

УДК 616-71

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.48.1.036](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.48.1.036)

## Экспериментальный стенд для электроимпедансной томографии легких новорожденных

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

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

**Резюме.** В статье представлены результаты разработки экспериментального стенда электроимпедансной томографии легких новорожденных (стенда) и входящих в него герметичной упрощенной физической модели средостения новорожденного и неонатальной электродной системы. Он состоит из семи основных устройств, которые позволяют моделировать условия, близкие к клиническим. Герметичная упрощенная физическая модель средостения (фантом) изготовлена с учетом возможности размещения куклы-новорожденного. Конструкция выполнена с использованием технологий 3D-печати, оснащена системой управляемого воздухонаполнения областей легких, а также дренажем для удаления из фантома лишней проводящей среды. Предусмотрено три ряда электродов, обеспечивающих возможность проведения экспериментов по моделированию глобальной и регионарной вентиляции при различных расположениях электродной системы (ряда). Разработана и изготовлена неонатальная электродная система с металлическими электродами на гибком тканевом основании, предназначенная для использования в составе стенда. Эластичное основание позволяет подстраиваться под расположение электродов на фантоме. Экспериментальные исследования, выполненные с применением аппарата искусственной вентиляции легких для дыхательных объемов от 2 до 60 мл, подтвердили работоспособность стенда в целом, а именно чувствительность фантома и неонатальной электродной системы к изменениям объемов воздуха, а также чувствительность к режимам вентиляции новорожденных на аппарате искусственной вентиляции легких. Разработанные решения позволяют выполнять исследования и тестирование новых алгоритмов и методик в области электроимпедансной томографии легких новорожденных, а также использования для диагностики нарушения функций внешнего дыхания в области неонатологии.

**Ключевые слова:** экспериментальный стенд, средостение, модель, электроимпедансная томография, новорожденные, 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., Темняков Н.С., Алексанян Г.К., Горбатенко Н.И. Экспериментальный стенд для электроимпедансной томографии легких новорожденных. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии.* 2025;13(1). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1824> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.036

## Experimental stand for electrical impedance tomography of newborn lungs

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

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

**Abstract.** The article presents the results of the development of an experimental setup for electrical impedance tomography of the lungs of newborns and a sealed simplified physical model of the neonatal mediastinum and a neonatal electrode system included in it. It consists of seven main devices that allow simulating conditions close to clinical ones. The sealed simplified physical model of the mediastinum (phantom) is made taking into account the possibility of placing a newborn doll; the design is made using 3D printing technologies. It is equipped with a system for controlled air filling of the lung areas, as well as drainage for removing excess conductive medium from the phantom. Three rows of electrodes are provided, providing the possibility of conducting experiments on simulating global and regional ventilation with different locations of the electrode system (row). A neonatal electrode system with metal electrodes on a flexible fabric base was developed and manufactured for use as part of the setup. The elastic base allows adjusting to the location of the electrodes on the phantom. Experimental studies performed using the ventilator for respiratory volumes from 2 to 60 ml confirmed the operability of the stand as a whole, namely the sensitivity of the phantom and neonatal electrode system to changes in air volumes, as well as sensitivity to neonatal ventilation modes on the ventilator. The developed solutions allow for research and testing of new algorithms and methods in the field of electrical impedance tomography of neonatal lungs, as well as use for diagnosing disorders of external respiration in neonatology.

**Keywords:** experimental stand, mediastinum, model, electrical impedance tomography, newborns, 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:** Konkko M.A., Temnyakov N.S., Aleksanyan G.K., Gorbatenko N.I. Experimental stand for electrical impedance tomography of newborn lungs. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1824> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.036

## Введение

После рождения воздух впервые попадает в легкие ребенка и в норме расправляет их полностью [1]. Риск повреждения легочной ткани детей гораздо выше, чем у взрослых пациентов, так как легкие недостаточно сформированы [2, 3]. В этой связи неинвазивная оценка легких новорожденных является важной составляющей оказания медицинской помощи в отделении интенсивной терапии. Она необходима для оценки тяжести и лечения заболевания, а также определения индивидуальных параметров функции внешнего дыхания и возможной дальнейшей настройки аппарата искусственной вентиляции легких (ИВЛ) под индивидуальные параметры новорожденного. В настоящее время измерения параметров системы внешнего дыхания являются стандартными в аппаратах ИВЛ, что может привести к дополнительным повреждениям. Для решения вышесказанных проблем используется метод электроимпедансной томографии (ЭИТ) [4, 5] для мониторинга внешнего дыхания в режиме реального времени.

Для разработки и исследования алгоритмических и аппаратно-программных решений в области ЭИТ необходимы дополнительные инструментальные решения, позволяющие моделировать режимы вентиляции и одновременно исследовать предлагаемые новые алгоритмы и технические средства. В этой связи в рамках данной статьи разрабатывается экспериментальный стенд для ЭИТ легких новорожденных, предназначенный для получения первичной измерительной информации с герметичной упрощенной физической модели средостения и неонатальной электродной системы, при использовании аппарата ИВЛ в качестве источника для подачи воздуха (моделирования вентиляции).

Целью работы является разработка экспериментального стенда для ЭИТ легких новорожденных (ЭСЛН), герметичной упрощенной физической модели средостения новорожденного (ГУФМС), а также неонатальной электродной системы (ЭС Neo). Предлагаемые решения позволяют проводить экспериментальные исследования методов и технических решений мониторинга глобальной и регионарной вентиляции в условиях, максимально приближенных к клиническим.

В ходе данной работы ставились и решались следующие задачи:

- определить состав устройств, входящих в ЭСЛН;
- разработать принципы построения и функционирование ЭСЛН;
- создать ЭСЛН;
- разработать и создать ГУФМС;
- разработать и создать ЭС Neo;
- выполнить экспериментальные исследования, а именно смоделировать традиционные режимы вентиляции новорожденных на основе ЭИТ на предложенном ЭСЛН.

традиционные режимы вентиляции новорожденных на основе ЭИТ на предложенном ЭСЛН.

### Материалы и методы

Для разработки ЭСЛН использовано оборудование, приведенное в Таблице 1.

