

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по специальности «8D07105 - Биомедицинская инженерия» Асылбековой Ляиды Рамазанкызы на тему «Разработка термоэлектрических охлаждающих устройств на основе элемента Пельтье для локального воздействия в медицине»

Актуальность темы исследования. В настоящее время термоэлектрический метод охлаждения широко применяется во многих областях современной техники. В частности, он используется в радиоэлектронике, квантовой оптике, высокочастотной технике, автономных и возобновляемых источниках энергии, измерительных приборах и бытовой технике. Основными преимуществами термоэлектрического метода являются высокая надежность, компактность, простота управления и быстрота работы.

В последние годы этот метод также начал находить свое место в области медицины. В частности, его стали применять для профилактики алопеции (выпадения волос) – одного из побочных эффектов лечения онкологических заболеваний. По данным Министерства здравоохранения Республики Казахстан, ежегодно в нашей стране регистрируется около 40 тысяч новых онкологических заболеваний, а на диспансерном учете состоят более 230 тысяч пациентов. Эти показатели свидетельствуют о широком масштабе проблемы.



Рисунок 1 – Динамика онкологических больных и новых случаев в Казахстане за 2020-2025 годы

Как показано на рисунке 1, по данным Министерства здравоохранения Республики Казахстан, в последние годы наблюдается устойчивый рост числа онкологических больных: с 190 159 в 2020 году до 231 019 в 2025 году, рост более чем на 21%. При этом ежегодно выявляется около 40 тысяч новых случаев, что свидетельствует о высокой распространенности онкологических заболеваний и сохраняющемся риске дальнейшего роста заболеваемости [1].

Выпадение волос может негативно влиять на самовосприятие пациентов, их социальную жизнь и мотивацию к лечению. Выпадение волос может быть рубцовым и нерубцовым. В первом случае причинами ее возникновения являются новообразования (опухоли) кожи и ее придатков; физическое и химическое воздействие, приводящие к рубцеванию кожи; инфекции кожи головы (бактериальные, грибковые, вирусные). Причинами нерубцовой алопеции у онкологических пациентов является угнетающее воздействие на делящиеся клетки волосяного фолликула лекарств и ионизирующей радиации. В обоих случаях требуется лечение этих заболеваний.

В настоящее время для предотвращения алопеции используются медикаментозные (ингибиторы андрогенного метаболизма, стимуляторы факторов роста, гормональные и негормональные антиандрогенные препараты, глюкокортикостероиды, антиметаболиты и иммунодепрессанты, обогащенная тромбоцитами плазма, мезотерапия), хирургические (аутотрансплантация волосяных фолликулов из зон, где рост и качество волос не нарушено) и физиотерапевтические методы (дарсонвализация, ПУВА-терапия, гальванизация, электрофорез, светотерапия, локальное охлаждение и криомассаж). Среди перечисленных большое внимание заслуживает метод, основанный на охлаждении волосистой области головы с использованием специальных охлаждающих шлемов. Применение данных технических средств для лечения алопеции онкологических пациентов в большинстве случаев позволяет существенно ускорить восстановление волосяного покрова головы. Другими преимуществами локального охлаждения головы в данном аспекте является гипоаллергенность, безопасность и комфортность проведения процедур, возможность контроля температуры.

В связи с этим охлаждение кожи головы во время химиотерапии является одним из наиболее эффективных методов профилактики алопеции. Этот метод, снижая локальную температуру кожи, замедляет кровообращение в коже головы, уменьшая воздействие лекарственных препаратов на волосяные фолликулы. Согласно исследованиям, эффективность охлаждения кожи головы зависит от вида химиотерапии, физиологических особенностей пациента и технических характеристик используемого аппарата. Например, уровень сохранности волос при химиотерапии антрациклинами составляет около 40%, при использовании таксанов более 70%, а при монотерапии гемцитабином этот показатель может достигать 100%.

Технически снижение температуры волосистой области головы на данный момент обеспечивается путем использования вентиляторных агрегатов, жидкостных систем охлаждения, парокомпрессионных холодильных машин с соответствующими приспособлениями для управления режимами их работы. Недостатками аппаратуры такого типа являются в первом случае невозможность охлаждения поверхности головы ниже температуры окружающей среды и низкая эффективность, шум, производимый во время работы, во втором – обязательное наличие компрессора для прокачивания жидкости, невозможность обеспечения точной

дозировки теплового воздействия, в третьем – громоздкость и сложность технологического исполнения.

