

Приборы медицинского назначения, контроля среды, веществ, материалов и изделий

УДК 615.47+681.2.08

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2020-23-1-96-104>

Метод прогнозирования основных показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования для больных с хронической сердечной недостаточностью

А. С. Красичков^{1,2}✉, Э. Мбазумутима¹, Ф. Шикама¹, Е. М. Нифонтов²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

²Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, Санкт-Петербург, Россия

✉ krass33@mail.ru

Аннотация

Введение. Кардиопульмональный нагрузочный тест предоставляет значимую диагностическую и прогностическую информацию о состоянии больных с сердечно-сосудистыми и легочными заболеваниями. Существует серьезная проблема, состоящая в том, что выполнение нагрузочного тестирования испытуемым в его завершающей фазе является физически тяжелым упражнением для человека. Присутствует значительный риск возникновения и развития патологических состояний сердечно-сосудистой системы пациента. Одним из решений данной проблемы является разработка методов оценивания биологических параметров пациентов в конце выполнения нагрузочного протокола на основе данных первых этапов теста.

Цель работы. Разработка метода нахождения оценки максимальной частоты сердечных сокращений (ЧСС) и пикового потребления кислорода (ПК) у больных с хронической сердечной недостаточностью (ХСН) в конце выполнения кардиореспираторного нагрузочного стресс-теста на основе результатов исследования, полученных на первоначальных ступенях теста.

Материалы и методы. Для проведения исследования использованы 149 обезличенных записей ритмограмм и данных изменения ПК пациентов с ХСН, которые проходили кардиопульмональный нагрузочный тест на велоэргометре с использованием ступенчатого нагрузочного протокола (прирост мощности нагрузки на каждой ступени составлял 10 Вт, длительность ступени нагрузки была равна 1 мин).

Результаты. На основе анализа полученных данных разработан метод оценки пиковых значений ЧСС и ПК у больных с ХСН.

Заключение. Относительная ошибка предложенной оценки пикового значения ЧСС в большинстве случаев не превысила 10 %, что позволяет ее использовать для практических целей. Установлено, что при выполнении 70 % нагрузочного протокола ошибка предложенной оценки пикового ПК в большинстве случаев не превышает 20 %. Необходимы дополнительные исследования для повышения точности данной оценки с целью использования в медицинских приложениях, направленных на модернизацию методов и аппаратуры для нагрузочного тестирования пациентов.

Ключевые слова: система нагрузочного тестирования человека, электрокардиосигнал, частота сердечных сокращений (ЧСС), анализ выдыхаемого воздуха, регрессионный анализ, предсказание показателей тестирования

Для цитирования: Метод прогнозирования основных показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования для больных с хронической сердечной недостаточностью / А. С. Красичков, Э. Мбазумутима, Ф. Шикама, Е. М. Нифонтов // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2020. Т. 23, № 1. С. 96–104. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-96-104

Благодарности. Выражаем благодарность Национальному медицинскому исследовательскому центру им. В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации за предоставление обезличенных данных кардиореспираторного нагрузочного теста пациентов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.10.2019; принята к публикации после рецензирования 28.11.2019; опубликована онлайн 28.02.2020



Medical Devices and Devices for Control of the Environment,
Substances, Materials and Products

Original article

A Method for Predicting the Main Indicators of Cardiopulmonary Stress Testing for Patients with Chronic Heart Failure

A. S. Krasichkov^{1,2} ✉, E. Mbazumutima¹, F. Shikema¹, E. M. Nifontov²

¹Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

²Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, St Petersburg, Russia

✉ krass33@mail.ru

Abstract.

Introduction. Cardiopulmonary stress test provides significant diagnostic and prognostic information of the condition of patients with cardiovascular and pulmonary diseases. There is a serious problem, that final phase of stress testing is a physically difficult exercise for a person. There is a significant risk of occurrence and development of pathological conditions of the patient's cardiovascular system. One of the solutions is the development of methods for assessing the biological parameters of the patients at the end of a load protocol based on data from the initial stages of the test.

Aim. Development of a method for finding an estimate of the maximum heart rate (HR) and of the peak oxygen consumption (OC) for the patients with chronic heart failure at the end of a cardiorespiratory exercise stress test, based on the results of the study obtained at the first initial stages of the test.

Materials and methods. For the study, 149 anonymized records of rhythmograms and data of changes in the oxygen consumption of the patients with chronic heart failure were used. The patients underwent a cardiopulmonary stress test by a bicycle ergometer using step-by-step load protocol (the load power increase at each stage was 10 W, the duration of the load stage was 1 min).

Results. Based on the analysis of the data obtained, a method for assessing the peak values of HR and of PC of the patients with chronic heart failure was developed.

Conclusion. The relative error of the proposed estimate of the HR peak in most cases was no more than 10 %, which allows it to be used for practical purposes. It was established that when performing 70 % of the stress protocol, the error of the proposed estimate of the OC peak in most cases did not exceed 20 %. More research is needed to improve the accuracy of the assessment for using in medical applications aimed to the modernization of methods and equipment for stress testing of the patients.

