

УДК 616-71

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.011](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.011)

Упрощенные физические модели средостения новорожденных для электроимпедансной томографии

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

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

Резюме. В статье представлены результаты разработки и экспериментального исследования двух упрощенных физических моделей средостения новорожденных для электроимпедансной томографии. Созданные модели базируются на данных спиральной компьютерной томографии и учитывают анатомические особенности органов грудной клетки младенцев. Реализация конструкций выполнена с использованием технологий 3D-печати, что позволило добиться высокой точности геометрических параметров. Модели оснащены системой управляемого воздухонаполнения лёгких и тремя рядами электродов, что обеспечивает возможность проведения экспериментов по моделированию глобальной и регионарной вентиляции. Экспериментальные исследования продемонстрировали, что разработанные модели позволяют регистрировать дыхательные объемы в диапазоне от 2 до 120 мл, что соответствует физиологическим параметрам дыхания новорожденных. Полученные данные подтвердили работоспособность моделей, их чувствительность к изменениям объемов воздуха, а также пригодность для исследований и тестирования новых алгоритмов и методик в области электроимпедансной томографии. Установлено, что предложенные модели обеспечивают адекватное воспроизведение вентиляционных процессов и могут быть использованы для разработки диагностических решений в области неонатологии. Результаты работы представляют практическую ценность для научных исследований, направленных на совершенствование методов диагностики дыхательных нарушений у новорожденных, и могут быть использованы в образовательной практике.

Ключевые слова: упрощенная физическая модель средостения, электроимпедансная томография, новорожденные, процесс глобальной и регионарной вентиляции, легкие.

Благодарности: Работа выполнена в рамках проекта «Разработка экспериментально-исследовательского медико-технического стенда многочастотной электроимпедансной томографии легких младенцев» при реализации программы развития ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова программы «Приоритет-2030».

Для цитирования: 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). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1791> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.011

Simplified physical models of the mediastinum of newborns for electrical impedance tomography

M.A. Konko✉, G.K. Aleksanyan, N.I. Gorbatenko, N.S. Elkin, N.S. Temnyakov

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

Abstract. The article presents the results of the development and experimental study of two simplified physical models of the neonatal mediastinum for electrical impedance tomography. The created models are based on spiral computed tomography data and take into account the anatomical features of the infant

chest organs. The designs were implemented using 3D printing technologies, which made it possible to achieve high accuracy of geometric parameters. The models are equipped with a controlled air filling system for the lungs and three rows of electrodes, which makes it possible to conduct experiments on modeling global and regional ventilation. Experimental studies have demonstrated that the developed models make it possible to record respiratory volumes in the range from 2 to 120 ml, which corresponds to the physiological parameters of newborn breathing. The data obtained confirmed the operability of the models, their sensitivity to changes in air volumes, as well as their suitability for research and testing of new algorithms and methods in the field of electrical impedance tomography. It was found that the proposed models provide adequate reproduction of ventilation processes and can be used to develop diagnostic solutions in the field of neonatology. The results of the work are of practical value for scientific research aimed at improving methods for diagnosing respiratory disorders in newborns, and can be used in educational practice.

Keywords: simplified physical model of mediastinum, electrical impedance tomography, newborns, process of global and regional ventilation, lungs.

Acknowledgements: The work was carried out within the framework of the project «Development of an experimental and research medical-technical stand of multi-frequency electrical impedance tomography of infants' lungs» within the framework of implementation of the Platov SRSPU (NPI) development programme «Priority-2030».

For citation: 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.). URL: <https://moitvivr.ru/journal/pdf?id=1791> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.011

Введение

Электроимпедансная томография (ЭИТ) – это метод визуализации внутренних структур объекта, который основан на оценке изменения поля проводимости в плоскости расположенных в замкнутом контуре электродов, при инжектировании через них высокочастотного тока малой амплитуды и одновременной регистрации разностей потенциалов с измерительных электродов, что позволяет получать динамические изображения, например, легких в режиме реального времени [1–2]. Большинство исследований направлены на применение мониторинга состояния легких у взрослого человека. Метод [3–4] представляет значимость также для исследования функций внешнего дыхания новорожденных, однако анатомические параметры существенно отличаются от параметров взрослых [5]. При проведении исследований в области ЭИТ легких взрослого человека используют функциональные модели [6–8], представляющие собой формы грудной полости и легких из непроводящего ток материала, по периметру которых размещены электроды в n-рядов на минимальном эквидистантном расстоянии. Эти формы заполняются проводящей средой, например, водой или 0,9 % раствором NaCl. После в функциональные модели погружают объекты для определения изменений в легких или моделирования процесса глобальной и регионарной вентиляции при помощи растяжимых форм, которые помещаются в модель легких. Физические модели позволяют получать данные, приближенные к реальным, так как они меньше зависят от упрощений и допущений, свойственных математическим моделям. Для задач ЭИТ новорожденных необходимо разработать упрощенные функциональные макеты средостения (УФМС), которые состоят из модели формы грудной полости и модели легких. Целью данного исследования является разработка и создание двух УФМС для проведения исследований методом электроимпедансной томографии. Задачами исследования являются: 1) разработка двух 3D-моделей УФМС новорожденного с учетом анатомических особенностей органов средостения; 2) изготовление двух УФМС новорожденных с использованием технологий 3D-печати; 3) подтверждение работоспособности УФМС.