В данных условиях перспективным является применение в качестве аппаратного средства для снижения температуры волосистой области головы приборов, в которых источником холода являются стандартные термоэлектрические модули Пельтье (ТЭМ), характеризующиеся высокой надежностью работы, малыми габаритными размерами и высокой экологичностью, бесшумностью, высоким ресурсом эксплуатации.

При этом необходимо отметить, что в данном направлении в настоящее время имеется существенный недостаток исследований, связанных с аппаратной частью охлаждающих средств, оптимизации их характеристик в соответствии со специфическими условиями эксплуатации. Это обстоятельство определяет актуальность проведения диссертационного исследования, связанного с разработкой и исследованием термоэлектрического устройства (ТЭУ), предназначенного для снижения температуры волосистой области головы с целью предотвращения алопеции у онкологических пациентов, имеющего возможность эксплуатации как в стационарных, так и полевых условиях.

Кроме того, термоэлектрические охлаждающие устройства могут найти широкое применение не только в области онкологии, но и в других областях. Например, их используют для уменьшения боли при мигрени и невралгии, в реабилитационных процессах после операций и черепно-мозговых травм, в спортивной медицине – для быстрого восстановления после интенсивных физических нагрузок, в косметологии – для укрепления волос и улучшения состояния кожи головы. Кроме того, их можно использовать в качестве защитного устройства от теплового стресса для специалистов, работающих в условиях высоких температур, пожарных и военнослужащих.

Всё вышеперечисленное наглядно демонстрирует научную, медицинскую и социальную значимость темы. Поэтому использование термоэлектрических охлаждающих систем в медицинских целях, а именно для улучшения качества жизни онкологических больных, является актуальным и перспективным направлением исследований.

Степень разработанности темы исследования. Проблема алопеции, вызванной противоопухолевой терапией, в последние десятилетия привлекает внимание исследователей в области медицины и биомедицинской инженерии. В частности, значительное внимание уделяется разработке и совершенствованию методов профилактики выпадения волос, включая локальное охлаждение кожи головы. Сегодня метод локального охлаждения признан одним из немедикаментозных методов, снижающих риск развития алопеции, вызванной химиотерапией, за счет снижения активности волосяных фолликулов. Существующие технические средства охлаждения кожи головы представлены в основном в виде систем жидкостного охлаждения и вентиляционных установок. Однако эти технологии имеют ряд существенных ограничений: громоздкость, необходимость стационарных условий эксплуатации, повышенный уровень шума, недостаточная точность

поддержания температуры, а также неудобство длительного использования в клинической практике. В научной и патентной литературе имеются отдельные публикации, посвященные использованию термоэлектрических модулей (элементов Пельтье) в медицинских охлаждающих устройствах. Эти элементы привлекают внимание исследователей компактными размерами, высокой надежностью, бесшумной работой и возможностью точной регулировки температуры. Однако большинство существующих разработок ограничено лабораторными образцами, не прошедшими клинические испытания. Таким образом, несмотря на определенные научно-технические достижения в области создания систем охлаждения, применение термоэлектрических устройств в виде шапочек для локального охлаждения кожи головы остается недостаточно изученной областью. Это требует проведения комплексных научных исследований, направленных на разработку, моделирование, экспериментальную апробацию и внедрение нового термоэлектрического устройства, обладающего высокой точностью, надежностью и простотой применения.

Объектом исследования является термоэлектрическое устройство специальной конструкции, предназначенное для профилактики алопеции у онкологических больных путем локального охлаждения волосистой части головы.

Предметом исследования являются тепловые и электрические процессы в термоэлектрическом устройстве для локального охлаждения волосистой части головы, а также методы математического моделирования и экспериментального анализа с целью повышения эффективности и надежности профилактики алопеции у онкологических больных.

Целью диссертационной работы является создание портативного термоэлектрического охлаждающего устройства специальной конструкции для профилактики алопеции у онкологических больных методом локального охлаждения, создание математической модели устройства и исследование электрических и теплофизических процессов в нём.

Задачи исследования. Исходя из поставленной цели, в рамках диссертационной работы определены следующие научные задачи:

1. Критический анализ существующих методов и технических средств, основанных на термоэлектрическом методе преобразования энергии в медицине, в частности, тепловых эффектов.

2. Создание математической модели термоэлектрического устройства для профилактики алопеции у онкологических больных методом локального охлаждения.

3. Проведение численного эксперимента по разработанной математической модели с анализом полученных результатов.

4. Создание экспериментального образца (макета) устройства методами компьютерного проектирования на основе оптимальных решений, полученных на этапе математического моделирования устройства и численных экспериментов.

