

На правах рукописи



САВИНОВА КРИСТИНА СЕРГЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ
ДЛЯ НОВОРОЖДЕННОГО ПОДХОДЯЩИХ УСЛОВИЙ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В НЕОНАТАЛЬНОМ ИНКУБАТОРЕ**

Специальность 2.2.12. Приборы, системы
и изделия медицинского назначения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Тамбов – 2025

Работа выполнена на кафедре «Биомедицинская техника» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тамбовский государственный технический университет» (ФГБОУ ВО «ТГТУ»).

Научный руководитель: *Фролов Сергей Владимирович*,
доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Биомедицинская техника» ФГБОУ ВО «ТГТУ»

Официальные оппоненты: *Кравчук Денис Александрович*,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», г. Таганрог

Ивахно Наталия Валериевна,
доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Газовая динамика» Института высокоточных систем им. В. П. Грязева ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», г. Тула

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет», г. Пенза

Защита состоится **12 декабря 2025 г. в 12 ч 00 мин** на заседании диссертационного совета **24.2.375.03** в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина» (ФГБОУ ВО «РГРТУ») по адресу: **390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1**.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на сайте www.rsreu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1, ФГБОУ ВО «РГРТУ», ученому секретарю диссертационного совета 24.2.375.03.

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.375.03,
доктор технических наук, доцент



Г. В. Овечкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Согласно статистическим исследованиям ВОЗ примерно 10% новорожденных являются недоношенными или с недостаточной массой, которым требуется специализированная помощь. На основе данных отчетов Федеральной службы государственной статистики (Росстат), в Российской Федерации количество преждевременных родов в среднем составляет около 6% от общего числа рождений, т.е. примерно 75 тысяч случаев в год. Проблема выживаемости недоношенных детей решается помещением их в неонатальные инкубаторы (НИ), которые обеспечивают для ребенка оптимальный температурный режим, уровень влажности, концентрацию кислорода, освещенность, акустическую изоляцию и стерильность.

В современных НИ используются системы управления на основе линейных ПИД-регуляторов, которые не позволяют обеспечивать высокие показатели качества процесса регулирования для выходных взаимосвязанных параметров НИ: температуры воздушного пространства внутри НИ, относительной влажности, концентрации кислорода и уровня освещенности.

Для НИ, характеризуемого как нелинейный, стохастический, многосвязный объект регулирования, предлагается алгоритм градиентного нейросетевого управления (ГНСУ), который относится к классу адаптивных алгоритмов и обеспечивает высокую точность стабилизации заданных выходных параметров.

В настоящее время для регулирования циркадных ритмов у новорожденных повсеместно применяется изотермическое покрывало, которым во время сна ребенка накрывается купол НИ. Однако его применение негативно сказывается на физическом и психоэмоциональном развитии ребенка. Для решения этой проблемы предлагается использование электрохромного стекла, преимуществом которого является плавное регулирование освещенности в НИ, имитируя естественную смену дня и ночи.

Степень разработанности темы исследования. Вопросы математического моделирования физиологических систем, включая процессы метаболизма и тепло- и массопереноса в организме новорожденного, физико-химических процессов в НИ, а также реализации известных систем управления микроклиматом, были описаны и проработаны исследовательскими группами под руководством профессора S. Leonhardt, M. A. Zermani, E. Feki, A. Mami, A. Hannouch, S. Lyra, F. Voss, A. Coenen, D. Blase, A. K. Abbas и др. Однако, несмотря на достигнутый прогресс, существующие исследования основывались на традиционных методах управления, требующих дальнейшего усовершенствования аппаратных средств НИ и программного обеспечения для достижения максимальной эффективности в создании оптимальных условий микроклимата для новорожденных. Известные методы управления системами, которые могут быть использованы в НИ, не адаптированы к процессам высокоточного регулирования режимами работы НИ.

Объектом исследования в работе является экспериментальная модель НИ нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры, обеспечивающая высокоточное поддержание в НИ заданных параметров микроклимата: температуры, относительной влажности, концентрации кислорода, освещенности и температуры кожи новорожденного.

Предметом исследования являются алгоритм и система управления параметрами микроклимата и состоянием организма новорожденного в НИ.

Целью исследования является повышение точности поддержания параметров микроклимата – температуры, относительной влажности, концентрации кислорода и освещенности, а также температуры кожи ребенка в НИ за счет разработки системы управления на основе применения метода ГНСУ.

Для достижения цели исследования необходимо решить **научную задачу**, заключающуюся в разработке и реализации системы управления параметрами микроклимата и состоянием организма новорожденного в НИ на основе ГНСУ.

Для достижения цели и решения научной задачи были сформулированы **частные задачи исследования**:

1. Исследование факторов, оказывающих воздействие на эффективность управления и поддержания, необходимых для недоношенных детей условий микроклимата в НИ.

2. Аппаратная реализация экспериментальной установки для исследования особенностей управления параметрами микроклимата и состоянием организма новорожденного, включающей НИ, блок управления микроклиматом на основе микрокомпьютера, а также гидродинамический неонатальный фантом (ГНФ) с управляемой имитацией кровотока.

3. Разработка и изготовление полноростового ГНФ с программной реализацией усовершенствованной позиционной системы управления имитацией кровотока в ГНФ, предназначенного для проведения исследований для точной настройки и оценки эффективности ГНСУ.

4. Разработка нейросетевой системы управления для поддержания оптимального уровня микроклимата в НИ.

5. Разработка математической модели тепло- и массопереноса в НИ на основе блочного принципа, реализующего учет взаимодействия модели ребенка, элементов НИ, входящих, выходящих потоков воздуха и добавленного кислорода, а также влияния возмущающих факторов внешней среды и решение задачи ее параметрической идентификации.

6. Имитационные исследования метода ГНСУ на основе комплексной математической модели тепло- и массопереноса в НИ для оценки эффективности разрабатываемой системы управления, а также проведение эксплуатационных исследований на разрабатываемой экспериментальной установке для оценки эффективности поддержания параметров микроклимата в НИ и возможности управления состоянием организма ребенка.

Научная новизна.

1. Разработана комплексная математическая модель тепло- и массопереноса в НИ, отличающаяся включением описания взаимодействий между компонентами НИ и организмом новорожденного, а также тепловых и материальных потоков воздуха в НИ с целью оптимизации лечебно-диагностических процессов, проведения медицинских исследований, прогнозирования поведения системы и улучшения алгоритмов управления (*соответствует п. 15 научной специальности 2.2.12*).

2. Разработана экспериментальная установка, реализующая НИ нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры, с использованием полноростового ГНФ, имитирующего процессы терморегуляции новорожденного, с целью повышения достоверности получаемых данных, проверки эффективности и универсальности предложенного алгоритма ГНСУ, а также для прогнозирования и диагностики текущего состояния недоношенного ребенка (*соответствует п. 3 научной специальности 2.2.12*).

