УДК 621.036:681.20

ТКАНЫЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛИ И АРКТИКА

© Александр Анатольевич Шульженко, Михаил Борисович Модестов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Москва, Россия

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Аннотация. Проведено исследование тканых электронагревателей при различных режимах работы, их электрических контактных соединений, тепловыделяющих элементов, рассмотрены особенности технологии изготовления тканых электронагревателей, особенности формирования создаваемых ими тепловых полей. Рассмотрены примеры изделий с электрообогревом на основе тканых электронагревателей для арктических условий. Элементы технологии производства тканых электронагревателей и целого ряда изделий с электрообогревом являются оригинальными, запатентованными разработками. Технология использовалась для изготовления серийных изделий. Данный материал представляет интерес для широкого круга специалистов, занимающихся разработкой и внедрением изделий с электрообогревом.

Ключевые слова: тканые электронагреватели, тепловыделяющие элементы на основе углеродных (графитовых) нитей, контактные соединения, арктические условия применения.

WOVEN ELECTRICAL HEATERS AND ARCTIC

© A. A. Shulzhenko, M. B. Modestov

Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

aa_shulzhenko.01@mail.ru

Abstract. A study of woven electrical heaters was conducted in various operating modes. Their electric contact connections, fuel generating elements, the technology of manufacturing fabric electric heaters, the formation of their thermal fields were considered in the paper. Examples of products with electric heating based on woven electrical heaters for Arctic conditions were given. Some elements of the manufacturing technology of woven electrical heaters and a number of products with electrical heating are original, patented developments. The technology was used for serial production. This study is of interest to a wide range of professionals involved in the development and introduction of products with electrical heating.

Keywords: woven electrical heaters, fuel generating elements based on carbon (graphite) filaments, contact connections, Arctic application conditions.

Введение. Необъятный край нашей страны располагается в арктическом регионе. Он обладает огромными запасами полезных ископаемых: нефти, газа, драгоценных металлов, алмазов, железной руды и т.д.

Но добраться до них не так просто. Связано это, в первую очередь, с низкими температурами, господствующими в этом регионе. Так зимние значения температур

достигают до -65°C . При таких температурах остро встают проблемы, связанные: с обеспечением безопасности деятельности человека в Арктике, с созданием устойчивых к холоду материалов, используемых для строительства, с созданием технических средств, в том числе, и машин способных работать в суровых условиях Арктики и т.д.

Эта особенность всегда была очевидна, поэтому государство оказывало и оказывает повышенную поддержку региону для его успешного развития.

Так, в девяностых годах прошлого столетия была принята и финансировалась Президентская программа «Техника Российского Севера».

В настоящее время Президентом Российской Федерации утверждены «Основы государственной политики Российской Федерации в Арктике на период до 2020 г. и дальнейшую перспективу», в рамках которых необходимо обеспечить достаточный уровень для решения задач обороны и безопасности, а также надежного функционирования систем жизнеобеспечения и производственной деятельности в природно-климатических условиях Арктики.

Накопленный теоретический и практический опыт в Институте Машиноведения им. А.А.Благонравова РАН в области создания различных систем и узлов машиностроительной техники по ряду направлений уже используется и еще может с успехом использоваться для решения проблем, имеющих в условиях Арктики, например, для создания фрикционных и антифрикционных материалов и разработки эффективных тормозных устройств, повышения надежности и ресурса работы топливных насосов газотурбовозов, работающих на сжиженном газе и т.д.

В рамках Программы фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013-2020гг, пункт 30 «Методы анализа и синтеза многофункциональных механизмов и машин для перспективных технологий и новых человеко-машинных комплексов, динамических и виброакустических процессов в технике», подпункт «- разработка методов анализа и синтеза устройств обогрева на основе тканых нагревателей» проводится работа по формированию тепловой защиты для различных технических устройств и биологических объектов, в том числе, и человека.

Решение вопроса обогрева работников, работающих на открытом воздухе в условиях Арктики, с помощью пассивных средств защиты является довольно сложным делом. Во многом оно определяется не только низкими температурами, а и другими факторами: ветровыми составляющими, влажностью в данном регионе, длительностью пребывания на открытом воздухе, активностью работающего и т.д., что усложняет проблему. Рассчитано, что теплозащитные свойства традиционной одежды ограничены и обычно не превышают 6 Кло ($0,950 \text{ м}^2 \cdot \text{C}^{\circ}/\text{Вт}$). Недостатком использования пассивных средств теплозащиты является то, что в одежде, созданной на этих принципах, вследствие ее большой толщины, невозможно активно перемещаться, так как она имеет большой вес и габариты [1].

