

Перспективы велоэргометрии с измерением артериального давления на каждом сердечном сокращении

В. М. Тихоненко^{1,2}, В. В. Пивоваров², А. В. Рубинский³, Г. К. Зайцев², А. Ю. Кормилицын²

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия

² НАО «Инкарт», Санкт-Петербург, Россия

³ ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия

РЕЗЮМЕ

Цель. В статье рассматриваются преимущества проведения нагрузочных проб с контролем давления на каждом сердечном сокращении. Рассматривается вопрос повышения точности, информативности и безопасности пробы.

Материалы и методы. Выполнены 30 велоэргометрических проб с контролем ЭКГ, артериального давления на каждом сердечном сокращении и периодическими измерениями в плече по тону Короткова.

Результаты. Показано, что артериальное давление зарегистрированное по тону Короткова в плече, совпадает непрерывным давлением в момент фиксации. Из-за невозможности измерять динамику в каждой 3-й пробе недооценка максимального систолического артериального давления методом Короткова превышает 20 мм рт. ст., а в каждой 5-й пробе превышает 30 мм рт. ст. Таким образом, измерение АД на каждом сердечном сокращении существенно повышает точность и информативность нагрузочных проб.

Выводы. Непрерывный сигнал АД в пальце повышает надёжность выделения зашумленных тонов Короткова и результатов измерения АД в плече классическим методом. Повышение точности и надёжности измерения обеспечивает большую безопасность пациента. Непрерывное давление, скорректированное по тону Короткова во время контрольных измерений в плече, даёт детальную и точную картину вариаций АД, что позволяет подробно исследовать особенности регуляции сердечно-сосудистой системы пациента, как во время, так и после снятия нагрузки, что не доступно при классическом измерении АД.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: метод 'beat to beat', велоэргометрия, артериальное давление, тоны Короткова.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Outlook for ergometer testing with beat to beat blood pressure measurement

V. M. Tihonenko^{1,2}, V. V. Pivovarov², A. V. Rubinskiy³, G. K. Zaitsev², A. Y. Kormilitsyn²

¹ St. Petersburg State University, Russia

² NAO 'Incart', St. Petersburg, Russia

³ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia

SUMMARY

Objective. The article discusses the advantages of performing stress tests with pressure control at each heartbeat. The question of increasing accuracy, informativeness and safety of the test is considered.

Materials and methods. We performed 30 bicycle ergometric tests with ECG measurement, beat to beat blood pressure measurement and periodic blood pressure measurement by the Korotkoff method in the shoulder.

Results. It was shown that arterial pressure registered by Korotkoff sounds in the shoulder corresponded with continuous pressure at the registration moment. Because of the impossibility to measure the dynamics, the underestimation of maximum systolic arterial pressure by the Korotkoff method exceeds 20 mm Hg in every 3 tests, and exceeds 30 mm Hg in every 5 tests. Therefore, the beat to beat measurement of BP significantly improves the accuracy and informativeness value of stress tests.

Conclusions. Continuous BP signal in the finger increases reliability of noisy Korotkoff sounds extraction and the results of BP measurement in the shoulder by the classical method. The increased accuracy and reliability of the measurement provides greater patient safety.

Continuous pressure corrected by Korotkoff sounds during reference measurements in the shoulder gives a detailed and accurate picture of BP variations, which allows to investigate in detail features of the patient's cardiovascular system regulation, both during and after the load, which is not available with classical BP measurement.

KEYWORDS: 'beat to beat', bicycle ergometry, blood pressure, Korotkoff sounds.

CONFLICT OF INTERESTS. The authors declare no conflict of interest.

При велоэргометрии необходим контроль артериального давления (АД), т.к. его величина служит не только показателем состояния организма человека, но и одним из основных критериев к прекращению нагрузочной пробы для снижения риска серьёзных осложнений и смерти пациента. Очевидно, что применяемые в настоящее время технические системы для проведения нагрузочных проб, позволяют получать только обрывочную информацию об АД не чаще, чем раз в одну-две минуты, к тому же

не отличающуюся высокой достоверностью, что снижает качество и безопасность этой диагностической процедуры.