Материалы и методы

Разработаны две УФМС (Рисунок 1), смоделированные в программе SolidWorks на основе реальных геометрических размеров, полученных с помощью спиральной компьютерной томографии (СКТ) новорожденного, взятой из [9]. Основные технические характеристики приведены в Таблице 1.

Процесс разработки 3D-модели включает несколько этапов, направленных на создание каркаса грудной полости, проработку деталей внутренней структуры, таких как легкие, а также проверку модели по анатомическим данным.

На первом этапе выполняется импорт формы СКТ, которая используется в качестве основы для 3D-моделирования. Это позволяет сохранить основные пропорции и формы грудной полости. Кроме того, отдельно моделируются модели легких, повторяя их естественную форму по СКТ. В модель УФМС дополнительно добавлены посадочные пазы для надежного крепления моделей легких (правого и левого). В Таблице 2 приведены параметры, используемые при 3D-печати функционального макета.

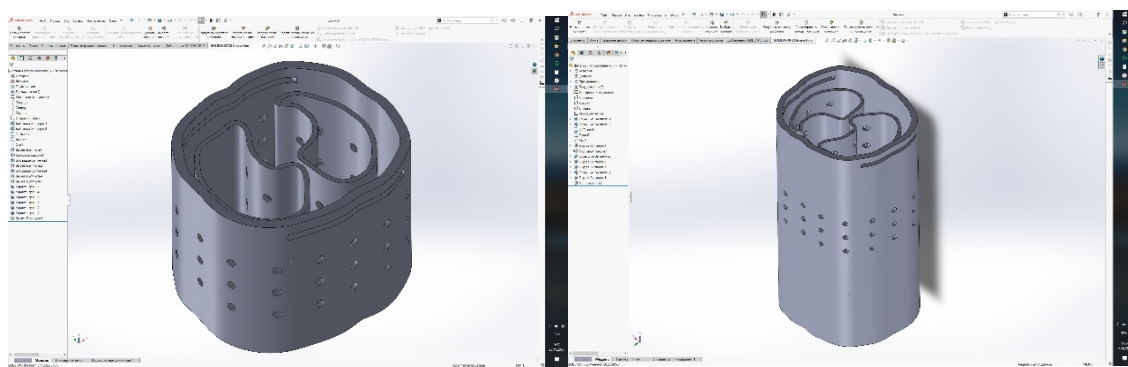


Рисунок 1 – УФМС новорожденного в разрезе и вид сверху в разных исполнениях
Figure 1 – SPMM of a newborn's chest and lungs in section and top view in different designs

Таблица 1 – Технические характеристики разработанных УФМС
Table 1 – Technical characteristics of the developed physical models

№ п/п	Технические характеристики	Обозначение	Параметр	
			Высокий	Низкий
1	Диаметр модели грудной клетки, мм	d	100	100
2	Высота модели грудной клетки, мм	h	205	85
3	Диаметр отверстия для электродов, мм	m	4	4
4	Количество предусмотренных электродных рядов, шт.	I, II, III	3	3
5	Количество электродов в одном электродном поясе, шт.	-	16	16
6	Материал электродов	-	МНЦ	МНЦ
7	Толщина стенок физической модели, мм	a	5	5
8	Форма модели грудной клетки	-	Торакс	Торакс
9	Длина левого/правого легкого, мм	b/c	72/69	72/69
10	Ширина левого/правого легкого, мм	e/f	48/40	48/40
11	Высота легких, мм	-	192	75
12	Максимальный объем правой и левой емкости легких (шаров) для воздухонаполнения, мл	-	70/50	70/50
13	Длина трубок от соединительного разъема к легким, мм	-	1750	1750
14	Длина общей трубки от соединительного разъема до груши для воздухонаполнения легких, мм	-	500	500
15	Внешний диаметр трубок, мм	-	6	6
14	Наличие кранов (роликов) для подачи и спуска воздуха, шт.	-	2	2
15	Соединительный разъем, шт.	-	1	1

На Рисунке 2 (а) приведены обозначения технических характеристик, разработанных УФМС на примере высокой модели, на Рисунке 2 (б) приведено сечение одной из разработанных УФМС (низкой модели).