Попытки создать одежду с использованием в ней полуактивных теплозащитных материалов, например, теплоотражающих пленок, также привела в тупик, так как в этом случае существенно ухудшается циркуляция воздуха в слоях одежды под пленкой, что приводит к повышению потовыделения у человека, одетого в такую одежду. Это способствует образованию повышенной влажности и, как следствие, замерзанию ее на холоде. Такая одежда становится неэластичной, «дубеет», и делается непригодной для носки.

Поэтому наиболее перспективными для защиты человека от низкотемпературных воздействий являются способы, в которых используются активные формы теплозащиты.

Одним из таких способов является применение тканых электронагревателей (далее нагревателей) в слоях одежды.

Тканые электронагреватели. Сотрудниками института были разработаны перспективные энергосберегающие технологии, обеспечивающие обогрев на основе тканых нагревателей (рис.1) различных объектов, как технического назначения, так и биологических, в том числе и человека.

Рис. 1. Тканый электронагреватель.

В процессе испытаний было выявлено, что созданная электронагревательная ткань (рис. 1) и нагреватели на ее основе обладают следующими возможностями:

- благодаря своей эластичности, позволяют обеспечить хорошее прилегание электронагревательного элемента, изготовленного из этой ткани к обогреваемому объекту и принятие его формы, что позволяет добиться высокой степени энергосбережения, так как в этом случае полученное от нагревателя тепло более эффективно обеспечивает обогрев объекта, что очень важно, особенно при использовании такого нагревателя в автономном режиме, при запитывании его от автономных источников электропитания;
- параллельное подключение тепловыделяющих элементов обеспечивает высокую надежность работы тканого нагревателя. Так обрыв одного тепловыделяющего элемента не выводит из строя весь нагреватель. Например, когда в нагревателе используются 44 углеродной нити (нагреватель для жилета), такой дефект приведет к потере мощности тканого электронагревателя чуть более 2%;
- параллельную структуру имеют в тканом нагревателе и контактные площадки из низкоомных нитей, соединяющие между собой углеродные нити, и служащие для подключения проводов. Такая структура контактных площадок способствует получению невысокого значения электрического сопротивления, как правило, существенно ниже сопротивления самого нагревателя, кроме того, обеспечивает высокую степень электрической надежности контактных соединений;
- эластичность тканых нагревателей создает комфортное ощущение у пользователей в динамике, так как структура электронагревательной ткани, используемой для обогрева биологических объектов, в том числе и человека, обычно состоит на 95% из естественных, например, хлопчатобумажных или льняных нитей, что обеспечивает нормальный воздухообмен в системе человек- тканый нагреватель-одежда-внешняя среда;
- электронагревательная ткань в своем рапорте содержит, как правило, не одну, а несколько заготовок нагревателей, то есть она имеет матричную структуру;
- матричная структура ткани и возможность автоматического переключения режимов станка позволяют получать при непрерывной работе ткацкого станка (без дополнительной перенастройки) не один тип заготовок нагревателей, а несколько;
- изготовление электронагревательной ткани производится на стандартном ткацком оборудовании;

- нагреватели из электронагревательной ткани работают от самых различных низковольтных источников электропитания (6В, 12В, 24В): бортовых транспортных средств и спецтехники, аккумуляторов, батареек, солнечных модулей, и очень перспективных в условиях Арктики термогенераторов, что обеспечивает высокую степень электробезопасности. От стационарных сетей питание нагревателей производится через адаптер;

- в качестве тепловыделяющих элементов в ней используются углеродные (графитовые) нити. Данные нити по своим параметрам, например электрическому сопротивлению, имеют разброс $\pm 10\%$ [2], однако, благодаря их параллельному подключению в нагревателе, разброс параметров существенно снижается. Так при изготовлении нагревателей, имеющих 22 параллельные углеродные нити, разброс их электрических сопротивлений не превосходил 3%.

Технология изготовления тканых нагревателей рассчитана на массовое производство. Так, например, для изготовления нагревателей для жилетов с электрообогревом из 100 погонных метров ткани было сделано ~500 нагревателей. А что такое 100 м ткани для ткацкого производства?