Возможно эту ситуацию улучшит применение систем с неинвазивным измерением АД на каждом сердечном сокращении. В настоящее время такие системы, выпускают фирмы: Finapres (Portapres, Finapres Nova), CNSystems (Task Force Monitor, CNAP Monitor) и ИНКАРТ (Кардиотехника-САКР). Все перечисленные системы для непрерывного измерения АД используют принцип «раз-

груженной артерии», предложенный J. Penaz [1]. Суть принципа заключается в непрерывной оценке объема сосудов пальца руки по фотоплетизмографическому сигналу и следящей электропневматической системе, способной создавать давление, противодействующее изменению диаметра артерий пальца, находящегося под манжетой. В этом случае давление в манжете будет повторять АД. К недостаткам такого подхода можно отнести то, что АД определяется в пальцевой артерии и не соответствует измеренному в плечевой артерии, поэтому пересчет непрерывного давления в пальцевой манжете к давлению в плече, выполняется во всех устройствах, хотя методы калибровки отличаются. Рассмотрим методы калибровки, использованные в разных приборах, применительно к условиям велоэргометрии (ВЭМ).

В приборах фирмы Finapres [2] для преобразования давления в пальце к давлению в плече используется метод «return to flow». Суть метода «return to flow» заключается в следующем: не прерывая измерение в пальце, давление в плечевой манжете на той же руке накачивается выше систолического. Пульсации пальцевого давления сначала пропадают, затем давление в плечевой манжете снижается и пульсации возникают вновь. В этот момент давление в плечевой манжете соответствует систолическому давлению (САД). Существенным недостатком метода является то, что для коррекции используется только систолическое давление, причем в другое время, нежели фиксируется корректируемый сигнал. В условиях сильно меняющегося АД во время велоэргометрии корректировка может значительно отличаться в зависимости от момента фиксации САД. Корректировка диастолического давления не производится, соответственно пульсовое давление остается равным зафиксированному в пальце и не учитывает изменение состояния сосудистой системы во время нагрузки.

В приборах фирмы CNSystems преобразование выполняется следующим образом [3]. После измерения некалиброванного давления в пальце, производится измерение артериального давления в плече осциллометрическим методом. Затем вычисляются масштабирующие коэффициенты, которые и применяются к сигналу давления в пальце. К сожалению, осциллометрический метод измерения артериального давления весьма ненадежен при физических нагрузках. Выполняемые пациентом повторяющиеся движения на велоэргометре приводят к появлению небольших пульсаций в плечевой манжете, неразличимых с пульсациями, вызванными изменением объема руки под манжетой при проходе пульсовой волны. Таким образом методы преобразования артериального давления в пальце к плечевому, реализованные в этих приборах, имеют принципиальные ограничения для их использования в ВЭМ.

Запатентованный метод (№ RU 2694737 и № RU 2698447) корректировки артериального давления в пальце к плечевому в системе «Кардиотехника-САКР» не прерывает измерения артериального давления в пальце. На одной руке пациента проводится непрерывное неинвазивное измерение АД в пальце. На другой руке осуществляется окклюзия плеча манжетой и с помощью микрофона регистрируются тоны Короткова (ТК) [4]. Одновременно с ок-

клюзией плеча выполнялось преобразование измеренного непрерывно в пальце АД таким образом, чтобы моменты времени пересечения анакрот пульсовых волн с кривой давления в плечевой манжете максимально соответствовали моментам времени возникновения тонов Короткова, зарегистрированных микрофоном (Рис. 1). В результате АД сопоставимое с измеренным в плече методом Короткова, определяются на каждом сердечном сокращении. Сигнал тонов Короткова, меньше подвержен искажениям во время велоэргометрии по сравнению с пульсациями давления в манжете, используемыми в осциллометрическом методе.