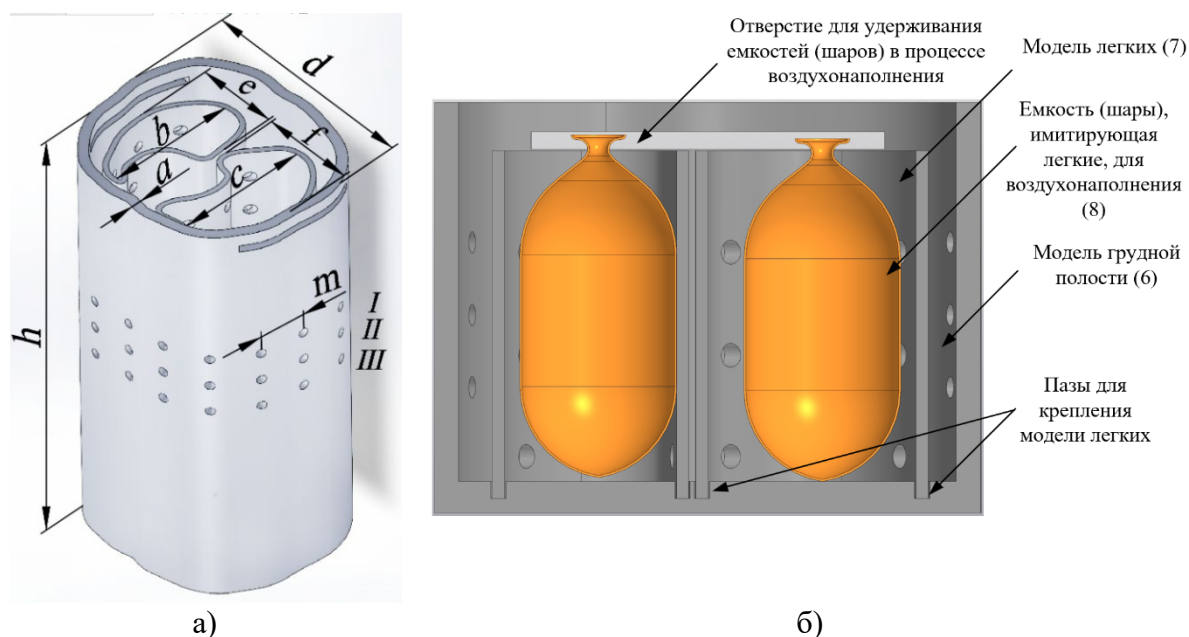


Рисунок 2 – Разработанные УФМС новорожденного
Figure 2 – Developed SPMM of a newborn

Таблица 2 – Параметры, используемые при 3D-печати УФМС
Table 2 – Parameters used in 3D printing SPMM

№ п/п	Наименование параметра	Параметр
1	Материал печати	PETG
2	Высота слоя печати, мм	0,1
3	Ширина линии стенки, мм	0,4
4	Количество линий стенки, шт.	5
5	Плотность заполнения, %	100
6	Температура сопла, град	220
7	Время печати (исполнение 1/2), ч	49/12

По периметру разработанных УФМС расположены по 16 электродов в 3 ряда (т. е. 3 ряда электродных поясов) на минимальном эквидистантном расстоянии. Использование нескольких электродных рядов в функциональной модели позволяет исследовать метод ЭИТ при разных положениях электродного ряда, за счет чего можно наблюдать за динамикой изменения поля проводимости с нескольких ракурсов. Для моделирования воздухонаполнения легких предусмотрены отдельные эластичные области правого и левого легких. В модели легких предусмотрены отверстия для полного заполнения УФМС проводящей средой, а также для обеспечения гальванической связи между моделями легких и грудной полостью. Проводящей средой является или вода, или 0,9 % раствор NaCl, поэтому ток протекает свободно по электролиту. В верхней части изделия расположено отверстие для того, чтобы удерживать объекты, например, шарики, для имитации процесса воздухонаполнения. В отверстие помещается тонкий твердый прозрачный полимер – удерживающая крышка (на рисунках не показана), для ее размещения модели легких расположены ниже модели грудной полости (нижняя граница отверстия). В УФМС не предусмотрено дренажа, так как в УФМС имеется запас

по высоте, чтобы, при осуществлении подачи воздуха в емкости (шары), имитирующие легкие, проводящая среда оставалась внутри изделия. На Рисунке 3 приведена структурная схема экспериментальной установки для выполнения исследований.

Система подачи воздуха представляет собой грушу для воздушнонаполнения емкости (легких) (12), трубки для подачи воздуха (11), кранов для подачи / спуска воздуха (10), соединительного разъема (9) и шаров (8), имитирующих легкие.

Создано два исполнения УФМС из-за их разных технических характеристик. Грудная полость и легкие новорожденных, могут иметь различную форму, высоту и объем из-за разности роста, веса, развития младенца.

