

ОРИГИНАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Научная статья

УДК 616-71

3.1.21. Педиатрия (медицинские науки)

<https://doi.org/10.17021/1992-6499-2026-2-109-120>

РАЗРАБОТКА И ТЕСТИРОВАНИЕ МАНЕКЕНА ГОЛОВЫ НОВОРОЖДЁННОГО С АНАТОМИЧЕСКИ ТОЧНЫМИ ВЕРХНИМИ ДЫХАТЕЛЬНЫМИ ПУТЯМИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ РЕСПИРАТОРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ОБУЧЕНИЯ МЕДИЦИНСКОГО ПЕРСОНАЛА

Всеволод Сергеевич Макаров^{1, 2}, Евгений Вячеславович Шестак^{1, 2},
Вадим Юрьевич Старков^{1, 2}

¹Екатеринбургский клинический перинатальный центр, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация. Актуальность исследования обусловлена отсутствием в Российской Федерации недорогих и реалистичных моделей головы новорождённых для тестирования неинвазивного респираторного оборудования и обучения медицинского персонала. Большинство из доступных на рынке манекенов обладают либо недостаточной анатомической точностью и невозможностью проведения измерений, либо крайне высокой ценой. **Цель исследования:** разработка и тестирование манекена головы новорождённого с анатомически точными верхними дыхательными путями для испытаний респираторного оборудования и обучения медицинского персонала. **Материалы и методы.** Исследование основано на использовании обезличенных данных компьютерной томографии новорождённых без патологий, полученных в государственном бюджетном учреждении здравоохранения Свердловской области «Екатеринбургский клинический перинатальный центр». На основе данных создана 3D-модель головы с реалистичными дыхательными путями, воспроизводящая анатомические особенности. Материалы включали PLA-пластик и двухкомпонентный силикон. Испытания проводились с использованием аппарата CPAP Infant Flow и высокоточных измерительных приборов. Период исследования включал разработку, изготовление и тестирование модели на протяжении 12 мес. **Результаты.** Разработанная модель головы продемонстрировала высокую точность воспроизведения давления в дыхательных путях. Ультратонкий силикон позволил идентифицировать зоны повышенного давления на коже, что делает модель полезной для обучения персонала. Практическая значимость заключалась в тестировании и настройке респираторного оборудования, а также обучении медицинского персонала в условиях, близких к клиническим. **Заключение.** Разработанный манекен головы новорождённого доказал свою эффективность как инструмент для тестирования оборудования и обучения персонала. Однако требуется дальнейшая оценка долговечности модели и её адаптация для работы с различными типами респираторных систем, а также последующее внедрение дополнительных электронных измерительных модулей для расширения функционала.

Ключевые слова: манекен головы новорождённого, неинвазивная респираторная поддержка, обучение медицинского персонала, тестирование оборудования

Для цитирования: Макаров В. С., Шестак Е. В., Старков В. Ю. Разработка и тестирование манекена головы новорождённого с анатомически точными верхними дыхательными путями для испытаний респираторного оборудования и обучения медицинского персонала // Астраханский медицинский журнал. 2026. Т. 21, № 2. С. 109–120. <https://doi.org/10.17021/1992-6499-2026-2-109-120>.

ORIGINAL RESEARCH

Original article

DEVELOPMENT AND TESTING OF A NEONATAL HEAD MANIKIN WITH AN ANATOMICALLY ACCURATE UPPER AIRWAY FOR RESPIRATORY EQUIPMENT TESTING AND MEDICAL PERSONNEL TRAINING

Vsevolod S. Makarov^{1, 2}, Evgenii V. Shestak^{1, 2}, Vadim Yu. Starkov^{1, 2}

¹Yekaterinburg Clinical Perinatal Center, Yekaterinburg, Russia

²Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia

Abstract. The relevance of the study is determined by the lack of inexpensive and realistic models of newborn heads in the Russian Federation for testing non-invasive respiratory support equipment and training medical personnel. Most of the manikins available on the market either have insufficient anatomical accuracy and the impossibility of taking measurements, or are extremely expensive. **Objective.** development and testing of a neonatal head manikin with anatomically accurate upper airway for respiratory equipment testing and medical personnel training. **Materials and methods.** The study is based on the use of anonymized data from computed tomography of newborns without pathologies, obtained at the State Budgetary Healthcare Institution of the Sverdlovsk Region, the Yekaterinburg Clinical Perinatal Center. Based on the data, a 3D model of the head with realistic airways was created, reproducing the anatomical features. The materials included PLA plastic and two-component silicone. The tests were conducted using the CPAP Infant Flow device and high-precision measuring devices. The study period included the development, production and testing of the model over a period of 12 months. **Results.** The developed head model demonstrated high accuracy in reproducing airway pressure. Ultra-soft silicone allowed identifying areas of increased pressure on the skin, making the model useful for training personnel. The practical significance consisted in testing and adjusting respiratory equipment, as well as training medical personnel in conditions close to clinical ones. **Conclusion.** The developed manikin of the newborn head has proven its effectiveness as a tool for testing equipment and training personnel. However, further assessment of the model's durability and its adaptation for work with different types of respiratory systems is required, as well as further implementation of additional electronic measuring modules to expand the functionality.

Key words: neonatal head manikin, non-invasive respiratory support, medical personnel training, equipment testing

For citation: Makarov V. S., Shestak E. V., Starkov V. Yu. Development and testing of a neonatal head manikin with anatomically accurate upper airway for respiratory equipment testing and medical personnel training. Astrakhan Medical Journal. 2026; 21 (2): 109–120. <https://doi.org/10.17021/1992-6499-2026-2-109-120> (In Russ.).