Для оценки информативности ВЭМ с измерением АД на каждом сердечном сокращении в Первом Санкт-Петербургском государственном медицинском университете им. академика И. П. Павлова были проведены пилотные исследования. Проба выполнялась на горизонтальном велоэргометре. Всем испытуемым измерялось АД системой «Кардиотехника-САКР» (НАО «Инкарт», Санкт-Петербург). Руки располагались на регулируемых подставках так, чтобы испытуемый мог максимально расслабить мышцы рук во время проведения пробы и предотвратить контакт плечевой манжеты с частями велоэргометра. Использование велоэргометра такого типа со специальными приспособлениями обусловлено конструктивными особенностями манжет для измерения артериального давления на каждом сердечном сокращении.

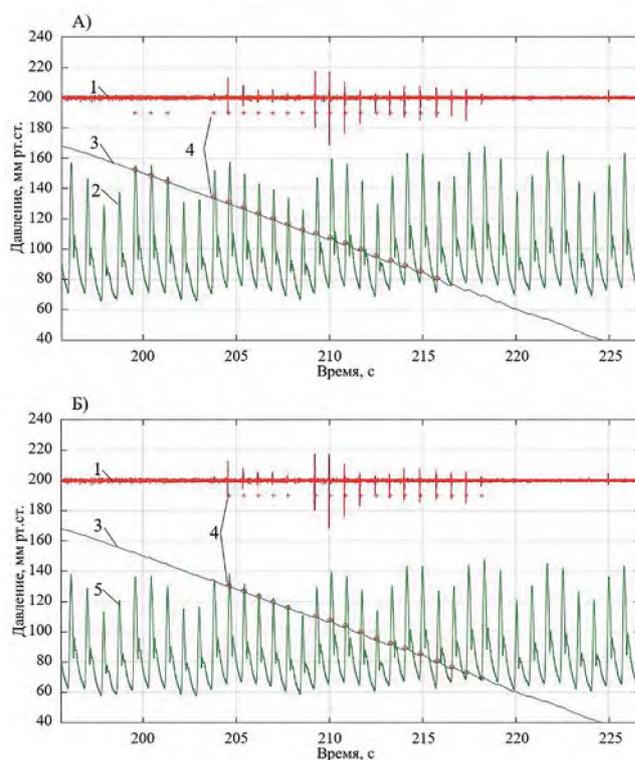


Рисунок 1. Преобразование непрерывного сигнала к плечевому АД. 1 — тоны Короткова. 2 — исходная кривая АД. 3 — давление в плечевой манжете. 4 — точки, в которых кривая давления в компрессионной манжете пересекает анакроты пульсовых волн непрерывной кривой АД. 5 — преобразованное непрерывное АД. График А — исходные данные до преобразования. График Б — преобразованный сигнал, где точки «4» соответствуют моментам возникновения тонов Короткова «1»



Рисунок 2. Велоэргометр с регулируемыми подставками для рук. Испытуемому предлагалось выполнить пробу по следующему протоколу:

- 3 мин. — настройка прибора
- 2 мин. — измерение в состоянии покоя
- 4 последовательных ступени повышения нагрузки с периодом 2 мин (нагрузка 40, 60, 80 и 100 Вт)
- 5 мин. — восстановление без нагрузки

Измерение артериального давления в плече проводилось в автоматическом режиме каждые 2 минуты, так чтобы фаза спуска давления в плечевой манжете приходилась на плато нагрузки.

Всего было выполнено 43 ВЭМ пробы. Для сопоставления показателей АД были отобраны записи 30 ВЭМ проб, во время которых были получены корректные данные величин АД, определенные стандартным методом Короткова с частотой один раз в 2 минуты и на каждом сердечном сокращении (beat-to-beat). Были отброшены пробы в которых на максимальных нагрузках стандартным методом Короткова (без превлечения сопутствующих сигналов) АД не было измерено из-за большого количества артефактов. Результаты сопоставления приведены в таблице 1.