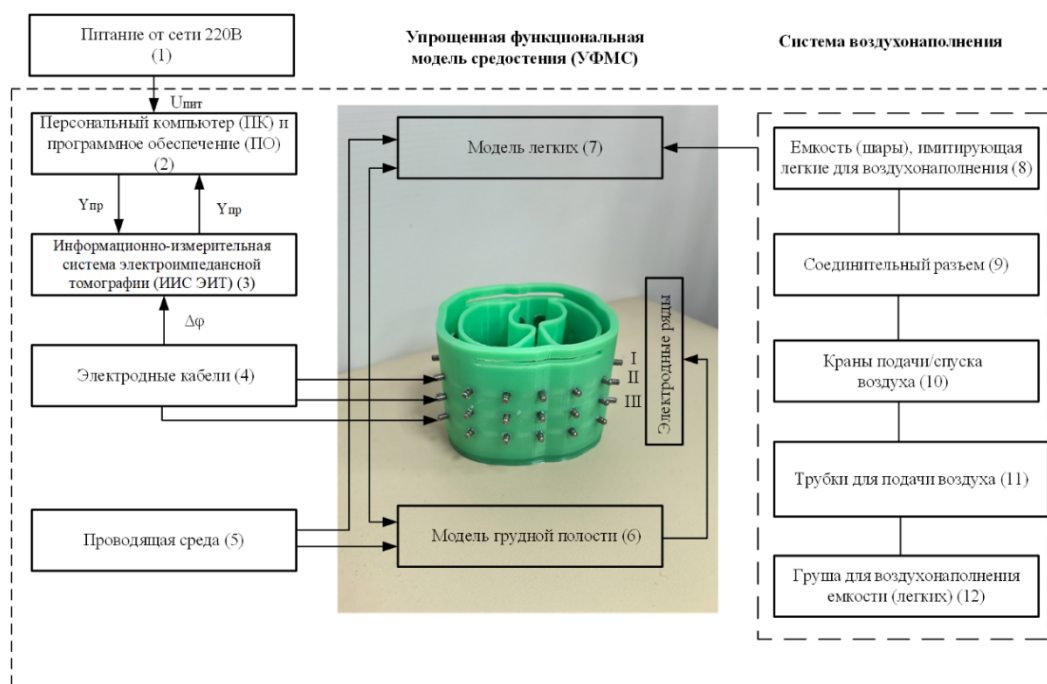


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки для выполнения исследований
Figure 3 – Structural scheme of the experimental installation for carrying out researches

На Рисунке 4 приведены фото готовых УФМС, напечатанных на 3D-принтере. Материал для печати выбран филамент PETG. Данный материал стойкий к износу, выдерживает длительное воздействие жидкости, прочный, без запаха при печати, имеет хорошее сцепление между слоями, подходит для 3D-печати крупных изделий. На Рисунке 4 (а) изображена УФМС новорожденного вид сверху, на Рисунке 4 (б) УФМС новорожденного (исполнение 1) вид сбоку, на Рисунке 4 (в) (исполнение 2) вид сбоку.

В модели грудной полости предусмотрены пазы для крепления моделей легких. Дополнительно модели легких закреплены в пазах строительным герметиком на силиконовой основе, который устойчив к воздействию влаги.

Блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований приведена на Рисунке 5.

В общем виде алгоритм получения и обработки результатов ЭИТ-исследования состоит из нескольких этапов, а именно:

- массив разностей потенциалов $|\Delta\varphi_{ij}| = \Delta\Phi$ (измерительная информация), где i – номер ряда, j – номер электрода;
- массив реконструкции поля проводимости $|\sigma_{ij}| = \Delta\Omega$;
- обработка, полученных результатов;
- визуализация.

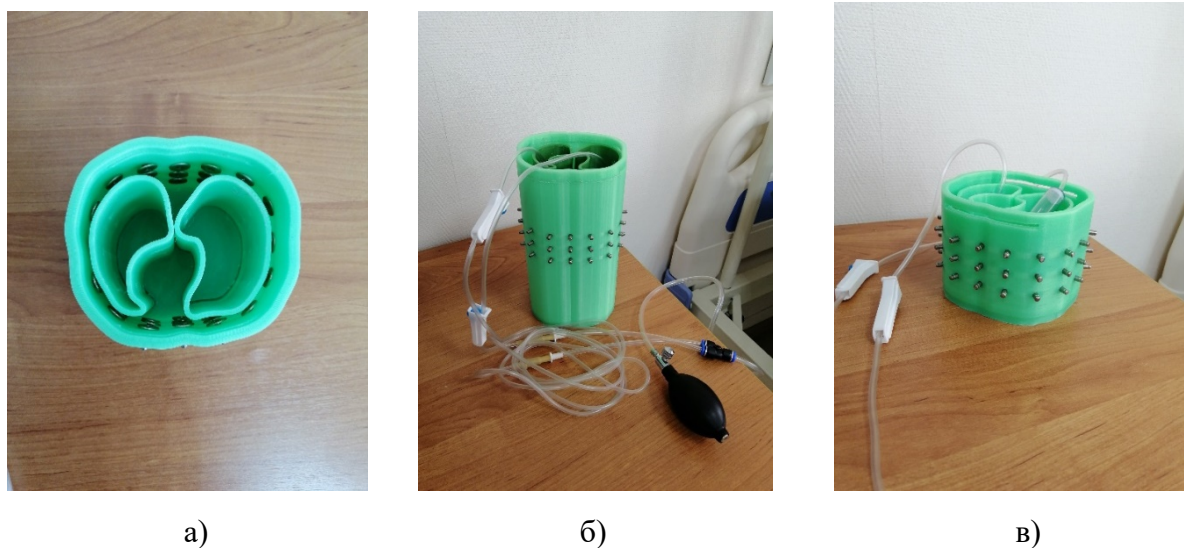


Рисунок 4 – Разработанные УФМС новорожденного
Figure 4 – Developed SPMM of the newborn's