Введение. Современный подход к медицине предъявляет высокие требования к подготовке медицинских сотрудников и тестированию оборудования, в том числе респираторным аппаратам и девайсам, контактирующим с тканями человека. Особую роль играет сектор неонатологии, где сотрудники работают с крайне незрелыми детьми от 500 г и менее, у которых быстро развиваются осложнения, а к респираторному оборудованию предъявляются высокие требования [1].

Проблема заключается в том, что современные респираторы должны учитывать анатомические особенности головы и воздухоносных путей новорожденного. Ошибки в дизайне аппаратов и лицевых интерфейсах, их неправильное использование могут привести к травмам носа, повреждению кожного покрова и недостаточной эффективности органозамещающей функции – вентиляции лёгких [2].

Обучение медицинского персонала не менее важно. От навыков работы с аппаратами неинвазивной респираторной поддержки напрямую зависит эффективность респираторной терапии и снижение осложнений [3, 4]. Учитывая особенности работы с новорожденными детьми, не всегда безопасно проводить обучение специалистов первого года работы на живых пациентах [5]. С этой целью можно использовать манекены, эффективность обучения на которых не вызывает сомнений [6, 7], однако далеко не все учреждения здравоохранения обладают материальной базой для проведения полноценных тренингов молодых специалистов [8].

Манекены с высокой анатомической точностью и возможностью проведения дополнительных измерений обладают высокой ценой и недоступны к приобретению небольшими медицинскими учреждениями или тренинговыми центрами.

Цель исследования – разработка и тестирование манекена головы новорождённого с анатомически точными верхними дыхательными путями для испытаний респираторного оборудования и обучения медицинского персонала.

Материалы и методы. На способы и технологию разработки, представленной симуляционной модели головы новорождённого получен патент от 05.12.2025 г. № 2852232 [9].

Дизайн исследования: одноцентровое обсервационное исследование.

Условия проведения исследования: модель разработана в молодёжной научной лаборатории «Приборостроение для медицины критических состояний» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России); тестирование проведено на базе государственного бюджетного учреждения здравоохранения Свердловской области «Екатеринбургский клинический перинатальный центр» (ГБУЗ СО «ЕКПЦ») [8].

Этапы разработки симуляционной модели:

1 этап – костные структуры. Исходными данными послужили обезличенные КТ-сканы новорождённых из ГБУЗ СО «ЕКПЦ», у которых не было выявлено патологий головы, шеи и грудной клетки [10]. На их основе реконструированы череп и шейный отдел позвоночника. Структуры, не влияющие на лицевой скелет и геометрию дыхательных путей, упростили – это сократило время печати без потери анатомического правдоподобия [8]. Нижнечелюстной сустав тоже упрощён, но с обязательным условием: после заливки силиконом он должен сохранять подвижность [11–12].

2 этап – мягкие ткани. На основе костного каркаса смоделирован обобщённый облик новорождённого без воспроизведения конкретных черт ребёнка. Геометрию и взаиморасположение носа и рта задавали по усреднённым антропометрическим данным – ручным измерениям и КТ [12]. В дыхательных путях заложены естественные изгибы, сужения и характерные пути сброса воздуха при работе назальных интерфейсов. Воздушный тракт спроектирован как сборная конструкция из нескольких сегментов: внутри черепа они стыкуются в единый канал, но после полимеризации силикона остаются извлекаемыми [13]. Дополнительно предусмотрена сменная вставка-обтуратор в ротовую полость, перекрывающая утечку через рот без искажения общего потока.

3 этап – литевая форма. Форма одновременно удерживает череп и заготовки дыхательных путей и отливает лицо ребёнка. Она выполнена из двух разъёмных половин – это обеспечивает многоразовость и точное сведение анатомических ориентиров при сборке. По периметру проходит бортик, удерживающий силикон: платиновый компаунд твёрдостью 1 Шор слишком текуч, чтобы обойтись без него. Костные структуры и вставки фиксируются собственными замками, исключающими смещение при заливке. Опытным путём были выявлены зоны, где образуются воздушные полости, к которым провели каналы для отвода воздуха.

4 этап – интерфейс для измерительного оборудования. В модель встроен адаптер для регистрации давления в дыхательных путях; через него же подключается система искусственного лёгкого, что расширяет круг сценариев – от испытаний аппаратов до отработки навыков подбора параметров вентилиции. Кожный покров имитирует двухкомпонентный платиновый силиконовый компаунд твёрдостью 1 по Шору [14]. Такая твердость воспроизводит податливость тканей новорождённого и в сочетании с анатомической геометрией обеспечивает достоверное позиционирование респираторных интерфейсов. Модель не привязана к конкретной измерительной системе и принимает любые приборы для регистрации параметров дыхания.

Способ изготовления. Цифровые модели печатали на FDM 3D-принтере из PLA-пластика с толщиной слоя 0,1 мм – этот параметр определяет качество поверхности и точность мелких анатомических деталей. После печати элементы собирали, проверяли укладку дыхательных путей, форму герметизировали и стягивали изоляционной лентой. Перед заливкой её обязательно тестировали водой – самый надёжный способ найти негерметичные стыки. Затем форму заполняли силиконовым компаундом.