Из таблицы 1 следует, что при ВЭМ максимальные значения САД и минимальные ДАД на каждом сердечном сокращении значительно отличаются от аналогичных, полученных методом Короткова (27,8 мм рт. ст. и -14,6 мм рт. ст. соответственно). Это обусловлено неопределенностью момента регистрации значения методом Короткова и тем, что АД поднимается не равномерно, а волнами, на которые дополнительно накладываются волны дыхания. Максимальная недооценка САД 48 мм рт. ст. была получена на максимальной нагрузке в случае, когда момент возникновения ТК совпал с локальным минимумом САД, обусловленным этими двумя факторами. Кроме того, время измерения САД в плечевой артерии приходилось на середину ступени физической нагрузки, после чего нагрузка продолжалась еще минуту,

а величина САД достигала максимума к концу ступени. Средние значения САД и ДАД отличаются значительно меньше (3,3 мм рт. ст., —5 мм рт. ст. соответственно), что подтверждает соответствие скорректированного артериального давления beat-to-beat и давления в плече.

На Рис. 3 представлены графики сигналов САД, ДАД, ЧСС и величины нагрузки во время ВЭМ пробы, имеющие характерную форму. Красными маркерами отмечены точки, в которых значения САД и ДАД определены классическим методом по ТК в плечевой артерии. Данные значения размещены в предположительные моменты измерения. Момент определялся временем, когда давление в плечевой манжете принимало определенное алгоритмом значение давления. Уточнение времени необходимо, т.к. сигнал значительно менялся (>20 мм рт. ст.) за время измерения в плече и момент фиксации мог теоретически попасть в любую фазу сигнала.

Из Рис. 3 следует, что АД, зарегистрированное по тонам Короткова в плече, лежит на скорректированной непрерывной кривой АД, зафиксированной в пальце. При этом максимальное давление в плече по ТК составило 175/76 мм рт. ст., что значительно ниже фактически достигнутого максимума во время пробы 211/91.

Известно, что ВЭМ проба при больших нагрузках стимулирует глубокое дыхание у испытуемых, которое в свою очередь, вызывают значительные дыхательные вариации АД, достигающие 20 мм рт. ст. Во время измерения в плече, такие вариации АД могут вызывать кратковременное исчезновение тонов Короткова, известное как «аускультативный провал» [5].

На рис. 4 видно, что по мере спуска давления в плечевой манжете сначала тоны возникают, затем из-за дыхательных вариаций САД падает ниже давления в манжете, раскрытия артерии нет и тонов нет, а позже САД возрастает, а давление в манжете снижается и тоны опять появляются. Таким образом, и первое, и повторное появление ТК показывает уровень САД, только в разные фазы колебаний, отличающиеся более, чем на 20 мм рт. ст. В данном случае

Таблица 1
Разница показателей АД, зарегистрированных методом 'beat-to-beat' и методом Короткова при проведении 30 ВЭМ проб

Разница показателей 'beat-to-beat' и метода Короткова	Средняя по группе	Максимальная	Минимальная
Максимальных САД, мм рт.ст.	27,8	48,0	7,0
Минимальных ДАД, мм рт.ст.	-14,6	-7,0	-24,0
Средних САД, мм рт.ст.	3,3	12,9	-5,3
Средних ДАД, мм рт.ст.	-5,0	-0,3	-16,6

