

УДК 616-71

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.001](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.001)

Моделирование паттернов дыхания новорожденных с использованием метода электроимпедансной томографии

М.А. Конько✉, Г.К. Алексанян, С.И. Пятницын, Н.И. Горбатенко

*Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация*

Резюме. В статье представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на моделирование пяти основных паттернов дыхания новорожденных с использованием электроимпедансного томографа и упрощенной физической модели средостения новорожденных. Исследование охватывает такие паттерны, как нормальное дыхание (эупноэ), периодическое дыхание, тахипноэ, дыхание с ретракциями и центральное апноэ. Разработанная ранее упрощенная физическая модель средостения новорожденных оснащена системой управляемого воздухонаполнения, что позволяет воспроизводить различные объемы и режимы вентиляции. Экспериментальные исследования подтвердили возможность моделирования и регистрации каждого из пяти паттернов дыхания с использованием электроимпедансного томографа. Разработанная методика позволяет проводить исследования и тестирование новых алгоритмов обработки данных в области электроимпедансной томографии легких новорожденных. Полученные результаты подтверждают, что электроимпедансная томография является инструментом для диагностики и мониторинга дыхательных нарушений у новорожденных. Предложенные решения могут быть использованы для разработки новых подходов к диагностике и лечению респираторных заболеваний в неонатологии.

Ключевые слова: электроимпедансная томография, новорожденные, паттерны, диагностика, мониторинг, легкие.

Для цитирования: Конько М.А., Алексанян Г.К., Пятницын С.И., Горбатенко Н.И. Моделирование паттернов дыхания новорожденных с использованием метода электроимпедансной томографии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1849> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.001

Modeling of newborn breathing patterns using electrical impedance tomography

М.А. Konko✉, G.K. Aleksanyan, S.I. Pyatnitsyn, N.I. Gorbatenko

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk,
the Russian Federation*

Abstract. The article presents the results of experimental studies aimed at modeling five basic breathing patterns of newborns using an electrical impedance tomograph and a simplified physical model of the neonatal mediastinum. The study covers such patterns as normal breathing (eupnea), periodic breathing, tachypnea, breathing with retractions and central apnea. The previously developed simplified physical model of the neonatal mediastinum is equipped with a controlled air filling system, which allows reproducing various volumes and modes of ventilation. Experimental studies confirmed the possibility of modeling and recording each of the five breathing patterns using an electrical impedance tomography. The developed technique allows research and testing of new data processing algorithms in the field of electrical impedance tomography of the lungs of newborns. The results confirm that electrical impedance tomography is a promising tool for diagnosing and monitoring respiratory disorders in newborns. The proposed solutions can be used to develop new approaches to the diagnosis and treatment of respiratory diseases in neonatology.

Keywords: electrical impedance tomography, newborns, patterns, diagnostics, monitoring, lungs.

For citation: Konko M.A., Aleksanyan G.K., Pyatnitsyn S.I., Gorbatenko N.I. Modeling of newborn breathing patterns using electrical impedance tomography. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1849> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.001

Введение

Дыхательная система новорожденных, особенно недоношенных детей, является одной из наиболее уязвимых систем организма, требующей постоянного мониторинга для своевременного выявления и предотвращения критических состояний вентиляции легких. У младенцев с первых дней жизни дыхательная система еще не полностью сформирована, что делает их особенно восприимчивыми к различным нарушениям. Апноэ, тахипноэ, периодическое дыхание и другие – эти состояния могут быть как временными, так и признаками серьезных патологий. Однако традиционные методы диагностики, такие как рентген или компьютерная томография, не всегда подходят для новорожденных из-за потенциальных рисков. В этой связи предлагается использовать метод электроимпедансной томографии (ЭИТ) [1, 2].

Электроимпедансная томография позволяет оценить состояние легких, не подвергая новорожденного воздействию вредного излучения, фиксирует изменения в распределении воздушных потоков и тканей легких в режиме реального времени, что делает данный метод идеальным инструментом для изучения дыхательных процессов.

