

УДК 621.3.036

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-493-502>

Оригинальная статья

Влияние металлизации поверхности многослойных углеродных нанотрубок на рабочие режимы композитных электронагревателей для защиты от обледенения

А. В. Щегольков^{✉,1}, А. В. Щегольков²

¹Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Российская Федерация

²Московский политехнический университет, г. Москва, Российская Федерация

[✉]energynano@yandex.ru

Аннотация

Повышенное внимание, связанное с развитием северных регионов страны, в том числе Арктики, делает разработку энергоэффективных технологий важной научно-технической задачей. Одним из ключевых направлений исследований по освоению северных регионов страны является развитие арктического материаловедения, которое подразумевает использование новейших подходов в смежных междисциплинарных областях науки, таких как нанотехнология и электротехнология. Разработка электронагревательного композиционного материала на основе кремнийорганического эластомера (полимерная матрица) и металлизированных многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) – проводящего наполнителя, с функцией защиты от обледенения позволяет создать эффективную электротермическую систему борьбы с наледью. В статье представлены результаты исследования электронагревателя на основе проводящего эластичного композита с эффектом саморегулирования температуры. Для модификации кремнийорганического композита использованы МУНТ с металлизированной поверхностью, что позволило усилить чувствительность нагревательных элементов к образованию наледи. Снижение температуры окружающей среды, при которой полимерный композит обладает отличающимся значением электрофизических параметров, формирует эффект адаптивного электронагрева относительно температуры окружающей среды. Результаты проведенных исследований имеют важное практическое значение, так как нагревательные элементы могут обладать различным составом и соответственно эксплуатироваться при низких температурах. Нагревательные элементы могут эффективно подстраивать режим нагрева под температурные условия окружающей среды, что позволяет экономить электрическую энергию. Время нагрева, в течение которого происходит таяние льда, составляет 210 с, и динамика изменения значения потребляемого тока коррелирует с температурой окружающей среды, что соответствует эффекту саморегулирования температуры.

Ключевые слова: обледенение, эластомер, углеродные нанотрубки, электрический нагреватель, антиобледенительные системы

Финансирование. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (№ 24-29-00855), <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

Для цитирования: Щегольков А.В., Щегольков А.В. Влияние металлизации поверхности многослойных углеродных нанотрубок на рабочие режимы композитных электронагревателей для защиты от обледенения. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2024;29(3):493–502. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-493-502>

Original article

The impact of surface metallization on multilayer carbon nanotubes regarding the operational characteristics of composite electric heaters utilized for anti-icing protection

Alexander V. Shchegolkov^{✉,1}, Aleksei V. Shchegolkov²

¹Tambov State Technical University, Tambov, Russian Federation

²Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation

[✉]energynano@yandex.ru

Abstract

The design of energy-efficient heating techniques is emerging as a crucial scientific and technical challenge, driven by the growing focus on the advancement of the northern regions of the country, particularly the Arctic. Research in

Arctic materials science, which incorporates cutting-edge techniques from various interdisciplinary fields like nanotechnology and electrotechnology, could become a key area of study for the development of these northern regions. The development of an electric heating composite material that utilizes an organosilicon elastomer as the polymer matrix and metallized multilayer carbon nanotubes (MWCNTs) serving as a conductive filler with enhanced resistance to icing enables an efficient electrothermal anti-icing system. The paper presents the results of the study of an electric heater based on the wiring of an elastic composite with the effect of temperature self-regulation. For modification of the silicon-organic compound, metallized MWCNTs were used, which increased the sensitivity of heating elements to ice formation. When the ambient temperature decreases, the polymer composite has different values of electro-physical parameters, which create the effect of acceptable electrical heating concerning the ambient temperature. The research results have significant practical value, as the heating elements can have different compositions and can be operated at low temperatures. Heating elements can effectively adjust the heating mode to the ambient temperature conditions, saving electrical energy. The heating time required for the ice to melt is 210 seconds, and the dynamics of the current consumption value correlate with the ambient temperature, reflecting the effect of temperature self-regulation.

Keywords: icing, elastomer, carbon nanotubes, electric heater, anti-icing systems

Funding. This study was supported by the grant of the Russian Science Foundation (No. 24-29-00855), <https://rscf.ru/project/24-29-00855/>.

For citation: Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. The impact of surface metallization on multilayer carbon nanotubes regarding the operational characteristics of composite electric heaters utilized for anti-icing protection. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2024;29(3):493–502. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2024-29-3-493-502>

Введение

В настоящее время Арктика находится в центре внимания как РФ, так и всего мира. Разработка новых технологий в сфере материаловедения, с адаптацией новых материалов к эксплуатации в условиях отрицательных температур до $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$, повышает эффективность освоения Арктики и Крайнего Севера [1]. В этом отношении получение новых, а также улучшение свойств уже известных (традиционных) материалов должно осуществляться с учетом экстремальных климатических условий Арктики [2]. Следовательно, важным аспектом, связанным с освоением Арктики, является развитие арктического материаловедения, которое подразумевает использование новейших технологий [2], а также методов получения новых материалов, находящихся на стыке междисциплинарных наук.