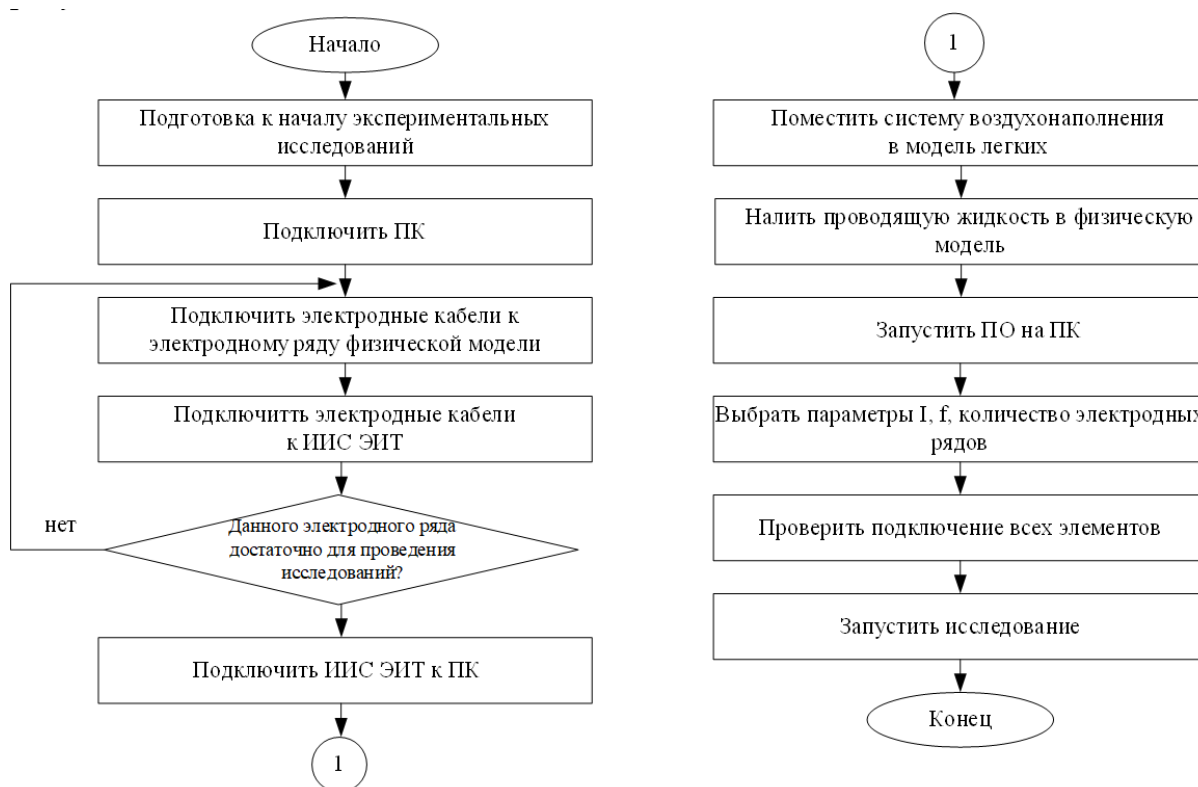


Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований
Figure 5 – The block scheme of the algorithm of experimental research

Получение измерительной информации $\Delta\Phi$ произведено при помощи информационно-измерительной системы электроимпедансной томографии (ИИС ЭИТ) с использованием разработанных УФМС [10] (Рисунок 6).

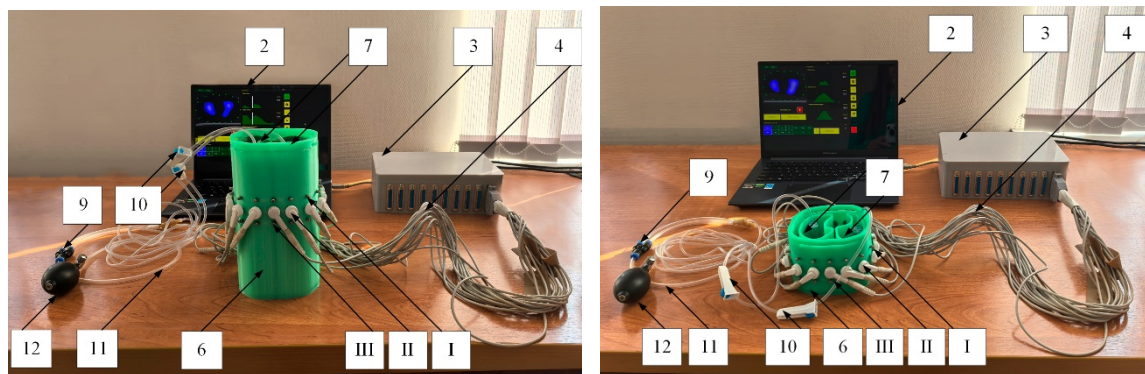


Рисунок 6 – ИИС ЭИТ и УФМС новорожденных для каждого исполнения физической модели
Figure 6 – IIS EIT and SPM of newborns for each version of the physical model

Тип моделируемого дыхания выбран эупноэ, так как является наиболее распространенным.

В Таблице 3 приведены параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований.