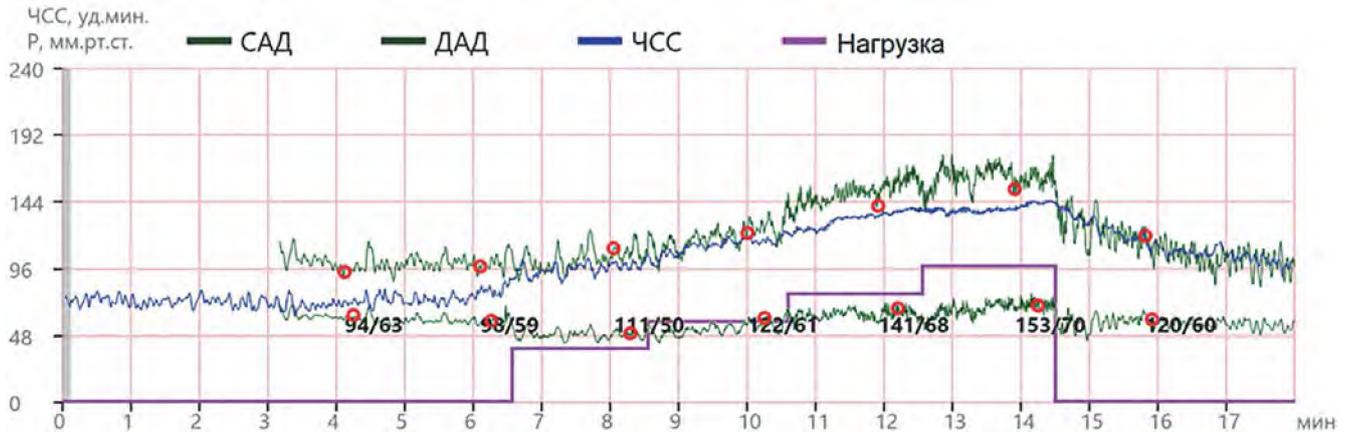


Рисунок 3. Пример динамики АД и ЧСС во время ВЭМ пробы. Красные метки — моменты и величины измерения давления в плече по тону Короткова

классический метод измерения по тону Короткова приводил к выраженной неоднозначности определения САД и давал значительную погрешность (рис. 3). Непрерывное измерение АД на каждом сердечном сокращении позволяет решить указанную проблему, т.к. убирается неоднозначность, присущая классическому методу.

В таблице 2 приведено количество ВЭМ проб, в которых максимальная недооценка САД классическим методом Короткова раз в 2 минуты, в сравнении с усреднёнными в интервале 10с САД на каждом сердечном сокращении превышала 10, 20 и 30 мм рт. ст.

Из таблицы 2 видно, что практически в каждой 3-й ВЭМ пробе недооценка САД классическим методом Короткова превышает 20 мм рт. ст., а в каждой 5-й пробе превышает 30 мм рт. ст. Таким образом, измерение АД на каждом сердечном сокращении существенно повышает точность и информативность нагрузочных проб.

К недостаткам контроля АД на каждом сердечном сокращении относится ограниченный выбор устройства нагружения. При использовании тред-мила будут создаваться значительные помехи непрерывному измерению АД за счёт вертикального качания тела при ходьбе. При использовании стандартного велоэргометра ограничены возможности опоры на руки из-за размещения манжеты на пальце и влияния мышечного напряжения рук на кровоток в сосудах проксимальнее пальцевой манжеты.

Следует отметить, что величина коэффициентов, корректирующих пальцевое давление к плечевому, определяется индивидуальными особенностями сосудистой системы пациента. На протяжении ВЭМ пробы коэффициенты у каждого пациента меняются по-разному в зависимости от адаптации сосудистой системы пациента к нагрузке. В момент изме-

рения можно ориентироваться только на величину АД, скорректированного по последнему измерению в плече. Полная корректировка достигается интерполяцией корректирующих коэффициентов в интервалах между двумя соседними измерениями в плече. Каждую точку корректировки в записи легко проверить по расположению тонов Короткова.