Целью работы является моделирование паттернов дыхания новорожденных с использованием метода ЭИТ на экспериментальном стенде. В рамках исследования планируется воспроизводить различные дыхательные сценарии (нормальное дыхание, апноэ, тахипноэ, периодическое дыхание, дыхание с ретракцией), оценить возможности ЭИТ в обнаружении и визуализации паттернов, а также вывести формулу изменения измерительной информации (разности потенциалов) во времени для проведения дальнейших исследований.

Результаты работы могут послужить основой для создания новых диагностических систем, способных улучшить качество медицинской помощи в отделениях интенсивной терапии новорожденных и снизить риски, связанные с респираторными нарушениями.

Материалы и методы

Для моделирования паттернов дыхания новорожденных и оценки возможностей электроимпедансной томографии (ЭИТ) разработан экспериментальный стенд, опубликованный ранее в [3], который включает электроимпедансный томограф (ЭИТ-томограф) [4], упрощенную функциональную модель средостения (УФМС) новорожденных совместно с системой воздухонаполнения емкостей (легких), опубликованную ранее в [3]. На Рисунке 1 приведен экспериментальный стенд с обозначением его основных элементов.

ЭИТ-томограф (1) подключен к персональному компьютеру (ПК) (2) при помощи USB-кабеля, а к УФМС (3) при помощи электродной системы (6). Электродная система (ряд) (ЭС) (6) состоит из электродов, расположенных непосредственно в УФМС, 16 электродных кабелей (4), которые подключаются к соответствующему электроду, и разъема (5). Разъем соединяет ЭС с ЭИТ-томографом. Количество электродов в электродном ряду УФМС (фантоме) равно 16, согласно внутренней структуре ЭИТ-томографа и разработанного ПО. Система воздухонаполнения емкостей (легких) (7) помещается в фантом для моделирования глобальной и регионарной вентиляции [3].

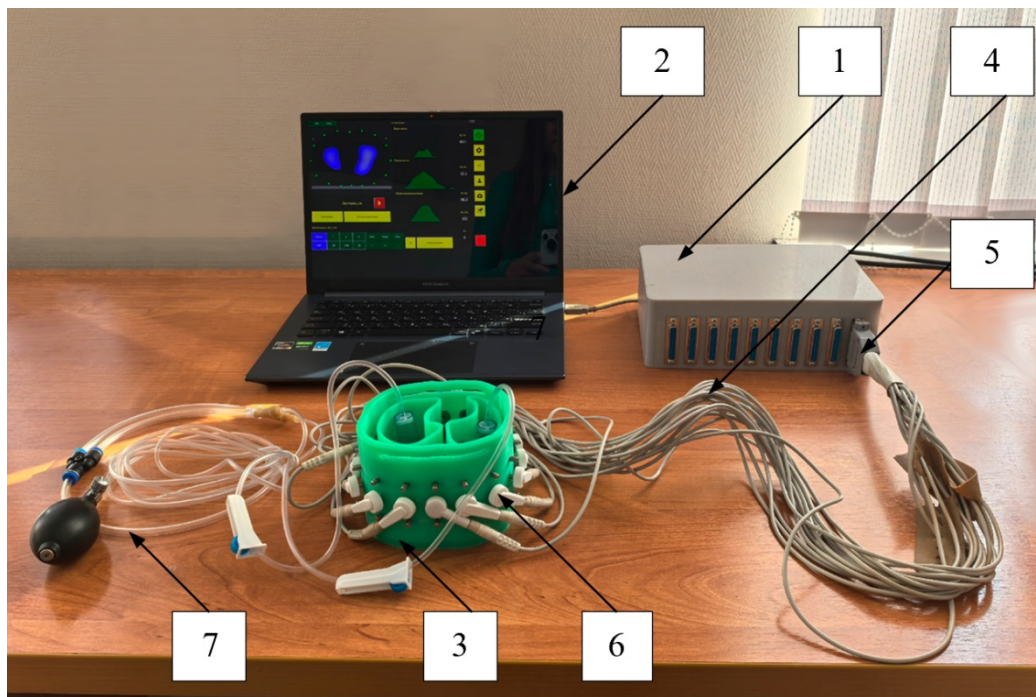


Рисунок 1 – Экспериментальный стенд для моделирования воздухонаполнения легких новорожденных

