

УДК 612.76:612.2

## АЛГОРИТМ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ БИОМЕХАНИКИ ДЫХАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ



**И.И. Ревинская**  
ассистент кафедры  
электронной техники и  
технологии БГУИР  
irewinskaya.bsuir@gmail.com



**П.В. Камлач**  
заместитель декана  
факультета  
компьютерного  
проектирования, кандидат  
технических наук, доцент  
kamlachpv@bsuir.by



**Е.И. Лещевич**  
аспирант, инженер  
кафедры электронной  
техники и технологии  
e.leshchevich@bsuir.by

### **И.И. Ревинская**

Окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Ассистент кафедры электронной техники и технологии. Область научного интереса – медицинская электроника и обработка медицинских сигналов

### **П.В. Камлач**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Доцент, кандидат технических наук, заместитель декана факультета компьютерного проектирования, доцент кафедры электронной техники и технологии БГУИР. Область научного интереса – проектирование медицинских электронных систем.

### **Е.И. Лещевич**

Окончил Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. Аспирант кафедры электронной техники и технологии. Область научного интереса – влияние инфразвука на биологические ткани.

**Аннотация.** Разработан аппаратно-программный комплекс для исследования биомеханических дыхательных движений стенок грудной клетки и живота, а также алгоритм исследования и обработки данных биомеханики дыхания. Предложена методика обработки данных исследований.

**Ключевые слова:** дыхание, биомеханика, видеокамера, спирометрия, объем легких, алгоритм обработки данных

**Введение.** Функциональные методы исследования приобретают ключевое значение в диагностике заболеваний легких. Это обусловлено потребностью клиницистов в объективной количественной и качественной характеристике возникающих у больного нарушений дыхания. Своевременная диагностика, наблюдение и лечение пациента может гарантировать эффективность лечения и контроль болезни [1-2]. Пациенты с хроническими респираторными заболеваниями должны следить за состоянием своего дыхания, и любые внезапные изменения в состоянии должны быть немедленно устранены для предотвращения дальнейших обострений.

Классические методы исследования функции внешнего дыхания (спирометрия, пневмотахометрия, бодиплетизмография и т.д.) позволяют выявлять возможные патологии функции дыхания, респираторные заболевания, такие как хроническая обструктивная болезнь легких (ХОБЛ), астма, бронхит, нарушение бронхиальной проводимости и т.д. [2-3]. Спирометрия предназначена для измерения объема вдыхаемого и выдыхаемого воздуха и считается «золотым стандартом» диагностики хронической обструктивной болезни лёгких [3].

В настоящее время все более актуально использовать как контактные, так и бесконтактные методы исследования функции внешнего дыхания. Последние научные исследования в данной области обосновывают возможность применения методов, основанных на анализе движения грудной клетки и живота [3-4]. Различают три подхода к анализу дыхания: на основе записи деформации грудной клетки, вызванной дыхательной активностью (датчики деформации); на основе изменения трансторакального импеданса (датчики импеданса); на основе записи движений грудной клетки (например, наклон грудной клетки, ускорение и скорости) с помощью акселерометра, гироскопа, магнитометра.

Эти методы позволяют косвенно оценивать объемные параметры дыхания по полученным значениям с датчиков (изменение импеданса грудной клетки во время дыхания, изменение емкости датчика, сопротивления и т.д.) из-за движения грудной клетки и брюшной полости. Таким образом, актуально и перспективно разрабатывать методы исследования функции внешнего дыхания по движению грудной клетки и живота. Такие методы позволят решить описанные ранее недостатки.

Целью данной работы является разработка алгоритма обработки данных биомеханики дыхания, позволяющего по значениям отклонений стенок грудной клетки и живота оценивать легочные объемы дыхания.

**Материалы и методы.** Для исследования биомеханических движений стенок грудной клетки и живота во время дыхания предложен аппаратно-программный комплекс (рисунок 1), который включает в себя видеокамеру, спирометр и персональный компьютер [5-6].

