



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-92-98>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 612.76:612.2

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЛЕГОЧНЫХ ОБЪЕМОВ НА ОСНОВЕ ЗАПИСИ БИОМЕХАНИКИ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ

И. И. РЕВИНСКАЯ, П. В. КАМЛЯЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 04.10.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Разработана методика исследования биомеханики дыхания для определения объема вдыхаемого и выдыхаемого воздуха. Методика основана на записи движений стенок грудной клетки и живота человека во время дыхания. Запись движения стенок грудной клетки и живота выполняли с помощью видеокамеры. В качестве эталонного метода измерения легочных объемов использовали спирометр. По предложенному алгоритму проведены исследования среди 63 человек (возраст – 18–26 лет, индекс массы тела – 18,1–32,6 кг/м², рост – 160–192 см). Статистическая обработка результатов показала тесную взаимосвязь между измеренными объемами и относительными отклонениями стенок грудной клетки и живота человека. Разработанная методика может быть использована для косвенной оценки легочных объемов.

Ключевые слова: биомеханика, дыхание, спирометрия, видеокамера, объем легких, статистический анализ, методика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Научная работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Министерства образования Республики Беларусь в рамках научного проекта T22MB-017 «Методы и средства транскутанного мониторинга объемных и скоростных показателей дыхания».

Для цитирования. Ревинская, И. И. Методика оценки легочных объемов на основе записи биомеханики дыхательных движений / И. И. Ревинская, П. В. Камляч // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 6. С. 92–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-92-98>.

METHODOLOGY FOR ASSESSING LUNG VOLUMES BASED ON RECORDING THE BIOMECHANICS OF RESPIRATORY MOVEMENTS

INA I. REVINSKAYA, PAVEL V. KAMLACH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 04.10.2023

Abstract. The method for studying the biomechanics of breathing has been developed to determine the volume of inhaled and exhaled air. The technique is based on recording the movements of the walls of the chest and abdomen of a person during breathing. A video camera was used to record movements of the chest and abdominal walls, with a spirometer used as the reference method for measuring lung volumes. According to the proposed technique, studies were conducted among 63 people (age – 18–26 years, body mass index ranged from 18.1–32.6 kg/m², height – 160–192 cm). Statistical processing of the results showed a strong relationship between the measured volumes and the relative deviations of the walls of the human chest and abdomen. The developed technique for studying the biomechanics of breathing can be used for indirect assessment of lung volumes.

Keywords: biomechanics, respiration, spirometry, video camera, lungs volume, statistical analysis, technique.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The scientific work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and Ministry of Education of the Republic of Belarus (project T22MB-017 “Methods and means of transcutaneous monitoring of volumetric and velocity parameters of respiration”).

For citation. Revinskaya I. I., Kamlach P. V. (2023) Methodology for Assessing Lung Volumes Based on Recording the Biomechanics of Respiratory Movements. *Doklady BGUIR*. 21 (6), 92–98. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-6-92-98> (in Russian).

Введение

Современные подходы к оценке легочных объемов дыхания применяются на практике повсеместно, в том числе в диагностической и спортивной медицине. Классические методы исследования функции дыхания (спирометрия, пневмотахометрия и т. п.) позволяют выявлять возможные патологии функции дыхания, респираторные заболевания, такие как хроническая обструктивная болезнь легких, астма, бронхит и т. д.

Спирометрия предназначена для измерения объема вдыхаемого и выдыхаемого воздуха и считается золотым стандартом диагностики хронической обструктивной болезни легких [1]. Во время подготовки к спирометрии требуются одноразовые расходные материалы (мундштук, антибактериальный фильтр, сменная сетка и др.) [1] и регулярная санитарная обработка измерительной трубки от мокроты после каждого пациента. После санобработки необходима калибровка прибора, что увеличивает время подготовки оборудования к работе. В процессе измерений обязательно использование носового зажима для достоверности результатов, что причиняет дискомфорт испытуемому и может повлиять на нормальный характер дыхания.