Таблица 3 – Параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований
Table 3 – Parameters used in the 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 № II
4	Количество электродов, шт.	16
5	Форма тока	Синусоидальный
6	Тип моделируемого дыхания	Нормальное (эупноэ)
7	Время проведения исследования, с	60

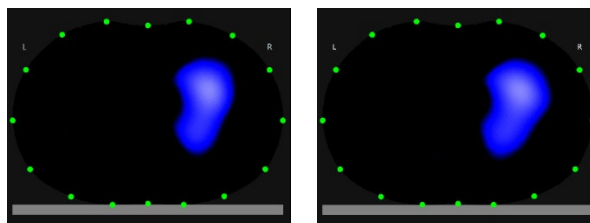
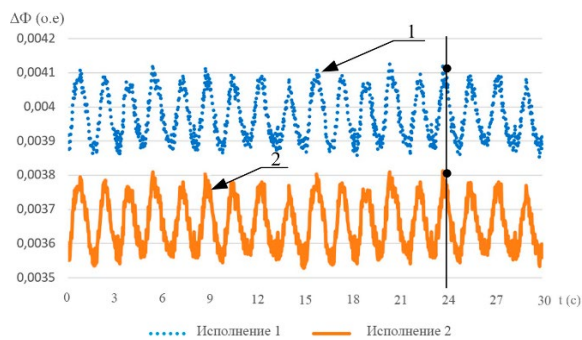
Алгоритм получения и обработки результатов ЭИТ-исследования реализован в виде программного обеспечения. Разработанная программа представляет собой окно с кнопками выбора параметров f, I, количество электродных рядов, электродов, формы тока и др. В окне в режиме реального времени можно наблюдать за воздухонаполнением легких.

Результаты

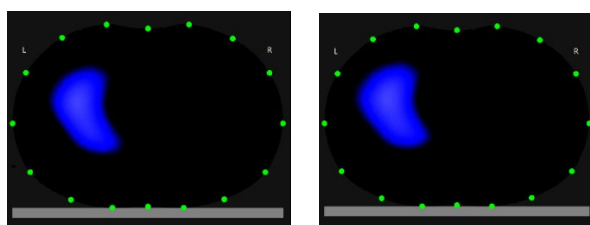
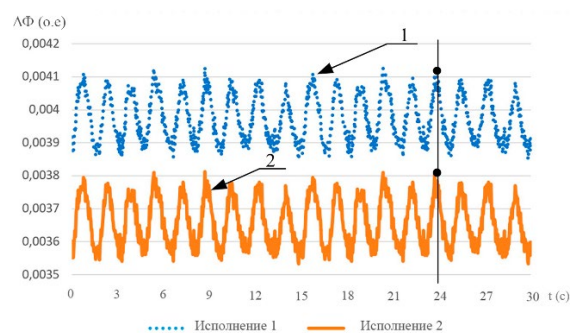
На Рисунке 7 представлены графики зависимости измерительной информации $\Delta\Phi$ (о. е.) от времени t (с) процесса глобальной и регионарной вентиляции для каждой разработанной модели. На Рисунке 7 (а) приведен график зависимости для правого легкого, на Рисунке 7 (б) – для левого легкого и на Рисунке 7 (в) – для двух легких. Данный график позволяет оценить смоделированный процесс глобальной и регионарной вентиляции, определить работоспособность созданных УФМС. На графиках приведены данные до 4 знаков для обеспечения корректного анализа близких значений. Используются правила округления, обеспечивающие минимальную погрешность округления. Такие значения позволяют различать малые изменения, что важно при нанесении их на график (например, 0,0076 и 0,0077). Слева, рядом с каждым графиком приведены стоп-кадры визуализации результатов реконструкции поля проводимости $\Delta\Phi$.

Моделирование процесса глобальной и регионарной вентиляции новорожденных за 30 секунд

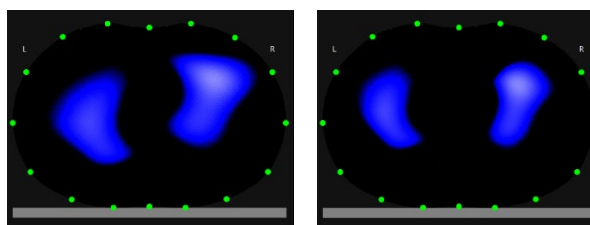
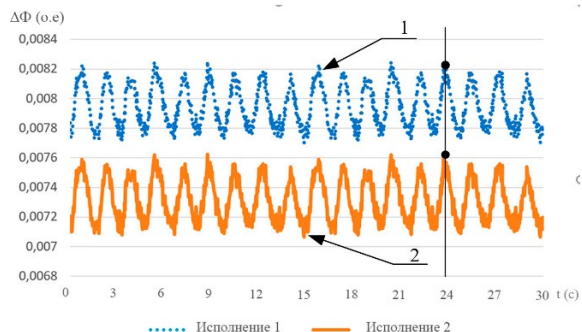
Визуализация результатов реконструкции поля проводимости
УФМС исполнение 1 УФМС исполнение 2
1 2



а)



б)



в)

Рисунок 7 – Зависимость параметра ЭИТ от времени дыхательных циклов и стоп-кадры визуализации результатов поля проводимости

Figure 7 – Dependence of the EIT parameter on the time of respiratory cycles and still images of visualization of conduction field results

Проверена адекватность разработанных УФМС, составлен график зависимости изменения измерительной информации $\Delta\Phi$ (о. е.) от изменения объема V (мл) поступающего воздуха для правого легкого (Рисунок 8 (а)), для левого (Рисунок 8 (б)) и для двух легких (Рисунок 8 (в)). В ходе проведения экспериментальных исследований установлено, что для накачивания правого легкого до максимального объема 70 мл необходимо грушу для воздушнонаполнения емкости (легкого) сжать 4 раза, для левого легкого (50 мл) – 3 раза. Для обоих легких (120 мл) – 7 раз. Одно нажатие позволяет заполнить шар на 16–18 мл воздуха.

