в центральных и периферических участках. В работах [9, 10] вторую производную пульсовой волны предлагается использовать как индикатор артериальной жесткости на систолическом участке пульсовой волны. Ранее нами было показано, что вторая производная пульсовой волны на диастолическом участке может свидетельствовать о дисфункции эндотелиальной системы [11], ремоделировании сосудистой системы спортсменов, занимающихся циклическими видами спорта [12], и служить критерием риска развития коллапсоидной реакции [13].

В связи с этим цель работы – установить взаимосвязь второй производной пульсовой волны давления с величиной обратного кровотока в артериальном русле.



### Моделирование пульсовой волны давления

Нами проведено моделирование пульсовой волны давления на основе двухэлементной модели виндкесселя [14, 15]. Согласно модели Франка упругого резервуара (двухэлементной модели виндкесселя) зависимость артериального давления  $P_{sa}(t)$  в крупных артериях определяется уравнением:

$$\frac{d}{dt} P_{sa}(t) = \frac{1}{C_{sa}} \cdot (Q_L(t) - \frac{P_{sa}(t)}{R_s}), \quad (1)$$

где  $Q_L(t)$  – объемная скорость кровотока в ар-

терии,  $R_s$  – гидростатическое сопротивление периферических сосудов,  $C_{sa} = dV_{sa}/dP_{sa}$  – эластичность артерий, равная отношению изменения общего объема сосудов  $V_{sa}$  к изменению давления в них.

Объемная скорость кровотока  $Q_{LA}(t)$  в прямой волне может быть приближенно описана бигармонической функцией с максимальной скоростью кровотока  $Q_{max}$ , временем максимальной скорости кровотока  $T_{max}$ , длительностью систолы  $T_s$  и временем кардицикла  $T$ :

$$Q_{LA}(t) = \begin{cases} \frac{1}{2} Q_{max} \left[ \sin \frac{\pi(t - \frac{T_{max}}{2})}{T_{max}} + 1 \right], & 0 < t < T_{max}, \\ \frac{1}{2} Q_{max} \left[ \cos \frac{\pi(t - T_{max})}{T_s - T_{max}} + 1 \right], & T_{max} < t < T_s, \\ 0, & T_s < t < T. \end{cases} \quad (2)$$

Для моделирования обратной волны объемная скорость кровотока в обратной волне задавалась в виде:

$$Q_{Lf}(t) = R_f \cdot Q_{LA}(t - t_d), \quad (3)$$

где  $R_f$  – амплитудный коэффициент обратной волны, зависящий от тонууса периферической системы. Полная объемная скорость кровотока вычислялась как сумма прямой и обратной волн, причем обратная волна появляется с задержкой относительно прямой со временем задержки  $t_d$ :

$$Q_L(t) = Q_{LA}(t) + Q_{Lf}(t). \quad (4)$$

На рис. 1 приведен вид задаваемой зависимости объемной скорости кровотока  $Q_L(t)$  при следующих параметрах:  $T_{max} = 0.09$  с;

$T_s = 0.33$  с;  $t_d = 0.35$  с,  $T = 0.80$  с;  $Q_{max} = 0.37$  л/с;  $C_{sa} = 1.0 \cdot 10^{-3}$  л/мм рт. ст.,  $R_s = 870$  мм рт. ст./л/с,  $R_f = 0.30$ . Параметры, используемые для расчета объемного кровотока  $Q_L(t)$ , а также величина коэффициента обратной волны и время задержки обратной волны выбирались на основе анализа скорости распространения пульсовой волны у 15 здоровых добровольцев (средний возраст 24.4 года, SD 3.0 года; средний рост 168.6 см, SD 8.0 см; средний вес 64.0 кг, SD 9.1 кг), приведенных в работах [15, 16].

