ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора технических наук, доцента Кравчука Дениса Александровича

на диссертацию Савиновой Кристины Сергеевны «Разработка эффективных методов и средств создания для новорожденного подходящих условий окружающей среды в неонатальном инкубаторе», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения»

Актуальность темы диссертационного исследования.

Разработка новых неонатальных инкубаторов необходима для повышения выживаемости и качества ухода за недоношенными и больными новорождёнными. Преждевременные роды остаются одной из ведущих причин детской смертности в неонатальном периоде и представляют собой серьёзную проблему для здравоохранения. Недоношенные и маловесные дети особенно уязвимы из-за незрелости основных физиологических систем организма, и в первую очередь – системы терморегуляции, что делает их чувствительными даже к незначительным перепадам температуры окружающей среды (до 1°C). Эти факторы влияют не только на повышенный риск летальных исходов, физических и нейрокогнитивных изменений, но и приводит к возникновению отдалённых последствий – нарушений показателей здоровья во взрослом возрасте.

Для предотвращения этих рисков недоношенных и маловесных детей помещают в неонатальные инкубаторы, главная задача которых – создание и поддержание безопасной термонейтральной среды.

В большинстве серийно выпускаемых неонатальных инкубаторов управление микроклиматом осуществляется на основе линейных ПИД-регуляторов, что ограничивает точность системы и адаптивность к изменениям внешней среды. Конструкция и программная реализация современных инкубаторов ориентирована на поддержание строго ограниченного набора параметров, что исключает возможность внедрения новых контуров управления – например, освещённости внутри камеры инкубатора для регулирования циркадных ритмов у новорожденных.

В диссертационной работе разработан неонатальный инкубатор нового поколения, реализующий адаптивный алгоритм градиентного нейросетевого управления. Предложенная система управления обеспечивает высокую точность стабилизации заданных выходных параметров – температуры воздушного пространства внутри неонатального инкубатора, относительной влажности, концентрации кислорода и уровня освещенности внутри камеры инкубатора за счёт применения электрохромного стекла.

Таким образом, диссертационная работа Савиновой К.С. является актуальной и отвечают современным вызовам, связанным с разработкой перспективных интеллектуальных систем управления параметрами микроклимата в неонатальных инкубаторах.

Оценка содержания диссертации. Диссертация включает введение, четыре главы, выводы, заключение, библиографический список из 149 наименований публикаций отечественных и зарубежных авторов, 2 приложения. Диссертационная работа изложена на 195 страницах и содержит 81 рисунок и 20 таблиц.

Во введении обоснована актуальность темы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость, представлены положения, выносимые на защиту, а также описано внедрение и апробация результатов исследования.

Первая глава посвящена анализу современного состояния и тенденций развития неонатальных инкубаторов. Рассмотрены функциональные принципы, конструкционные особенности и основные производители неонатальных инкубаторов. Обобщены исследования, посвящённые моделированию процессов тепло- и массопереноса в инкубаторе с учётом терморегуляции новорождённого, в том числе с применением неонатальных фантомов. Особое внимание уделено исследованиям, направленным на применение различных методов управления параметрами микроклимата. Приведены ключевые требования к поддержанию параметров микроклимата и описаны особенности физиологии недоношенных детей. Отмечено ограничение традиционных методов управления на основе ПИД-регуляторов для задач управления сложными, многосвязными, нелинейными объектами, тем самым обоснована необходимость разработки систем управления микроклиматом на основе нейросетевых методов.

Во второй главе описана разработка и аппаратная реализация экспериментальной установки неонатального инкубатора нового поколения. Представлена её структура – включающая блок управления инкубатором, блок управления гидродинамическим неонатальным фантомом, системы подготовки кровеимитирующей жидкости и формирования воздушного потока. Блоки управления неонатальным инкубатором и гидродинамическим неонатальным фантомом программно реализованы на основе языка программирования Python, аппаратно – на основе двух независимых микрокомпьютеров Raspberry. Гидродинамический неонатальный фантом, имитирующий терморегуляцию и испарение влаги с поверхности тела

младенца, выполнен на основе анатомических данных из двухкомпонентного силикона методом 3D-печати. Разработана экспериментальная установка предназначенная для оценки эффективности предложенных перспективных методов управления параметрами среды инкубатора.