Keywords: human stress testing system, electrocardiogram, heart rate (HR), exhaled breath analysis, regression analysis, test performance prediction

For citation: Krasichkov A. S., Mbazumutima E., Shikema F., Nifontov E. M. A Method for Predicting the Main Indicators of Cardiopulmonary Stress Testing for Patients with Chronic Heart Failure. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2020, vol. 23, no. 1, pp. 96–104. doi: 10.32603/1993-8985-2020-23-1-96-104

Acknowledgements. Our gratitude to the Almazov National Medical Research Centre for providing anonymized data on the cardiorespiratory stress test of patients

Conflict of interest. Authors declare no conflict of interest.

Submitted 25.10.2019; accepted 28.11.2019; published online 28.02.2020

Введение. Широкое распространение среди человеческой популяции различных патологий сердечно-сосудистой системы (ССС) требует создания неинвазивных инструментальных методов и средств диагностики, направленных на раннее выявление и предотвращение патологических состояний миокарда.

Нагрузочное стресс-тестирование (рис. 1) [1] чаще всего используется как неинвазивный и воспроизводимый метод диагностики состояния и

прогноза лечения ССС человека [2]. Система нагрузочного стресс-тестирования включает тренажеры, на которых пациент выполняет физические нагрузки определенной мощности (велоэргометр, беговая дорожка), датчики для регистрации биологических сигналов человека (например, электрокардиосигнала, артериального давления) и вычислительные устройства для обработки полученных данных с необходимым программным обеспечением [3].

Метод прогнозирования основных показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования для больных с хронической сердечной недостаточностью 97
A Method for Predicting the Main Indicators of Cardiopulmonary Stress Testing
for Patients with Chronic Heart Failure

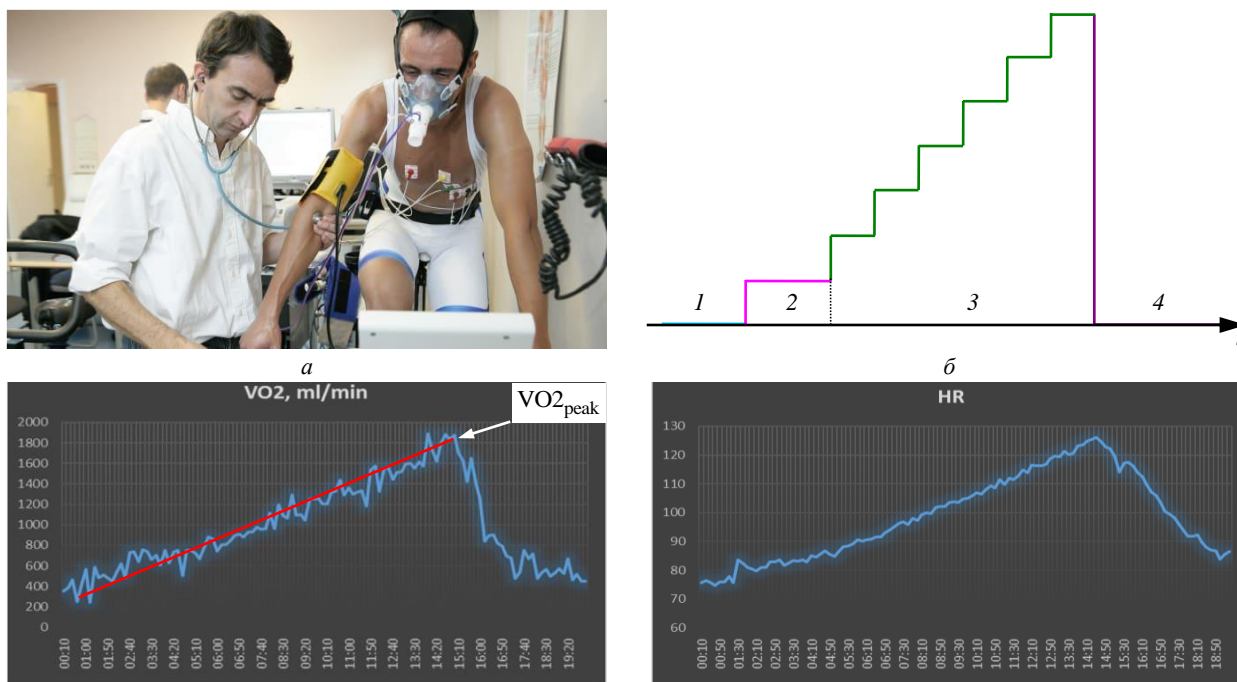


Рис. 1. Нагрузочное стресс-тестирование: а – тренажер; б – протокол тестирования (1 – подготовка, 2...3 мин; 2 – разминка, 1...3 мин; 3 – выполнение нагрузки, 8...15 мин; 4 – восстановление, 3...10 мин); в – результаты тестирования
 Fig. 1. Stress testing: а – training apparatus; б – test protocol (1 – training, 2...3 min; 2 – warm-up, 1...3 min; 3 – test implementation, 8...15 min; 4 – recovery, 3...10 min); в – test results

Под кардиопульмональным нагрузочным тестированием (КПНТ) понимается нагрузочное стресс-тестирование с дополнительным измерением параметров газообмена в состоянии покоя, во время нагрузки и в период восстановления. В результате измеряются следующие основные показатели: объем потребляемого кислорода (V_{O_2}), объем выдыхаемого углекислого газа (V_{CO_2}), вентиляционные параметры, а также оцениваются электрокардиографические параметры: частота сердечных сокращений (ЧСС) и артериальное давление. В качестве примера на рис. 1, а представлена система, позволяющая одновременно контролировать параметры дыхания, артериального давления, пульс во время нагрузки.