Численное решение уравнения (1) осуществляли методом Эйлера с использованием рекуррентного соотношения

$$P_{sa}(t + \Delta t) = \frac{P_{sa}(t) + \frac{\Delta t \cdot Q_L(t)}{C_{sa}}}{1 + \frac{\Delta t}{R_s C_{sa}}}, \quad (5)$$

где  $\Delta t$  – шаг по времени. Результаты расчета артериального давления  $P_{sa}(t)$  при  $\Delta t = 6.25 \cdot 10^{-3}$  с представлены на рис. 2.

### Расчет второй производной пульсовой волны

После нормировки на единицу величины  $P_{sa}$  вычислялась вторая производная на катакроте пульсовой волны давления (5) следующего вида:

$$P_3 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{d^2}{dt^2} [P_{sa}^i(t)] \right|, \quad (6)$$

где  $N$  – количество точек пульсовой волны, в которых вычислялась вторая производная по

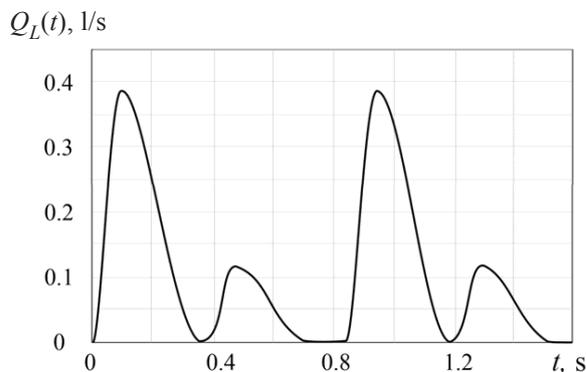


Рис. 1. Зависимость объемной скорости кровотока  $Q_L(t)$  за период кардицикла как сумма прямой и обратной волн  
Fig. 1. Dependence of the blood flow velocity  $Q_L(t)$  over the period of the cardiocycle, as the sum of forward and reverse waves

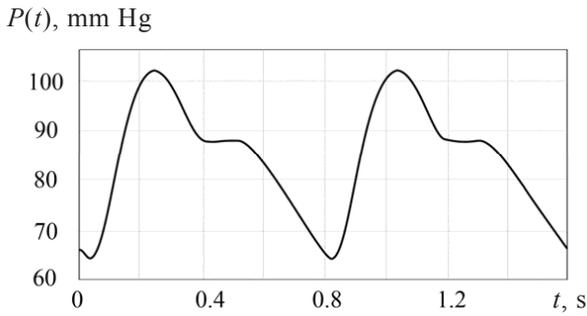


Рис. 2. Зависимость артериального давления  $P_{sa}(t)$  от времени за период сердечного цикла для представленной на рис. 1 скорости кровотока  $Q_L(t)$

Fig. 2. Dependence of the blood pressure  $P_{sa}(t)$  on time during the cardiocycle for the blood flow velocity  $Q_L(t)$  presented in Fig. 1

времени ( $N = 94$ ). Интервал  $\Delta t$  соответствовал продолжительности катакроты, деленной на количество точек  $N$ .

На рис. 3 приведена зависимость параметра  $P_3$ , характеризующего кривизну пульсовой волны, от отношения максимальной объемной скорости кровотока в обратной волне к максимальной объемной скорости кровотока в прямой волне  $Q_{Lfmax} / Q_{LAmax}$ .

Из рис. 3 следует, что наблюдается линейная зависимость второй производной пульсовой волны давления  $P_3$  от величины объема крови обратной волны.

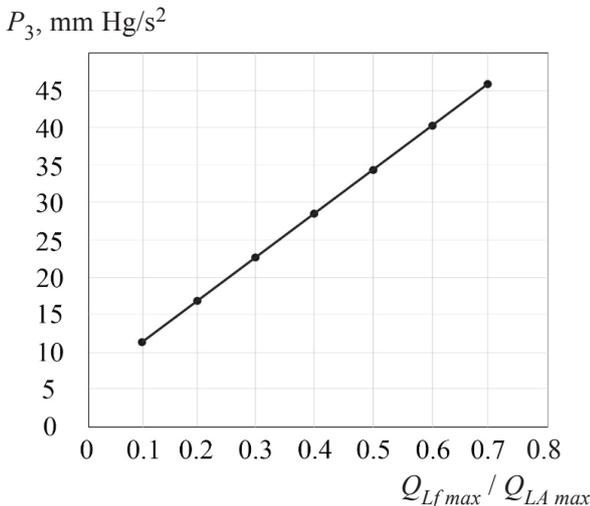


Рис. 3. Зависимость второй производной пульсовой волны давления  $P_3$  от отношения максимальной объемной скорости кровотока в обратной волне к максимальной объемной скорости кровотока в прямой волне  $Q_{Lfmax} / Q_{LAmax}$