Таблица 1 – Оборудование, используемое при разработке ЭСЛН

Table 1 – Equipment used in the development of the ESNL

№ п/п	Наименование оборудования	Назначение
1	Инкубатор для новорожденных ИДН-02-«ДАНИО», (I) (1 единица)	Предназначен для поддержания правильного теплообмена новорожденного, выхаживания и проведения эффективной реанимации недоношенных и ослабленных детей.
2	Аппарат ИВЛ SLE 5000, (II) (1 единица)	Предназначен для замещения и поддержки функции дыхания новорожденных, и детей раннего возраста (от 300 г до 20 кг).
3	Увлажнитель дыхательных смесей ТЕВЛАР, (III) (1 единица)	Предназначен для прогрева и увлажнения дыхательной смеси, поступающей пациенту при ИВЛ, кислородной терапии, ингаляционной анестезии
4	Прикроватный монитор пациента COMENSTAR-8000D (ПМП), (IV) (1 единица)	Позволяет выполнять мониторинг параметров SpO <sub>2</sub> , ЭКГ, частоты дыхания (ЧД), частоты сердечных сокращений (ЧСС)
5	Аппарат ЭИТ (со встроенным программным обеспечением (ПО)), (V) или аппарат ЭИТ + персональный компьютер с ПО (1 единица)	Предназначен для выполнения ЭИТ- исследования. Разработана на базе кафедры «Информационные и измерительные системы и технологии» ЮРГПУ(НПИ). Обеспечивает инжектирование тока фиксированной амплитуды (5 мА) в заданном диапазоне частот (от 50 кГц до 400 кГц)
6	Неонатальная электродная система (ЭС Neo), (VI) (1 единица)	Предназначена для съема первичной измерительной информации для систем ЭИТ.
7	Герметичная упрощенная функциональная модель средостения (ГУФМС) новорожденного (фантом), (VII) (1 единица)	Представляет собой ЭС с напечатанными внутри легкими новорожденного в которые может подаваться жидкость или газоздушная смесь
8	Груша для механического тонометра, (VIII) (1 единица)	Предназначена для накачивания и спуска проводящей среды в ГУФМС

На Рисунке 1 представлена разработанная структурная схема ЭСЛН для выполнения исследований методом ЭИТ. Выполнены работы по поиску, приобретению и изготовлению изделий.

В предложенном варианте построения ЭСЛН все устройства мобильны, оснащены передвижными стойками или располагаются на них, имеют ручку для переноски устройства. Проработка структуры ЭСЛН, приобретение и изготовление устройств проведены в период 2021–2023 гг.

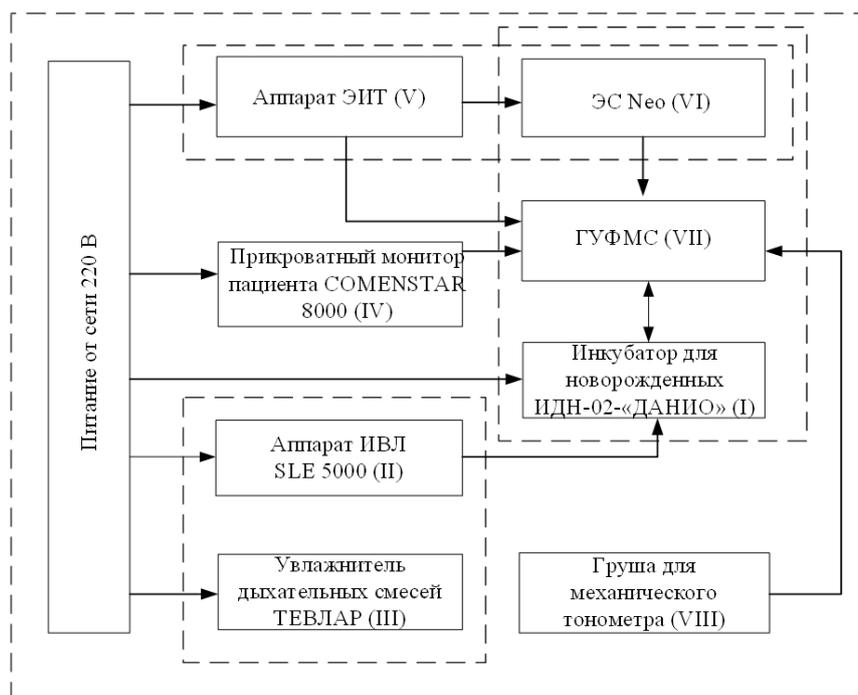


Рисунок 1 – Структурная схема экспериментального ЭСЛН для выполнения исследований  
Figure 1 – Structural diagram of the ESNL for carrying out researches

Исследования проводились на кукле-новорожденном, в которой внутри располагается ГУФМС. В фантом подается газоздушная смесь / жидкость и имитируется процесс внешнего дыхания. Кукла-новорожденного совместно с ГУФМС помещена в инкубатор для новорожденных ИДН-02-«ДАНИО». Предусмотрено два варианта проведения испытаний:

- с использованием груши для механического тонометра с подведенными медицинскими трубками к фантому для подачи в него жидкости / газоздушной смеси;
- с использованием аппарата ИВЛ SLE5000, с помощью которого газоздушная смесь может подаваться в фантом.

К аппарату ИВЛ прилагается увлажнитель дыхательных смесей ТЕВЛАР.

Прикроватный монитор пациента COMEN STAR-8000D предназначен для моделирования условий клинического применения аппарата ЭИТ, однако при выполнении работ в рамках данной статьи он не используется.

Также в составе ЭСЛН имеется аппарат ЭИТ, разработанный коллективом авторов на кафедре «Информационные и измерительные системы и технологии» ЮРГПУ (НПИ) имени М.И. Платова [6].

Съем измерительной информации ЭИТ, выполняется с помощью ЭС Neo, которая крепится на ГУФМС.