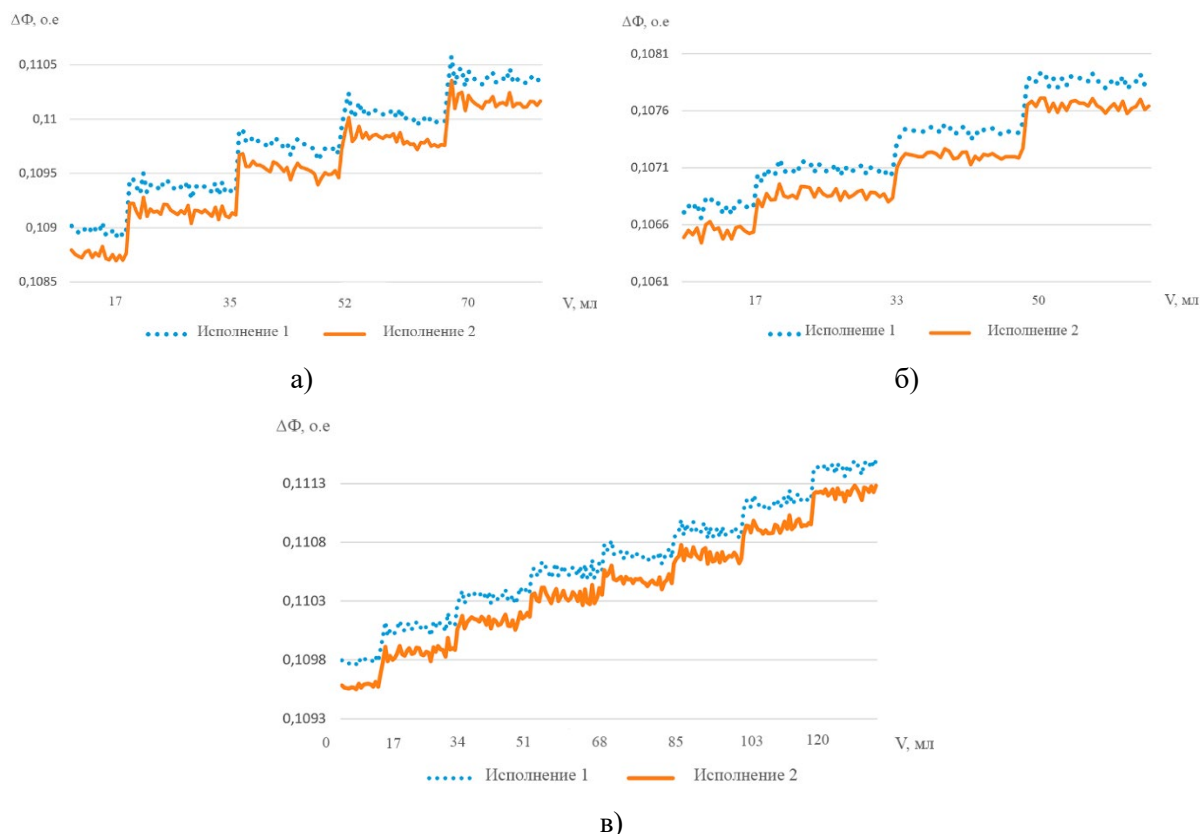


Рисунок 8 – Графики зависимости изменения измерительной информации $\Delta\Phi$ от объема V поступающего воздуха в УФМС
Figure 8 – Graphs of dependence of the change of measurement information $\Delta\Phi$ on the volume V of the incoming air to the SPMM

Обсуждение

Количество дыхательных движений легких новорожденных в минуту превышает взрослых в 2–3 раза. Поэтому необходимо установить, сможет ли ИИС ЭИТ распознать дыхание новорожденных. Как видно из Рисунков 7 и 8 ИИС ЭИТ восприимчив к измерительным данным [11], визуализируемые результаты реконструкции показывают возможность использования разработанных УФМС в исследовании процесса глобальной и регионарной вентиляции легких новорожденных. Проведены исследования с левым и правым легкими, отключенными от воздухонаполнения, система распознала отсутствие дыхания в данных областях исследования.

Заключение

В ходе проведенного исследования были успешно выполнены поставленные задачи:

1. Разработаны две 3D-модели УФМС новорожденного, отличающиеся тем, что построены по СКТ органов грудной клетки, позволяющей учесть анатомические особенности органов средостения, обеспечивающие получение модельного проекта для 3D-печати.