3. Разработан и реализован метод ГНСУ параметрами микроклимата в НИ на базе многослойного перцептрона с корректировкой весовых коэффициентов нейронной сети на основе алгоритма обратного распространения ошибки, отличающийся высокой точностью и стабильностью поддержания основных параметров микроклимата (температура воздушного пространства в НИ поддерживается с отклонением не более 0,5 °С, относительная влажность с колебаниями около 2...3%) и температуры кожи ребенка в НИ в условиях изменения внешних факторов окружающей среды (*соответствует п. 14 научной специальности 2.2.12*).

Теоретическая значимость результатов исследования заключается в рассмотрении взаимосвязанных процессов тепло- и массопереноса при взаимодействии элементов НИ (нагреватель, увлажнитель, матрас, остекление, потоки воздуха), внешней среды и тела ребенка (ядро и кожа); введении нового понятия для НИ – «чистая камера», т.е. в описании его как проточной пневматической емкости; применении нейросетевого метода управления микроклиматом и состоянием ребенка в НИ; постановке и решении задачи структурно-параметрического синтеза нейросетевой системы управления НИ.

Практическая значимость результатов исследования заключается в разработке экспериментальной установки НИ нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры и полноростового ГНФ для оценки эффективности предложенного алгоритма ГНСУ, что позволит повысить точность поддержания параметров микроклимата в НИ и использовать результаты для модернизации конструкции НИ, улучшения качества медицинского ухода и повышения выживаемости недоношенных новорожденных.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы математического моделирования, нейронных сетей, теории автоматического управления, оптимизации, обработки экспериментальных данных, визуализации полученных результатов.

Положения, выносимые на защиту.

1. Комплексная математическая модель процессов тепло- и массопереноса, описывающая взаимодействие организма новорожденного, элементов НИ и систему управления его режимами на основе 18 выходных параметров, 4 управляющих параметров, 5 возмущающих воздействий и 45 параметров объекта управления.

2. Метод ГНСУ взаимосвязанными параметрами микроклимата и состоянием организма ребенка в НИ.

3. Решение задачи структурно-параметрического синтеза нейросетевой системы управления в НИ на основе построенной комплексной математической модели процессов тепло- и массопереноса и системы управления параметрами микроклимата и состоянием организма ребенка, в результате которой определена архитектура нейронной сети с одним внутренним слоем и параметры алгоритма адаптации – число нейронов во внутреннем слое, равное 150, шаг корректировки весовых коэффициентов 0,15, параметр регуляризации 0,01 и шаг дискретизации работы алгоритма 0,1 с.

4. Экспериментальная установка НИ нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры для проведения исследований и оценки эффективности разработанного алгоритма ГНСУ четырьмя взаимосвязанными параметрами микроклимата и состоянием организма ребенка с использованием полноростового ГНФ, в результате которых точность поддержания температуры составила около 0,5 °С, относительной влажности с колебаниями около 2...3%.

Соответствие паспорту специальности. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.2.12. Приборы, системы и изделия медицинского назначения (п. 3. Приборы, системы и аппаратно-программные комплексы для терапии, реабилитации и восстановления утраченных функций; п. 14. Методы, модели и алгоритмы, включая распознавание образов, для медицинских информационных и интеллектуальных систем, обеспечивающих повышение эффективности медико-биологических исследований и врачебных решений; п. 15. Математическое моделирование медико-биологических процессов и врачебных решений с целью оптимизации лечебно-диагностических процессов).

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность и обоснованность полученных результатов подтверждена публикациями в рецен-

зируемых изданиях. Степень достоверности диссертационной работы достигается за счет адекватного применения математического аппарата и сопоставления результатов имитационных, эксплуатационных исследований и медицинских данных.

По результатам исследования сделан ряд докладов на международных и российских научных конференциях: II Международной научной конференции «Системы и технологии цифровой медицины» (STDH-2025) (Санкт-Петербург, 2025); XXVII Международной конференции по мягким вычислениям и измерениям (SCM'2024) (Санкт-Петербург, 2024); VII и VIII международных конференций «Информационные технологии и технические средства управления» (ICCT-2023, ICCT-2024)» (Астрахань, 2023, Владикавказ, 2024); IV «Международной конференции по нейронным сетям и нейротехнологиям NeuroNT'2023» (Санкт-Петербург, 2023); I Международной научно-технической конференции «E.R.A – Современная наука: электроника, робототехника, автоматизация» (Беларусь, Гомель, 2024); XXXIII, XXXIV, XXXVII всероссийских научно-технических конференциях «Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2023» (Рязань, 2020, 2023, 2024); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы теории и практики развития научных исследований» (Пермь, 2022); IV, V, VII – X всероссийских научно-практических конференциях «Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития» (Тамбов, 2019, 2020, 2022 – 2025); Научно-практической конференции студенческих научных объединений «Молодежь для устойчивого развития регионов» (Тамбов, 2023); IX Международной научно-практической конференции «Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн» (Тамбов, 2023); VII Международной научно-практической конференции молодых ученых «The World of Science without Borders» (Тамбов, 2020); VI Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах» (Тамбов, 2019).

Внедрение результатов исследования. Результаты исследований использованы в учебном процессе ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» при подготовке бакалавров направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии» и магистрантов направления подготовки 12.04.04 «Биотехнические системы и технологии». Разработанные в диссертационной работе модели, алгоритмы и методы внедрены и используются в ООО «Доступная диагностика», ООО «Медтехника» и ООО «Биомедтех».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 32 печатные работы, в том числе из них 5 статей в научных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК для публикации результатов диссертации по специальности 2.2.12; 3 статьи в научных рецензируемых изданиях, входящих в базу данных RSCI; 4 статьи в изданиях, входящих в базы Scopus; 12 статей и тезисов докладов внутривузовских, всероссийских и международных конференций; 4 патента на изобретение; 4 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Основные научные результаты диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований получены лично соискателем. В публикациях, написанных в соавторстве, личный вклад автора заключается в: обосновании актуальности и постановке цели и задач исследования; исследовании факторов, оказывающих воздействие на эффективность управления и поддержания требуемого для недоношенных детей уровня параметров микроклимата в НИ; разработке и программной реализации математической модели тепло- и массопереноса в НИ; разработке и программной реализации метода ГНСУ; разработке и изготовлении полноростового ГНФ и его системы управления; разработке структурной схемы системы управления НИ с нейроконтроллером; проведении имитационных исследований метода ГНСУ; разработке метода парамет-

рической идентификации параметров математической модели; программной и аппаратной реализации экспериментальной установки для управления микроклиматом в НИ; проведении эксплуатационных исследований, испытаний и отладке метода ГНСУ на разрабатываемой экспериментальной установке.

Диссертационное исследование проводилось в соответствии с Грантом РНФ № 23-29-00763 «Повышение эффективности поддержания подходящих для новорожденных условий окружающей среды в неонатальных инкубаторах посредством комплексного нейросетевого управления оптическими характеристиками освещенности, системами тепловой защиты и увлажнения».

Структура и объем работы. Диссертационное исследование состоит из введения, четырех глав, выводов, заключения, библиографического списка и приложений. Диссертационная работа изложена на 195 страницах, содержит 81 рисунок и 20 таблиц. Библиографический список включает 149 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, характеризуется степень ее разработанности, определены цель и задачи исследования, а также объект и предмет исследования. Сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведена структура диссертации. Представлены научные положения, выносимые на защиту автором.