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

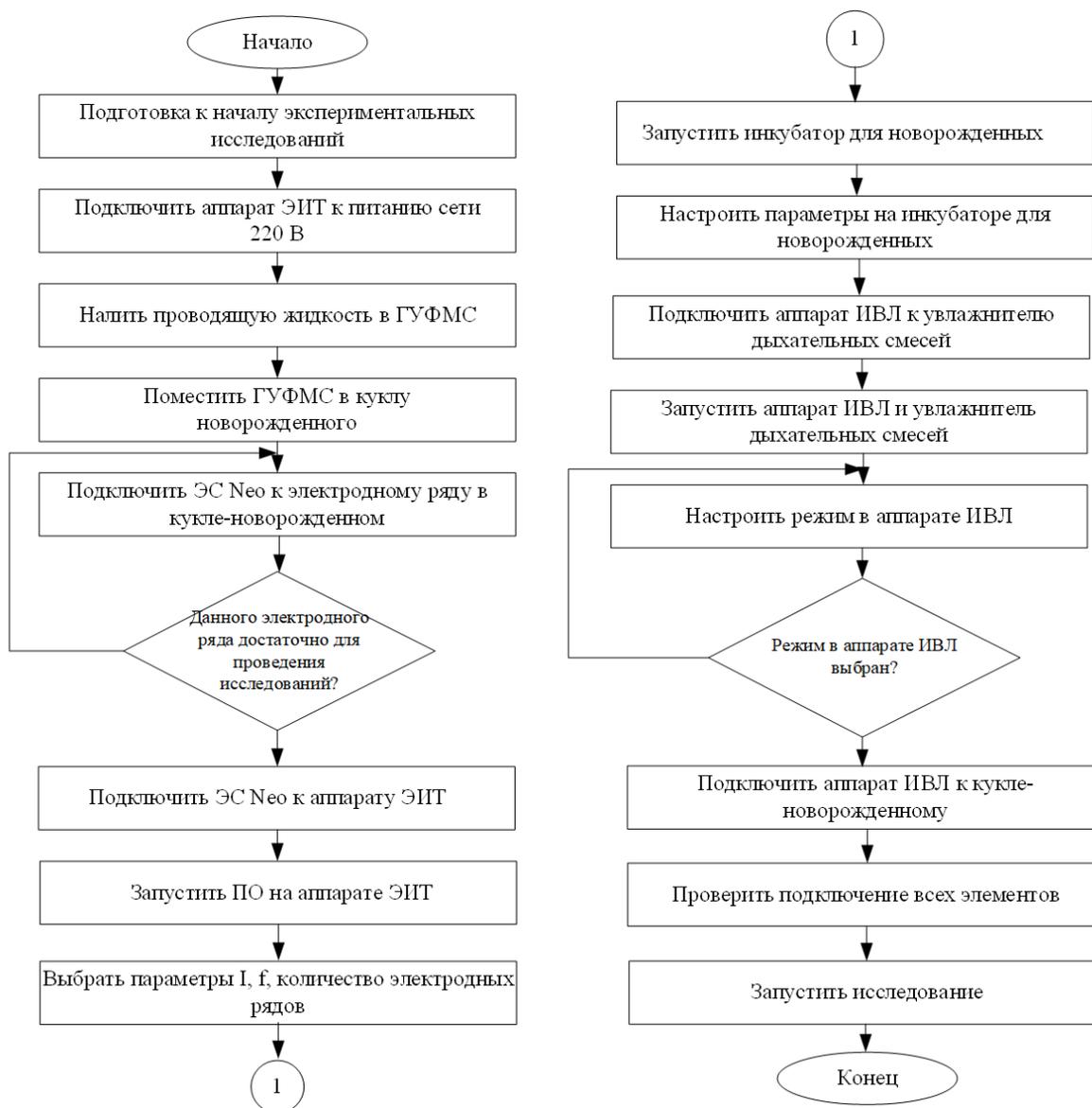


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма проведения экспериментальных исследований

Figure 2 – The block scheme of the algorithm of experimental research

Получение измерительной информации  $\Delta\Phi$  (массива разностей потенциалов) произведено при помощи аппарата ЭИТ с использованием разработанного ГУФМС.

### Результаты

В рамках статьи разработаны новые ГУФМС и ЭС Neo.

Геометрия ГУФМС (Рисунок 3), смоделирована в программе Компас 3D с учетом параметров куклы-новорожденного. На Рисунке 3а приведен фантом в сборке. На Рисунке 3б показано его сечение с обозначением основных элементов. Технические характеристики ГУФМС приведены в Таблице 2 и на Рисунке 3а,б.

Процесс разработки 3D-модели включает несколько этапов, направленных на создание корпуса, крышки и модели легких.

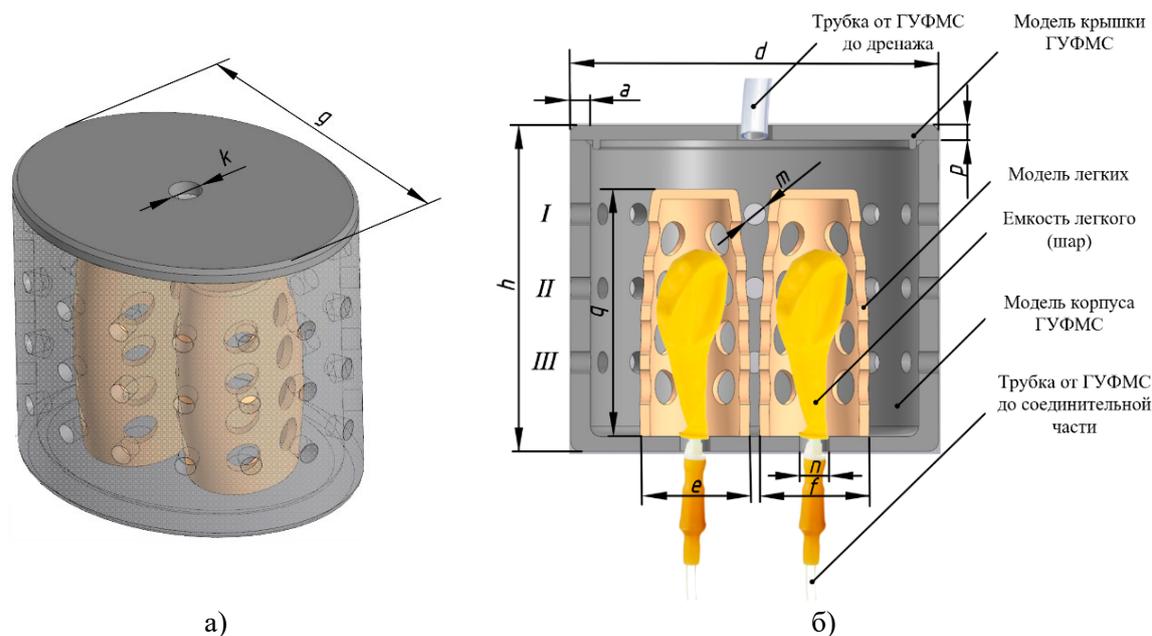


Рисунок 2 – Герметичная упрощенная физическая модель средостения новорожденного:  
а – в сборке; б – сечение с обозначением основных элементов  
Figure 2 – Hermetic simplified physical model of the neonatal mediastinum: a – assembled;  
b – cross-section with designation of main elements

Таблица 2 – Технические характеристики разработанного ГУФМС  
Table 2 – Technical characteristics of the developed HSPMM