Figure 1 – Experimental stand for modeling air filling of newborn lungs

Внутри УФМС созданы две независимые камеры, имитирующие левое и правое легкое, с возможностью изменения объема для моделирования дыхательных движений. Управления дыхательными паттернами производится при помощи медицинской груши для нагнетания воздуха. Объемы резервуара УФМС и емкостей (легких) приведены в Таблице 1. Управления частотно-временными объемами и параметрами производится при помощи медицинской груши для нагнетания воздуха до полного заполнения независимых камер эластичной емкостью (шаром), если дыхание глубокое, и наоборот.

Таблица 1 – Объемы резервуара УФМС и емкостей (легких)

Table 1 – Volumes of the SPMM reservoir and containers (lungs)

№ п/п	Наименование	Объем, мл
1	Объем резервуара фантома	650
2	Объем двух легких	120
3	Объем левого легкого	50
4	Объем правого легкого	70

В УФМС предусмотрено три ряда электродов, обеспечивающих возможность проведения экспериментов для моделирования глобальной и регионарной вентиляции при различных расположениях электродной системы (ряда), что позволяет наблюдать за динамикой изменения поля проводимости (измерительной информации) $\Delta\Phi$ с нескольких ракурсов, а также проводить исследования в нескольких плоскостях расположения емкостей (легких). Это позволяет увидеть легкие в 3D и понять, в какой части легких воздухонаполнение происходит хуже при одновременном подключении трех электродных поясов (рядов). В данной работе при проведении экспериментальных исследований используется один электродный ряд, так как перечисленные выше варианты моделирования глобальной и регионарной вентиляции не проводились.

Анализ типов дыхания новорожденных [5–7] позволил выявить 12 паттернов, представленных в Таблице 2 [8, 9]. Данные приведены для доношенных новорожденных.

Таблица 2 – Паттерны дыхания новорожденных
Table 2 – Newborn breathing patterns

№ п/п	Наименование паттерна	Время вдоха, выдоха паузы / количество циклов в минуту	Краткое описание
1	Эупноэ (норма)	Вдох: 0,4 с. Выдох: 0,6 с. Пауза: 0–0,2 с. Циклов: 50	Спокойное дыхание, без видимых усилий.
2	Периодическое дыхание	Вдох: 0,5–0,7 с. Выдох: 0,5–0,7 с. Пауза: 2–3 с. (между вдохом и выдохом) Циклов: 30–60	Чередование нормального дыхания с кратковременными паузами (5–10 секунд), вызванное незрелостью дыхательного центра, является физиологическим явлением, если не сопровождается цианозом или брадикардией.
3	Тахипноэ: (транзиторное-влажное легкое)	Вдох: 0,3–0,5 с. Выдох: 0,5–1 с. Пауза: 0,5 с. Циклов: 40–60	Учащенное дыхание, вызванное респираторным дистресс-синдромом, пневмонией, сердечной недостаточностью или транзиторным тахипноэ новорожденных, чаще наблюдается у недоношенных детей и новорожденных после кесарева сечения, сопровождается втяжением грудной клетки, раздуванием крыльев носа и цианозом.
4	Дыхание с ретракцией	Вдох: 0,3–0,5 с. Выдох: 0,5–1 с. Пауза: менее 0,5 с. Циклов: 40–60	При таком дыхании могут наблюдаться втягивания межреберных промежутков и податливых частей грудной клетки во время вдоха. Этот тип дыхания указывает на дыхательные затруднения и, как правило, связан с респираторным дистресс-синдромом, бронхолегочной дисплазией или пневмонией.
5	Гаспинг (удушьё)	Вдох: 1–2 с. Выдох: 1–2 с. Пауза: 0,5–1 с. Циклов: 40–60	Очень редкий, но опасный тип дыхания, который может свидетельствовать о тяжелых проблемах дыхания и требует немедленного вмешательства. Характерен для глубоких нарушений центральной нервной системы или при выраженной гипоксии.
6	Брадипноэ	Вдох: 1–2 с. Выдох: 2–3 с. Пауза: 0,5–1 с. Циклов: менее 30	Редкий паттерн для новорожденных, при котором частота дыхания значительно ниже нормы. Может быть вызвано незрелостью центральной нервной системы, которая не всегда способна поддерживать ритмичное дыхание. Также часто связано с гипоксией или нарушением обмена веществ.
7	Отдышка (Диспноэ) экспираторная или смешанная	Вдох: 1 с. Выдох: 2–3 с. Пауза: 0,5–1 с. Циклов: 40–60	Экспираторная одышка связана преимущественно с обструкцией нижних дыхательных путей, тогда как смешанная одышка отражает более тяжелые состояния, затрагивающие как верхние, так и нижние дыхательные пути.