Указанный тест является надежным диагностическим инструментом, который предоставляет значимую диагностическую и прогностическую информацию о состоянии больных с сердечно-сосудистыми и легочными заболеваниями, а также позволяет оценить риски и эффекты различных терапий [4, 5].

При проведении клинического нагрузочного тестирования определяющее значение имеет его протокол (рис. 1, б). Существующие протоколы обычно включают начальный период разминки, за

которым следует прогрессивная дозированная нагрузка с возрастающей мощностью, а также период восстановления после максимальных усилий.

Нагрузочный протокол должен быть выбран в соответствии с целью проводимого обследования пациента. Наиболее часто используется ступенчатая форма возрастания нагрузки [3, 6, 7]. Данные непрерывно отображаются на мониторе врача и записываются в память прибора для дальнейшей постобработки (рис. 1, в).

Существует серьезная проблема, состоящая в том, что выполнение нагрузочного тестирования испытуемым, особенно на пике нагрузки, является упражнением, физически тяжелым для человека. Присутствует значительный риск возникновения и развития патологических состояний ССС пациента. По этой причине процедуру нагрузочного тестирования больных проводят только в медицинских учреждениях, имеющих в своем составе реанимационные отделения.

Одним из решений указанной проблемы является разработка методов оценивания (прогнозирования) функционального состояния пациентов в конце выполнения нагрузочного протокола на основе данных, наблюдаемых только на первых этапах стресс-теста. В настоящей статье предложен подход, в соответствии с которым необходи-

мо выполнять не весь нагрузочный протокол, а только его начальную часть, а данные обследования пациента, соответствующие самой энергозатратной (завершающей) фазе нагрузочного тестирования, формировать с помощью анализа результатов, полученных на первых этапах стресс-теста. Таким образом, становится возможным уменьшить нагрузку на пациента за счет сокращения продолжительности нагрузочного протокола во время выполнения стресс-теста без потери диагностически важной информации.

Задача предсказания некоторых показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования ранее рассмотрена в литературе. В [8–11] исследована возможность предсказания ЧСС на пике нагрузки у больных с сердечными заболеваниями на основе линейных регрессионных уравнений.

Аналогичный подход использовался и для нахождения пикового потребления кислорода (ПК) [12–14]. Кроме того, существует метод предсказания пикового ПК на основе линейной взаимосвязи между ЧСС и V_{O_2} [15]. Однако

предсказание во всех перечисленных работах осуществлялось только на основе данных, соответствующих состоянию покоя пациента. Не учитывалась информация, получаемая на первых ступенях нагрузочного протокола. Таким образом, не принимались во внимание (фактически игнорировались) динамические свойства биологических сигналов во время нагрузочного тестирования.

Таким образом, цель работы, отраженной в настоящей статье, заключается в создании метода нахождения оценки максимальной ЧСС и пикового ПК у больных с хронической сердечной недостаточностью (ХСН) в конце выполнения кардиореспираторного нагрузочного стресс-теста по результатам исследования, полученным на первоначальных ступенях теста.

Материалы и методы. Для проведения исследования были использованы 149 обезличенных записей ритмограмм и данных изменения потребления кислорода пациентов с ХСН (97 мужчин и 52 женщин), которые проходили КПНТ на велоэргометре с использованием ступенчатого нагрузочного протокола (прирост мощности нагрузки на каждой ступени составлял 10 Вт, длительность ступени нагрузки была равна 1 мин) в Национальном медицинском исследовательском центре им. В. А. Алмазова Министерства здравоохранения Российской Федерации.

При выполнении нагрузочного стресс-теста были использованы следующие критерии прекращения физической нагрузки:

- 1) возникновение болевых ощущений;
- 2) усталость пациента;
- 3) критические изменения ЭКГ, артериального давления, уровня сатурации кислорода (изменение данных параметров непрерывно отслеживалось медицинским персоналом).

На основе анализа полученных данных был разработан метод оценки пикового значения ЧСС и пикового значения ПК у больных с ХСН, состоящий из трех этапов (рис. 2).

На первом этапе производится оценка пикового значения ЧСС \hat{HR}_{peak} (фактически предсказания ЧСС) на максимуме нагрузки (на завершающей фазе нагрузочного протокола). Для решения этой задачи на основе анализа ритмограмм эмпирически было получено регрессионное уравнение:

$$\hat{HR}_{peak} = k_1 + k_2 HR_{rest} + k_3 HR_{slope}, \quad (1)$$

где HR_{rest} – значение ЧСС в покое перед началом нагрузки; HR_{slope} – угловой коэффициент прямой, которая аппроксимирует зависимость изменения ЧСС на первых трех ступенях нагрузки с искомым оценкой. Значения коэффициентов k определялись с помощью метода наименьших квадратов

$$\sum_N \left(HR_{peak} - \hat{HR}_{peak} \right)^2 = \sum_N \left(HR_{peak} - k_1 - k_2 HR_{rest} - k_3 HR_{slope} \right)^2 \rightarrow \min,$$

где N – число анализируемых ритмограмм; HR_{peak} – истинное пиковое значение ЧСС.