№ п/п	Технические характеристики	Обозначение	Параметр
1	Длина модели и крышки ГУФМС, мм	d	70
2	Ширина модели и крышки ГУФМС, мм	g	55
3	Высота модели ГУФМС, мм	h	60
4	Высота крышки ГУФМС, мм	p	3
5	Диаметр отверстия для электродов, мм	m	4
6	Диаметр отверстия в крышке, мм	k	6
7	Диаметр отверстия в дне корпуса ГУФМС, мм	n	6
8	Количество предусмотренных электродных рядов, шт	I, II, III	3
9	Количество электродов в одном электродном поясе, шт	–	16
10	Материал электродов	–	Сталь
11	Толщина стенок физической модели, мм	a	4
12	Форма модели ГУФМС	–	овал
13	Длина левого/правого легкого, мм	b/c	25/30
14	Ширина левого/правого легкого, мм	e/f	15/20
15	Высота легких, мм	q	45
16	Максимальный объем левой и правой емкости легких (шаров) для воздухонаполнения, мл	–	25/35
17	Длина трубок от ГУФМС до соединительной части, мм	–	1400
18	Длина трубки (правой и левой) от соединительной части до соединительного разъема, мм	–	300
19	Длина общей трубки от соединительного разъема до груши для воздухонаполнения легких (шаров), мм	–	300
20	Длина трубки от ГУФМС до дренажа (шара), мм	–	8
21	Внутренний диаметр трубок, мм	–	6

В Таблице 3 приведены параметры, используемые при 3D-печати ГУФМС.

Таблица 3 – Параметры, используемые при 3D-печати ГУФМС

Table 3 – Parameters used in 3D printing HSPMM

№ п/п	Наименование параметра	Параметр
1	Материал печати	PETG
2	Высота слоя печати, мм	0,2
3	Количество линий стенки, шт.	4
4	Ширина линии стенки, мм	0,3
5	Температура сопла, °С	220
6	Плотность заполнения, %	100
7	Время печати, ч	18

По периметру разработанного ГУФМС на минимальном эквидистантном расстоянии расположены по 16 электродов в 3 ряда (т. е. 3 ряда электродных поясов). Использование нескольких электродных рядов в фантоме позволяет исследовать метод ЭИТ при разных положениях электродного ряда, за счет чего можно наблюдать за динамикой изменения поля проводимости с нескольких ракурсов. Также имеется возможность проводить исследования в нескольких плоскостях расположения легких (в статье не представлено), это позволяет увидеть легкие в 3D и понять, в какой части легких воздухонаполнение происходит хуже при одновременном подключении трех электродных поясов (рядов). Для моделирования воздухонаполнения легких предусмотрены отдельные эластичные области (шары) – правое и левое, которые заключены в форму (модель) легких с множеством отверстий для прохождения проводящей среды. Форма позволяет шарам принимать нужную форму и не соединяться друг с другом. Проводящей средой является вода или 0,9 % раствор NaCl, так как модель имеет отверстия, то ток протекает свободно по электролиту.

В верхней части изделия расположена трубка с емкостью (шаром), что является дренажем для проводящей среды. При поступлении газовой смеси в емкости легких (шары), воздух вытесняет лишнюю жидкость, и она переходит в дренаж. Функциональный макет помещается в куклу-новорожденного, в которой имеются отверстия для электродов (болтов), это сделано для того, чтобы имелась возможность подключать к ГУФМС ЭС Neo для проведения измерений и проверки ее работоспособности.

Экспериментальный стенд (далее экспериментальная установка без учета приборов I, II, III, IV, Таблица 1) для выполнения исследований состоит из таких компонентов, как: система подачи газовой смеси, система сообщающихся сосудов, электрическая и программная части.

Система подачи воздуха представляет собой грушу для воздухонаполнения емкости (легких) (18), трубки для подачи воздуха (от ГУФМС до соединительной части и от соединительной части до соединительного разъема и от соединительного разъема до груши для воздухонаполнения легких (шаров)) (17), кранов для подачи / спуска воздуха (16), соединительного разъема (15) и емкостей (шаров) (14), имитирующих легкие.

Система сообщающихся сосудов представляет собой модель корпуса (9) с электродными рядами (7), крышку к корпусу (10) для обеспечения герметичности конструкции, также модели легких для придания шарам (легким) (11) необходимой формы и предотвращения их соединения друг с другом. Отверстия необходимы для прохождения проводящей среды (8) внутрь. Также имеется трубка для отвода жидкости (12) из ГУФМС и дренаж (13) (шар).

Электрод, находящийся в корпусе изделия, состоит из болта (сам электрод), гайки для закрепления его на корпусе ГУФМС, шайбы, которая предназначена для крепления к электроду электродного кабеля и гайки для закрепления шайбы на электроде.

Аппарат ЭИТ (3) подключен через USB-кабель к персональному компьютеру (ПК), на котором установлено программное обеспечение (ПО) (2). ЭС Neo (6) или электродный ряд (ряды) (7) в зависимости от поставленных задач подключаются к аппарату ЭИТ через разъем (4) и электродные кабели (5).

На Рисунке 3 приведена структурная схема экспериментальной установки для выполнения исследований, где приведена связь между ее компонентами.

Система может быть размещена в кукле-новорожденном для проведения исследований с ЭС Neo.

На Рисунке 4 приведены фото ГУФМС внутри (Рисунок 4а), готовое изделие (Рисунок 4б), напечатанное на 3D-принтере и ГУФМС в кукле-новорожденном (Рисунок 4в). 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.

Модели легких плотно расположены внутри фантома, поэтому не требуют закрепления.