Fig. 3. Dependence of the second derivative of the pulse pressure wave  $P_3$  on the ratio of the maximum blood flow velocity in the reverse wave to the maximum blood flow velocity in the forward wave  $Q_{Lfmax} / Q_{LAmax}$

Следует отметить, что используемая модель пульсовой волны давления содержит упрощения, в частности, связанные с исключением из рассмотрения важных элементов регуляции сердечно-сосудистой системы и процесса дыхания. Учет таких дополнительных элементов усложняет динамику модели, делает ее нерегулярной [17, 18]. Это может привести к некоторому изменению формы зависимости  $P_3$  от  $Q_{Lfmax} / Q_{LAmax}$ . В предположении, что обратная волна формируется в тех же условиях, что и прямая волна, линейный характер этой зависимости должен оставаться неизменным.

### Выводы

Диастолический участок пульсовой волны чаще всего анализировался ранее как результат отражения прямой волны от элементов периферических сосудов. Однако измерения отрицательной линейной скорости кровотока по ультразвуковым доплерограммам однозначно свидетельствуют о наличии обратного кровотока в артериях.

Проведенный расчет был основан на усредненных значениях параметров кровотока, приведенных для здорового обследуемого в [2, 14, 15]. Использовалась двухэлементная модель виндкесселя с предположением суммарного объемного кровотока, являющегося результатом сложения возникающих в артериях прямого и обратного кровотока. Получена линейная зависимость второй производной пульсовой волны на диастолическом участке от величины объема крови обратной волны.

Таким образом, вторая производная пульсовой волны давления может быть использована для оценки величины обратного кровотока, который, в свою очередь, зависит от состояния периферической сосудистой системы.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-32-90072).

### Список литературы

1. Zhao E., Barber J., Burch M., Unthank J., Arciero J. Modeling acute blood flow responses to a major arterial occlusion // *Microcirculation*. 2020. Vol. 27, iss. 4. P. e12610. DOI: 10.1111/micc.12610
2. Hwang J. Y. Doppler ultrasonography of the lower extremity arteries : anatomy and scanning guidelines // *Ultrasonography*. 2017. Vol. 36, № 2. P. 111–119.