2. Изготовлены модели УФМС новорожденного с использованием технологии 3D-печати, отличающиеся наличием трех электродных рядов и управляемым воздухонаполнением в правое и левое легкие как одновременно, так и по отдельности, позволяющие моделировать процесс глобальной и регионарной вентиляции,

обеспечивающей проведение широкого перечня исследований, методов и алгоритмов ЭИТ.

3. Результаты экспериментальных исследований УФМС по моделированию заданного типа дыхания (эупноэ) подтверждены заложенными в изделие функциональными возможностями. Так, УФМС обеспечивает подачу, выбытие дыхательных объемов для правого (70 мл), левого (50 мл) и двух легких (120 мл), что подтверждает работоспособность УФМС и возможность их использования в научных исследованиях для моделирования процесса глобальной и регионарной вентиляции новорожденных.

4. Проверена адекватность разработанных УФМС, отличающиеся тем, что при воздухонаполнении легких отмечается восприимчивость измерительных данных к изменению объемов, что позволяет моделировать паттерны дыхания при дыхательных объемах от 2–3 мл до 120 мл. На графике видна пропорциональная зависимость роста измерительных данных $\Delta\Phi$ от роста объема V поступающего воздуха.

Выполненные в статье исследования и разработки вносят значительный вклад в развитие электроимпедансной томографии в области неонатологии. Разработанные УФМС могут использоваться как в научных исследованиях, так и для образовательных целей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Adler A., Holder D. *Electrical Impedance Tomography. Methods, History and Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2021. 518 p. <https://doi.org/10.1201/9780429399886>
2. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Ю., Плотников М.П., Уманский О.С. *Электроимпедансная томография*. Томск: Издательство научно-технической литературы; 2004. 190 с.
3. Gaertner V.D., Mühlbacher T., Waldmann A.D., Bassler D., Rüegger C.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>
4. Onland W., Hutten J., Miedema M., Bos L.D., Brinkman P., Maitland-van der Zee A.H., Van Kaam A.H. Precision Medicine in Neonates: Future Perspectives for the Lung. *Frontiers in Pediatrics*. 2020;8. <https://doi.org/10.3389/fped.2020.586061>
5. Seifnaraghi N., De Gelidi S., Frerichs I., Kallio M., Sorantin E., Tizzard A., Demosthenous A., Bayford R.H. Cross-sectional chest circumference and shape development in infants. *BMC Research Notes*. 2022;15(1). <https://doi.org/10.1186/s13104-022-06087-z>
6. Sourvanos D., Sun H., Zhu T.C., Dimofte A., Byrd B., Busch T.M., Cengel K.A., Neiva R., Fiorellini J.P. Three-dimensional printing of the human lung pleural cavity model for PDT malignant mesothelioma. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*. 2024;46. <https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2024.104014>
7. Liu G., Bian W., Zu G., Liu J., Zhang G., Li C., Jiang G. Development of a 3D Printed Lung Model Made of Synthetic Materials for Simulation. *Thoracic Cardiovascular Surgeon*. 2022;70(04):355–360. <https://doi.org/10.1055/s-0041-1731783>
8. Алексанян Г.К., Щербаков И.Д., Кучер А.И. Функциональный анатомический макет грудной полости и легких человека для многоракурсной электроимпедансной томографии. *Современные наукоемкие технологии*. 2019;(12-1):14–19. <https://doi.org/10.17513/snt.37825>

- Aleksanyan G.K., Shcherbakov I.D., Kucher A.I. Functional human thorax and lungs anatomical model for multi-angle electrical impedance tomography. *Modern High Technologies*. 2019;(12-1):14–19. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/snt.37825>
9. 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>
10. Конько М.А., Алексанян Г.К., Горбатенко Н.И., Панфилов О.С. Исследовательский стенд многочастотной электроимпедансной томографии легких младенцев. В сборнике: *Научное приборостроение: перспективы разработки, создания, развития и использования: Материалы Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, 17–20 сентября 2024 года, Ростов-на-Дону, Россия*. Ростов-на-Дону: Издательство ЮНЦ РАН; 2024. С. 156–159.
11. Fleming S., Thompson M., Stevens R., Heneghan C., Plüddemann A., Maconochie I., Tarassenko L., Mant D. Normal ranges of heart rate and respiratory rate in children from birth to 18 years of age: a systematic review of observational studies. *The Lancet*. 2011;377(9770):1011–1018. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)62226-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)62226-X)

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 of Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochockassk, the Russian Federation.

Алексанян Грайр Каренович, кандидат 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, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochockassk, the Russian Federation.

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 Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochockassk, the Russian Federation.

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

e-mail: mamroax@gmail.com

Nikolay S. Elkin, Assistant of the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochockassk, the Russian Federation.

ORCID: [0000-0001-9085-4170](https://orcid.org/0000-0001-9085-4170)

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

e-mail: temnjakovn@gmail.com

ORCID: [0009-0007-8276-5769](https://orcid.org/0009-0007-8276-5769)

Nikolay S. Temnyakov, postgraduate student 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 28.12.2024; одобрена после рецензирования 22.01.2025; принята к публикации 27.01.2025.

The article was submitted 28.12.2024; approved after reviewing 22.01.2025; accepted for publication 27.01.2025.