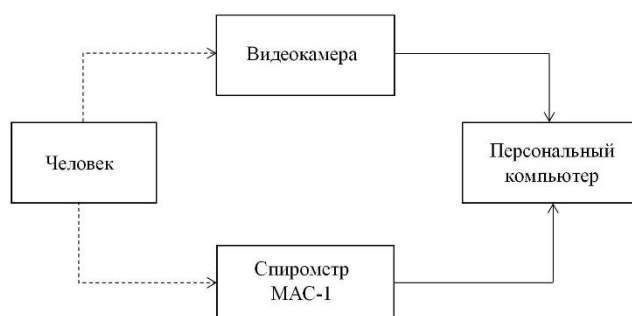


Рисунок 1. Структурная схема аппаратно-программного комплекса

Видеокамера необходима для записи движений стенок грудной клетки и живота испытуемого (субъект) во время дыхания. Спирометр является эталонным прибором измерения объемов вдыхаемого и выдыхаемого воздуха и предназначен для оценки достоверности предложенного способа измерения.

Методика проведения эксперимента приведена на рисунке 2.

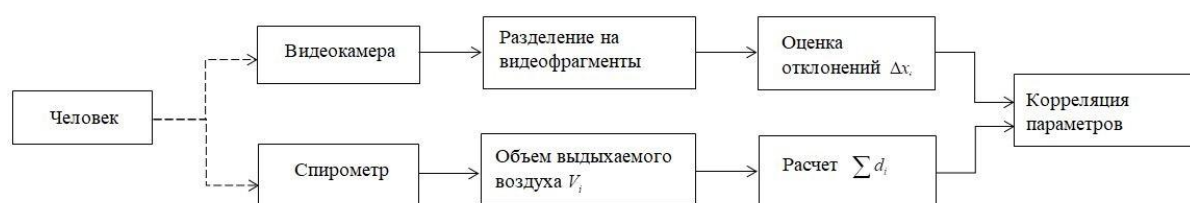


Рисунок 2. Методика проведения эксперимента

На персональном компьютере (ПК) с помощью специализированного программного обеспечения проводится разделение видеофайлов на видеофрагменты, обработка видеофрагментов, извлечение данных со спирометра, а также статистический анализ полученных параметров экспериментальных данных.

**Алгоритм обработки данных.** Алгоритм регистрации биомеханики дыхания (рисунок 3) основан на способе регистрации биомеханики грудной клетки и живота [5] и аппаратно-программного комплекса [6], который включает в себя следующие этапы [7]:

1 Установка видеокамеры и калибровочной доски.

Калибровочная доска имеет цену деления 0,5 и 1 см по оси абсцисс и 2 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. Видеокамера размещается на расстоянии 50-60 см справа от испытуемого. Высота ее установки 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 производится в соответствии с руководством по его эксплуатации.

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

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). Зубы должны лечь на мундштук, язык должен лежать на нижнем небе под мундштуком, губы плотно охватывают трубку. Перед выполнением теста необходимо перекрыть носовое дыхание носовым зажимом.

5 Выбор режима измерений.

Измерения производятся в режиме спирометрии, пневмотахометрии либо максимальной вентиляции легких [8]. В режиме спирометрии измерение жизненной емкости легких (ЖЕЛ) осуществляется на глубоком вдохе [8-9].

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 [9]. 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 минут, и запись исследования осуществить повторно. По окончании теста печатается протокол (отчет) об исследовании.