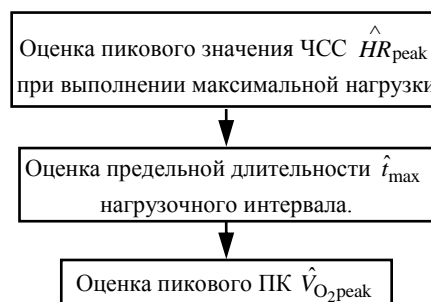


Рис. 2. Структурная схема метода оценки пиковых значений ЧСС и ПК у больных с хронической сердечной недостаточностью

Fig. 2. The structural scheme of the method for assessing the peak values of HR and OC for patients with chronic heart failure

Значения коэффициентов регрессионного уравнения
 The values of the regression equation coefficients

Коэффициент	Группа		
	мужчин	женщин	общая
k_1	14.935	27.228	24.263
k_2	1.081	0.898	0.988
k_3	32.086	22.215	22.205

В таблице представлены значения полученных коэффициентов для различных групп больных ХСН. Из нее следует, что коэффициенты k , входящие в регрессионное выражение (1), значительно варьируются в зависимости от способа формирования группы.

На основе полученной оценки пикового значения ЧСС \hat{HR}_{peak} , а также аппроксимируя изменение ЧСС от времени $HR(t)$ на интервале выполнения нагрузки квадратичной зависимостью:

$$HR(t) = a_1 t^2 + a_2 t + a_3; \quad HR(t_{max}) = HR_{peak},$$

находится оценка длительности нагрузочного интервала:

$$\hat{t}_{max} = \frac{-a_2 + \sqrt{a_2^2 - 4a_1(a_3 - \hat{HR}_{peak})}}{2a_1}. \quad (2)$$

При этом значения коэффициентов a_1 , a_2 , a_3 определяются на первых ступенях нагрузочного интервала.

На завершающем, третьем, этапе находится оценка пикового ПК \hat{V}_{O_2peak} . Нахождение данной оценки базируется на ранее полученной оценке \hat{HR}_{peak} , а также использовании линейной модели зависимости изменения ПК на нагрузочном интервале: $V_{O_2}(t) = c_1 t + c_2$. Тогда пиковое значение ПК оценивается по формуле

$$\hat{V}_{O_2peak} = c_1 \hat{t}_{max} + c_2, \quad (3)$$

где c_1 и c_2 – угловой коэффициент и свободный член линейной зависимости соответственно, значения которых получаются на основе аппроксимации зависимости изменения ПК на первых ступенях нагрузочного интервала.

Результаты. На рис. 3 показана диаграмма размаха для относительной ошибки оценки ЧСС на пике нагрузки с помощью (1), которая определяется как

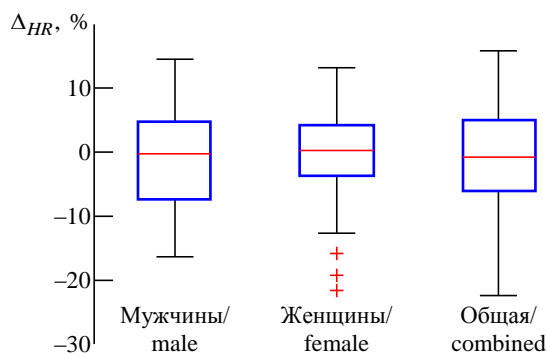


Рис. 3. Диаграммы размаха относительной ошибки предсказания ЧСС

Fig. 3. Relative error prediction range of heart rate diagrams

$$\Delta_{HR} = \frac{HR_{peak} - \hat{HR}_{peak}}{HR_{peak}}, \quad (4)$$

где HR_{peak} – истинное значение ЧСС на пике нагрузки; \hat{HR}_{peak} – оценка ЧСС на пике нагрузки, полученная с помощью (1).

Из рис. 3 видно, что относительная ошибка оценки пикового значения ЧСС в большинстве случаев не превосходит 10%. Также из рисунка следует, что предложенная оценка пикового значения ЧСС отдельно по группам дает результат, близкий к результатам оценивания при объединении групп.