Оборудование и расходные материалы: FDM 3D-принтер Elegoo Saturn 3 Ultra 12K, область печати 218,88 × 122,88 × 260 мм («Shenzhen Elegoo Technology Co., Ltd.», Китай); PLA-филамент, 5 кг – на две пробные модели и итоговый комплект костных структур и форм (Bestfilament, Россия); силикон «SilcoPlat» на платиновой основе твёрдостью 2 по Шору, 4 кг с учётом брака на два прототипа и итоговый образец (ХимСнабКомпозит, Россия); анализатор-калибратор «CitrexH4», № 54548-13 в Государственном реестре средств измерений РФ («Imtmedical AG», Швейцария); аппарат респираторной терапии Infant Flow SiPAP («VIASYS Healthcare Inc.», США); изогнутые носовые канюли для недоношенных детей со шлангом 2,1 м (АО «Интерсёдджикал»); силиконовые назальные маски и канюли размеров S–L («Intersurgical Ltd.», Великобритания); эндотрахеальная трубка № 4,5 без манжеты, внутренний диаметр 4,5 мм, наружный 6,2 мм, длина 210 мм («Mederen», Израиль) [8].

Целевые показатели исследования. Основной показатель исследования: значения среднего давления в дыхательных путях, определяемые на выходе из симуляционной модели. Дополнительные показатели исследования: определение зон наибольшего давления лицевого интерфейса.

Методы измерения целевых показателей. Испытания проводили в следующем порядке. Манекен соединяли с аппаратом CPAP Infant Flow через штатные интерфейсы; размер маски подбирали под носовые ходы манекена согласно рекомендациям производителя. Далее проверяли фиксацию интерфейсов, назальных масок и канюль: задача состояла в том, чтобы добиться максимальной герметичности, не сдавливая силиконовый слой, – это воспроизводило реальные условия работы оборудования. После этого аппарат запускали в различных режимах настройки.

Давление в дыхательных путях регистрировали поверенным анализатором CitrexH4, подключённым к эндотрахеальной трубке внутренним диаметром 4,5 мм, размещённой в дистальном отделе

воздушного тракта манекена. Параллельно с показаниями CitrexH4 фиксировали значения, выдаваемые самим аппаратом Infant Flow, – целью было сопоставить эти два набора данных при разных значениях потока дыхательной смеси. Одновременно отслеживали распределение давления на поверхности силиконовой «кожи» в зонах контакта с канюлями и маской.

Каждая серия измерений проводилась в двух конфигурациях: с установленной ротовой вставкой и без неё. Извлечённая вставка имитировала клиническую ситуацию открытого рта у новорождённого, то есть значительную утечку из дыхательных путей [8].

Результаты и их обсуждение.

Изготовление модели. Результатом проведенной работы стала разработка 3D-моделей костных структур. На рисунке 1 изображена окончательная 3D-модель черепа и позвоночника с готовыми замками крепления в литейной форме. На рисунке 2 – окончательная модель нижней челюсти со специально разработанными замками, которые, присоединяясь к ответной части в черепе, сохраняют свободный ход и позволяют легко прикреплять и откреплять челюсть.

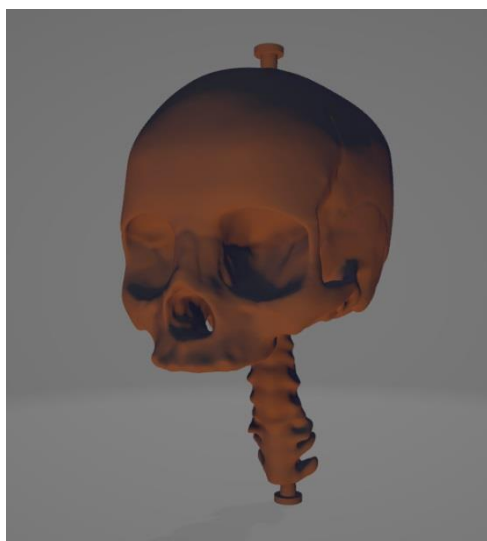


Рисунок 1. **Череп и позвоночник**
Figure 1. **Skull and spine**



Рисунок 2. **Нижняя челюсть**
Figure 2. **Lower jaw**

Параллельно спроектирован комплект вставок, формирующих язык, ротовую полость и верхние дыхательные пути. Языковая вставка вместе с прилегающей частью ротовой полости показана на рисунке 3. Носовые ходы образуют две симметричные вставки, одна из которых представлена на рисунке 4. Продолжение тракта – носоглотку, вход в трахею и саму трахею – формирует отдельный элемент (рис. 5) [8].



Рисунок 3. **Ротовая полость**
Figure 3. **Oral cavity**



Рисунок 4. **Носовые ходы**
Figure 4. **Nasal passages**



Рисунок 5. **Ротоглотка, вход в трахею**
Figure 5. **Oropharynx, entrance to trachea**

Также было выполнено моделирование литейных форм (рис. 6–7), которые формируют лицо манекена. В модели можно заметить углубления для фиксации вставок и отверстия для заливки силикона и отхождения воздуха.



Рисунок 6. Нижняя часть формы
Figure 6. The lower part of the form



Рисунок 7. Верхняя часть формы
Figure 7. Top of the form

После получения всех необходимых моделей была произведена печать на 3D-принтере вставок, формирующих дыхательные пути (рис. 8). На рисунке 9 изображен череп с закрепленной нижней челюстью в нижней части литейной формы. На рисунке 10 представлены вставки, формирующие дыхательные пути, вставленные в нижнюю часть литейной формы без черепа. На рисунке 11 показан череп, вставленный в нижнюю часть литейной формы с закрепленными вставками, формирующими дыхательные пути.



Рисунок 8. Вставки дыхательных путей
Figure 8. Airway inserts



Рисунок 9. Череп с частью позвоночника с закрепленной нижней челюстью
Figure 9. Skull with part of the spine with the lower jaw attached



Рисунок 10. Вставки дыхательных путей
Figure 10. Airway inserts



Рисунок 11. Череп с нижней челюстью
с установленными вставками в литевой форме
Figure 11. Skull with lower jaw with
inserts installed in a cast mold

После проверки и сборки всех частей произведена заливка формы дегазированным силиконом твердостью 1 по Шору с добавлением красителя «кожа». После полного застывания силикона готовая модель извлекается из литевой формы, после удаляются вставки (рис. 12). На рисунке 13 демонстрируется ротовая полость, видно язык и окружающее пространство. На рисунке 14 при отгибании носа можно увидеть структуру носовых ходов. В нижней части манекена располагается выход дыхательных путей (рис. 15) с естественными сужениями [8].