Таблица 2 (продолжение)
Table 2 (continued)

8	Апноэ недоношенных (центральное)	Вдох: 1 с. Выдох: 1 с. Пауза: от нескольких секунд до 10 с. Циклов: 30–60	Возникает из-за нарушений в центре дыхательного контроля в мозге. Ребенок временно прекращает дышать, грудная клетка не поднимается.
9	Апноэ недоношенных (обструктивное)		Связано с физической блокировкой дыхательных путей (например, языком или мягким небом). Во время вдоха грудная клетка поднимается, но воздух не проходит, что приводит к задержке дыхания.
10	Апноэ недоношенных (смешанное)		Сочетает в себе элементы как центрального, так и обструктивного апноэ. Сначала наблюдается центральное апноэ (без дыхательных движений), а затем может возникнуть обструкция, когда дыхание не восстанавливается сразу.
11	Апноэ недоношенных (рефлекторное)		Связано с рефлексами, активируемыми различными стимулами (например, определенные тактильные или слуховые раздражители). Может проявляться как кратковременные эпизоды, когда дыхание временно останавливается, но быстро восстанавливается.

Блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований приведена на Рисунке 2.

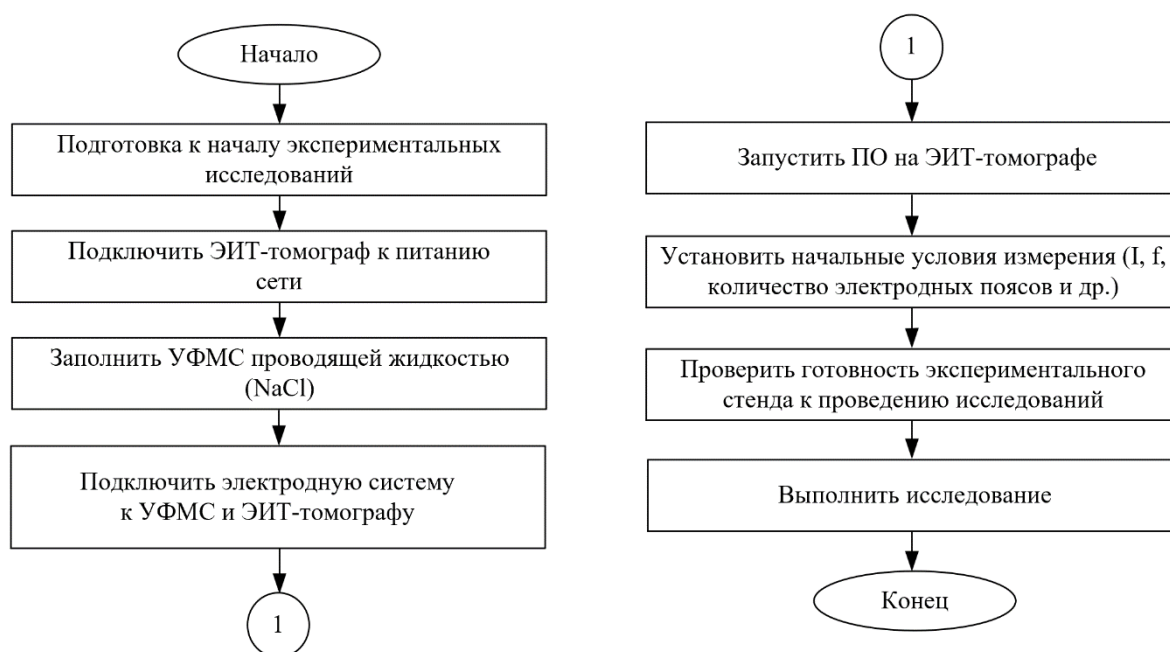


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований
Figure 2 – The block scheme of the algorithm of experimental research