В качестве примера на рис. 4 показан результат аппроксимации изменения ЧСС во время нагрузочного тестирования квадратичной зависимостью для двух разных пациентов. По вертикальной оси

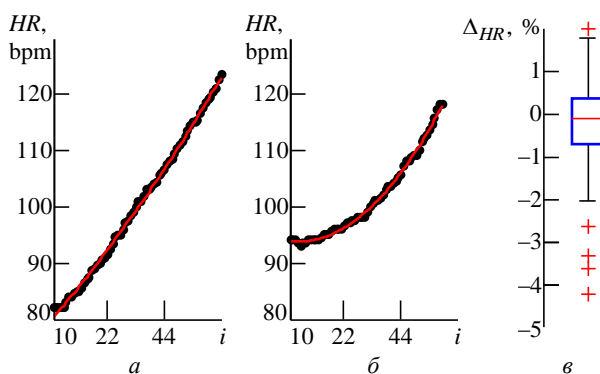


Рис. 4. Аппроксимация ЧСС квадратичной зависимостью: а, б – результаты для двух пациентов (маркеры – результаты измерений, красные линии – аппроксимация); в – диаграмма размаха относительной ошибки определения ЧСС на пике нагрузки с помощью квадратичной модели

Fig. 4. Approximation of HR by quadratic dependence: а, б – results for two patients (markers – measurement results, red lines – approximation); в – diagram of the scale of the relative error in determining HR at the peak of the load using a quadratic model

отложены значения ЧСС, по горизонтальной – номера отсчетов i . На рис. 4, в приведена диаграмма размаха для относительной ошибки определения ЧСС на пике нагрузки с помощью квадратичной модели, определенной по аналогии с (4).

Как видно из рис. 4, квадратичная модель точно описывает зависимость изменения ЧСС на нагрузочном интервале. Относительная ошибка оценки ЧСС на пике нагрузки с помощью квадратичной модели в подавляющем большинстве случаев не превышает 2%. Такой результат подтверждает адекватность используемой квадратичной модели изменения ЧСС на нагрузочном интервале стресс-теста.

На рис. 5 приведена диаграмма размаха относительной ошибки определения пикового ПК. Уровень ПК на нагрузочном интервале аппроксимировался линейной зависимостью

$$\hat{V}_{O_2}(t) = c_1 t + c_2; \hat{V}_{O_2\text{peak}} = \hat{V}_{O_2}(t_{\text{max}}).$$

В данном случае продолжительность нагрузочного тестирования t_{max} была известна, а ко-

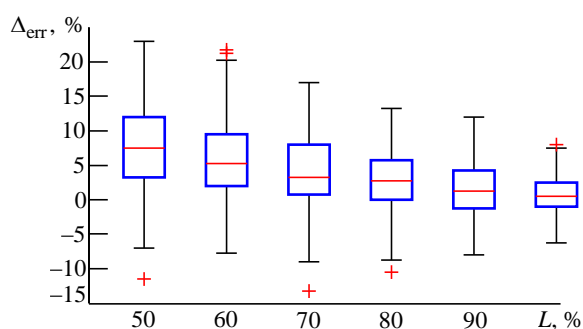


Рис. 5. Относительная ошибка определения пикового значения ПК $\hat{V}_{O_2\text{peak}}$ согласно линейной модели
 Fig. 5. Relative error of the determining of peak value of a OC with a linear model

эффициенты c_1 и c_2 , входящие в линейное уравнение, рассчитывались в зависимости от процентного соотношения выполнения стресс-теста относительно максимальной продолжительности нагрузки L . Как следует из рис. 5, относительная ошибка оценки пикового потребления кислорода с помощью линейной модели, полученной при выполнении даже всего нагрузочного стресс-теста (100% от максимальной продолжительности нагрузки), отлична от нуля. Данный факт можно объяснить тем, что кривая изменения $V_{O_2}(t)$ во время тестирования значительно флуктуирует (см. рис. 1, в). Это связано с техническими особенностями аппаратуры (особенно датчиками) измерения газообмена.

Зависимость относительной ошибки оценки пикового значения ПК при неизвестной априори длительности нагрузочного тестирования t_{max} от продолжительности выполненной нагрузки показана на рис. 6, а. В данном случае эта длительность прогнозировалась на основании (2) и (3) как доля от оценки \hat{t}_{max} . Использование этой оценки приводит к увеличению размаха диаграммы относительной ошибки оценки пикового значения ПК (рис. 6, б). Однако уже при выполнении 70% нагрузочного протокола ошибка оценки в большинстве случаев не превосходит 20%. Необходимо отдельно отметить, что на данный разброс влияет сразу несколько факторов, связанных с процессом регистрации биологических сигналов. В частности, при регистрации электрокардиосигнала в процессе выполнения стресс-теста в монитрограмме присутствуют шумы, связанные с неизбежной двигательной активностью пациента,

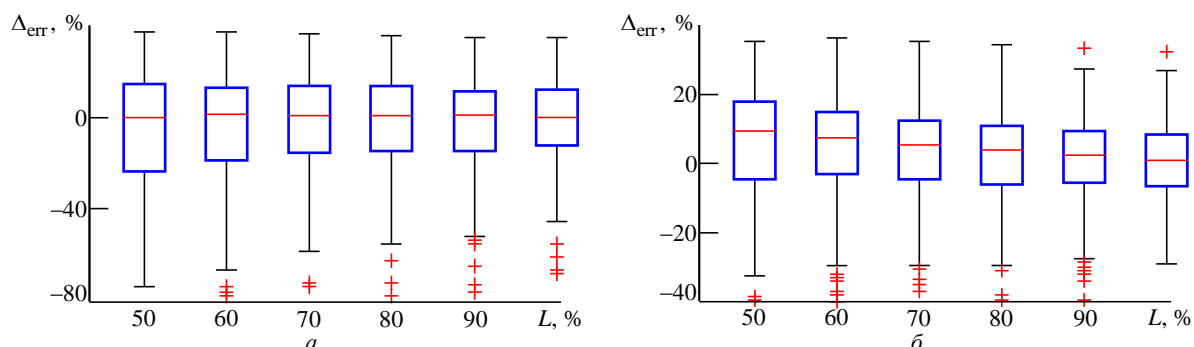


Рис. 6. Относительная ошибка определения пикового значения ПК при неизвестной априори длительности нагрузочного тестирования: а – относительная ошибка определения длительности нагрузочного тестирования; б – относительная ошибка определения пикового значения ПК при оценке длительности нагрузочного тестирования