Рисунок 12. Готовая модель
Figure 12. Finished model



Рисунок 13. Ротовая полость с отогнутой губой
Figure 13. Oral cavity with a retracted lip

Сравнительная оценка давлений. Симуляционная модель головы новорождённого оснащена адаптером для подключения измерительных приборов, что позволяет оценивать давление в дыхательных путях при тестировании респираторной техники. Также возможна интеграция системы искусственного лёгкого для проведения обучающих сценариев и подбора оптимальных параметров вентиляции. Анатомически корректная ротовая полость предусматривает установку вставки, блокирующей утечку воздуха через рот и не нарушающей общий поток, что даёт возможность имитировать как

герметичные, так и негерметичные клинические условия. Модель позволяет воспроизводить различные респираторные ситуации и подключается к широкому спектру измерительной аппаратуры. В ходе испытаний манекен был соединён с аппаратом Infant Flow через стандартные назальные маски и канюли размера L, выбранные согласно инструкции производителя. Оценивалась герметичность интерфейсов и корректность установки без чрезмерного давления на мягкие ткани.



Рисунок 14. Носовые ходы
Figure 14. Nasal passages

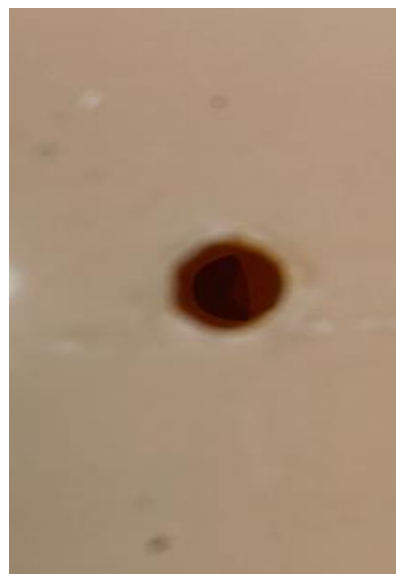


Рисунок 15. Выход дыхательных путей
Figure 15. Airway exit

Испытания проводились при изменении воздушного потока от 2 до 12 л/мин с шагом 1 л/мин. Измерения выполнялись в два этапа: первый – при подключении Citrex H4 к эндотрахеальной трубке с установленной ротовой вставкой; второй – при подключении Citrex H4 к той же трубке, но с извлечённой ротовой вставкой, имитируя открытую ротовую полость. На каждом этапе осуществлялось по 10 замеров для каждой скорости потока. Также параллельно отслеживалось распределение давления на поверхности силиконовой «кожи» манекена в местах контакта с интерфейсами [8].

На первом этапе, когда Citrex H4 подключался к эндотрахеальной трубке с закрытым ртом, на уровнях потока 11 и 12 л/мин отмечались статистически значимые отличия давления ($p = 0,039$ и $p = 0,023$), что подтверждает функциональность дыхательных путей модели и наличие потерь давления по мере прохождения воздушного потока (табл. 1) [8].

На втором этапе (открытый рот) давление на Citrex H4 резко снижалось вплоть до нулевых значений при потоках 2–3 л/мин ($p < 0,001$), что объясняется имитацией утечки воздуха через открытую ротовую полость (табл. 2) [8].

Таблица 1. Показатели давления на первом этапе испытания с ротовой вставкой

Table 1. Pressure readings during the first stage of testing with the oral insert

Поток, л/мин	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MAP Infant Flow (смH ₂ O) M ± SD	0,20 ± 0,06	0,60 ± 0,06	1,12 ± 0,10	1,80 ± 0,13	2,60 ± 0,13	3,01 ± 0,13	4,18 ± 0,12	5,29 ± 0,11	6,02 ± 0,19	9,03 ± 0,19	9,24 ± 0,16
MAP CitrexH4 (смH ₂ O) M ± SD	0,18 ± 0,07	0,57 ± 0,09	1,09 ± 0,09	1,76 ± 0,16	2,53 ± 0,17	2,96 ± 0,18	4,12 ± 0,16	5,21 ± 0,15	5,84 ± 0,22	8,86 ± 0,14	9,04 ± 0,19
p (t Стьюдента двусторонний)	0,548	0,424	0,516	0,557	0,330	0,507	0,363	0,208	0,069	0,039*	0,023*

Таблица 2. Показатели давления на втором этапе испытания без ротовой вставки

Table 2. Pressure readings in the second stage of testing without an oral insert

Поток, л/мин	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
MAP Infant Flow (смH ₂ O) M ± SD	0,20 ± 0,05	0,60 ± 0,06	1,12 ± 0,10	1,81 ± 0,13	2,61 ± 0,14	3,01 ± 0,13	4,18 ± 0,12	5,29 ± 0,11	6,02 ± 0,19	9,03 ± 0,19	9,24 ± 0,16
MAP CitrexH4 (смH ₂ O) M ± SD	0,0 ± 0,0	0,0 ± 0,0	0,20 ± 0,10	0,64 ± 0,13	1,0 ± 0,08	1,50 ± 0,15	2,44 ± 0,13	2,82 ± 0,12	3,93 ± 0,12	4,92 ± 0,19	5,5 ± 0,18
p (t Стьюдента двусторонний)	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001

Таким образом, модель достоверно воспроизводит клинические сценарии с различными параметрами вентиляции и герметичности, что делает её полезным инструментом для обучения и тестирования оборудования.