С ростом объемов производства и цена нагревательных элементов, получаемых из электронагревательной ткани, существенно падает.

Еще одним положительным фактором, говорящим в пользу применения данной технологии является возможность диверсификации ткацкого производства, что обеспечивает ему большую устойчивость.

Кроме того, в качестве фоновых, электроизоляционных нитей часто используются нити из льна, что так же полезно для поддержки отрасли по производству льна.

Следует подчеркнуть, что тканые нагреватели могут обеспечивать температуры, предназначенные не только для обогрева человека, а и для создания нагревательных систем с более высокими уровнями температур, что позволяет расширить их сферу применения и использовать для обеспечения работы различных технических устройств.

Технология изготовления нагревателей состоит не только из технологии изготовления электронагревательной ткани на ткацком оборудовании. Она включает в себя еще производство контактных элементов [3], соединяющих провода с ткаными контактными площадками нагревателей, электромонтаж разъемных соединений, терморегуляторов и т.д.

Особенностью технологии изготовления тканых нагревателей является требование к возможности адаптации всей конструкции нагревателя ко всему или к отдельным частям обогреваемого объекта [4]: биологическому объекту или техническому устройству по различным параметрам, в первую очередь, по температурному режиму, электрическому напряжению и т.д.

Были проработаны теоретические аспекты тканых электронагревателей и их использования в изделиях.

Теоретические предпосылки для создания тканых электронагревателей. Электрические параметры нагревательного элемента определяются с одной стороны требованиями по обогреву обогреваемого объекта, а с другой стороны возможностями элементов, входящих в структуру нагревателя. Как правило, в качестве тепловыделяющих элементов в тканых нагревателях, обеспечивающих режим обогрева – режим «мягкого тепла», используют углеродные нити, а контактные площадки строят на основе низкоомных нитей. Промежуточное пространство заполняется электроизоляционными фоновыми нитями.

Структура самого простого нагревательного элемента из пяти эластичных тепловыделяющих элементов показана на рис. 2.

Электрическая эквивалентная схема такого тканого электронагревателя показана на рис. 3.

Рис. 2. Электрическая монтажная схема тканого нагревателя, состоящего из 5 углеродных и 5 мишурных нитей.

1 – углеродные нити, 2 – мишурные нити, 3 – фоновые нити, 4 – контактные площадки, 5 – активная длина углеродных нитей l_a , 6 – расстояние между мишурными нитями в контактных площадках l_n , 7 – расстояние между углеродными нитями, 8 – средство соединения мишурных нитей в контактной площадке с проводом, 9 – провода, 10 – источник электропитания; 11 – фоновые электроизоляционные нити.

Эквивалентная схема даже такого простого нагревателя, приведенная на рис. 2, представляет собой сложную электрическую систему (рис. 3), содержащую 37 контуров, описываемых системой уравнений, составленной в соответствии со вторым законом Кирхгофа.

$$\begin{cases} I_1 R_{11} + I_2 R_{12} + I_3 R_{13} + \dots + I_n R_{1m} = U_1 \\ I_1 R_{21} + I_2 R_{22} + I_3 R_{23} + \dots + I_n R_{2m} = U_2 \\ I_1 R_{31} + I_2 R_{32} + I_3 R_{33} + \dots + I_n R_{3m} = U_3 \\ I_1 R_{41} + I_2 R_{42} + I_3 R_{43} + \dots + I_n R_{4m} = U_4 \\ \dots \\ I_1 R_{n1} + I_2 R_{n2} + I_3 R_{n3} + \dots + I_n R_{nn} = U_n \end{cases} \quad (1)$$

Эту систему уравнений можно решить любым из известных методов, например, методом последовательного исключения Гаусса [5].

Рис. 3. Эквивалентная электрическая схема тканого нагревательного элемента, показанного на рис. 2.

1 – сопротивления углеродных нитей в пределах активной части тканого нагревательного элемента R_a , 2 – сопротивления углеродных нитей между мишурными нитями в контактных группах R_b , 3 – сопротивления мишурных нитей между углеродными нитями в контактных группах R_n , 4, 6 – контактные группы, 5 – активная часть нагревательного элемента.