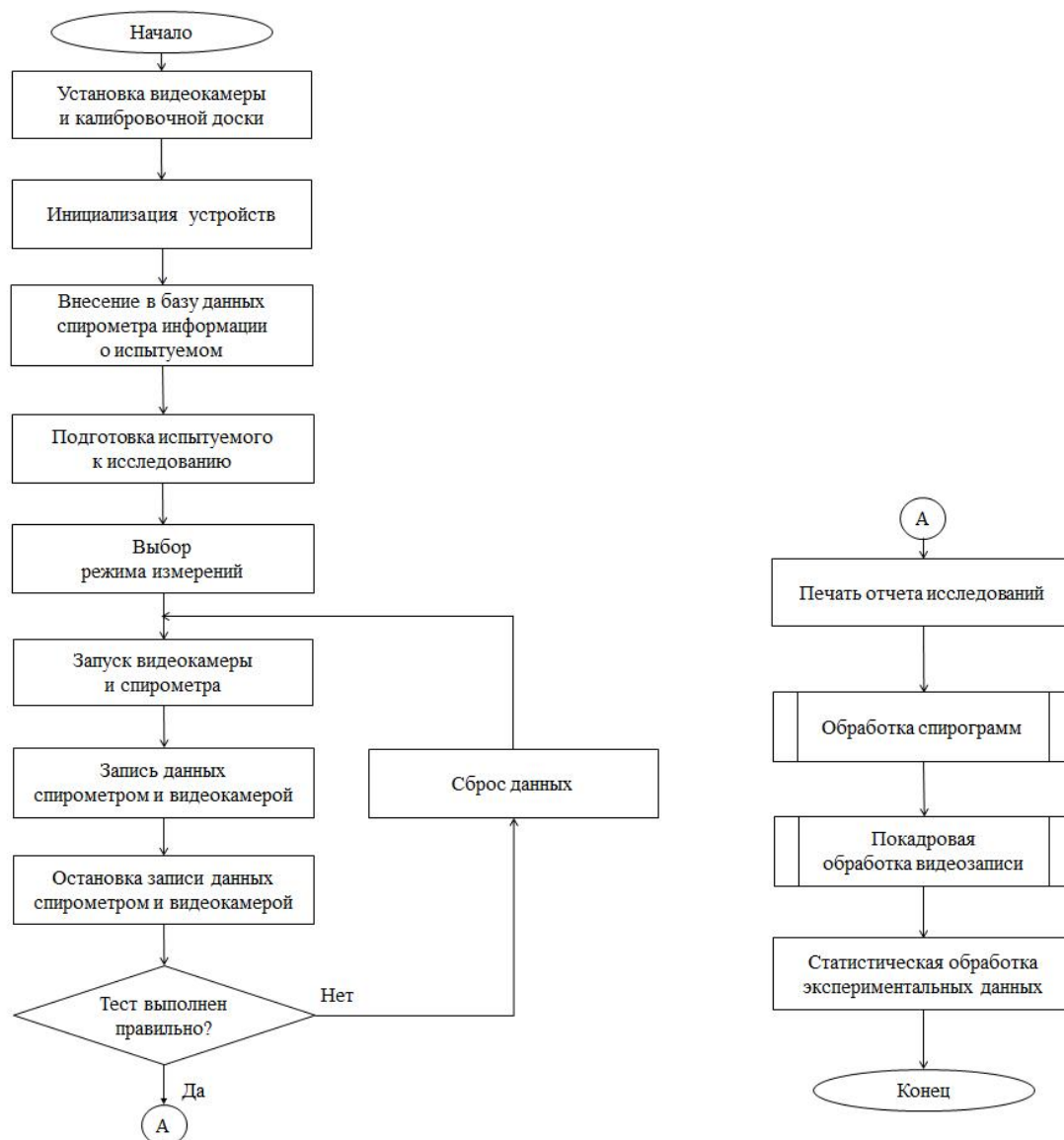


Рисунок 3. Алгоритм исследования и обработки данных биомеханики дыхания

8 Остановка записи данных.

9 Обработка спирограмм. Обработка данных включает этапы (рисунок 4):

- 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 (рисунок 4):

- 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, полученной со спирометра.

д) обработка полученных кадров. На каждом видеофрагменте по шести уровням 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 формуле:

$$\Delta x_i = x_{ai} - x_{fi}, \quad (1)$$

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. Уровни отклонений от 1 до 3 описывают грудное дыхание, уровни от 4 по 6 описывают брюшное дыхание.