В современной диагностической медицине применяются косвенные бесконтактные методы исследования функции внешнего дыхания [2]. Последние научные исследования в данной области обосновывают возможность использования методов, основанных на анализе движения грудной клетки и живота [1, 3]. Отмечаются различные подходы к анализу дыхания: на основе записи деформации грудной клетки, вызванной дыхательной активностью (датчики деформации); по изменению трансторакального импеданса (датчики импеданса); запись движений грудной клетки (например, наклон грудной клетки, ускорение и скорость) с помощью видеокамеры, акселерометра, гироскопа, магнитометра. При использовании косвенных методов следует учитывать: необходимость построения калибровочной модели, описывающей взаимосвязь измеряемых физических величин (например, ускорения, измеренного с помощью акселерометра); необходимость плотного контакта датчика с кожей (при контактном методе); влияние положения тела испытуемого при проведении измерений; необходимость цифровой фильтрации измеренных сигналов от различного рода помех и т. д.

В [4, 5] приведен фотометрический метод записи биомеханики дыхания для косвенной оценки объема вдыхаемого и выдыхаемого воздуха. Взаимосвязь биомеханических движений грудной и брюшной стенок с соответствующими изменениями диаметров воздухоносных путей во время непрерывного процесса дыхания изложена в математической модели [5].

В статье предложена разработанная авторами методика исследования биомеханики дыхания, позволяющая по значениям отклонений стенок грудной клетки и живота оценивать легочные объемы дыхания.

Материалы и методы исследования

Для оценки объемных параметров дыхания в качестве эталонного метода использовали автоматизированный многофункциональный спирометр MAC-1. Основные технические характеристики спирометра: предел измерений объема воздуха 1–8 дм³, измеряемый поток – до ±18 л/с, класс точности ±5 %, автоматическая проверка качества тестов в соответствии с ATS-1994 и ATS/ERS-2005 [6].

Отклонения стенок грудной клетки и живота определяли с помощью видеокамеры [4, 5] с основными техническими характеристиками: количество точек матрицы – 12 Мп, максимальное число кадров в секунду – 240 кадров/с (1280×720), оптическая стабилизация. Структурная схема исследований представлена на рис. 1.

Методика исследования биомеханики дыхания (рис. 2) основана на способе регистрации биомеханики грудной клетки и живота [4] и аппаратно-программном комплексе [5].