Дополнительные результаты исследования. Распределение давления от лицевого интерфейса. Ультратягкий силикон дал возможность детально проследить, где именно при наложении назальных канюль и маски возникают зоны максимального давления. Наиболее выраженные точки нагрузки приходятся на носогубный треугольник, крылья носа и скуловую область. При некорректной фиксации канюль давление перераспределяется, появляются локальные пики нагрузки и деформация носа – в клинических условиях это и приводит к формированию пролежней.



Рисунок 16. Сравнение деформации крыльев носа при избыточном усилии крепления
Figure 16. Comparison of the deformation of the nasal wings with excessive fastening force

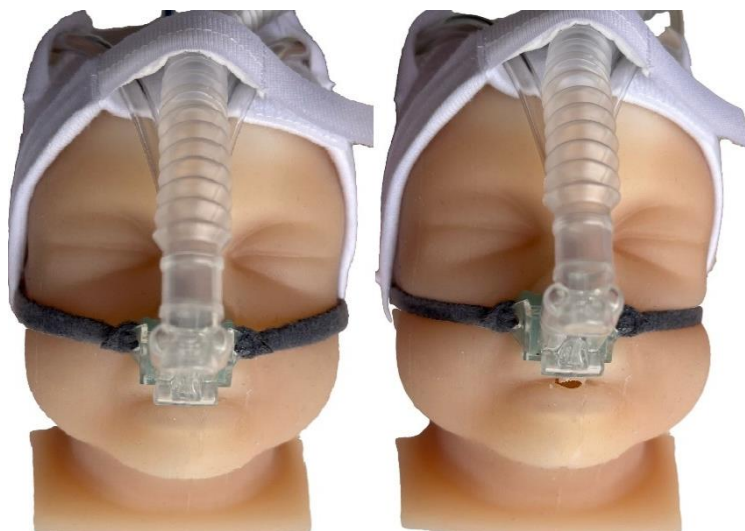


Рисунок 17. Сравнение деформации области скуловой кости при избыточном креплении
Figure 17. Comparison of the deformation of the zygomatic bone region with excessive anchorage

Обсуждение. Была разработана анатомическая точная модель головы новорождённого с верхними дыхательными путями. Её ключевые достоинства – доступность и высокая реалистичность, благодаря которым она одинаково применима и для тестирования оборудования, и для обучения персонала. Испытания показали значительную потерю давления в дыхательных путях при имитации открытого рта. Эти данные подтверждают пригодность манекена для оценки респираторного оборудования и различных лицевых интерфейсов.

Ограничения исследования. Ограничения исследования включают отсутствие длительных испытаний на долговечность материалов, использованных при производстве манекена, а также необходимость проверки эффективности модели на более широком спектре оборудования.

Интерпретация результатов исследования. Существует ряд исследований, демонстрирующих возможность проведения испытаний респираторного оборудования и лицевых интерфейсов с использованием самодельных манекенов. Одно из таких исследований посвящено тестированию системы ViPAP с использованием специально разработанной головы новорождённого ребёнка [15]. В сравнении с разработанным манекеном можно выделить несколько существенных отличий. Конструкция описанного в исследовании манекена выполнена из жёстких материалов, что исключает податливость

кожных покровов. Это, в свою очередь, сужает возможность оценки безопасности лицевых интерфейсов и снижает реалистичность имитации различных сценариев при обучении медицинского персонала. Дыхательные пути в данном манекене характеризуется высокой анатомической точностью, однако отсутствует ротовая полость, что исключает возможность моделирования утечек воздуха. Таким образом, конструкция манекена ориентирована на узкоспециализированные задачи, ограничивая его применение в более широком контексте.

В другом исследовании изучались преимущества индивидуальных масок, созданных с учётом анатомических особенностей пациента [16]. Для этих целей использовался специально разработанный манекен. Его преимуществом являлась возможность измерения давления в местах контакта маски с поверхностью лица, благодаря использованию внешних датчиков, которые не требовали специального крепления и не были встроены в ткани манекена. Голова манекена была выполнена из мягкого полимерного материала, что могло повысить его долговечность. Однако такая конструкция не позволяла визуально оценить деформацию кожных покровов при неправильном креплении маски. Кроме того, отсутствие ротовой полости ограничивало возможность моделирования утечек воздуха.

В третьей работе для оценки нестандартных масок использовался коммерческий манекен [17]. Несмотря на высокое качество, выявлен ряд ограничений: рот требовалось заклеивать вручную подручными средствами – иных способов исключить утечку конструкция не предусматривала. Жёсткие материалы корпуса и отсутствие встроенных датчиков давления не позволяли оценить компрессию тканей.

Сравнительный анализ указанных исследований подтверждает актуальность разработки универсального манекена. Особое внимание было уделено конструкции, которая была бы простой в изготовлении, легко модифицируемой и подходящей для проведения как тренингов, так и сложных научных исследований. При этом основной акцент был сделан на вопросах анатомической точности, безопасности лицевых интерфейсов и возможности имитации разнообразных сценариев, включая моделирование утечек воздуха и оценку воздействия на кожные покровы.

Проведённое исследование продемонстрировало высокий уровень воспроизведения анатомических характеристик модели, что подтверждается сопоставлением данных о давлении, полученных от аппаратов респираторной поддержки и внешних измерительных приборов [8]. Однако наблюдаемые расхождения в измерениях давления при некоторых режимах требуют дальнейшего изучения. Увеличение точности измерений может быть достигнуто за счёт применения более сложных моделей дыхательных путей или использования дополнительного калибровочного оборудования.