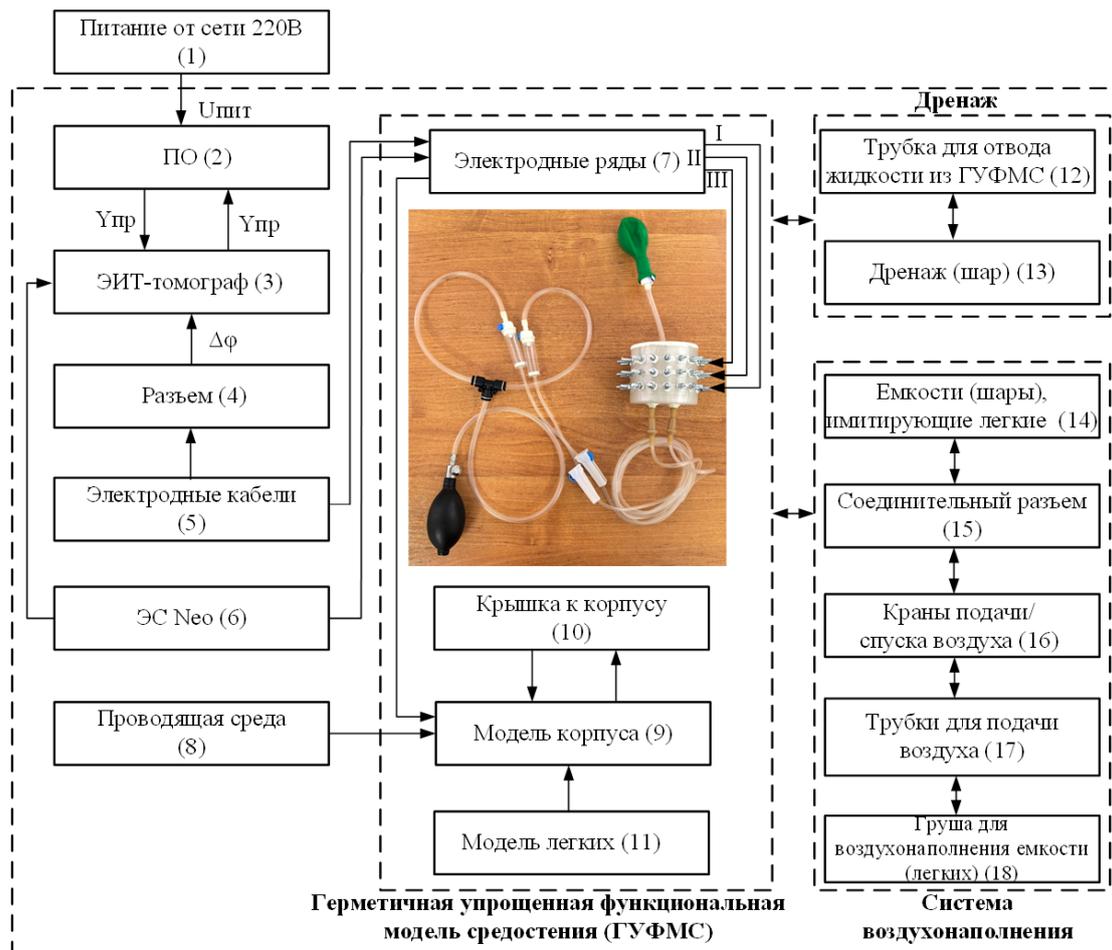


Рисунок 3 – Структурная схема экспериментальной установки для выполнения исследований  
Figure 3 – Structural scheme of the experimental installation for carrying out researches

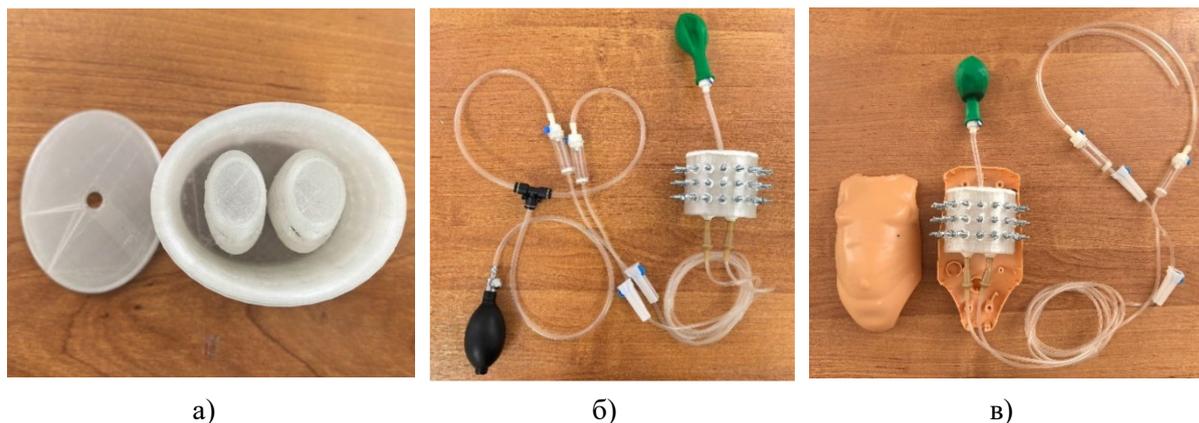


Рисунок 4 – Разработанный ГУФМС: а – вид изнутри; б – готовое изделие, напечатанное на 3D-принтере; в – готовое изделие в кукле-новорожденном  
Figure 4 – Designed by HSPMM; a – view from inside; b – 3D-printed finished product; c – finished product in a newborn doll

Разработана ЭС Neo (Рисунок 5а) для проведения дальнейших экспериментальных исследований на одном из электродных рядов. Электродная система выполнена из тканевого эластичного основания, застежки, выполненной в виде ленты липучки, для надежной фиксации на кукле-новорожденном, металлических электродов, выполненных в виде кнопок для одежды, гибкого кабеля на плату, который выполняет роль электродных кабелей, передающих через разъем первичную измерительную информацию в аппарат ЭИТ. На Рисунке 5б приведена ЭС Neo, расположенная на кукле-новорожденном, совместно с ГУФМС, которая расположена внутри.



Рисунок 5 – Неонатальная электродная система: а – готовое изделие; б – ЭС Neo, расположенная на кукле-новорожденном  
Figure 5 – Neonatal electrode system: a – finished product; b – Neo ES on the newborn doll

Таблица 4 – Технические характеристики неонатальной электродной системы  
Table 4 – Technical characteristics of neonatal electrode system

№ п/п	Наименование параметра	Параметр
1	Основание	Тканевое
2	Тип электродов	Металлические круглые
3	Материал исполнения электродов	Нержавеющая сталь
4	Количество электродов, шт.	16
5	Длина электродного кабеля, м	2
6	Тип разъема к устройству ЭИТ	DB-25
7	Тип исполнения	Одноразовый

Ранее в работе [7] описана упрощенная функциональная модель средостения новорожденных (не герметичная). Проведены исследования на аппарате ЭИТ и подтвердилась ее работоспособность при моделировании нормального типа дыхания (эупноэ).

В данной работе используется один электродный ряд для проведения исследований. Для проверки работоспособности ЭСЛН и других разработанных решений смоделировано два режима замещения и поддержки функции дыхания новорожденных при помощи подачи газовой смеси в фантом через аппарат ИВЛ SLE 5000. Аппарат ИВЛ работает совместно с увлажнителем дыхательных смесей ТЕВЛАР (Таблица 1). Прикроватный монитор пациента COMENSTAR-8000D при проведении данного экспериментального исследования не используется.