В **первой главе** анализируются функциональные принципы, структурные особенности и определены ключевые производители НИ. Рассмотрены исследования по моделированию тепло- и массопереноса в НИ с учетом терморегуляции, включая использование неонатальных фантомов. Изучены методы, направленные на улучшение эффективности поддержания микроклимата в НИ за счет совершенствования систем управления. Описаны особенности организма недоношенных детей и методы их выхаживания в условиях реанимации и интенсивной терапии. Обоснована актуальность разработки инновационных алгоритмов управления для решения задачи высокоточного поддержания оптимальных условий для новорожденных в НИ.

Во **второй главе** описаны принципы и этапы разработки, монтажа экспериментальной установки с использованием полноростового ГНФ для дальнейшей реализации, проверки адекватности и эффективности нейросетевого управления.

Разработанная экспериментальная установка состоит из взаимосвязанных компонентов: блока управления НИ (УНИ), блока управления ГНФ (УФ), блока подготовки кровеимитирующей жидкости и жидкости для имитации процесса испарения телом ребенка (блока подготовки жидкости (ПЖ)), НИ, блока формирования потока воздуха (ФПВ), ГНФ.

Задающие воздействия, определяющие цель управления по поддержанию заданных параметров микроклимата НИ – температуры $y_1^3(t)$, относительной влажности, $y_2^3(t)$, концентрации кислорода $y_3^3(t)$ и уровня освещенности $y_4^3(t)$, формируются на блоке УНИ, выполненном на базе одноплатного управляющего микрокомпьютера «Raspberry Pi 4 Model B Desktop Kit». На основе сигналов рассогласования $\varepsilon_1(t) = y_1(t) - y_1^3(t)$, $\varepsilon_2(t) = y_2(t) - y_2^3(t)$, $\varepsilon_3(t) = y_3(t) - y_3^3(t)$, $\varepsilon_4(t) = y_4(t) - y_4^3(t)$ посредством ГНСУ в блоке УНИ формируются управляющие воздействия $u_1(t)$, $u_2(t)$, $u_3(t)$, $u_4(t)$, представляющие собой ШИМ-сигналы с изменяющимися коэффициентами заполнения и частотой 1000 Гц для изменения мощности нагревательного элемента, поддерживающего температуру воздушного пространства в НИ, %; мощно-

сти нагревательного элемента увлажнителя, %; напряжения на электромагнитный клапан расхода кислорода, %; напряжения на электрохромное стекло, которое обеспечивает заданную освещенность внутри НИ, %.

Система управления реализована по принципу обратной связи с расположенными внутри НИ датчиками температуры, относительной влажности, концентрации кислорода и освещенности соответственно для получения текущей информации $y_1(t) - y_4(t)$ состояния внутренней среды НИ. В блоке ФПВ циркуляция воздуха обеспечивается вентилятором, нагнетающим отфильтрованный воздух, который далее нагревается, увлажняется и затем поступает в камеру с новорожденным.

Блок управления и мониторинга параметров микроклимата экспериментальной установки состоит из четырех взаимосвязанных блоков: электропитания, управления и отображения, воздействующих устройств и датчиков. Работа электрохромного стекла при смене режимов «день-ночь» показана на рис. 1, а, б. Блок ФПВ расположен внутри рабочей камеры НИ.



а)



б)

Рис. 1. Работа электрохромного стекла при режиме «день» (а) и режиме «ночь» (б)

В целях имитации тепло- и массообменных процессов разработан метод создания полноростового ГНФ. ГНФ выполнен из двухкомпонентного силикона методом литья с помощью форм, распечатанных из фотополимерной смолы на 3D-принтере. Внутри сегментов головы и тела создаются связанные между собой полости, через которые циркулирует кровесимитирующая жидкость.

Блок УФ выполнен на основе микрокомпьютера «Raspberry Pi 4 Model B Desktop Kit» и обеспечивает имитацию метаболических процессов (терморегуляции), выделения влаги в результате дыхания и процессов испарения с тела ребенка. Он предназначен для формирования задающих воздействий: имитация естественного испарения влаги с тела новорожденного – $y_3^3(t)$ и температура поверхности ГНФ – $y_6^3(t)$. ГНФ помещается на матрас внутри НИ.

Посредством применения алгоритма усовершенствованного позиционного регулирования в блоке УФ с учетом сигнала рассогласования $\varepsilon_6(t) = y_6(t) - y_6^3(t)$ на нагреватель кровесимитирующей жидкости подается управляющее воздействие $u_5(t)$. Реализована обратная связь с датчиком температуры поверхности ГНФ $y_6(t)$. Подогретая кровесимитирующая жидкость через замкнутый контур эластичных трубок поступает из накопительной емкости и циркулирует через внутренние полости ГНФ с помощью перистальтического насоса. Имитация естественного испарения влаги с тела новорож-

денного $y_3^3(t)$ осуществляется подачей воды из емкости к увлажнителю на поверхности тела ГНФ путем передачи управляющего сигнала $u_6(t)$ на шприцевой насос.

Приведен результат разработки взаимосвязанных элементов блоков управления, мониторинга и воздействующих устройств в НИ, ГНФ с блоком системы его управления (рис. 2), на котором: 1 – УНИ; 2 – НИ; 3 – ФПВ (ВУ); 4 – ГНФ; 5 – электрохромное стекло; 6 – перистальтический насос Shenchen Lab V6; 7 – шприцевой насос SPLab01; 8 – блок подготовки и управления подачей жидкости; 9 – накопительная емкость с жидкостью; 10 – баллон кислорода.

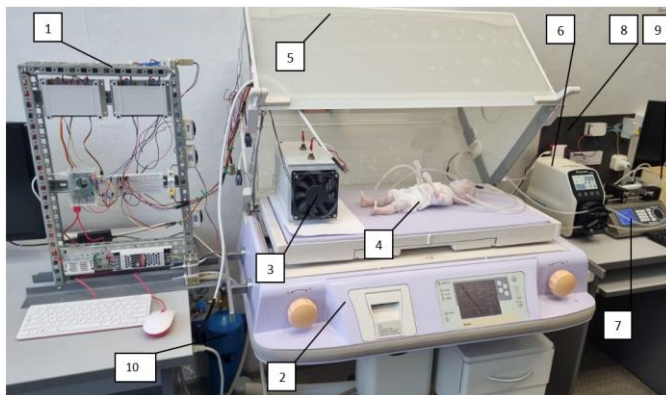


Рис. 2. Экспериментальная установка для выявления особенностей управления микроклиматом в НИ с использованием полноростового ГНФ

Проведение серии экспериментов с разработанным ГНФ на экспериментальной установке позволит оценить эффективность различных алгоритмов управления. Для выбора оптимального метода управления и его настройки необходимо разработать комплексную математическую модель, учитывающую процессы тепло- и массопереноса в НИ, а также особенности взаимодействия ребенка и элементов НИ.