5. Проведение натурных испытаний макета охлаждающего термоэлектрического устройства на экспериментальном стенде в соответствии с методикой измерений, разработанной на основе действующих нормативных документов и стандартов.

Методы исследования. При решении поставленных в диссертации задач использовались принципы системного подхода, методы математического моделирования процессов теплопередачи, элементы математической статистики, численные методы расчета систем дифференциальных уравнений, теория автоматического управления, экспериментальные исследования и методы обработки результатов измерений на компьютере.

Научная новизна:

1. Разработан способ локального охлаждения волосистой части головы на основе термоэлектрического устройства, характеризующийся тем, что он обеспечивает охлаждение холодных поверхностей термоэлектрического модуля с высокой точностью в диапазоне температур от 273 до 291,5 К (0-18,5 °С), а отвод тепла от горячих поверхностей термоэлектрического модуля осуществляется с помощью системы жидкостного охлаждения.

2. Математическая модель для исследования теплофизических процессов, происходящих в системе «голова – термоэлектрическое устройство», характеризующаяся тем, что она основана на решении двумерной нестационарной задачи теплопроводности для слоистой структуры сложной формы с учетом наличия объектов с различными теплофизическими параметрами, условий теплообмена на границах второго и третьего типов сред, энергетических и геометрических параметров термоэлектрических модулей.

3. Конструкция термоэлектрического устройства для профилактики алопеции у онкологических больных методом локального охлаждения, характеризующаяся тем, что она состоит из охлаждающего блока, содержащего термоэлектрические модули и вентилятор, системы жидкостного охлаждения, используемой для отвода тепла от нагретых поверхностей термоэлектрических модулей, блока управления работой устройства и шапочки (шлема), надеваемой на голову пациента.

Теоретическая значимость работы заключается в создании математической модели для исследования теплофизических процессов, происходящих в системе «голова – термоэлектрическое устройство», характеризующейся тем, что она основана на решении двумерной нестационарной задачи теплопроводности для слоистой структуры сложной формы с учетом энергетических и геометрических параметров термоэлектрических модулей.

Практическая значимость работы:

– создание конструктивных вариантов термоэлектрического устройства для профилактики алопеции у онкологических больных методом локального охлаждения, позволяющего повысить надежность, эффективность и комфортность профилактических мероприятий;

- внедрение результатов исследования в медицинские организации и высшие учебные заведения;
- актуальность использования результатов работы на практике, прежде всего, в медицинских организациях и учреждениях;
- рекомендации по практическому применению термоэлектрических устройств.

Выводы, предлагаемые к защите:

1. Для профилактики алопеции у онкологических больных целесообразно использовать метод локального охлаждения волосистой части головы на основе термоэлектрического устройства, включающего охлаждающий блок, содержащий термоэлектрические модули и вентилятор, водоблок для отвода тепла от нагретых поверхностей термомодулей и блок управления, регулирующий работу термоэлектрических модулей с точки зрения обеспечения необходимого уровня охлаждения головы.

2. Математическая модель термоэлектрического устройства для профилактики алопеции у онкологических больных методом локального охлаждения основана на решении двумерной нестационарной задачи теплопроводности для слоистой структуры сложной формы с учетом наличия объектов с различными теплофизическими параметрами, условий теплообмена на границах сред второго и третьего порядков, а также энергетических и геометрических параметров термоэлектрического модуля.

3. Для охлаждения волосистой части головы с помощью термоэлектрического устройства, рассчитанного на диапазон температур от 273 до 291,5 К (0-18,5 °С), необходимо использовать два стандартных термоэлектрических модуля типа DRIFT-0,8 производства ООО «Криотерм», характеристики каждого из которых находятся в следующих пределах: диапазон мощности от 20 до 80 Вт, средний перепад температур между спаями 50 К, потребляемая мощность от 100 до 500 Вт, ток потребления от 3 до 11 А, холодильный коэффициент варьируется от 0,1 до 0,5.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается обоснованностью использованных теоретических подходов, соответствием результатов математического моделирования данным натурных экспериментов, а также подтверждением основных выводов исследования публикациями в научных журналах.

Апробация результатов исследования. По результатам научного исследования диссертационной работы опубликовано 6 научных работ, в том числе 2 статьи в зарубежных изданиях, входящих в международную базу цитирования Scopus, 2 статьи опубликованы в научных изданиях, рекомендованных Комитетом по обеспечению качества в сфере науки и высшего образования Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан, а также получено 2 патента Республики Казахстан на полезные модели.