3. *Жирнова О. А., Берестень Н. Ф., Пестовская О. Р., Богданова Е. Я.* Неинвазивная диагностика нарушения эластических свойств артериальных сосудов // *Ангиология*. 2011. № 1. С. 27–42.
4. *Калакутский Л. И., Федотов А. А.* Диагностика дисфункции сосудистого эндотелия методом контурного анализа пульсовой волны // *Изв. ЮФУ. Техн. науки*. 2009. Т. 98, № 9. С. 93–98.
5. *Иванов С. В., Рябиков А. Н., Малютин С. К.* Жесткость сосудистой стенки отражение пульсовой волны в связи с артериальной гипертензией // *Бюл. СО РАМН*. 2008. Т. 131, № 3. С. 9–12.
6. *Фролов А. В., Сидоренко Г. И., Воробьев А. П., Мельникова О. П., Гуль Л. М.* Прямая и отраженная пульсовые волны: методы исследования // *Кардиология в Беларуси*. 2009. № 5. С. 99–108.
7. *Mason D. T., Braunwald E., Ross J. Jr., Morrow A. G.* Diagnostic value of the first and second derivatives of the arterial pressure pulse in aortic valve disease and in hypertrophic subaortic stenosis // *Circulation*. 1964. Vol. 30, iss. 1. P. 90–100. DOI:10.1161/01.CIR.30.1.90
8. *Hashimoto J., Chonan K., Aoki Y., Nishimura T., Ohkubo T., Hozawa A., Suzuki M., Matsubara M., Michimata M., Araki T., Imai Y.* Pulse wave velocity and the second derivative of the finger photoplethysmogram in treated hypertensive patients : their relationship and associating factors // *Journal of Hypertension*. 2002. Vol. 20, iss. 12. P. 2415–2422. DOI: 10.1097/00004872-200212000-00021
9. *Inoue N., Kawakami H., Yamamoto H., Ito Ch., Fujiwara S., Sasaki H., Kihara Y.* Second derivative of the finger photoplethysmogram and cardiovascular mortality in middle-aged and elderly Japanese women // *Hypertension Research*. 2017. Vol. 40, iss. 2. P. 207–211. DOI: 10.1038/hr.2016.123
10. *Munir S., Guilcher A., Kamalesh T., Clapp B., Redwood S., Marber M., Chowienzyk P.* Peripheral augmentation index defines the relationship between central and peripheral pulse pressure // *Hypertension*. 2008. Vol. 51, iss. 1. P. 112–118. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.107.096016
11. *Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Бриленок Н. Б., Добдин С. Ю., Аверьянов А. П., Бахметьев А. С., Баатыров Р. Т.* Функциональная диагностика состояния артериальных сосудов по форме пульсовой волны и аппаратура для ее реализации // *Медицинская техника*. 2020. Т. 54, № 1. С. 29–32.
12. *Usanov D. A., Skripal A. V., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Averianov A. P., Bakhmetev A. S., Baatyrov R. T.* Diagnostics of functional state of endothelium in athletes by the pulse wave // *Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019)*. 2019. Vol. 1028. P. 176–184. DOI: 10.1007/978-3-030-35048-2\_21
13. *Усанов Д. А., Протопопов А. А., Скрипаль А. В., Аверьянов А. П., Репин В. Ф., Рытик А. П., Вагарин А. Ю., Кузнецов М. А., Петрова М. Г.* Диагностика риска развития коллапсоидных осложнений в группе студентов с аномальной сердечно-сосудистой реакцией // *Саратовский научно-медицинский журнал*. 2010. Т. 6, № 3. С. 615–619.
14. *Westerhof N., Lankhaar J., Westerhof B. E.* The arterial Windkessel // *Med. Biol. Eng. Comput.* 2009. Vol. 47, iss. 2. P. 131–141. DOI: 10.1007/s11517-008-0359-2
15. *Hoppensteadt F. C., Peskin Ch.* Modeling and Simulation in Medicine and the Life Sciences. N. Y. : Springer-Verlag, 2002. 355 p.
16. *Baruch M. C., Warburton D. ER., Bredin S. SD., Cote A., Gerdt D. W., Adkins C. M.* Pulse decomposition analysis of the digital arterial pulse during hemorrhage simulation // *Nonlinear Biomed. Phys.* 2011. Vol. 5, № 1. P. 1–15.
17. *Magosso E., Cavalcanti S., Ursino M.* Theoretical analysis of rest and exercise hemodynamics in patients with total cavopulmonary connection // *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* 2002. Vol. 282. P. H1018–H1034.
18. *Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R., Prokhorov M. D.* Autonomic control is a source of dynamical chaos in the cardiovascular system // *CHAOS*. 2019. Vol. 29. P. 121101.