В **третьей главе** поставлена задача поиска оптимальной структуры и параметров системы управления параметрами микроклимата в НИ. Установлена связь между входными, выходными и управляющими координатами НИ в виде уравнения (1):

$$\frac{dy(t)}{d\tau} = f(a, u(\tau), z(\tau)), \quad y(0) = y_0, \quad u(\tau) \in U. \quad (1)$$

Здесь составляющими вектора выходных сигналов $y(\tau) = (y_1(\tau), y_2(\tau), \dots, y_{18}(\tau))$ объекта управления, зависящих от времени τ , являются $y_1(\tau)$ – температура воздушного пространства в НИ, К; $y_2(\tau)$ – относительная влажность воздушной среды в НИ, %; $y_3(\tau)$ – концентрация кислорода, $\text{кг}/\text{м}^3$; $y_4(\tau)$ – освещенность, лк; $y_5(\tau)$ – температура кожи новорожденного, К; $y_6(\tau)$ – температура ядра тела новорожденного, К; $y_7(\tau)$ – температура матраца, К; $y_8(\tau)$ – энтальпия воды в увлажнителе, Дж; $y_9(\tau)$ – масса воды в увлажнителе, кг; $y_{10}(\tau)$ – энтальпия воздушного пространства в НИ, Дж; $y_{11}(\tau)$ – масса воздушной среды в НИ, кг; $y_{12}(\tau)$ – температура внутренней стенки НИ, К; $y_{13}(\tau)$ – температура нагревателя воздуха, К; $y_{14}(\tau)$ – температура наружной стенки НИ, К; $y_{15}(\tau)$ – давление насыщенных паров в увлажнителе, Па; $y_{16}(\tau)$ – концентрация паров воды

в воздушном пространстве НИ, кг/м³; $y_{17}(\tau)$ – концентрация азота, кг/м³; $y_{18}(\tau)$ – температура воды в увлажнителе, К; $\mathbf{a}$ – параметры объекта; вектор управляющих воздействий $\mathbf{u}(\tau) = (u_1(\tau), u_2(\tau), u_3(\tau), u_4(\tau))$ состоит из параметров: $u_1(\tau)$ – коэффициент заполнения ШИМ для управления мощностью нагревательного элемента, поддерживающего температуру воздуха в НИ, %; $u_2(\tau)$ – коэффициент заполнения ШИМ для управления мощностью нагревательного элемента увлажнителя, %; $u_3(\tau)$ – коэффициент заполнения ШИМ для подачи напряжения на электромагнитный клапан расхода кислорода, %; $u_4(\tau)$ – коэффициент заполнения ШИМ для подачи напряжения, подаваемого на электрохромное стекло, которое обеспечивает заданную освещенность внутри НИ, %; вектор случайных возмущений $\mathbf{z}(\tau) = (z_1(\tau), z_2(\tau), z_3(\tau), z_4(\tau), z_5(\tau))$ имеет составляющие: $z_1(\tau)$ – входной поток воздуха в НИ, м³/с; $z_2(\tau)$ – температура окружающей среды, К; $z_3(\tau)$ – концентрация паров воды в окружающей среде; $z_4(\tau)$ – температура подаваемого кислорода, К; $z_5(\tau)$ – освещенность окружающей среды, лк; $\mathbf{y}_0 = (y_0^1, y_0^1, \dots, y_0^{18})$ – наблюдаемый выход объекта при $\tau = 0$; U – заданное множество допустимых управлений.

Алгоритм ГНСУ работает в дискретном времени $t = 0, 1, 2, 3, \dots, t_k$, связанном с непрерывным временем τ и шагом квантования $\Delta\tau$:

$$\tau = t\Delta\tau. \quad (2)$$

Задается вектор ошибки $\mathbf{e}(t) = (y_1(t) - y_1^3(t), y_2(t) - y_2^3(t), y_3(t) - y_3^3(t), y_\sigma(t) - y_\sigma^3(t))$

и вектор задания $\mathbf{y}_3(t) = (y_1^3(t), y_2^3(t), y_3^3(t), y_\sigma^3(t))$. Параметр y_σ выбирается из условий клинической задачи: $\sigma = 4$ – стабилизация температуры воздушного пространства НИ, $\sigma = 5$ – стабилизация температуры кожи ребенка.

Алгоритм ГНСУ задает вектор $\{\mathbf{u}(1), \mathbf{u}(2), \dots, \mathbf{u}(t_k)\}$. На вход алгоритма ГНСУ поступает вектор ошибок $\mathbf{e}(t)$. Архитектуру нейронной сети определяет вектор $\boldsymbol{\beta} = \{s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_M, N_1, \dots, N_j, \dots, N_M\}$. Здесь M – число слоев нейронной сети, s_j – функции активации, N_j – число нейронов в j -м слое. Алгоритм адаптации корректирует весовые коэффициенты $\mathbf{w}(t)$. Алгоритм адаптации определяет вектор $\boldsymbol{\gamma} = \{\lambda, \eta\}$, в котором η – коэффициент шага градиентного метода, λ – коэффициент регуляризации. Вектор $\boldsymbol{\alpha} = \{\boldsymbol{\beta}, \boldsymbol{\gamma}\}$ задает алгоритм ГНСУ в виде

$$\begin{cases} \mathbf{u}(t) = F[\mathbf{w}(t), \mathbf{y}(t), \boldsymbol{\alpha}], \\ \mathbf{w}(t+1) = G[\mathbf{w}(t), \mathbf{y}(t), \mathbf{y}(t+1), \boldsymbol{\alpha}], \end{cases} \quad (3)$$

который соответствует типовому алгоритму адаптивного управления.

Структурно-параметрический синтез алгоритма ГНСУ НУ определяется постановкой задачи: для $t \in [0, t_k]$, вектора $\mathbf{a}$, множеств $\{\mathbf{z}_1(t), \mathbf{z}_2(t), \dots, \mathbf{z}_r(t), \dots, \mathbf{z}_R(t)\}$, $\{y_1^3(t), y_2^3(t), y_3^3(t), y_\sigma^3(t)\}$ найти вектор $\mathbf{a}^*$, при котором критерий минимален:

$$\mathbf{a}^* = \arg \min_{\mathbf{a} \in V} \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^{t_k} \left(\sum_{i=1}^3 (y_i(\mathbf{a}, \mathbf{u}(t), \mathbf{z}_r(t)) - y_i^3(t))^2 + (y_\sigma(t) - y_\sigma^3(t))^2 \right) \quad (4)$$

и выполняются уравнения связи (1) – (3). Здесь R – количество экспериментов.

Для исследования и настройки системы управления НИ строится математическая модель, определяющая взаимосвязь между различными блоками НИ и ребенком, а также направления материальных и тепловых потоков между ними (рис. 3). Здесь $Q_1 - Q_{17}$ – тепловые потоки, Вт; $W_1 - W_3$ – материальные потоки испаренной влаги, кг/с; z_1, G_1, G_2 – потоки входящего и выходящего воздуха, м³/с.