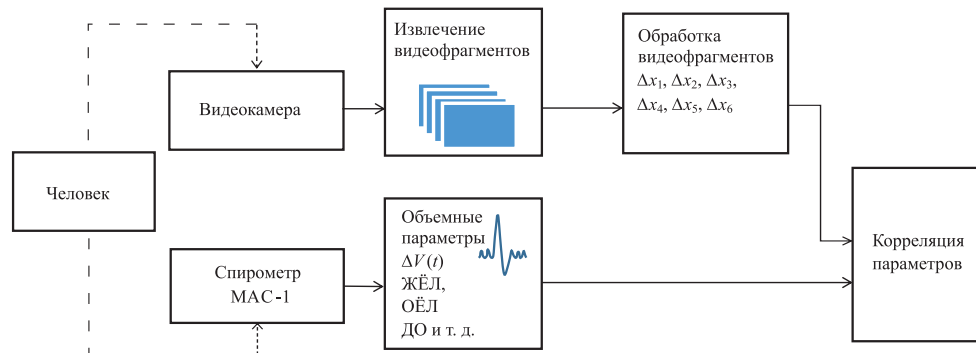


Рис. 1. Структурная схема исследований
Fig. 1. Structural diagram of research

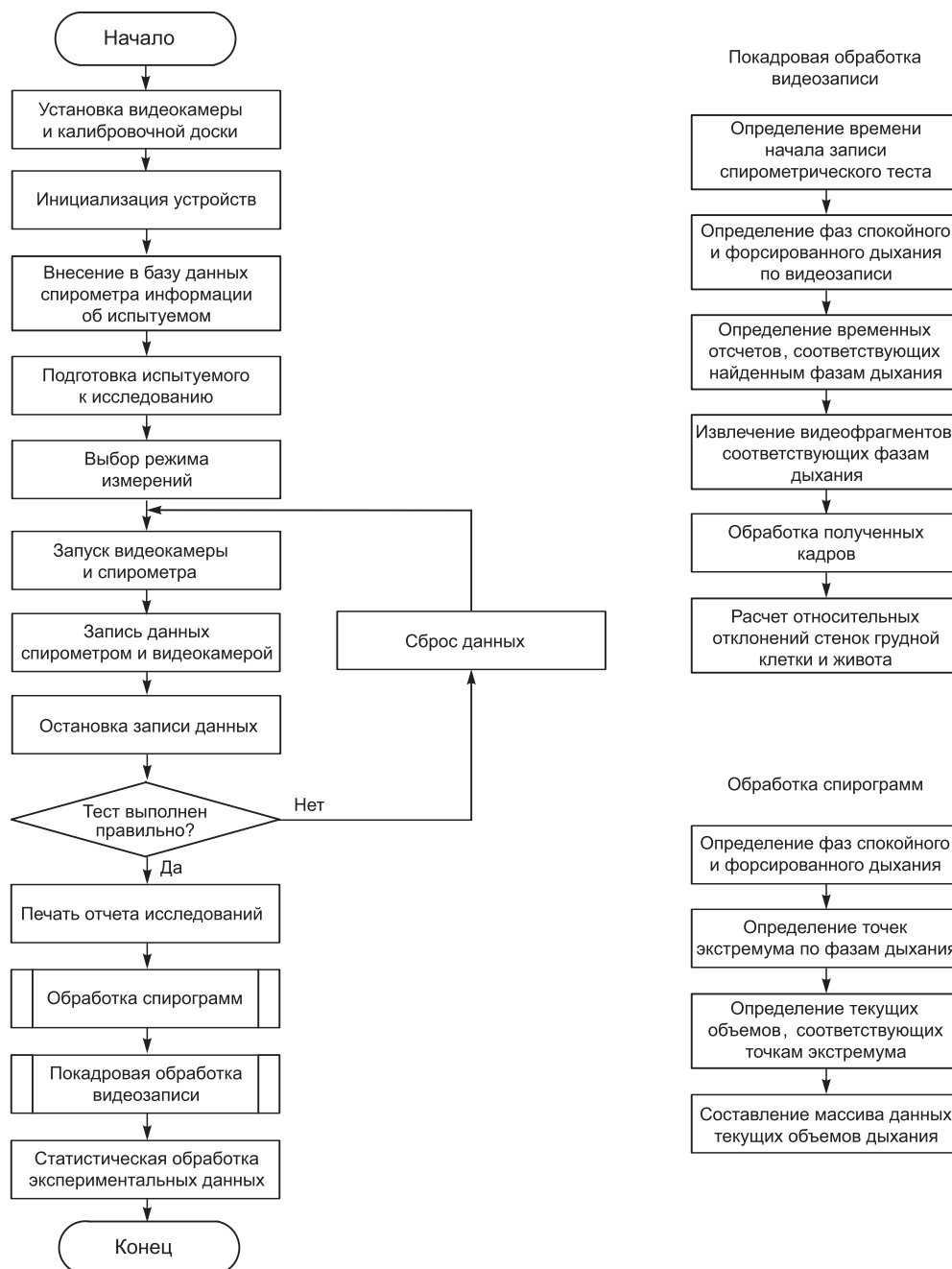


Рис. 2. Методика исследования биомеханики дыхания
Fig. 2. Technique for researching the biomechanics of breathing

Согласно рис. 2, методика исследования биомеханики дыхания включает в себя следующие этапы.

1. Установка видеокамеры и калибровочной доски. Калибровочная доска имеет цену деления 0,5 и 1,0 см по оси абсцисс и 2,0 см по оси ординат и предназначена для измерения координат крайних точек стенок спины и грудной клетки (живота). Калибровочная доска крепится на стене слева от испытуемого, а видеокамера размещается на расстоянии 50–60 см справа от него. Высота установки доски регулируется индивидуально для каждого испытуемого, который находится в положении сидя. Видеокамера должна размещаться в профиль испытуемого параллельно плоскости измерения.