Fig. 6. Relative error of the determining the peak value of a OC with an unknown a priori duration of stress testing: а – relative error of the determining the duration of stress testing; б – the relative error of the determining the peak value of the OC in assessing the duration of stress testing

что влияет на качество формируемой ритмограммы (возможно ложное обнаружение или пропуск кардиокомплекса [16, 17]). Также влияют флуктуации кривой, отражающей изменения $V_{O_2}(t)$.

Выводы. В результате исследования был предложен подход, позволяющий сократить длительность нагрузочного стресс-теста за счет обработки информации, полученной на первых этапах теста, и тем самым сократить нагрузку на пациента. Было эмпирически получено уравнение линейной регрессии для нахождения оценки пикового значения ЧСС. Установлено, что коэффициенты регрессионного уравнения значительно варьируются от пола пациента. Относительная ошибка оценки пикового значения ЧСС в большинстве случаев не превосходит 10 %, что позволяет ее использовать для практических целей. Было установлено, что для больных с ХСН ис-

пользование квадратичной зависимости при описании изменения ЧСС на нагрузочном интервале стресс-теста позволяет создать адекватную модель ритмограммы. Также было эмпирически получено уравнение линейной регрессии для нахождения оценки пикового потребления кислорода $\hat{V}_{O_{2peak}}$. Установлено, что при выполнении 70 % нагрузочного протокола ошибка оценки пикового потребления кислорода в большинстве случаев не превосходит 20 %, причем на точность данной оценки влияет сразу несколько факторов, связанных с процессом регистрации биологических сигналов. Таким образом, необходимы дополнительные исследования для повышения точности данной оценки с целью использования в медицинских приложениях, направленных на модернизацию методов и аппаратуры для нагрузочного тестирования пациентов.

Авторский вклад

Красичков Александр Сергеевич – руководство работой, подготовка текста статьи.

Мбазумутима Элиаким – анализ ритмограмм.

Шикама Фабиен – анализ данных потребления кислорода.

Нифонтов Евгений Михайлович – постановка задачи и участие в обсуждении результатов.

Authors' contribution

Alexander S. Krasichkov, management of the work and preparation of the paper text.

Eliachim Mbazumutima, analysis of the heart rate data.

Fabian Shikama, analysis of the oxygen consumption data.

Evgeny M. Nifontov, statement of the problem and discussion of the results.

Список литературы

1. Stress tests could mark bottom for bank stocks. URL: <https://www.cnbc.com/2017/06/28/stress-tests-fed-bank-stocks.html> (дата обращения 24.01.2020).
2. Falk E., De Feyter P. J., Shah P. K. Ischemic Heart Disease. London: Manson Publishing, 2007. 312 p.
3. ACC/AHA Guidelines for Exercise Testing. A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association. Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing) // JACC. 1997. Vol. 30, № 1. P. 260–315.
4. Vilcant V., Zeltser R. Treadmill Stress Testing // NCBI Bookshelf. 2019. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29763078> (дата обращения 24.01.2020).
5. Cardiopulmonary exercise testing and its application / K. Albouaini, M. Eged, A. Alahmar, D. J. Wright // Postgraduate medical j. 2007. Vol. 83, iss. 985. P. 675–682. doi: 10.1136/hrt.2007.121558
6. Papadakis M. A., McPhee S., Rabow M. W. Current Medical Diagnosis & Treatment. 59th ed. New York: McGraw-Hill, 2020. 1933 p.
7. Exercise Standards for Testing and Training. A Scientific Statement from the American Heart Association / G. F. Fletcher, P. A. Ades, P. Kligfield, R. Arena, G. J. Balady, V. A. Bittner, L. A. Coke, J. L. Fleg, D. E. Forman, T. C. Gerber, M. Gulati, K. Madan, J. Rhodes, P. D. Thompson, M. A. Williams // Circulation. 2013. Vol. 128, № 8. P. 873–934. doi: 10.1161/CIR.0b013e31829b5b44
8. Hammond H. K., Kelly T. L., Froelicher V. Radionuclide Imaging Correlates of Heart Rate Impairment during Maximal Exercise Testing // J. of the American College of Cardiology. 1983. Vol. 2, № 5. P. 826–833. doi: 10.1016/s0735-1097(83)80228-9
9. Separation of Effects of Cardiovascular Disease and Age on Ventricular Function with Maximal Exercise / R. A. Bruce, L. D. Fisher, M. N. Cooper, G. O. Gey // Amer-

ican J. of Cardiology. 1974. Vol. 34, № 7. P. 757–763. doi: 10.1016/0002-9149(74)90692-4