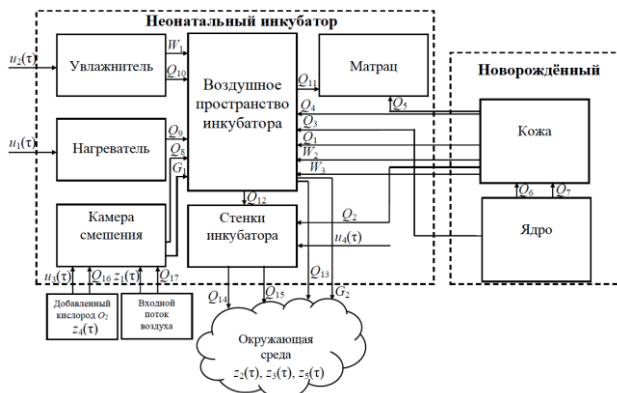


Рис. 3. Схема материальных и тепловых потоков в неонатальном инкубаторе

Математическую модель тепло- и массопереноса можно рассматривать как совокупность взаимосвязанных моделей, описывающих процессы терморегуляции ребенка, а также тепловой и материальный баланс внутри НИ. В модели учтены основные компоненты НИ: стенки НИ, матрас, увлажнитель, нагреватель воздушного пространства внутри НИ и воздушное пространство НИ, а также особенности окружающей среды, где размещен НИ.

На основе полученной модели разработан авторский алгоритм ГНСУ параметрами микроклимата в НИ, необходимый для запуска, отладки и проверки работоспособности экспериментальной установки НИ с использованием ГНФ.

Метод ГНСУ, представленный в виде алгоритма управления и алгоритма адаптации, реализован на основе глубокой нейронной сети прямого распространения типа многослойного перцептрона (Multi-Layer Perceptron – MLP) (рис. 4).

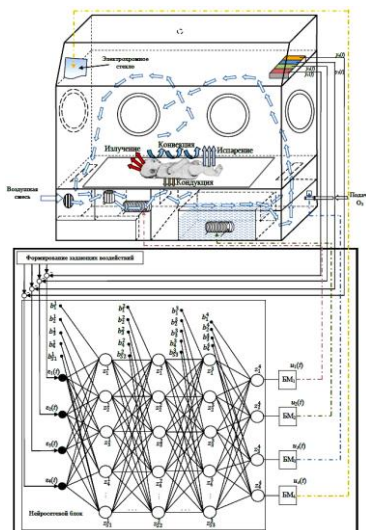


Рис. 4. Структурная схема системы управления с нейроконтроллером

Для задачи управления динамическая система представляется дискретно:

$$\mathbf{y}(t+1) = F(\mathbf{y}(t), \mathbf{w}(t)),$$

где $\mathbf{y}(t)$ – вектор управляемых координат; $\mathbf{w}(t)$ – множество весовых коэффициентов нейронной сети.

Вектор рассогласования и функция цели управления соответственно записываются в виде

$$\mathbf{\varepsilon}(t) = \mathbf{y}_3(t) - \mathbf{y}(t),$$

$$e(\mathbf{F}(\mathbf{y}(t), \mathbf{w}(t))) = (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_3(t))^T (\mathbf{y}(t) - \mathbf{y}_3(t)) = \sum_{n=1}^4 (\varepsilon_n(t))^2.$$

Алгоритм ГНСУ формирует управления $\mathbf{u}(t) = (u_1(t), \dots, u_4(t))$ через блок масштабирования (БМ). Для устойчивости работы алгоритма ГНСУ используется метод регуляризации. С учетом использования метода регуляризации изменяется целевая функция:

$$\tilde{e} = (\mathbf{y}(t+1)) = \sum_{n=1}^4 (\varepsilon_n(t))^2 + \Omega(\mathbf{w}(t)),$$

$$\Omega(\mathbf{w}(t)) = \frac{1}{2} \lambda \left[\left(\sum_{n=1}^4 \sum_{s=1}^S w_{ns}^1(t) \right)^2 + \left(\sum_{m=1}^4 \sum_{s=1}^S w_{ms}^2(t) \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^4 \sum_{s=1}^S b_{ns}^1(t) \right)^2 + \left(\sum_{m=2}^4 \sum_{s=2}^S b_{ms}^1(t) \right)^2 \right],$$

где $w_{ns}^1(t)$, $w_{ms}^2(t)$, $b_{ns}^1(t)$, $b_{ms}^1(t)$ – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты корректируются следующим образом:

$$\mathbf{w}(t+1) = \mathbf{w}(t) - \eta \nabla_{\mathbf{w}} \tilde{e}(\mathbf{w}(t)),$$

где $\nabla_{\mathbf{w}}$ – вектор градиента; $\eta \geq 0$ – коэффициент настройки.

При настройке системы ГНСУ на основе математической модели выбирается архитектура сети MLP, настроечные параметры алгоритма η , λ , вектор весовых коэффициентов $\mathbf{w}_0$. Далее настройка проводится в процессе управления НИ, будут скорректированы настроечные параметры алгоритма η , λ исходя из технических характеристик датчиков, применяемых в экспериментальной установке.

Для воспроизведения физиологических параметров жизнедеятельности новорожденного с помощью ГНФ и поддержания заданных значений температуры поверхности тела ГНФ использовано усовершенствованное двухпозиционно-статическое регулирование с дополнительным звеном обратной связи.

В четвертой главе проведен процесс параметрической идентификации математической модели НИ и новорожденного, выполненный в целях корректировки параметров модели и повышения ее адекватности.

На основании проведенных экспериментов (внешняя температура воздуха 24,2 °С, относительная влажность воздуха 40%, длительность циклов экспериментов 1 ч, частота управляющих сигналов ШИМ 1 кГц) были определены статические и динамические характеристики системы, что позволило выявить особенности поведения темпе-

ратуры воздушной среды и относительной влажности в НИ при разных коэффициентах заполнения ШИМ (20...100% – для нагревательного элемента воздушного пространства НИ, 20...55% – для нагревательного элемента увлажнителя).

Была сформулирована и решена задача параметрической идентификации, сформулированная как поиск вектора $\mathbf{a}^*$, при котором функция невязки минимальна, т.е.

$$\mathbf{a}^* = \arg \min_{\mathbf{a} \in A} \sum_{i=1}^5 \left[\int_0^{t_k} \left((y_{1,i}(t, \mathbf{a}) - y_{1,i}^3(t)) \right)^2 dt + \int_0^{t_k} \left((y_{2,i}(t, \mathbf{a}) - y_{2,i}^3(t)) \right)^2 dt \right],$$

где $y_{1,i}(t, \mathbf{a})$, $y_{2,i}(t, \mathbf{a})$ – значения температуры и влажности, рассчитанные по модели;

$y_{1,i}^3(t)$, $y_{2,i}^3(t)$ – экспериментальные значения динамических характеристик температуры и влажности; i – порядковый номер записей в сериях экспериментов для температуры и влажности. Получен вектор корректируемых параметров модели $\mathbf{a}^*$, обеспечивающих наилучшее соответствие экспериментальных данных (динамических характеристик) расчетам, получаемых на модели. В результате среднее отклонение температуры воздуха в НИ между экспериментами и моделью составляет 0,11 °C (около 0,358%), среднее отклонение относительной влажности между экспериментами и модельными расчетами составляет 1,08%, что говорит о высокой адекватности разработанной модели.