2. Инициализация устройств. Настройка и калибровка спирометра производятся в соответствии с руководством по его эксплуатации.

3. Сбор анамнеза (возраст, рост, вес, наличие заболеваний, в том числе хронических), ввод информации об испытуемом в базу спирометра. При этом в спирометре автоматически рассчитываются должные величины объемов дыхания (дыхательный объем, жизненная емкость легких (ЖЁЛ) и т. д.). Должные объемы легких рассчитываются по формулам:

– для мужчин:

$$\text{ЖЁЛ} = 40 \times \text{рост (см)} + 30 \times \text{массу (кг)} - 4400; \quad (1)$$

– для женщин:

$$\text{ЖЁЛ} = 40 \times \text{рост (см)} + 10 \times \text{массу (кг)} - 3800. \quad (2)$$

4. Подготовка к исследованию. Испытуемого необходимо проинструктировать, как правильно выполнять спирометрические тесты, проконтролировать правильное положение головы, плеч и всего тела в целом (в положении сидя). Спина испытуемого не должна соприкасаться со спинкой стула, руки не должны закрывать обзор крайних точек спины и грудной клетки (живота).

5. Выбор режима измерений. Измерения производятся в режиме спирометрии, пневмотахометрии либо максимальной вентиляции легких [7]. В режиме спирометрии измерение ЖЁЛ осуществляется на глубоком вдохе [7, 8].

6. Запуск видеокамеры и спирометра, выполнение спирометрических тестов.

7. Запись данных спирометром и видеокамерой. Спирометром определяется качество выполнения теста, при этом исследователь произносит команды согласно тесту и контролирует по кривой спирометрии и внешним признакам правильность выполнения команд и техники дыхания, а также наличие носового зажима, правильность положения тела, головы и рук [8]. В случае ошибок при выполнении теста испытуемым запись останавливается и начинается заново. Если количество попыток выполненных тестов превышает три-четыре измерения, то испытуемому необходимо дать отдых в течение 5–10 мин, и запись исследования осуществить повторно. По окончании теста печатается протокол (отчет) об исследовании.

8. Остановка записи данных.

9. Обработка спирограмм:

- а) определение фаз спокойного и форсированного дыхания;
- б) определение точек экстремума по фазам дыхания;
- в) определение текущих объемов, соответствующих точкам экстремума;
- г) составление массива данных текущих объемов дыхания.

10. Покадровая обработка видеозаписи:

- а) определение времени начала записи спирометрического теста;
- б) определение фаз спокойного и форсированного дыхания по видеозаписи;
- в) определение временных отсчетов, соответствующих найденным фазам дыхания;
- г) извлечение видеофрагментов, соответствующих фазам дыхания. Каждый извлекаемый видеофрагмент сопоставляется с фиксируемыми точками на спирограмме;

д) обработка полученных кадров. На каждом видеофрагменте по шести уровням (схематично показанным на рис. 3) определяются значения координат крайних точек спины x_{fi} (задней стенки) и передней стенки грудной клетки (живота) x_{ai} ;

е) расчет относительных отклонений стенок грудной клетки и живота осуществляется по формуле

$$\Delta x_i = x_{ai} - x_{fi}, \quad (3)$$

где x_{ai} – крайняя точка передней стенки грудной клетки (живота), определяемая по калибровочной доске; x_{fi} – крайняя точка задней стенки (спины); i – номер уровня отклонения.

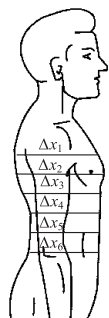


Рис. 3. Определение относительных отклонений стенок грудной клетки (живота) по шести уровням

Fig. 3. Determination of relative deviations of the chest (abdominal) walls at six levels

Уровни отклонений от 1 до 3 описывают грудное, от 4 по 6 – брюшное дыхание. Относительные отклонения стенок грудной клетки и живота определяли на калибровочной доске по шести уровням, равноудаленным по высоте друг от друга. Величины Δx_1 , Δx_2 , Δx_3 соответствуют уровням 1, 2, 3 и описывают грудное дыхание. Исходным уровнем являлась третья точка (уровень 3) – на 3 см ниже уровня соска, по которой определяли величину отклонения Δx_3 . Величины Δx_1 и Δx_2 соответствуют уровням на 8 и 16 см выше исходного уровня относительно калибровочной доски. Брюшное дыхание описывают отклонения Δx_4 , Δx_5 и Δx_6 , которые определялись ниже третьего уровня на 8, 16 и 24 см соответственно.