Получение измерительной информации $\Delta\Phi$ (массива разностей потенциалов) выполнено с использованием ЭИТ-томографа, УФМС и других элементов экспериментального стенда.

Результаты

Для получения и обработки результатов ЭИТ-исследования используется алгоритм, который реализован в виде ПО. Разработанная программа представляет собой окно с кнопками выбора параметров f , I , количество электродных рядов, электродов, формы тока, и др. В окне в режиме реального времени можно наблюдать за воздухонаполнением легких в виде динамического изображения и кривых для правого, левого и двух легких.

На Рисунке 3 изображен экспериментальный стенд, подготовленный к проведению исследований.

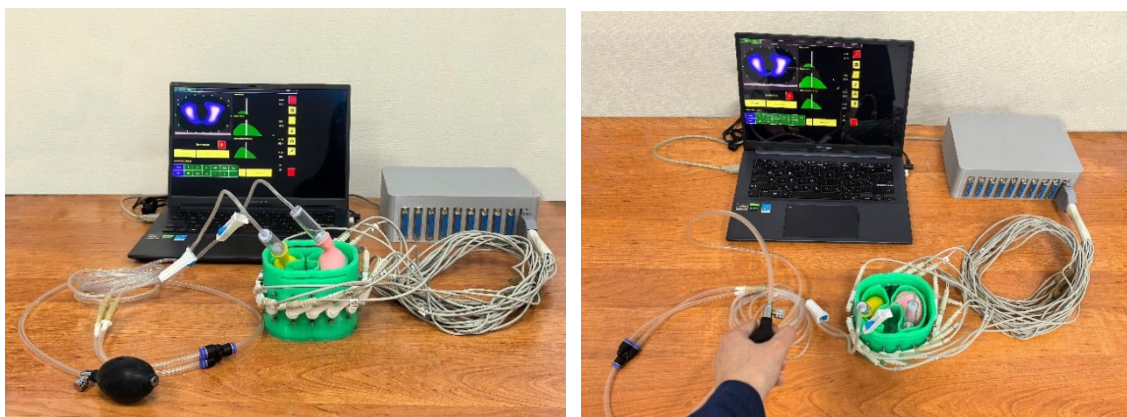


Рисунок 3 – Экспериментальный стенд, подготовленный к проведению исследований
Figure 3 – Experimental stand prepared for conducting researches

В ходе экспериментальных исследований смоделировано пять основных паттернов дыхания, которые наиболее часто встречаются в клинической практике, а именно: нормальное дыхание (эупноэ), периодическое дыхание, тахипноэ, дыхание с ретракциями, центральное апноэ (наиболее часто встречается среди других типов апноэ). В Таблице 3 приведены параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований.