#### Образец для цитирования:

Баатыров Р. Т., Калинин М. Ю., Усанов А. Д., Добдин С. Ю., Скрипаль Ан. В. Оценка величины обратного кровотока в артерии по второй производной пульсовой волны давления // *Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика*. 2020. Т. 20, вып. 3. С. 178–182. DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-178-182>

#### Estimation of the Value of Reverse Blood Flow in the Artery by the Second Derivative of the Pulse Pressure Wave

R. T. Baatyrov, M. Yu. Kalinkin, A. D. Usanov, S. Yu. Dobdin, An. V. Skripal

Rahim T. Baatyrov, <https://orcid.org/0000-0001-6747-7119>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [rahim\\_baatyrov@mail.ru](mailto:rahim_baatyrov@mail.ru)

Mihail Yu. Kalinkin, <https://orcid.org/0000-0002-3613-7290>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [kalinkinmyu@mail.ru](mailto:kalinkinmyu@mail.ru)

Andrey D. Usanov, <https://orcid.org/0000-0002-4004-875X>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [aka\\_norton@mail.ru](mailto:aka_norton@mail.ru)

Sergey Yu. Dobdin, <https://orcid.org/0000-0002-0801-4664>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [dobdinsky@info.sgu.ru](mailto:dobdinsky@info.sgu.ru)

Anatoly V. Skripal, <https://orcid.org/0000-0002-9080-0057>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, [skripalav@info.sgu.ru](mailto:skripalav@info.sgu.ru)

**Background and Objectives:** Previously, the diastolic section of the pulse wave was most often analyzed as the result of reflection of a direct wave from the elements of peripheral vessels. However, measurements of the negative linear velocity of blood flow using ultrasound dopplerograms clearly indicate the presence of reverse blood flow in the arteries. The aim of the work was to establish the relationship of the second derivative of the pulse pressure wave with the value of the reverse blood flow in the arterial bed.



**Materials and Methods:** The shape of the pressure pulse wave was calculated based on the two-element windkessel model. The calculation of the second derivative of the pulse pressure wave was performed taking into account the direct and reverse blood flow occurring in the arteries at different values of the reverse blood flow. **Results:** The linear dependence of the second derivative of the pulse wave on the value of the blood volume of the reverse wave on the diastole is obtained. **Conclusions:** It is concluded that the second derivative of the pulse pressure wave can be used to estimate the value of the reverse blood flow in the artery, which depends on the state of the peripheral vascular system.

**Keywords:** pulse wave, second derivative, volume blood flow, arterial vessels, windkessel model, peripheral resistance.

Received: 14.05.2020 / Accepted: 27.07.2020 / Published: 31.08.2020

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

*Acknowledgements:* This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No. 19-32-90072).