11. Статистическая обработка экспериментальных данных.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследования проводили на базе кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. По описанной выше методике было обследовано 63 человека (возраст – 18–26 лет, индекс массы тела – 18,1–32,6 кг/м², рост – 160–192 см). Для каждого испытуемого рассчитали относительные отклонения стенок грудной клетки (живота) и соответствующие им объемы вдыхаемого и выдыхаемого воздуха, определили коэффициенты корреляции между измеряемыми величинами. На рис. 4 представлены точечные диаграммы рассеяния значений текущего объема дыхания и отклонений габаритных размеров грудной клетки (живота).

С помощью корреляционно-регрессионного анализа экспериментальных результатов установлено, что модель полиномиальной регрессии наиболее точно описывает тесноту связи между объемами вдыхаемого и выдыхаемого воздуха и значениями отклонений габаритных размеров грудной клетки. Взаимосвязь экспериментальных значений наиболее точно описывает уровень 3 (корреляционное отношение $\eta = (0,98 \pm 0,05)$, коэффициент детерминации $R^2 = 0,95$, уровень значимости $\alpha = 0,05$), для уровней 1 и 2 корреляционное отношение составило $\eta = (0,92 \pm 0,08)$, $R^2 = 0,84$, для уровня 4 – $\eta = (0,84 \pm 0,11)$, $R^2 = 0,70$. Наименьшие значения корреляционного отношения для точек уровней 5 ($\eta = (0,66 \pm 0,16)$, $R^2 = 0,44$) и 6 ($\eta = (0,47 \pm 0,19)$, $R^2 = 0,22$) можно объяснить тем, что у испытуемых преобладал грудной тип дыхания, а движение грудной клетки и живота происходило несогласованно.

Взаимосвязь описывается нелинейно в виде полиномиальной кривой в связи с тем, что в процессе дыхания объемы легких изменяются совместно с движениями стенок грудной клетки и живота в горизонтальной, саггитальной и вертикальной плоскостях. В рассматриваемом случае измерения проводились только в горизонтальной плоскости, поскольку в ней амплитуды отклонения туловища наибольшие, и в этой связи упрощаются расчеты экспериментальных значений.

Заключение

Разработана методика исследования биомеханики дыхания, согласно которой предложено осуществлять запись отклонений стенок грудной клетки и живота с помощью видеокамеры и при этом спирометром измерять текущие дыхательные объемы. Результаты исследований показали сильную взаимосвязь между измеряемыми величинами. По результатам статистической обработки данных, полученных в результате обследования 63 человек (возраст 18–26 лет, индекс массы тела – 18,1–32,6 кг/м², рост – 160–192 см), определили уровень, когда дыхательные движения наиболее выраженные и имеют наибольшие значения коэффициентов корреляции и детерминации ($\eta = (0,98 \pm 0,05)$, $R^2 = 0,95$, $\alpha = 0,05$ для уровня 3). Полученные результаты подтверждают возможность применения разработанной методики при косвенной оценке объемных параметров дыхания.