Обычно температура в камере инкубатора может варьироваться в диапазоне от 20 до 30 °С. Влажность поддерживается в диапазоне от 30 до 75 %. Для глубоко недоношенных детей в первую неделю жизни влажность может составлять 85 %, затем она снижается до 50 % [8]. В инкубаторе для проведения экспериментальных исследований установили параметры, приведенные в Таблице 5, и поместили ГУФМС в инкубатор для новорожденных ИДН-02-«ДАНИО» для проведения дальнейших экспериментальных исследований в лабораторных условиях. Рассмотрим работоспособность ЭСЛН на примере работы двух режимов вентиляции легких новорожденных (CPAP, CMV), смоделированных при помощи аппарата ИВЛ.

В Таблице 5 приведены параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований.

Таблица 5 – Параметры, используемые при проведении экспериментальных исследований  
Table 5 – Parameters used in conducting experimental studies

№ п/п	Параметр	Значение
1	Частота инжектируемого тока (f), кГц	50, 100
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	Моделируемые режимы ИВЛ	CPAP, CMV
7	Время проведения исследования, с	60
8	Температура в инкубаторе, град С	25
9	Влажность в инкубаторе, %	50
10	Наклон объекта исследования в инкубаторе, град	0

Каждый режим вентиляции в аппарате ИВЛ сопровождается настройкой различных параметров. Режимы CPAP, CMV [9] выбраны как одни из самых традиционных и часто используемых в клинической практике. Для CMV характерно, что в данном режиме цикл вдоха инициируется вентилятором при заданной частоте дыхания (40 вд./мин) в минуту, вдохи здесь цикличны по времени. CPAP – вентилятор генерирует постоянное положительное давление в дыхательных путях на заданном авторами статьи уровне. В Таблице 6 приведены основные настройки параметров режимов вентиляции, используемых при проведении исследований, где CPAP – постоянное положительное давление в дыхательных путях, PEEP – положительное давление конца выдоха, PIP – пиковое давление вдоха, Tвд – время вдоха, ЧД – частота дыхания.

Таблица 6 – Основные настраиваемые параметры режимов вентиляции  
Table 6 – Main adjustable parameters of ventilation modes

№ п/п	Наименование параметра	Режим вентиляции					
		CPAP			CMV		
1	Давление CPAP, мбар	5			–		
2	Давление РЕЕР, мбар	–			5		
3	РIP, мбар	15			15		
4	Твд, с	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
5	ЧД, вл/мин	–	–	–	32	42	65

При проведении исследования на аппарате ЭИТ возможно одновременно отслеживать параметр Твд, который изменяется в ходе эксперимента на аппарате ИВЛ. Также в режиме CMV изменяется параметр ЧД. В режиме CPAP ЧД определяется, исходя из сигналов датчика давления. Другие значения останутся стандартными, так как нам необходимо проверить работоспособность ЭСЛН. Зная значение давления CPAP, РЕЕР, РIP, в аппарате ИВЛ рассчитывается объем поступающего воздуха в емкости легких (шары). Реальные клинические условия не моделируются. В качестве моделируемого типа дыхания выбрано тахипноэ (транзиторное-влажное легкое) [10].

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 6 изображен ЭСЛН, подготовленный к проведению исследований.

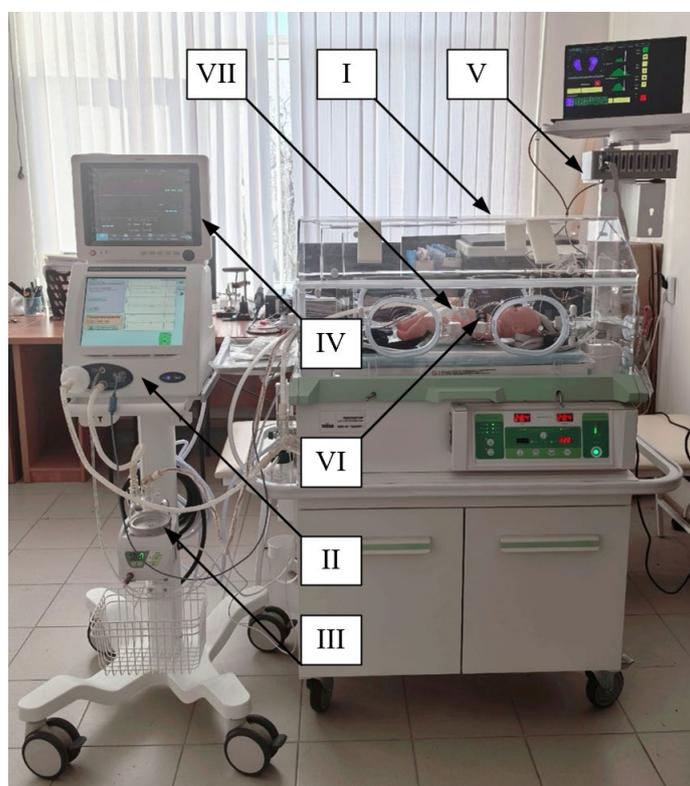


Рисунок 6 – Разработанный ЭСЛН, подготовленный к проведению исследований  
Figure 6 – Developed ESNL, prepared for conducting research

В Таблице 7 представлены графики зависимости измерительной информации  $\Delta\Phi$  (о. е.) от времени  $t$  (с) процесса глобальной и регионарной вентиляции для каждого паттерна дыхания для частот 50 и 100 кГц.

Результаты визуализации вентиляции легких на ГУФМС приведены в Таблице 8.

Таблица 7 – Зависимость параметра ЭИТ от времени дыхательных циклов

Table 7 – Dependence of the EIT parameter on the time of respiratory cycles

Режим ИВЛ	Частота инжектируемого тока 50 кГц	
	Время вдоха ( $T_{вд}=0,7$ с)	
CPAP		
CMV		
	Время вдоха ( $T_{вд}=0,5$ с)	
CPAP		
CMV		
	Время вдоха ( $T_{вд}=0,3$ с)	
CPAP		

Таблица 7 (продолжение)  
Table 7 (continued)