Данные непрерывного АД, получаемые онлайн в ходе пробы, кроме показателя АД позволяют повысить надежность измерения АД классическим методом Короткова во время нагрузки. Это достигается использованием непрерывного сигнала давления в пальце для более точного определения временного окна появления ТК, и позволяет детектировать его даже при наличии значительного уровня шума во время ВЭМ. При этом сам уровень шума фиксируется непосредственно перед этим временным окном и адаптивно влияет на порог распознавания тонов.

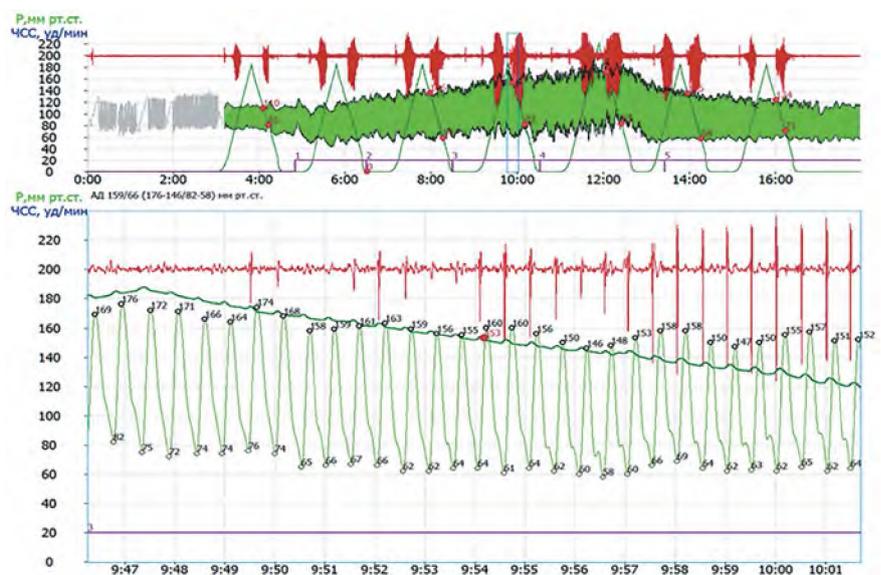


Рисунок 4. Пример «аускультативного провала» во время велоэргометрической пробы. Верхний график — проба целиком. Красный — тоны Короткова в относительных единицах. Темно-зеленый — давление в плечевой манжете. Светло-зеленый — преобразованное непрерывное АД. Сиреневый — этап нагрузки. Красные метки — моменты и величины измерения АД в плече по тону Короткова. Черные метки — САД и ДАД на каждом сокращении сердца

Таблица 2
Распределение максимальной недооценки САД
методом Короткова в сравнении с усреднёнными
в 10 с интервале измерениями САД
на каждом сердечном сокращении в 30 ВЭМ пробах

Максимальная недооценка САД методом Короткова	Количество проб (%)
>10 мм рт. ст.	23 (77%)
>20 мм рт. ст.	9 (30%)
>30 мм рт. ст.	6 (20%)

Представленные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. В ходе ВЭМ пробы значения САД и ДАД позволяют существенно снизить степень недооценки САД. Непрерывный сигнал АД в пальце повышает надёжность выделения зашумленных тонов Короткова и, следовательно, результатов измерения АД в плече классическим методом, что критически важно при движениях пациента. Таким образом, измерение АД на каждом сердечном сокращении при ВЭМ повышает безопасность пациента, т. к. обладает преимуществом в точности и надёжности контроля допустимых границ

изменения АД во время диагностической процедуры по сравнению с классическим измерением.

2. Непрерывное давление, скорректированное по тонам Короткова во время контрольных измерений в плече, даёт детальную и точную картину вариаций АД, что позволяет подробно исследовать особенности регуляции сердечно-сосудистой системы пациента, как во время, так и после снятия нагрузки, что не доступно при классическом измерении АД.