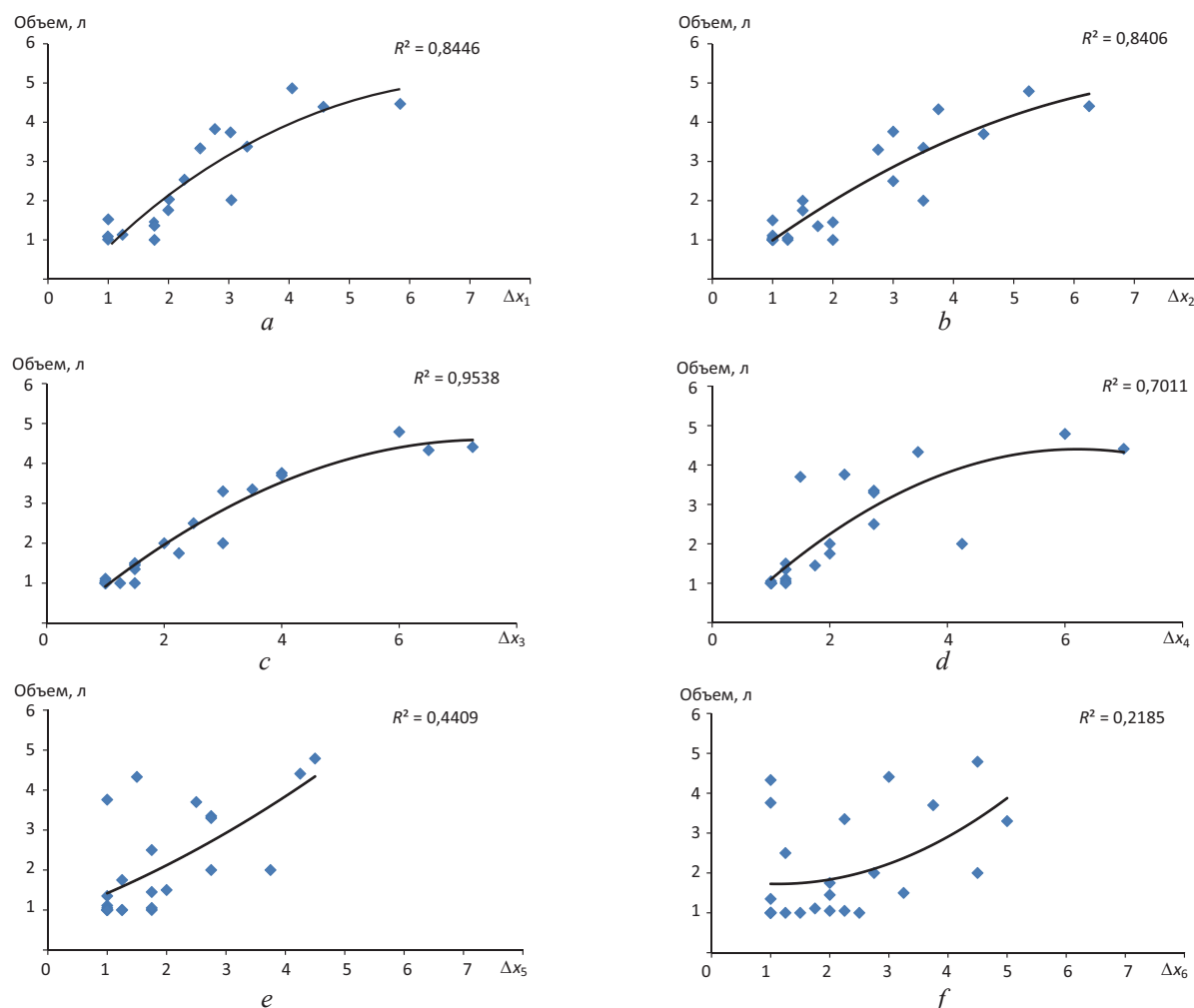


Рис. 4. Диаграммы рассеяния значений текущего объема дыхания и отклонений габаритных размеров грудной клетки (живота)
Fig. 4. Scatter diagrams of the values of the current breathing volume and deviations of the overall dimensions of the chest (abdomen)