Таблица 3 – Параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований
Table 3 – Parameters used in conducting experimental studies

№ п/п	Параметр	Значение
1	Частота инжектируемого тока (f), кГц	200
2	Амплитуда инжектируемого тока (I), мА	5
3	Количество используемых электродных рядов	Один электродный ряд (средний)
4	Количество электродов, шт.	16
5	Форма тока	Синусоидальный
6	Время проведения исследования, с	60

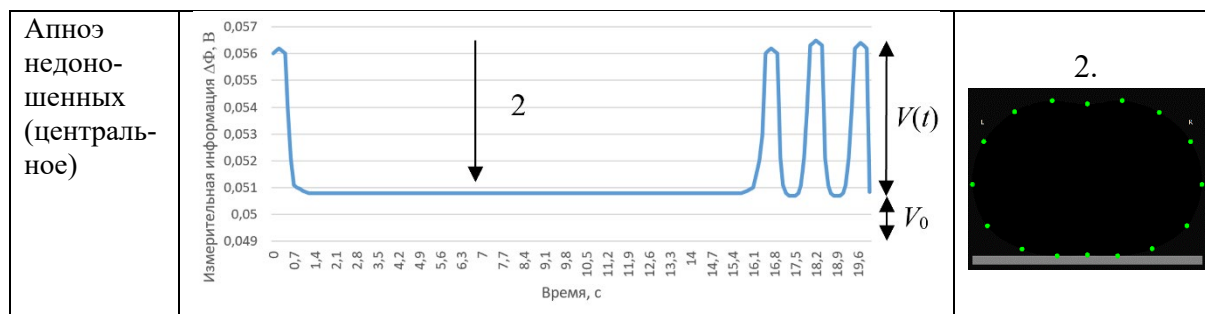
Основные паттерны дыхания новорожденных, смоделированные на экспериментальном стенде, приведены в Таблице 4. Время проведения исследований выполнены для 60 секунд, однако в Таблице 4 для лучшей визуализации результатов моделирования приведены графики для 20 секунд. На графиках (в столбце результаты моделирования) представлены зависимость измерительной информации $\Delta\Phi$ (массива разностей потенциалов) (В) от времени (с). В крайнем столбце приведены результаты визуализации $\Delta\Omega$. Для моделируемых паттернов стрелкой и цифрой 1 показан момент

стоп-кадра для одного из максимальных значений полученной измерительной информации $\Delta\Phi$. Для паттернов периодическое дыхание и апноэ стрелками и цифрой 2 показан момент стоп-кадров результатов визуализации $\Delta\Omega$ при отсутствии дыхания.

Таблица 4 – Паттерны дыхания, смоделированные на экспериментальном стенде
Table 4 – Breathing patterns simulated on the experimental stand

Наименование паттерна	Результаты моделирования (зависимость измерительной информации $\Delta\Phi$ (массива разностей потенциалов) (В) от времени (с))	Результаты визуализации $\Delta\Omega$
Эупноэ (норма)		
Периодическое дыхание		
Тахипноэ: (транзиторное – влажное легкое)		
Дыхание с ретракцией		

Таблица 4 (продолжение)
Table 4 (continued)



Измерительная информация $\Delta\Phi(t)$ зависит от разницы между текущим объемом $V(t)$ и остаточным объемом V_0 . Изменение объема воздуха $V(t)$ влияет на распределение потенциалов (измерительной информации $\Delta\Phi(t)$), так как изменяет геометрию и свойства среды (например, ее проводимость).

В ходе полученных данных и проведенного анализа выявлено, что разность потенциалов $\Delta\Phi(t)$ изменяется во времени как:

$$\Delta\Phi(t) = k \times f(V_0 + V(t)),$$

где V_0 – остаточный объем воздуха [10] в емкости (легких), $V(t)$ – объем воздуха, поступающий в емкости (легкие), k – коэффициент пропорциональности, который зависит от геометрии системы, свойств среды и параметров тока.