На основе комплексной математической модели процессов тепло- и массообмена и системы управления параметрами микроклимата в НИ решена задача структурно-параметрического синтеза нейросетевой системы управления НИ и найден вектор $\mathbf{a}^*$, который определяет архитектуру нейронной сети и параметры алгоритма адаптации.

Были проведены две серии имитационных экспериментов, направленных на стабилизацию уровня температуры воздуха в НИ и температуры новорожденного с помощью комплексной математической модели. В каждой серии исследованы динамические режимы системы при совместной стабилизации заданных параметров (температура воздуха или кожи ребенка и относительная влажность) в различных условиях: выход на установившийся режим, реакция системы (рис. 5) на переключение между уровнями заданных значений (имитация смены клинического протокола) и действие возмущающих факторов (например, открытие НИ).

Проведены эксплуатационные исследования работоспособности разработанного ГНСУ на экспериментальной установке – динамики параметров микроклимата (температуры воздушной среды, относительной влажности и освещенности в НИ), реакции на возникновение возмущающих воздействий при смене задания относительной влажности, а также по оценке эффективности работы ГНСУ при контроле температуры кожи новорожденного с использованием полноростового ГНФ (рис. 6).

Из графиков видно, что алгоритм ГНСУ стабилизирует температуру кожи ребенка (37 °C) примерно через 26 мин посредством увеличения температуры воздушного пространства в НИ до уровня 36,5 °C. Отмечена стабилизация относительной влажности до требуемого уровня 70%.

Исследования демонстрируют, что система ГНСУ эффективно стабилизирует и поддерживает параметры микроклимата в НИ для контроля состояния новорожденного. Это обеспечивает оптимальные условия для терморегуляции и поддержания физиологического состояния новорожденного.

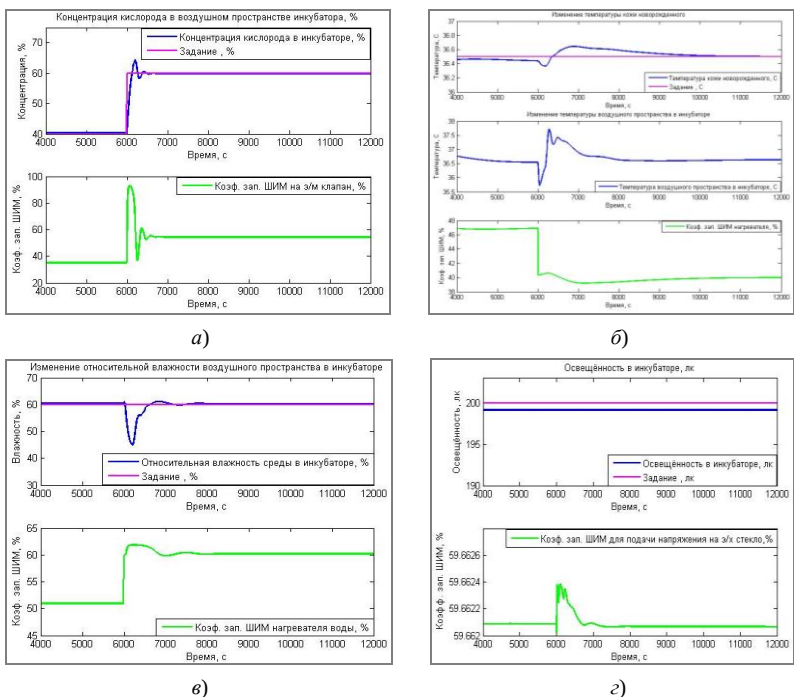


Рис. 5. Реакция системы на смену задания концентрации кислорода:
 а – изменение концентрации кислорода; б – изменение температуры кожи новорожденного относительно температуры воздушного пространства в НИ;
 в – изменение относительной влажности в НИ; г – изменение освещенности в НИ

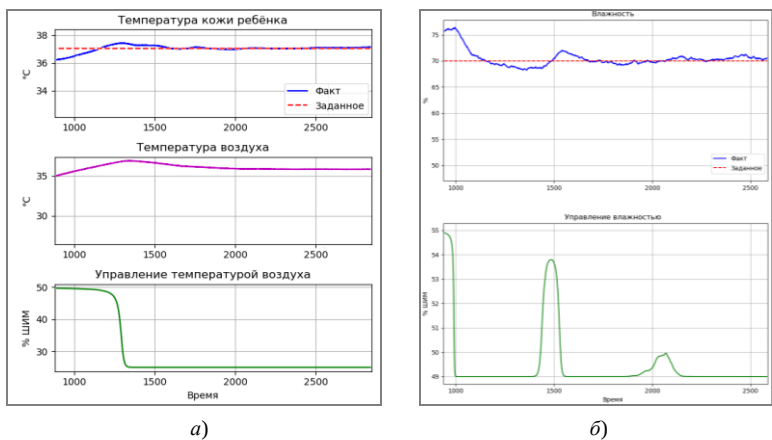


Рис. 6. Изменение температуры кожи новорожденного относительно температуры воздушного пространства в инкубаторе (а) и изменение относительной влажности в инкубаторе в режиме контроля температуры кожи новорожденного (б)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате реализованных в диссертации исследований была достигнута цель работы, заключающаяся в повышении точности поддержания параметров микроклимата – температуры воздушного пространства, относительной влажности, концентрации кислорода и освещенности в НИ за счет разработки авторского алгоритма ГНСУ, реализованного на базе одноплатного управляющего микрокомпьютера «Raspberry Pi 4 Model B» и высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования Python. Получены следующие результаты.

1. На основе проведенного анализа современного состояния и тенденций развития НИ были выявлены основные параметры, требующие контроля и управления для поддержания оптимальных параметров микроклимата для недоношенных новорожденных в НИ.

2. Разработана экспериментальная установка НИ нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры для исследования особенностей и отладки высокоточного алгоритма управления параметрами микроклимата на базе одноплатного управляющего микрокомпьютера «Raspberry Pi 4 Model B», состоящая из блока управления НИ, блока управления ГНФ, блока подготовки кровеимитирующей жидкости и жидкости для имитации процесса испарения телом, НИ, блока формирования потока воздуха и полноростового ГНФ.

3. Разработан и изготовлен полноростовой ГНФ, имитирующий функции организма ребенка в целях проведения исследований для точной настройки и оценки эффективности нейросетевого метода управления. Трехмерная анатомически корректная модель ГНФ была разработана на основе диаграммы Фентона и реальных медицинских данных с использованием программного обеспечения для трехмерного (3D) моделирования и технологии 3D-печати. Разработана и программно реализована на языке программирования Python система управления ГНФ на основе усовершенствованного позиционно-статического регулирования.

4. Разработана комплексная математическая модель, описывающая процессы тепло- и массопереноса в НИ, включая терморегуляцию новорожденного, управления режимами НИ и состоянием организма ребенка, а также влияния внешних факторов, в целях предварительной настройки системы управления НИ.

5. Разработан алгоритм ГНСУ параметрами микроклимата в НИ на основе многослойного перцептрона. Предложена система управления микроклиматом в НИ и состоянием организма новорожденного на базе одноплатного управляющего микрокомпьютера «Raspberry Pi 4 Model B» и высокоуровневого объектно-ориентированного языка программирования Python.