В результате решения уравнения (1) для нагревателя, показанного на рис. 2, было найдено, что сопротивление контактной площадки составляет $R_{\text{конт}5} = 0,545 \text{ ом}$, сопротивление самого нагревателя – $25,4 \text{ ом}$, следовательно, сопротивление контактной площадки не превосходит 2,1% от значения сопротивления самого нагревателя. Такое низкое сопротивление контактной площадки обеспечивает высокую электрическую надежность нагревательного элемента.

С помощью тканых нагревателей можно формировать и использовать для решения многочисленных задач тепловые поля различных уровней и форм. Ниже на рис. 4 представлены результаты моделирования наиболее часто встречающегося теплового поля тканого нагревателя с тепловыделяющими элементами на основе углеродных нитей, расположенных на одинаковом расстоянии от соседних нитей [5].

При разработке методик расчета были получены и использованы не только плоскостные, но и объемные модели тепловых полей, создаваемых ткаными нагревателями (рис. 5) [6].

Исследовались также не только статические, но и динамические характеристики тепловых полей. На этом рис. 6 показаны результаты моделирования изменения температуры в слоях одежды (пространственная ось X) во времени (временная ось t).

Рис. 4. Распределение температуры на поверхности нагревателя, состоящего из одной полосы из 5 параллельных углеродных нитей, соседние нити, в пределах этой полосы, находятся на одинаковом расстоянии друг от друга.

Рис. 5. Объемное представление температурного распределения на поверхностях тканого электронагревателя.

Рис. 6. Модель динамического процесса нагрева тканого электронагревателя в слоях одежды.

Полученные в процессе моделирования данные с успехом можно использовать при создании не только одежды с электрообогревом, а и различных нагревателей для устройств технического назначения.

В ходе исследования элементов одежды, их взаимодействия с обогреваемым объектом, были обнаружены эффекты, позволяющие получать количественные данные о реакции человека на воздействие тепловых полей тканых нагревателей, находящихся в изделиях на поверхности тела. Эти данные расширяют представления о тепловых свойствах человеческого организма, и позволяют использовать их при конструировании одежды с электрообогревом [9].

При проведении работ по созданию различных устройств с электрообогревом были затронуты и фундаментальные проблемы генерации тепла тепловыделяющими элементами из углеродных (графитовых) нитей. Рассмотрены вопросы взаимодействия электронов с фононами в графите. Разработана методика проведения тепловых расчетов с учетом данного эффекта. Знание физических процессов, происходящих в тепловыделяющих элементах (в нашем случае углеродных нитях), позволяет лучше адаптировать создаваемые устройства с объектами обогрева, а также эффективнее использовать автономные источники электропитания [7].

При исследовании тканых нагревателей и их тепловых полей применялись современные методы фрактальной геометрии, так как тепловыделяющие элементы - углеродные нити представляют собой мультифрактальные структуры, то есть структуры образованные аффинными множествами филаментов, из которых состоит нить. Фрактальное представление тепловыделяющих элементов позволило выяснить причины, приводившие к большим отличиям (~10 раз) между расчетными результатами при использовании ранее широко применяемой цилиндрической модели и экспериментальными данными [8].

Закключение. Проведенные исследования позволяют обеспечить более правильный подход к проектированию не только одежды для Арктики, но и к решению других Арктических проблем на основе использования тканых нагревателей [10], а разработанная технология обеспечить практическую реализацию.

Данный материал может представлять интерес для специалистов, работающих в сфере жизнеобеспечения в Арктике.

Примеры использования тканых нагревателей. На основе созданной технологии был освоен и серийно выпущен целый ряд изделий с электрообогревом, что позволило провести практическую апробацию данной технологии и на этой базе осуществить ее усовершенствование. Основой данной технологии является электронагревательная ткань. Структура электронагревательной ткани была запатентована [11, 12].

Как уже отмечалось, тканые нагреватели с успехом использовались как в обычной одежде [4], так и в комплектах специальной одежды, например, для водителей транспортных средств. Возможно использование подобной одежды и для водителей снегоходов.

Так для Выксунского металлургического завода была разработана и изготовлена партия жилетов с электрообогревом. Жилеты с ткаными нагревателями предназначались для автокащиков и крановщиков (рис. 7). Они показали свою высокую эксплуатационную надежность.

Рис. 7. Образец жилета с электрообогревом, выпущенного для Выксунского металлургического завода.