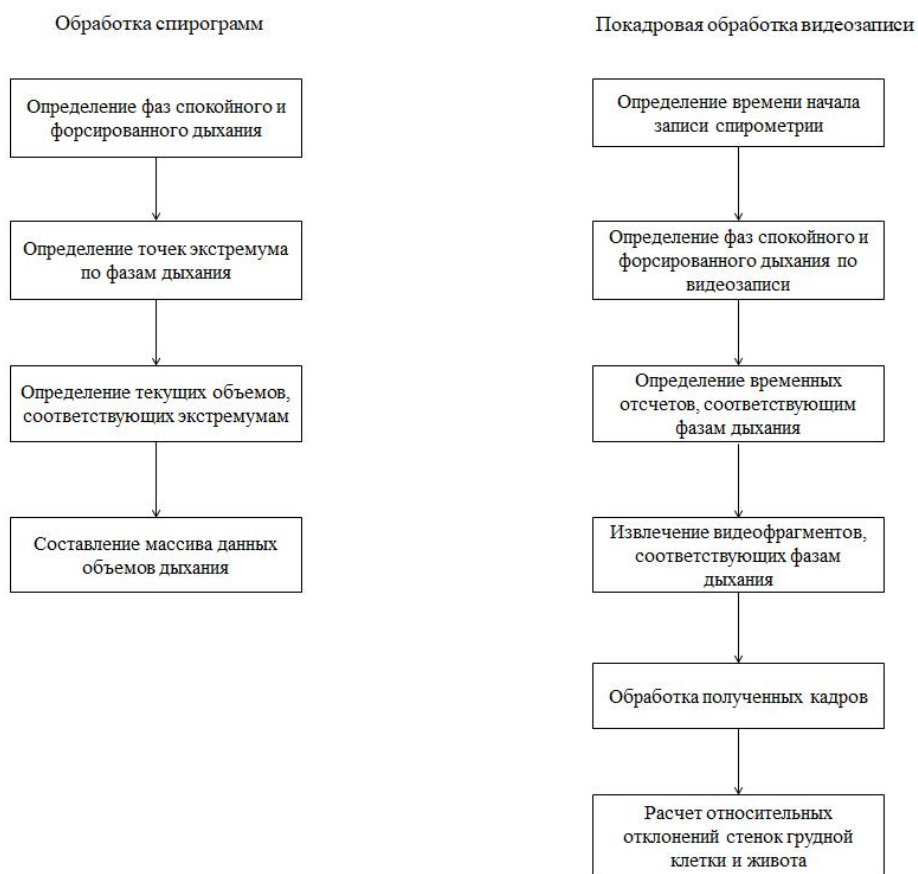


Рисунок 4. Алгоритм обработки спирограмм и покадровой обработки видеозаписи

Относительные отклонения стенок грудной клетки и живота определяли на калибровочной доске по шести уровням, равноудаленным по высоте друг от друга. Величины  $\Delta x_1$ ,  $\Delta x_2$ ,  $\Delta x_3$  соответствуют уровням 1, 2, 3 и описывают грудное дыхание. Исходным уровнем являлась третья точка (уровень 3), которая на 3 см ниже уровня соска, по которой определяли величину отклонения  $\Delta x_3$ . Величины  $\Delta x_1$  и  $\Delta x_2$  соответствуют

уровням на 8 и 16 см выше исходного уровня относительно калибровочной доски. Брюшное дыхание описывают отклонения  $\Delta x_4$ ,  $\Delta x_5$  и  $\Delta x_6$ , которые определялись ниже третьего уровня на 8, 16 и 24 см соответственно.

11 Статистическая обработка экспериментальных данных. Для оценки нелинейной связи между объемами вдыхаемого и выдыхаемого воздуха и значений отклонений  $\Delta x_i$  рассчитывается корреляционное отношение  $\eta$  по формуле:

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{\sigma_{ост}^2}{\sigma^2}} = \sqrt{1 - \frac{(y_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{ост}^2$  – остаточная дисперсия;

$\sigma^2$  – дисперсия фактических значений результативного признака;

$y$  – теоретические значения, полученные по уравнению регрессии;

$y_i$  – эмпирические значения;

Подкоренное выражение корреляционного отношения представляет собой коэффициент детерминации  $R^2$  и рассчитывается по формуле:

$$R^2 = 1 - \frac{(y_i - \bar{y})^2}{(y_i - \bar{y})^2}. \quad (3)$$

Коэффициент детерминации  $R^2$  показывает, насколько тесно наблюдаемые значения примыкают к линии регрессии. Для проверки адекватности регрессионной модели используется критерий Стьюдента  $t_\eta$  и рассчитывается по формуле:

$$t_\eta = \frac{\eta}{m_\eta} = \eta \sqrt{\frac{N-2}{1-\eta^2}}, \quad (4)$$

где  $(N-2)$  – число степеней свободы при заданном уровне значимости и объеме выборки  $N$ ;

$m_\eta$  – стандартная ошибка корреляционного отношения  $\eta$ .