Манекен поддерживает тренировку широкого набора клинических сценариев: смену положения ребёнка, вариации давления при разных потоках дыхательной смеси, смещение лицевых интерфейсов, замену типов креплений. На основе полученных данных были выстроены алгоритмы оптимального наложения назальных канюль и масок, снижающие нагрузку на кожу и предотвращающие формирование зон избыточного давления. Эти алгоритмы вошли в обучающие программы для персонала и уменьшают вероятность ошибок при подключении аппаратов респираторной поддержки и систем подачи кислорода [8]. Кроме того, модель помогла локализовать участки риска по пролежням; на эти зоны рекомендуется превентивно накладывать гидрогелевые повязки – особенно у крайне недоношенных детей и пациентов, длительно получающих неинвазивную респираторную поддержку.

Алгоритмы включают пошаговые инструкции по фиксации оборудования, проверке давления и периодической переоценке состояния кожных покровов. Во время практических занятий медицинский персонал обучается следовать этим алгоритмам, закрепляя навыки с помощью манекена.

Практическая значимость исследования заключается в следующем: в тестировании респираторного оборудования в условиях, максимально приближенных к клиническим; разработке алгоритмов наложения респираторных интерфейсов, минимизирующих давление на кожные покровы; обучении медицинского персонала с использованием визуализации зон риска повреждений кожи при наложении канюль и масок.

Перспективы дальнейших исследований включают: адаптацию модели к различным типам респираторных устройств; интеграцию дополнительных сенсорных модулей для отслеживания параметров дыхания и объективного контроля давления на различные участки; возможность масштабирования технологии для создания моделей других частей тела.

Заключение. Разработанный манекен головы новорождённого доказал свою эффективность как инструмент для тестирования респираторного оборудования и обучения медицинского персонала. Его высокая анатомическая точность и возможность воспроизведения клинических сценариев делают модель универсальным средством в области неонатальной медицины. Для полного внедрения модели в

практическую деятельность необходимы дальнейшая оценка долговечности модели при интенсивной эксплуатации; тестирование совместимости с различными типами оборудования; разработка модулей для более точного измерения и анализа параметров респираторной терапии.

Внедрение подобных моделей может значительно повысить качество обучения медицинского персонала и тестирования оборудования, что, в свою очередь, снизит риски осложнений у новорождённых и улучшит исходы лечения.

Раскрытие информации. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Вклад авторов. Авторы декларируют соответствие своего авторства международным критериям ICMJE. Все авторы в равной степени участвовали в подготовке публикации: разработка концепции статьи, получение и анализ фактических данных, написание и редактирование текста статьи, проверка и утверждение текста статьи.

Authors' contribution. The authors declare the compliance of their authorship according to the international ICMJE criteria. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Источник финансирования. Авторы декларируют отсутствие внешнего финансирования для проведения исследования и публикации статьи.

Funding source. The authors declare that there is no external funding for the exploration and analysis work.

Благодарность. Коллектив авторов выражает признательность Сабирову Михаилу Маулитовичу, врачу отделения реанимации Екатеринбургского перинатального центра, за помощь в проведении испытаний.

Acknowledgments. The team of authors expresses gratitude to Sabirov Mikhail Mauliovich, physician of the intensive care unit of the Yekaterinburg Perinatal Center, for assistance in conducting the tests.

Список источников

1. Newnam K. M., McGrath J. M., Estes T., Jallo N., Salyer J., Bass W. T. An integrative review of skin breakdown in the preterm infant associated with nasal continuous positive airway pressure // *Journal of Obstetric, Gynecologic, and Neonatal Nursing*. 2013. Vol. 42, no. 5. P. 508–516. doi: 10.1111/1552-6909.12233.
2. Boyar V. Pressure Injuries of the Nose and Columella in Preterm Neonates Receiving Noninvasive Ventilation via a Specialized Nasal Cannula: A Retrospective Comparison Cohort Study // *Journal of Wound, Ostomy and Continence Nursing*. 2020. Vol. 47, no. 2. P. 111–116. doi: 10.1097/WON.0000000000000616.
3. Naha N., Pournami F., Prabhakar J., Jain N. Nasal Injury with Continuous Positive Airway Pressure: Need for “Privileging” Nursing Staff // *Indian Journal of Pediatrics*. 2019. Vol. 86, no. 7. P. 595–598. doi: 10.1007/s12098-019-02960-1.
4. McCoskey L. Nursing Care Guidelines for prevention of nasal breakdown in neonates receiving nasal CPAP // *Advances in Neonatal Care*. 2008. Vol. 8, no. 2. P. 116–124. doi: 10.1097/01.ANC.0000317260.99072.ae.
5. Chae S., Shon S. Effectiveness of simulation-based interprofessional education on teamwork and communication skills in neonatal resuscitation // *BMC Medical Education*. 2024. Vol. 24, no. 1. P. 602. doi: 10.1186/s12909-024-05581-1.
6. Yousef N., Moreau R., Soghier L. Simulation in neonatal care: towards a change in traditional training? // *European Journal of Pediatrics*. 2022. Vol. 181, no. 4. P. 1429–1436. doi: 10.1007/s00431-022-04373-3.
7. MacKinnon K., Marcellus L., Rivers J., Gordon C., Ryan M., Butcher D. Student and educator experiences of maternal-child simulation-based learning: a systematic review of qualitative evidence protocol // *JBIC Database of Systematic Reviews and Implementation Reports*. 2015. Vol. 13, no. 1. P. 14–26. doi: 10.11124/jbisrir-2015-1694.
8. Шестак Е. В. Респираторные нарушения у новорождённых детей: новые технологии ранней диагностики, лечения и профилактики локальных осложнений: специальность 3.1.21. «Педиатрия». Екатеринбург, 2025. 276 с.
9. Патент 2852232 Рос. Федерация: МПК G09B 23/28 Симуляционная модель головы новорожденного и способ изготовления для проведения испытаний неинвазивной респираторной поддержки и обучения медицинских специалистов работе с дыхательной аппаратурой / Шестак Е. В., Макаров В. С., Старков В. Ю.; заяв. и пат. ФГБОУ ВО УГМУ Минздрава России. № 2024139057; заявл. 23.12.2024; опубл. 05.12.2025. Бюл. № 34.
10. Buser T. J., Boyd O. F., Cortés Á., Donatelli C. M., Kolmann M. A., Luparell J. L., Pfeiffenberger J. A., Sidlauskas B. L., Summers A. P. The Natural Historian's Guide to the CT Galaxy: Step-by-Step Instructions for Preparing and Analyzing Computed Tomographic (CT) Data Using Cross-Platform, Open Access Software // *Integrative Organismal Biology*. 2020. Vol. 2, no. 1. P. obaa009. doi: 10.1093/iob/obaa009.
11. Sander I. M., McGoldrick M. T., Helms M. N., Betts A., van Avermaete A., Owers E., Doney E., Liepert T., Niebur G., Liepert D., Leevy W. M. Three-dimensional printing of X-ray computed tomography datasets with multiple materials using open-source data processing // *Anatomical Sciences Education*. 2017. Vol. 10, no. 4. P. 383–391. doi: 10.1002/ase.1682.