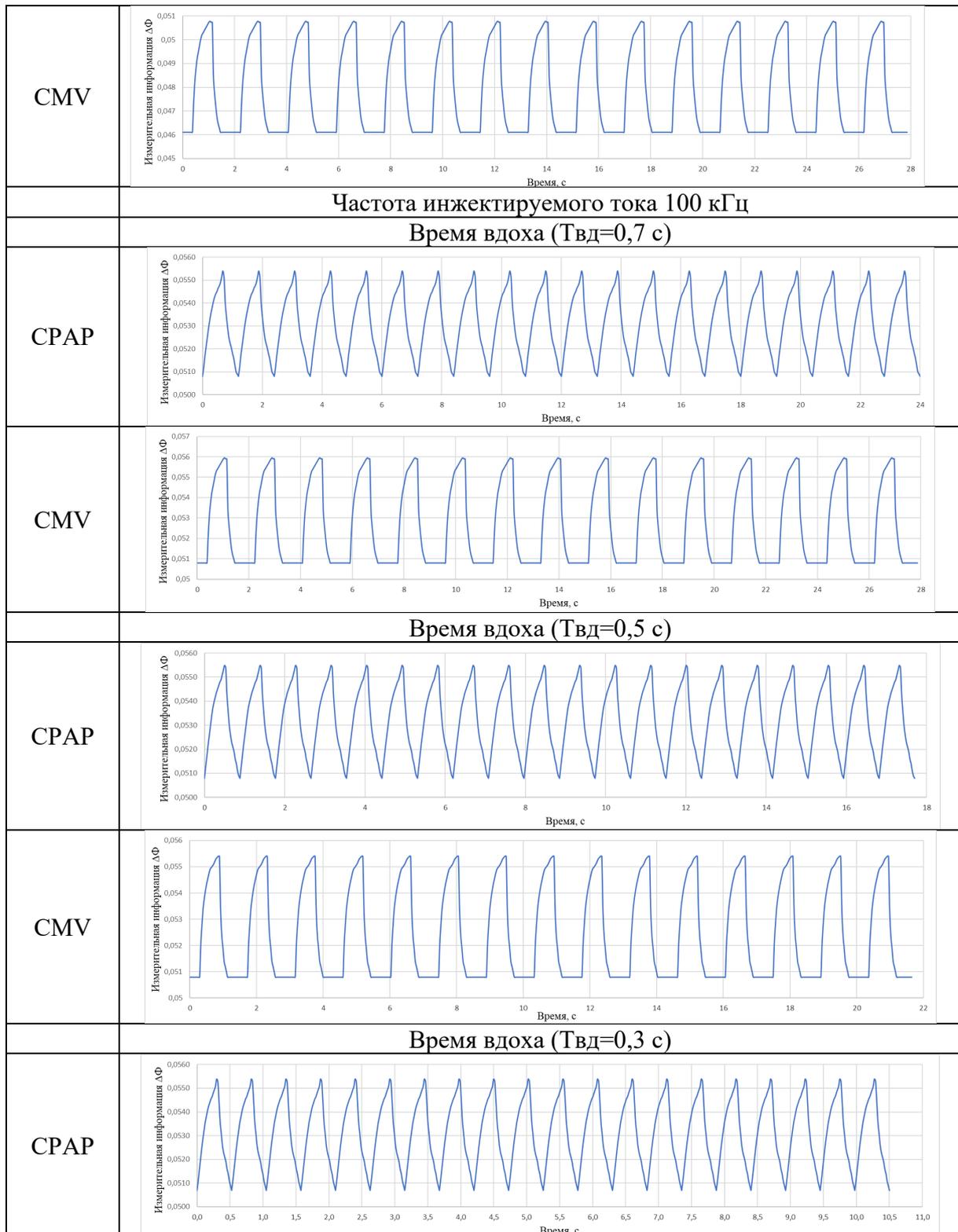


Таблица 7 (продолжение)  
Table 7 (continued)

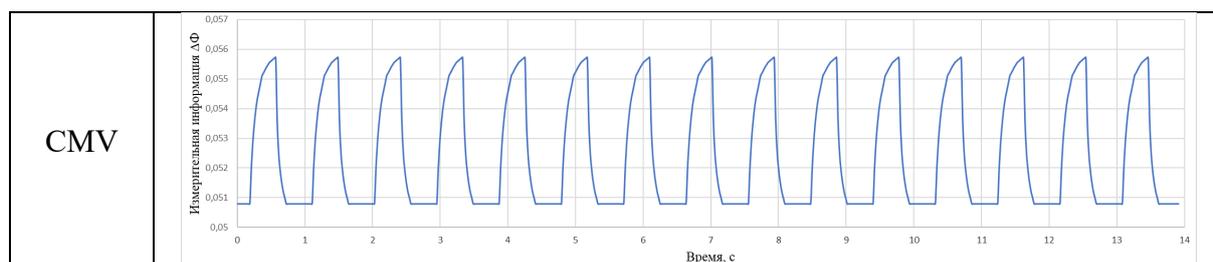


Таблица 8 – Результаты визуализации вентиляции на ГУФМС на частотах 50, 100 кГц  
Table 8 – Results of ventilation visualisation on HSPMM at 50, 100 kHz frequencies

Режим ИВЛ	Частота, кГц	Результаты визуализации вентиляции		
		Твд=0,7 с	Твд=0,5 с	Твд=0,3 с
СРАР	50			
	100			
CMV	50			
	100			

ГУФМС обеспечивает подачу, выбытие дыхательных объемов для правого (25 мл), левого (35 мл) и двух легких (60 мл = 0,06 л). Чувствительность ( $H$ ) ГУФМС рассчитывалась по формуле (1). Она ( $H$ ) может быть выражена как отношение изменения импеданса (измерительной информации  $\Delta\Phi$ , В) к изменению измеряемого параметра  $\Delta V$ , л:

$$H = \frac{\Delta\Phi}{\Delta V}. \quad (1)$$

По усредненным значениям максимальных ( $\max$ ) и минимальных ( $\min$ ) точек вдоха и выдоха, полученным при проведении экспериментальных исследований, получим значение  $H_{\max}$  и  $H_{\min}$  для каждого из двух режимов ИВЛ при частоте инжестируемого тока 50, 100 кГц. Полученные данные сведены в Таблицу 9.

Таблица 9 – Чувствительность для режимов ИВЛ СРАР и CMV при частоте инъецируемого тока 50, 100 кГц

Table 9 – Sensitivity for CPAP and CMV modes of ventilation at injected current frequency of 50, 100 kHz

Режимы ИВЛ		CPAP			CMV		
Частота, кГц	Твд, с	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
50 кГц	$H_{max}$ , В/л	0,856	0,854	0,854	0,882	0,882	0,881
	$H_{min}$ , В/л	0,773	0,773	0,772	0,767	0,766	0,767
100 кГц	$H_{max}$ , В/л	0,834	0,835	0,834	0,854	0,853	0,852
	$H_{min}$ , В/л	0,746	0,745	0,744	0,754	0,754	0,753

Полученные расчетные величины  $H$  необходимо учитывать в дальнейших экспериментальных исследованиях по моделированию глобальной и регионарной вентиляции.