Обсуждение

В ходе экспериментальных исследований с использованием ЭИТ-томографа, УФМС и других основных элементов экспериментального стенда успешно смоделированы пять основных паттернов дыхания, которые наиболее часто встречаются в клинической практике: нормальное дыхание (эупноэ), периодическое дыхание, тахипноэ, дыхание с ретракциями и центральное апноэ. Выбор числа паттернов для проведения исследований проведен на основе аналитического обзора медицинской и научной литературы в данной предметной области, а также обусловлен функциональными и техническими возможностями экспериментального стенда. Оценка работоспособности изделия проводилась на временном отрезке $t = 60$ секунд (на графиках показана для 20 секунд), данная длительность может быть увеличена или уменьшена в зависимости от цели и задачи эксперимента. Дыхательный объем $V(t)$ определялся числом нажатия на грушу для нагнетания воздуха. Полученные решения подтверждают возможность моделирования и анализа паттернов дыхания с применением разработанных авторами технических средств ЭИТ, позволяют глубже понять их механизмы и особенности, что имеет важное значение для диагностики и мониторинга дыхательных нарушений в неонатологии для клинического применения ЭИТ. Высокая временная разрешающая способность метода позволяет детально изучать динамику дыхательных процессов. Полученные данные о разности потенциалов $\Delta\Phi(t)$ демонстрируют четкую зависимость от времени для конкретного случая, что свидетельствует о возможности использования ЭИТ для мониторинга изменений в легочной ткани и распределении воздушных потоков. Для подтверждения клинической эффективности метода необходимы дополнительные исследования с участием реальных пациентов, а также учет индивидуальных анатомических особенностей. Все это делает

метод ценным инструментом для диагностики и мониторинга пациентов с различными респираторными патологиями.

Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Адаптирован экспериментальный стенд, разработанный ранее в [3], позволяющий моделировать паттерны дыхания новорожденных в лабораторных условиях, включающий ЭИТ-томограф, УФМС и другие основные элементы стенда, обеспечивающий проведение экспериментальных исследований, связанных с моделированием режимов глобальной и регионарной вентиляции новорожденных.

2. Выбраны паттерны дыхания на основе аналитического обзора медицинской и научной литературы в данной предметной области, а также выделены и сформированы их частотно-временные параметры.

3. Проведено моделирование пяти ключевых паттернов дыхания. При проведении исследований выявлено, что метод ЭИТ способен различать нормальное дыхание (эупное) и патологические состояния (периодическое дыхание, тахипное, дыхание с ретракциями и центральное апное), что подчеркивает его диагностический потенциал, позволяющий наглядно представить динамику различных паттернов дыхания, что важно для понимания их особенностей, что обеспечивает более глубокое изучение патофизиологических процессов, связанных с дыхательной системой.

Дальнейшее развитие результатов исследований направлено на изучение влияния индивидуальных анатомических особенностей на результат ЭИТ-исследования. Планируется расширить исследования и усовершенствовать алгоритмы анализа данных. Кроме того, стоит рассмотреть возможность интеграции ЭИТ с другими методами диагностики, такими как пульсоксиметрия, спирометрия, для получения более полной картины состояния дыхательной системы новорожденных. Проведенные исследования вносят вклад в понимание механизмов дыхательных нарушений и открывают новые возможности для их исследования методом ЭИТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Scaramuzzo G., Pavlovsky B., Adler A., et al. Electrical impedance tomography monitoring in adult ICU patients: state-of-the-art, recommendations for standardized acquisition, processing, and clinical use, and future directions. *Critical Care*. 2024;28. <https://doi.org/10.1186/s13054-024-05173-x>
2. Cui Z., Liu X., Qu H., Wang H. Technical Principles and Clinical Applications of Electrical Impedance Tomography in Pulmonary Monitoring. *Sensors*. 2024;24(14). <https://doi.org/10.3390/s24144539>
3. Конько М.А., Алексанян Г.К., Горбатенко Н.И., Елкин Н.С., Темняков Н.С. Упрощенные физические модели средостения новорожденных для электроимпедансной томографии. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(1). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.011>
Konko M.A., Aleksanyan G.K., Gorbatenko N.I., Elkin N.S., Temnyakov N.S. Simplified physical models of the mediastinum of newborns for electrical impedance tomography. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.011>
4. Алексанян Г.К. Экспериментальная апробация макета информационно-измерительной системы мониторинга регионарного вентиляционно-