12. Weatherall A. D., Rogerson M. D., Quayle M. R., Cooper M. G., McMenamin P. G., Adams J. W. A Novel 3-Dimensional Printing Fabrication Approach for the Production of Pediatric Airway Models // *Anesthesia and Analgesia*. 2021. Vol. 133, no. 5. P. 1251–1259. doi: 10.1213/ANE.0000000000005260.
13. Kavanagh K. R., Cote V., Tsui Y., Kudernatsch S., Peterson D. R., Valdez T. A. Pediatric laryngeal simulator using 3D printed models: A novel technique // *Laryngoscope*. 2017. Vol. 127, no. 4. P. E132–E137. doi: 10.1002/lary.26326.
14. Eu D., Daly M. J., Taboni S., Sahoaler A., Gilbank A. N., Irish J. C. Evaluation of a 3D Printed Silicone Oral Cavity Cancer Model for Surgical Simulations // *Journal of Personalized Medicine*. 2024. Vol. 14, no. 5. P. 450. doi: 10.3390/jpm14050450.
15. Dundek M. L., Ng E. K., Brazil A. M., DiBlasi R. M., Poli J. A., Burke T. F. Evaluation of a Bubble CPAP System for Low Resource Settings // *Respiratory Care*. 2021. Vol. 66, no. 10. P. 1572–1581. doi: 10.4187/respcare.08948.
16. Kamath A. A., Kamath M. J., Ekici S., Stans A. S., Colby C. E., Matsumoto J. M., Wylam M. E. Workflow to develop 3D designed personalized neonatal CPAP masks using iPhone structured light facial scanning // *3D Print Med*. 2022. Vol. 8, no. 1. P. 23. doi: 10.1186/s41205-022-00155-7.
17. Neonatal CPAP Mask Biomedical Engineering Senior Design Project 2022 // University of Rochester. URL: <https://www.hajim.rochester.edu/senior-design-day/neonatalcpap-adaptor/>.