Для корреляционного отношения рассчитывается стандартная ошибка, которую можно записать в виде:  $\eta \pm m_\eta$ .

**Заключение.** Разработанные аппаратно-программный комплекс и алгоритм исследований и оценки легочных объемов позволяет по значениям отклонений стенок грудной клетки и живота оценивать легочные объемы дыхания. Использование статистической обработки экспериментальных данных позволяет обрабатывать большие объемы данных.

### Список литературы

[1] Ferkol, T.; Schraufnagel, D. The global burden of respiratory disease. Ann. Am. Thorac. Soc. 2014, 11, p. 404–406.

[2] Буцель, А. Ч. Острые респираторные вирусные инфекции: синдромальная диагностика, лечение и профилактика : учебно-методическое пособие / А. Ч. Буцель, Е. С. Яцкевич, Г. Г. Максименя. – Минск : БГМУ, 2020. – 48 с.

[3] Chu M., Nguyen T., Pandey V., Zhou Y., Pham H. N., Bar-Yoseph R., Radom-Aizik S. [et al.]. Respiration rate and volume measurements using wearable strain sensors. *npj Digital Medicine*, 2019, vol. 2, iss. 1, art. ID 8. <https://doi.org/10.1038/s41746-019-0083-3>.

[4] Moeuyersons, J.; Morales, J.; Seews, N.; Van Hoof, C.; Hermeling, E.; Groenendaal, W.; Willems, R.; Van Huffel, S.; Varon, C. Artefact Detection in Impedance Pneumography Signals: A Machine Learning Approach. *Sensors* 2021, 21, 2613. <https://doi.org/10.3390/s21082613>.

[5] Ревинская, И. И. Математическая модель для оценки объемных параметров дыхания = Mathematical Model for Estimation of Volume Respiratory Parameters / И. И. Ревинская // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 1. – С. 19-25.

[6] Revinskaya I. I., Kamlach P. V., Liashchevich E. I. Hardware-software complex for studying of breathing volume parameters. *Vestsi Natsyuanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 2, pp. 149–155. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-2-149-155>.

[7] Ревинская, И. И. Методика оценки легочных объемов на основе записи биомеханики дыхательных движений = Methodology for Assessing Lung Volumes Based on Recording the Biomechanics of Respiratory Movements / И. И. Ревинская, П. В. Камлач // Доклады БГУИР. – 2023. – Т. 21, № 6. – С. 92–98.

[8] Дубровский, В. И. Биомеханика / В. И. Дубровский, В. Н. Федорова. М.: Владос-Пресс, 2003.

[9] Давыдченко, С. В. Исследование вентиляционной функции легких в клинической практике / С. В. Давыдченко, А. А. Бова. Минск: Белор. госуд. медицин. ун-т, 2007.

### Авторский вклад

**Ревинская Инна Ивановна** – разработка аппаратно-программного комплекса, методики эксперимента, а также алгоритма обработки данных биомеханики дыхательных движений, подготовка рукописи статьи.

**Камлач Павел Викторович** – постановка целей и задачи исследования.

**Лещевич Евгений Игоревич** – разработка аппаратно-программного комплекса, методики эксперимента, подготовка рукописи статьи.

## ALGORITHM FOR PROCESSING DATA OF BIOMECHANICS OF RESPIRATORY MOVEMENTS

***I.I. Revinskaya***  
*Assistant at the Department of  
Electronic Engineering and  
Technology of BSUIR*

***P.V. Kamlach***  
*Cand. of Sci., Associate  
Professor, Associate Professor at  
the Department of Electronic  
Engineering and Technology*

***E.I. Liashchevich***  
*Postgraduate student of the  
Department of Electronic  
Engineering and Technology of  
BSUIR*

**Abstract.** A hardware-software complex has been developed for studying the biomechanical movements of the walls of the chest and abdomen, as well as an algorithm for studying and processing data on the biomechanics of breathing. A methodology for processing research data is proposed.

**Keywords.** breathing, biomechanics, video camera, spirometry, lung volume, data processing algorithm.