Исследования, проводившиеся во Всероссийском центре медицины катастроф «Защита» совместно с ИМАШ РАН, показали, что данные электронагреватели можно применять и в специальных медицинских изделиях, например, в комплектах для транспортировки пострадавших от гипотермии (рис. 8).

Рис. 8. Комплект для транспортировки пострадавших от гипотермии.

Еще одним примером применения тканых электронагревателей может служить решение одной из задач обеспечения экологической безопасности в районах Арктики - утилизации отходов жизнедеятельности человека. С этой целью организацией ООО «Экосервис» была разработана технология с использованием тканых нагревателей, разработанных сотрудниками института, позволяющая проводить утилизацию отходов круглогодично. ОАО «Опытным заводом № 31 Гражданской авиации» эта технология была освоена и налажен выпуск туалетов с обогреваемыми баками для Таймыра.

Здесь приведено незначительное число примеров, возможного решения задач для Арктики с применением тканых электронагревателей, а таких задач, требующих обогрева - много: обогрев измерительных устройств, в том числе дефектомеров для нефтяных и газовых труб, обогрев нефтяных и газовых расходомеров, обогрев компрессоров, работающих на открытом воздухе, обогрев аккумуляторов для автомобилей, создание специзделий для человека, в том числе и водолазных костюмов с обогревом, обогрев питания, обогрев животных и т.д.

Конечно, нельзя забывать, что тканые электронагреватели можно использовать для обеспечения комфортных условий в домах жителей Арктических регионов, например, в виде жалюзи с обогревом на окнах и дверях, ковриков с обогревом и т.д.

Как видим, применение тканых нагревателей предоставляет широкие возможности не только обеспечить выживание людям в суровых арктических условиях, а и комфорт, обеспечить работоспособность технических устройств.

Список литературы

1. Афанасьева Р.Ф. Гигиенические основы проектирования одежды для защиты от холода. - М.: Легкая индустрия, 1977. - 136 с.
2. Технические характеристики продукции. ООО «УВИКОМ». Проспект. - М.О.: ООО УВИКОМ, 1997.
3. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б., Пичко П.Г., Чудов В.А. Средство соединения проводов с проводником из мягкого материала (варианты), патент РФ № 2210148, М., 2003, Бюллетень № 22, 16 с.
4. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. Одежда с электронагревательной тканью, свидетельство на полезную модель № 9123, М., 1999, Бюллетень № 2, 4 с.
5. Шульженко А.А. Анализ и синтез устройств обогрева узлов машин. Диссертация. ИМАШ РАН, 2011, 142 с.

6. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Тканые электронагревательные элементы и примеры их применения// Вестник научно-технического развития. – 2017. - №7. - С. 30-40.
7. A.A.Shul'zhenko, M.B.Modestov. Method of Disigning Heating Units on the Basis of Carbon (Graphit) Threads. ISSN 1052-6188// Journal of Machinery Manufacture and Reliability. - 2015. - vol. 44, No 4. - P. 389-394.
8. Ахметханов Р.С., Дубинин Е.Ф., Шульженко А.А., Модестов М.Б. Диагностика тканых электронагревателей на основе углеродных нитей// Сборник трудов международной конференции «Живучесть и конструкционное машиноведение. ЖИВКОМ - 2016». - ИМАШ РАН. - 2016. - С. 200-203.
9. Шульженко А.А., Модестов М.Б., Модестов Б.М. Способ измерения реакции потовых желез человека при наличии теплового воздействия. Патент № 2578864, М., 2016, Бюллетень № 9.
10. Шульженко А.А., Модестов М.Б. Особенности использования тканых электронагревателей для обеспечения работоспособности технических устройств в условиях Арктики// Сборник трудов конференции «Материалы для технических устройств и конструкций, применяемых в Арктике». - ВИАМ. - 2015. - С. 37.
11. Шульженко А.А., Первушин В.П., Корнев В.Н., Колпаков В.В. «Электронагревательная ткань», патент РФ № 2109091, М., 1998, Бюллетень № 11, 14 с.
12. Шульженко А.А., Корнев В.Н., Модестов М.Б. «Электронагревательная ткань, нагревательный элемент на ее основе и средство соединения нагревательного элемента с источником электропитания (варианты)», патент РФ № 2145984, М., 2000, Бюллетень № 6, 24 с.

Дата поступления: 20 февраля 2019 г.