6. На основе экспериментальных исследований проведена параметрическая идентификация параметров математической модели НИ и новорожденного, определен вектор корректируемых параметров модели. Полученные результаты по среднему отклонению между экспериментами и моделью составляют 0,11 °C (около 0,358%) и 1,08% по температуре и относительной влажности соответственно.

7. Поставлена и решена задача поиска оптимальной структуры и параметров системы управления НИ на основе комплексной математической модели. В результате исследований получено, что оптимальной является нейронная сеть с одним внутренним слоем. Установлена сигмоидальная функция активации во внутреннем и внешнем слоях. Оптимальное число нейронов во внутреннем слое приближается к значению $N^* = 150$, а оптимальные параметры алгоритма адаптации равны: шаг корректировки весовых коэффициентов $\eta^* = 0,15$, параметр регуляризации $\lambda^* = 0,01$ и шаг дискретизации работы алгоритма $dt = 0,1$ с.

8. Проведена серия имитационных исследований, направленных на стабилизацию по уровню температуры воздуха в НИ на основе комплексной математической модели НИ, новорожденного и ГНСУ в программной среде Matlab. При выходе на установившийся режим ГНСУ обеспечил стабилизацию температуры воздуха за 25 мин (погрешность ~0,2%), относительной влажности 60% (погрешность ~2%) и концентрации кислорода 40% за ~15 мин (погрешность 1,5%). Освещенность регулировалась без задержки (погрешность 1%).

9. Проведена серия имитационных исследований, направленных на стабилизацию уровня температуры кожи новорожденного. Температура кожи стабилизировалась на уровне ~36,5 °С на 40-й минуте при прогреве температуры воздуха с 24,2 до 37,0...37,5 °С (в соответствии с нормами). Относительная влажность стабилизировалась на ~60% за 8...10 мин. Концентрация кислорода стабилизировалась на 40% за 20 мин. Уровень освещенности поддерживается на уровне 200 лк.

10. Проведены эксплуатационные исследования работоспособности разработанного метода управления на экспериментальной установке с использованием полноростового ГНФ. При выходе на заданный режим температуры кожи отмечена плавная стабилизация температуры воздуха, влажность стабилизирована на 60% за 20 мин (ошибка ~2...3%). Открытие НИ не привело к значительным изменениям температуры воздушного пространства благодаря тепловой завесе. Наблюдалось падение относительной влажности на 10% с последующим восстановлением. Смена задания относительной влажности с 60 до 70% выполнена за 8 мин (погрешность ~2%). При контроле по температуре кожи ГНФ отмечена стабилизация ее уровня за 26 мин с ГНФ с 34,5 до 37,0 °С благодаря прогреву воздуха до 36,5 °С и уровню влажности 70%.

Разработанный ГНСУ и реализующая его экспериментальная установка продемонстрировали его эффективность при создании и поддержании подходящих условий окружающей среды в НИ. Результаты, полученные при имитационных исследованиях на комплексной математической модели НИ и ребенка, а также эксплуатационных исследований подтвердили возможность точного и устойчивого поддержания заданного микроклимата, в том числе при действии возмущения и смене клинических протоколов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных рецензируемых изданиях, включенных в перечень ВАК:

1. Экспериментальная установка для исследования особенностей управления микроклиматом в неонатальных инкубаторах с использованием гидродинамического фантома новорожденного / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2024. – Т. 27, № 2. – С. 52 – 59. – DOI: 10.18127/j15604136-202402-07. (2.2.12)
2. Современное состояние и тенденции в области исследований и разработок неонатальных инкубаторов / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2023. – Т. 11, № 4(43). – DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.016. (2.2.12)
3. Реализация систем позиционного регулирования в медицинской технике / С. В. Фролов, **К. С. Савинова**, Г. П. Ильин, А. Н. Ветров // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2023. – № 1. – С. 100 – 110. – DOI: 10.21685/2227-8486-2023-1-6. (2.2.12)
4. Использование эффективных систем позиционного регулирования для задач медицинской техники / С. В. Фролов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Куликов, И. А. Сукокин // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2022. – № 2. – С. 50 – 62. – DOI: 10.21685/2227-8486-2022-2-4. (2.2.12)
5. Двухэтапная процедура синтеза управления нелинейными нестационарными объектами с использованием многослойного персептрона / С. В. Фролов, С. В. Синдеев, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2020. – № 8(3). (2.2.12)

Публикации в научных рецензируемых изданиях, входящих в базу данных RSCI:

6. Использование нейроконтроллера и электрохромного остекления в инкубаторах для новорожденных для адаптивной имитации смены дня и ночи / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова** // Медицинская техника. – 2024. – № 4. – С. 14 – 16.

7. Нейросетевая система управления микроклиматом и освещенностью в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Датчики и системы. – 2025. – № 1. – С. 62 – 68.

8. Градиентный метод нейросетевого управления многосвязными нелинейными нестационарными стохастическими системами / С. В. Фролов, А. Ю. Потлов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова** // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2021. – № 5. – С. 41 – 48.

Публикации в изданиях, входящих в базы Scopus:

9. Structural-Parametric Synthesis of a Neural Network Control System for a Neonatal Incubator / S. V. Frolov, A. A. Korobov, **K. S. Savinova**, A. Y. Potlov // 2024 8th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT), Vladikavkaz, Russian Federation. – 2024. – P. 1 – 4. – EID: 2-s2.0-85219534538. – DOI: 10.1109/ICCT62929.2024.10874930. (IEEE Xplore)

10. Building a Simulation Model of a Neonatal Incubator with a Neural Controller / S. V. Frolov, A. A. Korobov, A. Y. Potlov, **K. S. Savinova** // Proceedings of 2024 27th International Conference on Soft Computing and Measurements, SCM 2024. – 2024. – P. 444 – 448. – EID: 2-s2.0-85197219291. – DOI: 10.1109/SCM62608.2024.10554072 (IEEE Xplore)

11. Neural Network Control of Environmental Parameters in Neonatal Incubators / S. V. Frolov, A. Y. Potlov, A. A. Korobov, **K. S. Savinova** // Proceedings of 2023 4th International Conference on Neural Networks and Neurotechnologies, NeuroNT. – 2023. – P. 21 – 24. – EID: 2-s2.0-85166645652. – DOI: 10.1109/NeuroNT58640.2023.10175837. (IEEE Xplore)

12. Application of the Method of Gradient Neural Network Control in Bioengineering Systems / S. V. Frolov, A. Y. Potlov, A. A. Korobov, **K. S. Savinova** // Proceedings of the 2023 7th International Conference on Information, Control, and Communication Technologies, ICCT. – 2023. – P. 225 – 228. – EID: 2-s2.0-85182021897. – DOI: 10.1109/ICCT58878.2023.10347082. (IEEE Xplore)

Прочие публикации в других изданиях и материалы конференций:

13. **Савинова, К. С.** Исследование нейросетевой системы управления инкубатором для новорожденных / К. С. Савинова // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2024 : сб. тр. XXXVII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов / Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина, Рязань, 04–06 декабря 2024 года. – Рязань : ИП Коняхин А. В., 2024. – С. 183 – 187.