В третьей главе поставлена задача поиска оптимальной структуры и параметров системы управления параметрами микроклимата в неонатальном инкубаторе. Для её решения строится комплексная математическая модель тепло- и массопереноса в неонатальном инкубаторе, учитывающая взаимодействие всех ключевых компонентов системы: организма новорождённого (в виде ядра и кожи), элементов инкубатора (стенок, матраца, нагревателя, увлажнителя), воздушных потоков и внешних возмущений. Модель построена на блочном принципе и описывает 18 выходных переменных, 4 управляющих воздействия и 5 типов внешних возмущений. На её основе сформулирован и реализован метод градиентного нейросетевого управления, представленный в виде алгоритма управления и алгоритма адаптации с учетом процессов тепло- и массопереноса. Разработанный метод управления основан на многослойном перцептроне с применением метода обратного распространения ошибки.

В четвертой главе проводится параметрическая идентификация разработанной комплексной математической модели тепло- и массопереноса в неонатальном инкубаторе и проведение эксплуатационных исследований на созданной экспериментальной установке с использованием полноростового гидродинамического неонатального фантома. На основе серии экспериментов были получены статические и динамические характеристики системы, что позволило сформулировать и решить задачу параметрической идентификации параметров модели и доказать её адекватность. Решена задача поиска оптимальной структуры и параметров системы управления неонатальным инкубатором.

На этапе имитационных исследований, выполненных в среде MATLAB на основе комплексной математической модели тепло- и массопереноса, была подтверждена эффективность алгоритма градиентного нейросетевого управления. Отмечено, что система устойчиво реагировала на возмущения (например, открытие инкубатора) и смену клинического протокола.

На этапе эксплуатационных исследований разработанный алгоритм был протестирован на экспериментальной установке, в том числе с использованием полноростового гидродинамического неонатального фантома. Результаты показали, что при управлении по температуре кожи система обеспечила её плавную стабилизацию за 26 минут за счёт прогрева

воздушного пространства до 36,5 °C и поддержания влажности на уровне 70 %. Полученные результаты подтверждают высокую устойчивость и адаптивность предложенного метода управления в условиях, приближённых к реальной клинической практике.

В заключении представлены основные научные и практические результаты исследований, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

Приложение содержит документы, подтверждающие практическое использование и внедрение результатов диссертационной работы.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций. Автор корректно использует известные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций.

В работе проведён глубокий анализ существующих подходов к моделированию тепло- и массообмена в неонатальных инкубаторах, методов управления микроклиматом, а также технических решений по имитации физиологических процессов у недоношенных новорождённых. Выявлены ключевые ограничения традиционных систем на базе ПИД-регуляторов и обоснована необходимость перехода к нейросетевым адаптивным методам управления.

Научные положения, рекомендации и выводы в достаточной степени аргументированы, так как основаны на применении известных методов математического моделирования, нейронных сетей, теории автоматического управления, оптимизации, обработки экспериментальных данных, визуализации полученных результатов.

Оценка новизны и достоверности. В качестве новых научных результатов диссертантом Савиновой К.С. предложены:

1. Комплексная математическая модель тепло- и массопереноса в неонатальном инкубаторе, учитывающая взаимодействие между компонентами инкубатора и организмом новорожденного, а также внешние возмущения.
2. Экспериментальная установка неонатального инкубатора нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок и полноростовым гидродинамическим фантомом, имитирующим терморегуляцию новорожденного.
3. Алгоритм градиентного нейросетевого управления на основе многослойного перцептрона, обеспечивающий высокую точность

поддержания параметров микроклимата (температура воздуха ±0,5°C, влажность ±2–3%) и температуры кожи ребёнка.

В целом, результаты, полученные диссертантом, являются новыми в области математического моделирования тепло- и массообмена в неонатальном инкубаторе и разработки адаптивных высокоточных систем управления микроклиматом для недоношенных новорождённых.