- перфузионного отношения легких человека. *Современные наукоемкие технологии*. 2021;(12-1):9–14. <https://doi.org/10.17513/snt.38947>
- Aleksanyan G.K. Experimental approbation of the layout of the information-measuring system for monitoring the regional ventilation-perfusion ratio of human lungs. *Modern High Technologies*. 2021;(12-1):9–14. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.38947>
5. Gaertner V.D., Mühlbacher T., Waldmann A.D., Bassler D., Rüegger Ch.M. Early prediction of pulmonary outcomes in preterm infants using electrical impedance tomography. *Frontiers in Pediatrics*. 2023;11. <https://doi.org/10.3389/fped.2023.1167077>
 6. Onland W., Hutten J., Miedema M., et al. Precision Medicine in Neonates: Future Perspectives for the Lung. *Frontiers in Pediatrics*. 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.586061>
 7. Mirza A., Martinez M., Kilaikode S. Unusual Cause of Respiratory Distress in a Term Neonate. *Ochsner Journal*. 2022;22(2):196–198. <https://doi.org/10.31486/toj.21.0101>
 8. Володин Н.Н., Дегтярев Д.Н., Албегова М.Б. *Неонатология. Том I*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2023. 752 с.
 9. Дашичев К.В., Плетнева Н.Ю., Олендарь Н.В. Электроимпедансная томография легких как метод оценки функции внешнего дыхания глубоконедоношенных новорожденных. *Вестник Ивановской медицинской академии*. 2013;18(2):68–69. Dashichev K.V., Pletneva N.Yu., Olendar N.V. Lungs electroimpedance tomography as an technique of external respiration function evaluation in newborns with deep degree of prematurity. *Bulletin of the Ivanovo Medical Academy*. 2013;18(2):68–69. (In Russ.).
 10. Володин Н.Н., Дегтярев Д.Н., Крючко Д.С., Антонов А.Г. *Неонатология. Клинические рекомендации*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2019. 320 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Конько Мария Александровна, ассистент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация.

e-mail: mari.mak787@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-0019-8884](https://orcid.org/0000-0002-0019-8884)

Maria A. Konko, Assistant at the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, the Russian Federation.

Алексанян Грайр Каренович, доктор технических наук, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация.

e-mail: graer@yandex.ru

ORCID: [0000-0001-9611-6275](https://orcid.org/0000-0001-9611-6275)

Graer K. Aleksanyan, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, the Russian Federation.

Пятницын Станислав Игоревич, аспирант кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация.

e-mail: pyatnitsyn.stanislav@yandex.ru

Stanislav I. Pyatnitsyn, Postgraduate at the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, the Russian Federation.

ORCID: [0000-0002-2451-6832](https://orcid.org/0000-0002-2451-6832)

Горбатенко Николай Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и измерительные системы и технологии», Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, Новочеркасск, Российская Федерация.

e-mail: gorbatenko@novoch.ru

ORCID: [0000-0003-1049-4801](https://orcid.org/0000-0003-1049-4801)

Nikolay I. Gorbatenko, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochoerkassk, the Russian Federation.

Статья поступила в редакцию 10.03.2025; одобрена после рецензирования 25.03.2025; принята к публикации 02.04.2025.

The article was submitted 10.03.2025; approved after reviewing 25.03.2025; accepted for publication 02.04.2025.