Список литературы

1. Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors / M. Chu [et al.] // npj. Digital Medicine. 2019. No 2. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
2. Artefact Detection in Impedance Pneumography Signals: A Machine Learning Approach / J. Moeyersons // Sensors. 2021. Vol. 21, No 8. <https://doi.org/10.3390/s21082613>.
3. Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate / C. Massaroni // Sensors. 2019. Vol. 19, No 4. <https://doi.org/10.3390/s19040908>.
4. Ревинская, И. И. Математическая модель для оценки объемных параметров дыхания / И. И. Ревинская // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 1. С. 19–25. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-19-25>.
5. Revinskaya, I. I. Hardware-Software Complex for Studying of Breathing Volume Parameters / I. I. Revinskaya, P. V. Kamlach, Ya. I. Liashchevich // Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series. 2023. Vol. 68, No 2. P. 149–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-149-155>.
6. Standardisation of Spirometry / M. R. Miller [et al.] // European Respiratory Journal Series. “ATS/ERS TASK FORCE: Standardisation of Lung Function Testing”. 2005. Vol. 26, No 2. P. 319–338. Doi: 10.1183/09031936.05.00034805.
7. Организация работы по исследованию функционального состояния легких методами спирографии и пневмотахографии и применение этих методов в клинической практике / О. И. Турина [и др.]. Минск, 2002. 81 с.
8. Давыдченко, С. В. Исследование вентиляционной функции легких в клинической практике / С. В. Давыдченко, А. А. Бова. Минск: Белор. гос. мед. ун-т, 2007. 112 с.

References

1. Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Hoang N. Pham, Bar-Yoseph R., Radom-Aizik S., Jain R., Dan M. Cooper, Khine M. (2019) Respiration Rate and Volume Measurements Using Wearable Strain Sensors. *npj Digital Medicine*. (2). <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.
2. Moeyersons J., Morales J., Seews N., Van Hoof C., Hermeling E., Groenendaal W., Willems R., Van Huffel S., Varon C. (2021) Artefact Detection in Impedance Pneumography Signals: A Machine Learning Approach. *Sensors*. 21 (8). <https://doi.org/10.3390/s21082613>.
3. Massaroni C., Nicolò A., Lo Presti D., Sacchetti M., Silvestri S., Schena E. (2019) Contact-Based Methods for Measuring Respiratory Rate. *Sensors*. 19 (4). <https://doi.org/10.3390/s19040908>.
4. Revinskaya I. I. (2023) Mathematical Model for Estimation of Volume Respiratory Parameters. *Doklady BGUIR*. 21 (1), 19–25. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-1-19-25> (in Russian).
5. Revinskaya I. I., Kamlach P. V., Liashchevich Ya. I. (2023) Hardware-Software Complex for Studying of Breathing Volume Parameters. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 68 (2), 149–155. <https://doi.org/10.29 235/1561-8358-2023-68-2-149-155>.
6. Miller M. R., Hankinson J., Brusasco V., Burgos F., Casaburi R., Coates A., Crapo R., Enright P., van der Grinten C. P. M., Gustafsson P., Jensen R., Johnson D. C., MacIntyre N., McKay R., Navajas D., Pedersen O. F., Pellegrino R., Viegi G., Wanger J. (2005) Standardization of Spirometry. *European Respiratory Journal. Series “ATS/ERS TASK FORCE: Standardization of Lung Function Testing”*. 26 (2), 319–338. Doi: 10.1183/09031936.05.00034805.
7. Turina O. I., Lapteva I. M., Kalechits O. M., Manichev I. A., Shcherbitsky V. G. (2002) *Organization of Work on the Study of the Functional State of the Lungs Using Spirography and Pneumotachography and the Use of These Methods in Clinical Practice*. Minsk. 81 (in Russian).
8. Davydenko S. V., Bova A. A. (2007) *The Study of the Ventilation Function of the Lungs in Clinical Practice*. Minsk, Belarusian State Medical University. 112 (in Russian).

Вклад авторов

Ревинская И. И. разработала методику исследования биомеханики дыхания, подготовила рукопись статьи.

Камлач П. В. определил цели и задачи исследования.

Authors' contribution

Revinskaya I. I. developed a technique for researching the biomechanics of breathing, prepared the manuscript of the article.

Kamlach P. V. determined the goals and objectives of the study.

Сведения об авторах

Ревинская И. И., асп. каф. электронной техники и технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Камлач П. В., канд. техн. наук, доц., доц. каф. электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-84-14
E-mail: inna_revinskaya@bsuir.by
Ревинская Инна Ивановна

Information about the authors

Revinskaya I. I., Postgraduate at the Department of Electronic Technology and Engineering of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Kamlach P. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-84-14
E-mail: inna_revinskaya@bsuir.by
Revinskaya Ina Ivanauna