10. Predicting Maximum Heart Rate Among Patients with Coronary Heart Disease Receiving β -Adrenergic Blockade Therapy / C. A. Brawner, J. K. Ehrman, J. R. Schairer, J. J. Cao, S. J. Keteyian // American Heart J. 2004. Vol. 148, № 5. P. 910–914. doi: 10.1016/j.ahj.2004.04.035

11. Predicting Maximal HR in Heart Failure Patients Receiving β -Blockade Therapy / S. J. Keteyian, D. Kitzman, F. Zannad, J. Landzberg, J. M. Arnold, P. Brubaker, C. A. Brawner, D. Bensimhon, A. S. Hellkamp, G. Ewald // Medicine and science in sports and exercise. 2012. Vol. 44, № 3. P. 371–376. doi: 10.1249/MSS.0b013e318234316f

12. An Equation for the Prediction of Oxygen Consumption in a Brazilian Population / A. E. Almeida, C. M. Stefani, J. A. Nascimento, N. M. Almeida, A. C. Santos, J. P. Ribeiro, R. Stein // Arquivos brasileiros de cardiologia. 2014. Vol. 103, № 4. P. 299–307.

13. Simple Prediction Formula for Peak Oxygen Consumption in Patients with Chronic Heart Failure / G. M. Laniar, Qi Zheng, G. Wagman, C.-H. Tseng // J. of Exercise

Science & Fitness. 2012. Vol. 10, № 1. P. 23–27. doi: 10.1016/j.jesf.2012.04.005

14. Prediction of maximal oxygen consumption: comparison of the Bruce and Balke treadmill protocols / V. F. Froelicher, A. J. Thompson, G. Davis, A. J. Stewart, J. H. Triebwasser // Chest. 1975. Vol. 68, № 3. P. 331–336. doi: 10.1378/chest.68.3.331

15. McArdle W. D., Katch F. I., Katch V. L. Essentials of Exercise Physiology. New York: Lippincott Williams & Wilkins, 2010. 790 p.

16. Krasichkov A. S., Grigoriev E. B., Nifontov E. M. Influence of Myographic Interference and Isoelectric Line Drift on Correlation Coefficient in Classification of Cardiac complexes // Biomedical Engineering. 2015. Vol. 49, iss. 4. P. 220–223. doi: 10.1007/s10527-015-9533-7

17. Shape Anomaly Detection under Strong Measurement Noise: an Analytical Approach to Adaptive Thresholding / A. S. Krasichkov, E. B. Grigoriev, M. I. Bogachev, E. M. Nifontov // Physical Review E. 2015. Vol. 92, iss. 4. 042927. doi: 10.1103/PhysRevE.92.042927

Информация об авторах

Красичков Александр Сергеевич – доктор технических наук (2017), доцент кафедры радиотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – статистическая радиотехника; методы обработки сигналов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: krass33@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8120-3293>

Мбазумутима Элиаким – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2019), аспирант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор одной научной публикации. Сфера научных интересов – цифровая обработка биомедицинских сигналов, машинное обучение, распознавание образов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: eliachim2013@yandex.ru

Шикама Фабиен – магистр по направлению "Биотехнические системы и технологии" (2016), аспирант кафедры биотехнических систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Сфера научных интересов – цифровая обработка биомедицинских сигналов, протезирование и реабилитация.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, 197376, Россия
E-mail: fshikama@mail.ru

Нифонтов Евгений Михайлович – доктор медицинских наук (2003), профессор (2009) Санкт-Петербургского государственного медицинского университета им. акад. И. П. Павлова. Автор более 150 научных работ. Сфера научных интересов – фундаментальная медицина; кардиология.

Адрес: Первый Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. акад. И. П. Павлова, ул. Льва Толстого, д. 6-8, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: nifontov@spm.u.rssi.ru

References

1. Stress Tests Could Mark Bottom for Bank Stocks. Available at: <https://www.cnbc.com/2017/06/28/stress-tests-fed-bank-stocks.html> (accessed 24.01.2020).

2. Falk E., De Feyter P. J., Shah P. K. Ischemic Heart Disease. London, Manson Publishing, 2007, 312 p.

3. ACC/AHA Guidelines for Exercise Testing. A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association. Task Force on Practice Guidelines (Committee on Exercise Testing). JACC, 1997, vol. 30, no. 1, pp. 260–315.

4. Vilcant V., Zeltser R. Treadmill Stress Testing. NCB

Метод прогнозирования основных показателей кардиопульмонального нагрузочного тестирования для больных с хронической сердечной недостаточностью 103
A Method for Predicting the Main Indicators of Cardiopulmonary Stress Testing for Patients with Chronic Heart Failure

Bokshelf, 2019. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29763078> (accessed 24.01.2020).

5. Albouaini K., Egred M., Alahmar A., Wright D. J. Cardiopulmonary Exercise Testing and Its Application. *Postgraduate medical j.* 2007, vol. 83, iss. 985, pp. 675–682. doi: 10.1136/hrt.2007.121558

6. Papadakis M. A., McPhee S., Rabow M. W. *Current Medical Diagnosis & Treatment.* 59th ed. New York, McGraw-Hill, 2020, 1933 p.