14. Фролов, С. В. Моделирование процессов метаболизма недоношенных новорожденных / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова** // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. IX Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием, Тамбов, 07 мая 2024 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2024. – С. 276 – 278.

15. Коробов, А. А. Этапы разработки гидродинамического фантома новорожденного для исследования микроклимата в неонатальном инкубаторе / А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Е.Р.А – Современная наука: электроника, робототехника, автоматизация : материалы I Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых / Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого и др. ; под общ. ред. А. А. Бойко. Гомель, 29 февраля 2024 года. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2024. – С. 75–76

16. **Савинова, К. С.** Преимущество неонатальных инкубаторов с двойными стенками в сохранении требуемого микроклимата / К. С. Савинова, Л. А. Халипина, А. А. Коробов // Молодежь для устойчивого развития регионов : материалы науч.-практ. конф. студенческих научных объединений. Тамбов, 21 сентября 2023 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – С. 130 – 132.

17. Подход к созданию фантома новорожденного для исследования микроклимата в неонатальном инкубаторе / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2023 : сб. тр. XXXVI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 06–08 декабря 2023 года. – Рязань : ИП Коняхин А. В., 2023. – С. 143 – 146.

18. Халипина, Л. А. Разработка сайта интернет-магазина инкубаторов для новорожденных / Л. А. Халипина, **К. С. Савинова** // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IX Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 24–25 октября 2023 года. Выпуск 9. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2023. – С. 333 – 335.

19. Шнякина, Я. И. Многопозиционная система регулирования для задач медицинской техники / Я. И. Шнякина, А. Р. Аветисян, **К. С. Савинова** // Радиоэлектроника. Проблемы и перспективы развития : сб. тр. Седьмой всероссийской молодежной научной конференции, Тамбов, 11–12 мая 2022 года. – Тамбов : Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2022. – С. 178–179.

20. **Савинова, К. С.** Модель термодинамики тела ребенка / К. С. Савинова, А. А. Трубиенко, А. А. Коробов // Биотехнические, медицинские и экологические системы, измерительные устройства и робототехнические комплексы – Биомедсистемы-2020 : материалы XXXIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов, Рязань, 09 – 11 декабря 2020 года. – Рязань : ИП Коняхин А. В., 2020. – С. 267 – 270.

21. Фролов, С. В. Математическая модель инкубатора для новорожденных как объекта управления / С. В. Фролов, А. А. Трубиенко, **К. С. Савинова** // Роль и место биомедицинской техники в современной медицине : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Вологда, 26 декабря 2018 года. – Вологда : Вологодский государственный университет, 2018. – С. 16–17.

22. **Савинова, К. С.** Тенденции развития инкубаторов для новорожденных / К. С. Савинова, Ф. Чиквето // Энергосбережение и эффективность в технических системах : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. студентов, молодых ученых и специалистов, Тамбов, 10 – 12 июля 2017 года / Тамбовский государственный технический университет. – Тамбов : Издательство Першина Р. В., 2017. – С. 511–512.

23. **Савинова, К. С.** Управление температурой в инкубаторе для новорожденных на основе усовершенствованного позиционного регулятора / К. С. Савинова // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Тамбов, 15 – 17 ноября 2017 года. Выпуск 4, Том III. – Тамбов : Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. – С. 128 – 132.

24. Чиквето, Ф. Перспективы развития инкубаторов для новорожденных / Ф. Чиквето, **К. С. Савинова** // Взгляд молодых на проблемы региональной экономики – 2016 : материалы Всерос. открытого конкурса студентов вузов и молодых исследователей, Тамбов, октябрь 2016 года. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. – С. 223 – 227.

Интеллектуальная собственность:

25. Пат. на изобретение RU № 2846571 Российская Федерация, G 09 B 23/28 (2025.01). Полноростовой фантом младенца / Потлов А. Ю., Фролов С. В., Коробов А. А., **Савинова К. С.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2024137336 ; заявл. 12.12.2024 ; опубл. 09.09.2025, Бюл. № 25.

26. Пат. на изобретение RU № 2826790 Российская Федерация, A 61 G 11/00 (2024.01). Инкубатор для новорожденных с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры / Потлов А. Ю., Фролов С. В., Коробов А. А., **Савинова К. С.** ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2023129215 ; заявл. 10.11.2023 ; опубл. 17.09.2024, Бюл. № 26.

27. Пат. на изобретение RU № 2690090 C1 Российская Федерация, МПК G 01 K 7/16, G 01 L 1/22, G 05 B 11/01. Способ и система регулирования температуры и давления тензомостом / Семенов Д. Д., Коробов А. А., **Савинова К. С.**, Глинкин Е. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2018128811 ; заявл. 06.08.2018 ; опубл. 30.05.2019, Бюл. 16.

28. Пат. на изобретение RU № 2654311 Российская Федерация, G 01 K 7/16 (2006.01) G 01 L 1/22 (2006.01). Способ и система измерения давления и температуры тензомостом / Коробов А. А., **Савинова К. С.**, Фролов С. В., Глинкин Е. И. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2017108522 ; заявл. 14.03.2017 ; опубл. 17.05.2018, Бюл. № 14.

29. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024689299. Комплексное нейросетевое управление температурным режимом, влажностью, содержанием кислорода и освещенностью в инкубаторах для новорожденных / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов ; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2024688970 ; заявл. 28.11.2024 ; опубл. 05.12.2024.

30. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2024691281. Комплексная математическая модель тепломассопереноса в неонатальном инкубаторе и нейросетевого управления его режимами / С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова**, А. Ю. Потлов ; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2024690649 ; заявл. 09.12.2024 ; опубл. 20.12.2024.

31. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023684642. SCADA-система для оперативного мониторинга в реальном масштабе времени и нейросетевого управления характеристиками микроклимата внутри рабочей камеры неонатального инкубатора / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, А. А. Коробов, **К. С. Савинова** ; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2023683879 ; заявл. 13.11.2023 ; опубл. 16.11.2023.

32. Св-во о государственной регистрации программы для ЭВМ RU 2023684416. Численное моделирование термодинамических процессов в неонатальных инкубаторах с учетом влияния незрелой терморегуляции новорожденного / А. Ю. Потлов, С. В. Фролов, **К. С. Савинова**, А. А. Коробов ; заявитель ФГБОУ ВО «ТГТУ». – № 2023683882 ; заявл. 13.11.2023 ; опубл. 15.11.2023.

САВИНОВА КРИСТИНА СЕРГЕЕВНА

**РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ И СРЕДСТВ СОЗДАНИЯ
ДЛЯ НОВОРОЖДЕННОГО ПОДХОДЯЩИХ УСЛОВИЙ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ В НЕОНАТАЛЬНОМ ИНКУБАТОРЕ**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 07.10.2025.
Формат 60 × 84/32. 1 печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 27

Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106/5, помещение 2, к. 14.
Телефон (4752) 63-81-08.
E-mail: izdatelstvo@tstu.ru

Отпечатано в типографии ФГБОУ ВО «ТГТУ»
392008, г. Тамбов, ул. Мичуринская, д. 112А.
E-mail: tipo_tstu68@mail.ru