### Обсуждение

Количество дыхательных движений легких новорожденных в минуту превышает взрослых в 2–3 раза, если ребенок родился доношенным и не имеет патологий дыхания. У многих новорожденных отмечается наличие патологий дыхания, которые превышают или снижают интенсивность дыхания. Необходимо установить, сможет ли аппарат ЭИТ распознать традиционные режимы вентиляции легких новорожденных. Как видно из Таблиц 7–9, аппарат ЭИТ восприимчив к измерительным данным, визуализируемые результаты реконструкции показывают возможность использования разработанного ГУФМС в исследовании процесса глобальной и регионарной вентиляции легких новорожденных. Проведены исследования с воздухонаполнением левого и правого легких. Система распознала дыхание при моделировании двух режимов вентиляции легких в областях исследования.

Разработанный ЭСЛН может использоваться для задач длительного мониторинга и визуализации вентиляции, перфузии, ВПО с использованием различных типов ЭС Neo. Вентиляция может производиться как жидкостью, так и газозвдушной смесью с настройкой и регулировкой параметров температуры, влажности, наклона объекта исследования и других параметров, которые могут быть получены с помощью оборудования, входящего в комплекс ЭСЛН.

Разработанный ЭСЛН позволяет проводить широкий спектр исследований. К перспективным методам исследований можно отнести возможность оценки влияния: температуры и влажности на результат ЭИТ-исследования, разных типов электродных систем (ЭС), количества электродов в ЭС, их размера на результат реконструкции полепроводимости, влияние угла наклона и высоты детского модуля, а также массы исследуемого объекта на результаты измерений, влияние частоты и силы инъецируемого тока на результат исследований, параметров режимов вентиляции аппарата ИВЛ и их комбинаций, а также воздухонаполнения емкостей легких (шаров) при помощи груши для механического тонометра на результат реконструкции полепроводимости, мониторинга параметров SpO<sub>2</sub>, ЭКГ, ЧД, ЧСС и других.

### Заключение

В ходе проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Разработаны принципы построения ЭСЛН, которые обеспечивают создание функционального, безопасного стенда, позволяющего выполнить моделирование режимов вентиляции легких новорожденных на основе метода ЭИТ.

2. Разработан ЭСЛН, позволяющий моделировать клинические ситуации в лабораторных условиях, обеспечивающий проведение экспериментальных исследований и тестирования новых медицинских технологий, связанных с вентиляцией легких новорожденных.

3. Разработана 3D-модель ГУФМС в программе Компас 3D, отличающаяся тем, что является герметичной конструкцией, которую можно помещать в куклу-новорожденного, эта модель будет использована для дальнейшей 3D-печати изделия.

4. Изготовлена ГУФМС с использованием технологии 3D-печати, отличающейся возможностью проведения исследований как на ГУФМС, так и с использованием ЭС Neo на кукле-новорожденном, наличием трех электродных рядов и управляемым воздухонаполнением в правое и левое легкие как одновременно, так и по отдельности, позволяющая моделировать процесс нормального и патологических типов дыхания, обеспечивающей проведение широкого перечня исследований, методов и алгоритмов ЭИТ.

5. Изготовлена ЭС Neo, отличающаяся комбинированной конструкцией, малыми размерами и гибким тканевым основанием, позволяющая проводить исследования на кукле-новорожденном, обеспечивающая плотное прилегание электродов к поверхности ГУФМС.

6. Результаты экспериментальных исследований ГУФМС по моделированию при помощи аппарата ИВЛ двух режимов вентиляции подтверждены заложенными в изделие функциональными возможностями. Так, ГУФМС, обеспечивает подачу, выбытие дыхательных объемов для правого (25 мл), левого (35 мл) и двух легких (60 мл), что подтверждает работоспособность ГУФМС и возможность их использования в научных исследованиях для моделирования процесса глобальной и регионарной вентиляции новорожденных, в особенности недоношенных.

Направление дальнейших исследований состоит в следующем:

- проведение экспериментальных исследований на ЭСЛН, а именно моделирование паттернов дыхания новорожденных;
- проведение экспериментальных исследований на ЭСЛН при помощи подачи жидкости в емкости (шары) легких;
- разработка и изготовление трехмерной ЭС Neo для проведения исследований сразу в нескольких плоскостях расположения электродных рядов;
- проведение экспериментальных исследований с использованием различных типов электродов в ЭС Neo.

Выполненные в статье исследования и разработки вносят значительный вклад в развитие ЭИТ в области неонатологии. Разработанная ГУФМС может быть использована как в научных исследованиях, так и для образовательных целей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Шабалов Н.П. *Неонатология. Т. II*. Москва: МЕДпресс-информ; 2004. 640 с.
2. Александрович Ю.С., Пшениснов К.В. *Респираторная поддержка при критических состояниях в педиатрии и неонатологии*. Москва: ГЭОТАР-Медиа; 2020. 272 с.
3. 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 a technique of external respiration function evaluation in newborns with deep degree of prematurity. *Bulletin of the Ivanovo State Medical Academy*. 2013;18(2):68–69. (In Russ.).
4. Adler A., Holder D. *Electrical Impedance Tomography: Methods, History and Applications*. Boca Raton: CRC Press; 2021. 518 p.
  5. Пеккер Я.С., Бразовский К.С., Усов В.Ю. и др. *Электроимпедансная томография*. Томск: Издательство научно-технической литературы; 2004. 192 с.
  6. Алексанян Г.К. Экспериментальная апробация макета информационно-измерительной системы мониторинга регионарного вентилиционно-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>
  7. 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>
  8. Демидова Т.В. *Сестринский уход за недоношенным новорожденным*. Иркутск: ИГМУ; 2013. 52 с.
  9. Горячев А.С., Савин И.А. *Основы ИВЛ*. Москва: ООО «МД»; 2013. 258 с.
  10. Шабалов Н.П. *Неонатология. Т. I*. Москва: МЕДпресс-информ; 2004. 608 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](mailto:mari.mak787@yandex.ru)

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

**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](mailto:temnjakovn@gmail.com)

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

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

**Nikolay S. Temnyakov**, Postgraduate at the Department of Information and Measurement Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novochechassk, the Russian Federation.

**Алексанян Грайр Каренович**, доктор технических наук, доцент кафедры «Информационные и измерительные системы и

**Graer K. Aleksanyan**, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of Information and Measurement

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

*e-mail:* [graer@yandex.ru](mailto:graer@yandex.ru)

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

Systems and Technologies, Platov South Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 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](mailto: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), Novocherkassk, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 20.02.2025; одобрена после рецензирования 10.03.2025; принята к публикации 19.03.2025.*

*The article was submitted 20.02.2025; approved after reviewing 10.03.2025; accepted for publication 19.03.2025.*