7. Fletcher G. F., Ades P. A., Kligfield P., Arena R., Balady G. J., Bittner V. A., Coke L. A., Fleg J. L., Forman D. E., Gerber T. C., Gulati M., Madan K., Rhodes J., Thompson P. D., Williams M. A. Exercise Standards for Testing and Training. A Scientific Statement from the American Heart Association. *Circulation.* 2013, vol. 128, no. 8, pp. 873–934. doi: 10.1161/CIR.0b013e31829b5b44

8. Hammond H. K., Kelly T. L., Froelicher V. Radionuclide Imaging Correlatives of Heart Rate Impairment during Maximal Exercise Testing. *J. of the American College of Cardiology.* 1983, vol. 2, no. 5, pp. 826–833. doi: 10.1016/s0735-1097(83)80228-9

9. Bruce R. A., Fisher L. D., Cooper M. N., Gey G. O. Separation of Effects of Cardiovascular Disease and Age on Ventricular Function with Maximal Exercise. *American J. of Cardiology.* 1974, vol. 34, no. 7, pp. 757–763. doi: 10.1016/0002-9149(74)90692-4

10. Brawner C. A., Ehrman J. K., Schairer J. R., Cao J. J., Keteyian S. J. Predicting Maximum Heart Rate Among Patients with Coronary Heart Disease Receiving β -Adrenergic Blockade Therapy. *American Heart J.* 2004, vol. 148, no. 5, pp. 910–914. doi: 10.1016/j.ahj.2004.04.035

11. Keteyian S. J., Kitzman D., Zannad F., Landzberg J., Arnold J. M., Brubaker P., Brawner C. A., Bensimhon D., Hellkamp A. S., Ewald G. Predicting Maximal HR in Heart Failure Patients Receiving β -Blockade Therapy. *Medicine and Science in Sports and Exercise.* 2012, vol. 44, no. 3, pp. 371–376. doi: 10.1249/MSS.0b013e318234316f

12. Almeida A. E., Stefani C. M., Nascimento J. A., Almeida N. M., Santos A. C., Ribeiro J. P., Stein R. An Equation for the Prediction of Oxygen Consumption in a Brazilian Population. *Arquivos brasileiros de cardiologia.* 2014, vol. 103, no. 4, pp. 299–307.

13. Lanier G. M., Zheng Qi, Wagman G., Tseng C.-H. Simple Prediction Formula for Peak Oxygen Consumption in Patients with Chronic Heart Failure. *J. of Exercise Science & Fitness.* 2012, vol. 10, no. 1, pp. 23–27. doi: 10.1016/j.jesf.2012.04.005

14. Froelicher V. F., Thompson A. J., Davis G., Stewart A. J., Triebwasser J. H. Prediction of Maximal Oxygen Consumption: Comparison of the Bruce and Balke Treadmill Protocols. *Chest.* 1975, vol. 68, no. 3, pp. 331–336. doi: 10.1378/chest.68.3.331

15. McArdle W. D., Katch F. I., Katch V. L. *Essentials of Exercise Physiology.* New York, Lippincott Williams & Wilkins, 2010, 790 p.

16. Krasichkov A. S., Grigoriev E. B., Nifontov E. M. Influence of Myographic Interference and Isoelectric Line Drift on Correlation Coefficient in Classification of Cardiac complexes. *Biomedical Engineering.* 2015, vol. 49, iss. 4, pp. 220–223. doi: 10.1007/s10527-015-9533-7

17. Krasichkov A. S., Grigoriev E. B., Bogachev M. I., Nifontov E. M. Shape Anomaly Detection under Strong Measurement Noise: an Analytical Approach to Adaptive Thresholding. *Physical Review E.* 2015, vol. 92, iss. 4, 042927. doi: 10.1103/PhysRevE.92.042927

Information about the authors

Alexander S. Krasichkov, Dr. Sci. (Eng.) (2017), Associate Professor of the Department of Radio System of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: statistical radio engineering; signal processing.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: krass33@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0002-8120-3293>

Eliachim Mbazumutima, Master (2019) in Biotechnical Systems and Technologies, postgraduate student of the Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 1 scientific publication. Area of expertise: digital processing of biomedical signals; machine learning; pattern recognition.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: eliachim2013@yandex.ru

Fabian Shikama, Master (2016) in Biotechnical Systems and Technologies, postgraduate student of the Department of Bioengineering Systems of Saint Petersburg Electrotechnical University. Area of expertise: digital processing of biomedical signals; prosthetics and rehabilitation.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 Professor Popov Str., St Petersburg 197376, Russia

E-mail: fshikama@mail.ru

Evgeny M. Nifontov, Dr. Sci. (Medicine) (2003), Professor (2009) of Pavlov First Saint Petersburg State Medical University. The author of more than 150 scientific publications. Area of expertise: fundamental medicine; cardiology.

Address: Pavlov First Saint Petersburg State Medical University, 6-8 L'va Tolstogo Str., St Petersburg 197022, Russia

E-mail: nifontov@spmu.rssi.ru