Обоснованность полученных результатов основывается на тщательном сопоставлении данных имитационного и эксплуатационного моделирования на разработанной экспериментальной установке, результатах проведения параметрической идентификации, а также на согласованности с физиологическими нормами и требованиями клинической практики.

Достоверность научных положений, теоретических выводов и практических результатов подтверждается высокой адекватностью комплексной математической модели (среднее отклонение от экспериментальных данных по температуре — 0,11 °C, по влажности — 1,08 %), а также воспроизводимостью ключевых характеристик системы управления в условиях, приближённых к реальным: стабилизация температуры кожи новорождённого с точностью до 0,5 °C, влажности — в пределах 2–3 %, устойчивость к возмущениям и корректная реакция на смену клинических протоколов.

Помимо этого, степень достоверности диссертационной работы подтверждается рядом публикаций, сделанных Савиновой К.С. (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).

Практическая ценность работы заключается в разработке экспериментальной установки неонатального инкубатора нового поколения с изменяемой прозрачностью стенок рабочей камеры и полноростового гидродинамического неонатального фантома для оценки эффективности предложенного алгоритма градиентного нейросетевого управления, что позволит повысить точность поддержания параметров микроклимата в неонатального инкубатора и использовать результаты для модернизации конструкции неонатального инкубатора, улучшения качества медицинского ухода и повышения выживаемости недоношенных новорожденных.

Реализация результатов работы и рекомендации их использования. Результаты исследований использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Биотехнические системы и технологии», нашли применение в работе медицинского центра ООО «Доступная Диагностика», ООО «Биомедтех», ООО «Медтехника».

Общие замечания по диссертационной работе.

1. Не достаточно проработан вопрос необходимости подробной детализации математической модели неонатального инкубатора.
2. Не представлены данные о реакции системы на совместное влияние комбинации нескольких возмущающих факторов.
3. Следовало бы подробнее в диссертации изложить представление неонатального инкубатора как «чистой камеры».
4. Имитационные исследования проведены для младенца строго определённых параметров. Не показано, как изменятся тепло- и массообменные процессы в неонатальном инкубаторе для младенцев другой массы тела и степени недоношенности.

Приведенные замечания не меняют общего положительного впечатления от диссертации и не оказывают влияния на значимость научных положений, а также на практическую ценность диссертационной работы.

Заключение. Полученные автором научные и практические результаты, выводы и заключения обоснованы. Основу работы составляет большое количество проведенных имитационных и экспериментальных исследований на лабораторной установке. Диссертация написана грамотно, ее отличает высокий научный уровень.

Автореферат полностью отражает структуру и содержание диссертации. Изложенные в автореферате данные не вступают в противоречие с данными, приведенными в диссертации.

Диссертационная работа Савиновой Кристины Сергеевны «Разработка эффективных методов и средств создания для новорожденного подходящих условий окружающей среды в неонатальном инкубаторе» является законченной научно-квалификационной работой, в которой решена научная задача, заключающаяся в разработке и реализации системы управления параметрами микроклимата и состоянием организма новорожденного в неонатальном инкубаторе на основе градиентного нейросетевого управления.

Диссертация и автореферат соответствуют выбранной специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

Диссертация отвечает требованиям п.9-14 Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Савинова Кристина Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения».

Официальный оппонент:
доктор технических наук по специальности 2.2.12. «Приборы, системы и изделия медицинского назначения», доцент, профессор кафедры электрогидроакустической и медицинской техники института нанотехнологий, электроники и приборостроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

_____ / Кравчук Денис Александрович /

Подпись д.т.н., проф. Кравчука Дениса Александровича удостоверяю.
Директор Института нанотехнологий, электроники и приборостроения федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»

27.10.2025 г. _____ / Федотов Александр Александрович /
Дата, печать подпись

Адрес организации: 347922, ЮФО, Ростовская область, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, ФГАОУ ВО «Южный федеральный университет», кафедра электрогидроакустической и медицинской техники Института нанотехнологий, электроники и приборостроения.
Телефон: +7 (8634) 37–17–95
Сайт: https://inep.sfedu.ru
Email: kravchukda@sfedu.ru

С отзывом ознакомлена 05.11.2025г.