## Reference

1. Zhao E., Barber J., Burch M., Unthank J., Arciero J. Modeling acute blood flow responses to a major arterial occlusion. *Microcirculation*, 2020, vol. 27, iss. 4, pp. e12610. DOI: 10.1111/micc.12610
2. Hwang J. Y. Doppler ultrasonography of the lower extremity arteries: anatomy and scanning guidelines. *Ultrasonography*, 2017, vol. 36, no. 2, pp. 111–119.
3. Zhirnova O. A., Beresten' N. F., Pestovskaja O. R., Bogdanova E. Ja. Non-invasive diagnosis of disruptions of the elastic properties of arterial vessels. *Angiology*, 2011, no. 1, pp. 27–42 (in Russian).
4. Kalakutskiy L. I., Fedotov A. A. Diagnostics of endothelial dysfunction by the method of contour analysis of pulse wave. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2009, vol. 98, no. 9, pp. 93–98 (in Russian).
5. Ivanov S. V., Ryabikov A. N., Malyutina S. K. Arterial stiffness and pulse wave reflection in association with arterial hypertension. *Siberian Scientific Medical Journal*, 2008, vol. 131, no. 3, pp. 9–12 (in Russian).
6. Frolov A. V., Sidorenko G. I., Vorob'ev A. P., Mel'nikova O. P., Gul' L. M. Direct and reflected pulse waves: research methods. *Kardiologija v Belarusi [Cardiology in Belarus]*, 2009, no. 5, pp. 99–108 (in Russian).
7. Mason D. T., Braunwald E., Ross J. Jr., Morrow A. G. Diagnostic value of the first and second derivatives of the arterial pressure pulse in aortic valve disease and in hypertrophic subaortic stenosis. *Circulation*, 1964, vol. 30, iss. 1, pp. 90–100. DOI: 10.1161/01.CIR.30.1.90
8. Hashimoto J., Chonan K., Aoki Y., Nishimura T., Ohkubo T., Hozawa A., Suzuki M., Matsubara M., Michimata M., Araki T., Imai Y. Pulse wave velocity and the second derivative of the finger photoplethysmogram in treated hypertensive patients: their relationship and associating factors. *Journal of Hypertension*, 2002, vol. 20, iss. 12, pp. 2415–2422. DOI: 10.1097/00004872-200212000-00021
9. Inoue N., Kawakami H., Yamamoto H., Ito Ch., Fujiwara S., Sasaki H., Kihara Y. Second derivative of the finger photoplethysmogram and cardiovascular mortality in middle-aged and elderly Japanese women. *Hypertension Research*, 2017, vol. 40, iss. 2, pp. 207–211. DOI: 10.1038/hr.2016.123
10. Munir S., Guilcher A., Kamalesh T., Clapp B., Redwood S., Marber M., Chowienczyk P. Peripheral augmentation index defines the relationship between central and peripheral pulse pressure. *Hypertension*, 2008, vol. 51, iss. 1, pp. 112–118. DOI: 10.1161/HYPERTENSIONAHA.107.096016
11. Usanov D. A., Skripal A. V., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Averianov A. P., Bakhmetev A. S., Baatyrov R. T. Functional diagnostics of arterial vessels by pulse wave analysis and equipment for its implementation. *Biomedical Engineering*, 2020, vol. 54, no. 1, pp. 41–45. DOI: 10.1007/s10527-020-09970-w
12. Usanov D. A., Skripal A. V., Brilenok N. B., Dobdin S. Yu., Averianov A. P., Bakhmetev A. S., Baatyrov R. T. Diagnostics of functional state of endothelium in athletes by the pulse wave. *Proceedings of the 12th International Symposium on Computer Science in Sport (IACSS 2019)*, 2019, vol. 1028, pp. 176–184. DOI: 10.1007/978-3-030-35048-2\_21
13. Usanov D. A., Protopopov A. A., Skripal A. V., Averyanov A. P., Repin V. F., Rytik A. P., Vagarin A. Yu., Kuznetsov M. A., Petrova M. G. Diagnostics of evolution of risk collapse complications at student group with anomalous cardiovascular reaction. *Saratov Journal of Medical Scientific Research*, 2010, vol. 6, no. 3, pp. 615–619 (in Russian)
14. Westerhof N., Lankhaar J., Westerhof B. E. The arterial Windkessel. *Med. Biol. Eng. Comput.*, 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 131–141. DOI: 10.1007/s11517-008-0359-2
15. Hoppensteadt F. C., Peskin Ch. *Modeling and simulation in medicine and the life sciences*. New York, Springer-Verlag, 2002. 355 p.
16. Baruch M. C., Warburton D. ER., Bredin S. SD., Cote A., Gerdt D. W., Adkins C. M. Pulse decomposition analysis of the digital arterial pulse during hemorrhage simulation. *Nonlinear Biomed. Phys.*, 2011, vol. 5, no. 1, pp. 1–15.
17. Magosso E., Cavalcanti S., Ursino M. Theoretical analysis of rest and exercise hemodynamics in patients with total cavopulmonary connection. *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.*, 2002, vol. 282, pp. H1018–H1034.
18. Karavaev A. S., Ishbulatov Yu. M., Ponomarenko V. I., Bezruchko B. P., Kiselev A. R., Prokhorov M. D. Autonomic control is a source of dynamical chaos in the cardiovascular system. *CHAOS*, 2019, vol. 29, pp. 121101.

## Cite this article as:

Baatyrov R. T., Kalinkin M. Yu., Usanov A. D., Dobdin S. Yu., Skripal An. V. Estimation of the Value of Reverse Blood Flow in the Artery by the Second Derivative of the Pulse Pressure Wave. *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Physics*, 2020, vol. 20, iss. 3, pp. 178–182 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1817-3020-2020-20-3-178-182>