Список литературы / References

1. Penaz J. Patentova Listina. CISLO 133205. 1969.
2. Guelen I, Westerhof B, et al. Finometer, finger pressure measurements with the possibility to reconstruct brachial pressure. *Blood Press Monitoring*. 2003 Feb;8(1):27–30
3. Fortin J, Marte W, Grullenberger R, et al. Continuous non-invasive blood pressure monitoring using concentrically interlocking control loops. *Computers in biology and medicine*. 2006; (36): 941–998.
4. Пивоваров В. В., Тихоненко В. М., Кормилицын А. Ю., Зайцев Г. К. Система «Кардиотехника-САКР» для измерения в каждом сердечном цикле истинного артериального давления в плече при его высокой вариабельности. *Поликлиника*. 2019; (1): 30–32.
5. Тихоненко В. М., Пивоваров В. В., Кормилицын А. Ю., Зайцев Г. К. Определение артериального давления по тонам Короткова при наличии «аускультативного провала». // *Артериальная гипертензия*. 2019; 25(1): 90–96. <https://doi.org/10.18705/1607-419X-2019-25-1-90-96>.

Сведения об авторах

Виктор Михайлович Тихоненко, д.м.н., профессор научно-клинического и образовательного центра «Кардиология»^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-6262-1326>.

Владимир Вячеславович Пивоваров, д.т.н., заместитель директора по науке², <https://orcid.org/0000-0002-8426-215X>.

А. В. Рубинский, к.м.н., доцент кафедры медицинской реабилитации и адаптивной физической культуры³, <https://orcid.org/0000-0003-1041-8745>.

Зайцев Глеб Константинович, инженер², <https://orcid.org/0000-0002-8822-9197>.

Александр Юрьевич Кормилицын, генеральный директор², <https://orcid.org/0000-0002-6373-4285>.

¹ ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Россия.

² НАО «Инкарт», Санкт-Петербург, Россия.

³ ФГБОУ ВО «Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет имени академика И. П. Павлова» Министерства здравоохранения Российской Федерации, Санкт-Петербург, Россия.

Автор для переписки: Зайцев Глеб Константинович
 E-mail: gkz@incart.ru

About authors

Viktor Mihaylovich Tihonenko, Doctor of Sciences in Medicine, Professor of Scientific-Clinical and Educational Center «Cardiology»^{1,2}, <https://orcid.org/0000-0002-6262-1326>

Vladimir Vyacheslavovich Pivovarov, Doctor of Sciences in Technology, Deputy Director for Science², <https://orcid.org/0000-0002-8426-215X>

A. V. Rubinsky, Candidate of Sciences in Medicine, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Medical Rehabilitation and Adaptive Physical Culture³, <https://orcid.org/0000-0003-1041-8745>.

Zaitsev Gleb Konstantinovich, engineer², <https://orcid.org/0000-0002-8822-9197>

Alexander Kormilitsyn, General Director², <https://orcid.org/0000-0002-6373-4285>.

¹ St.Petersburg State University, Russia.

² NAO 'Incart', St.Petersburg, Russia.

³ Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St. Petersburg, Russia.

Corresponding author: Zaitsev Gleb Konstantinovich
 E-mail: gkz@incart.ru

Статья поступила / Received 08.09.2022
 Получена после рецензирования / Revised 10.09.2022
 Принята в печать / Accepted 22.11.2022

Для цитирования: Тихоненко В. М., Пивоваров В. В., Рубинский А. В., Зайцев Г. К., Кормилицын А. Ю. Перспективы велоэргометрии с измерением артериального давления на каждом сердечном сокращении. *Медицинский алфавит*. 2022; (33):8–12. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-33-8-12>

For citation: Tihonenko V. M., Pivovarov V. V., Rubinsky A. V., Zaitsev G. K., Kormilitsyn A. Y. Outlook for ergometer testing with beat to beat blood pressure measurement. *Medical alphabet*. 2022;(33):8–12. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2022-33-8-12>