References

1. Newnam K. M., McGrath J. M., Estes T., Jallo N., Salyer J., Bass W. T. An integrative review of skin breakdown in the preterm infant associated with nasal continuous positive airway pressure. *Journal of Obstetric, Gynecologic, and Neonatal Nursing*. 2013; 42 (5): 508–516. doi: 10.1111/1552-6909.12233.
2. Boyar V. Pressure Injuries of the Nose and Columella in Preterm Neonates Receiving Noninvasive Ventilation via a Specialized Nasal Cannula: A Retrospective Comparison Cohort Study. *Journal of Wound, Ostomy and Continence Nursing*. 2020; 47 (2): 111–116. doi: 10.1097/WON.0000000000000616.
3. Naha N., Pournami F., Prabhakar J., Jain N. Nasal Injury with Continuous Positive Airway Pressure: Need for “Privileging” Nursing Staff. *Indian Journal of Pediatrics*. 2019; 86 (7): 595–598. doi: 10.1007/s12098-019-02960-1.
4. McCoskey L. Nursing Care Guidelines for prevention of nasal breakdown in neonates receiving nasal CPAP. *Advances in Neonatal Care*. 2008; 8 (2): 116–124. doi: 10.1097/01.ANC.0000317260.99072.ae.
5. Chae S., Shon S. Effectiveness of simulation-based interprofessional education on teamwork and communication skills in neonatal resuscitation. *BMC Medical Education*. 2024; 24 (1): 602. doi: 10.1186/s12909-024-05581-1.
6. Yousef N., Moreau R., Soghier L. Simulation in neonatal care: towards a change in traditional training? *European Journal of Pediatrics*. 2022; 181 (4): 1429–1436. doi: 10.1007/s00431-022-04373-3.
7. MacKinnon K., Marcellus L., Rivers J., Gordon C., Ryan M., Butcher D. Student and educator experiences of maternal-child simulation-based learning: a systematic review of qualitative evidence protocol. *JBIC Database of Systematic Reviews and Implementation Reports*. 2015; 13 (1): 14–26. doi: 10.11124/jbisrir-2015-1694.
8. Shestak E. V. Respiratornye narusheniya u novorozhdennykh detey: novye tekhnologii ranney diagnostiki, lecheniya i profilaktiki lokal'nykh oslozhneniy = Respiratory disorders in newborns: New technologies for early diagnosis, treatment and prevention of local complications. Yekaterinburg; 2025: 276 p. (In Russ.).
9. Shestak E. V., Makarov V. S., Starkov V. Yu. Patent RF, no. 2852232, IPC G09B 23/28. Simulation model of a newborn's head and method of manufacture for testing non-invasive respiratory support and training medical specialists in working with respiratory equipment. Applicant and patent holder Ural State Medical University. Appl. no. 2024139057, filed 23.12.2024, publ. 05.12.2025, bull. no. 34. (In Russ.).
10. Buser T. J., Boyd O. F., Cortés Á., Donatelli C. M., Kolmann M. A., Luparell J. L., Pfeifferberger J. A., Sidlauskas B. L., Summers A. P. The Natural Historian's Guide to the CT Galaxy: Step-by-Step Instructions for Preparing and Analyzing Computed Tomographic (CT) Data Using Cross-Platform, Open Access Software. *Integrative organismal biology*. 2020. Vol. 2, no. 1. P. obaa009. doi: 10.1093/iob/obaa009.
11. Sander I. M., McGoldrick M. T., Helms M. N., Betts A., van Avermaete A., Owers E., Doney E., Liepert T., Niebur G., Liepert D., Leevy W. M. Three-dimensional printing of X-ray computed tomography datasets with multiple materials using open-source data processing. *Anatomical Sciences Education*. 2017. Vol. 10, no. 4. P. 383–391. doi: 10.1002/ase.1682.
12. Weatherall A. D., Rogerson M. D., Quayle M. R., Cooper M. G., McMenamin P. G., Adams J. W. A Novel 3-Dimensional Printing Fabrication Approach for the Production of Pediatric Airway Models. *Anesthesia and Analgesia*. 2021; 133 (5): 1251–1259. doi: 10.1213/ANE.0000000000005260.
13. Kavanagh K. R., Cote V., Tsui Y., Kudernatsch S., Peterson D. R., Valdez T. A. Pediatric laryngeal simulator using 3D printed models: A novel technique. *Laryngoscope*. 2017; 127 (4): E132–E137. doi: 10.1002/lary.26326.
14. Eu D., Daly M. J., Taboni S., Sahoaler A., Gilbank A. N., Irish J. C. Evaluation of a 3D Printed Silicone Oral Cavity Cancer Model for Surgical Simulations. *Journal of Personalized Medicine*. 2024; 14 (5): 450. doi: 10.3390/jpm14050450.

15. Dundek M. L., Ng E. K., Brazil A. M., DiBlasi R. M., Poli J. A., Burke T. F. Evaluation of a Bubble CPAP System for Low Resource Settings. *Respiratory Care*. 2021; 66 (10): 1572–1581. doi: 10.4187/respcare.08948.
16. Kamath A. A., Kamath M. J., Ekici S., Stans A. S., Colby C. E., Matsumoto J. M., Wylam M. E. Workflow to develop 3D designed personalized neonatal CPAP masks using iPhone structured light facial scanning. *3D Print Med*. 2022. Vol. 8, no. 1. P. 23. doi: 10.1186/s41205-022-00155-7.
17. Neonatal CPAP Mask Biomedical Engineering Senior Design Project 2022. University of Rochester. URL: <https://www.hajim.rochester.edu/senior-design-day/neonatalcpap-adaptor/>.

Информация об авторах

В. С. Макаров, врач-анестезиолог-реаниматолог отделения реанимации и интенсивной терапии новорождённых, Екатеринбургский клинический перинатальный центр, Екатеринбург, Россия; младший научный сотрудник молодежной научной лаборатории ЦНИЛ, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия, ORCID: 0009-0008-4211-8775, e-mail: severuccio@ya.ru;

Е. В. Шестак, кандидат медицинских наук, заведующий отделением реанимации и интенсивной терапии новорождённых, врач анестезиолог-реаниматолог высшей квалификационной категории, Екатеринбургский клинический перинатальный центр; руководитель молодежной научной лаборатории ЦНИЛ, доцент кафедры госпитальной педиатрии, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия, ORCID: 0000-0003-3445-2956, e-mail: shestakev@yandex.ru;

В. Ю. Старков, врач-анестезиолог-реаниматолог отделения реанимации и интенсивной терапии новорождённых, Екатеринбургский клинический перинатальный центр; младший научный сотрудник молодежной научной лаборатории ЦНИЛ, Уральский государственный медицинский университет, Екатеринбург, Россия, ORCID: 0000-0003-0113-0766, e-mail: v.u.starkov@gmail.com.

Information about the authors

V. S. Makarov, anesthesiologist-resuscitator of the Department, Yekaterinburg Clinical Perinatal Center, Yekaterinburg, Russia; Junior Researcher of the Laboratory, Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia, ORCID: 0009-0008-4211-8775, e-mail: severuccio@ya.ru;

E. V. Shestak, Cand. Sci. (Med.), Head of the Department, Anesthesiologist-Resuscitator of the Highest Qualification Category, Yekaterinburg Clinical Perinatal Center, Yekaterinburg, Russia; Head of the Laboratory, Associate Professor of the Department, Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia, ORCID: 0000-0003-3445-2956, e-mail: shestakev@yandex.ru;

V. Yu. Starkov, anesthesiologist-resuscitator of the Department, Yekaterinburg Clinical Perinatal Center, Yekaterinburg, Russia; Junior Researcher of the Laboratory, Ural State Medical University, Yekaterinburg, Russia, ORCID: 0000-0003-0113-0766, e-mail: v.u.starkov@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 11.08.2025; одобрена после рецензирования 07.04.2026; принята к публикации 15.06.2026.

The article was submitted 11.08.2025; approved after reviewing 07.04.2026; accepted for publication 15.06.2026.