Одним из негативных явлений, которое наносит ощутимый ущерб оборудованию, энергетическим установкам, а также транспортным средствам, является обледенение, т. е. процесс образования льда на различных поверхностях. Обледенению, например, подвержены линии электропередач высокого напряжения, лопасти ветряных турбин, самолетов и вертолетов, на поверхности которых зачастую образуется толстый слой льда, приводящий к серьезным потерям энергии и ухудшению аэродинамических характеристик. Существует также серьезная проблема с безопасностью авиаперелетов в условиях с высоким перепадом температур, который неблагоприятно ска-

зывается на эксплуатации технических средств. Известно большое количество различных методов и подходов профилактики и борьбы с образованием ледяного покрова [3].

Одним из наиболее эффективных методов профилактики обледенения является применение электротермических устройств, которые обладают эффектом саморегулирования температуры. Антиобледенительные системы – композиты на основе полимеров, армированные углеродным волокном, это эффективное техническое решение проблемы образования льда [4]. В [5] представлена разработка и испытание новой интегрированной многофункциональной композитной электротермической системы защиты от образования льда. Ветровые турбины обычно устанавливают на высоте или в прибрежной зоне, где их работа максимальна эффективна. Однако эксплуатация в этих местах характеризуется максимальными перепадом температур, а соответственно, и обледенением лопастей [6]. Термические устройства с функцией антиобледенения и растопки снега обеспечивают оптимальное состояние технических систем (ТС) в зимних условиях и имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными методами [7]. К таким устройствам относят автоматизированные системы контроля состояния поверхности ТС (достигнута погрешность измерения, равная 12 мкм) [8]. К другим способам предотвращения образования льда относятся использование химических реагентов. Применение нагревателей для транспортных средств с

двигателями внутреннего сгорания, к которым относятся дизельные силовые агрегаты, а также отдельные элементы авиационной техники, обусловлено их запуском в экстремальных условиях низких и отрицательных температур [9].

Перспективными материалами для антиобледенительных систем являются композиты на основе проводящих полимеров [10], которые обладают эластичностью, а также возможностью создания на их основе различных функциональных материалов. Для создания в полимерных композитах определенных свойств применяются различные углеродные дисперсные добавки или наполнители с заданными электро- и теплофизическими свойствами, например, углеродные нанотрубки (УНТ) [11,12]. В большинстве случаев свойства композитов для электронного нагрева определяет полимерная матрица [12, 13]. В [14] отмечается, что эффективные параметры антиобледенительных систем достигаются при высоком напряжении для случайно-ориентированных УНТ в составе композита при температуре -20 °С. Представленные в работе результаты демонстрируют высокий потенциал применения композитов УНТ/СПЭ в качестве антиобледенительной системы в линиях электропередач и других технических областях, требующих джоулевого нагрева при высоком напряжении 900–2800 В [15].

В качестве оценки эффективности работы электротермической антиобледенительной системы выступают следующие характеристики: градиент температур в объеме многослойной матрицы; температура поверхности антиобледенительной системы; температура талой воды. В результате анализа этих параметров производится оптимизация энергопотребления на основе модели антиобледенительной системы [16].

Нагреватели с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ПТКС) имеют высокий уровень энергоэффективности по сравнению с резистивными металлическими или керамическими нагревателями. При использовании нагревателей в портативных устройствах должны выполняться требования к снижению массогабаритных характеристик, а также улучшению гибкости и стабильности эксплуатации в экстремальных условиях. В [17] говорится об исследовании, результатом которого стал новый тип материала с ПТКС и удельным сопротивлением $400 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при низких и отрицательных температурах. При этом, как утверждают авторы статьи [17], материал обладает улучшенной тер-

мической стабильностью в температурном диапазоне от -20 до -120 °С.

В [18] были продемонстрированы композиты с превосходными джоулевыми характеристиками нагрева при отрицательных температурах. Нагревательному элементу потребовалось всего 31 с, чтобы нагреть аккумуляторную батарею до 0 °С при начальной температуре -20 °С. Предполагается, что представленные в работе композиты обладают высокой динамикой нагрева и имеют также высокий потенциал применения в качестве высокоэффективной технологии управления температурой аккумуляторных батарей при отрицательных температурах.

Следует отметить, что немаловажным фактором является технология получения УНТ, которая непосредственным образом определяет свойства композита в целом, такие как: механические, технические, эксплуатационные [19–21]. УНТ, полученные по СВЧ-технологии на разных режимах синтеза, обладают различными электро- и теплофизическими свойствами для электронного нагрева композитов [21]. Электронагревательные композиты с ПТКС характеризуются нелинейной зависимостью изменения температур от электрических параметров (напряжение и ток), обусловленной переменным потреблением электрической энергии. В [22] авторами исследуются причины образования сосулек и наледи на крышах зданий, сооружений и их опасность. Представлены методы и средства удаления сосулек и наледи: от специальных антиобледенительных систем и модернизации водосточных систем зданий и сооружений до механических – с помощью ручных инструментов. В [23] представлена приближенная температурная характеристика электрического нагревателя постоянной мощности, находящегося внутри шарового слоя.

В [24] рассмотрены структуры и параметры УНТ с учетом прочности при растяжении, удельным модулем упругости, плотности, а также относительное удлинение при разрыве, относительная остаточная деформация после разрыва и модуль упругости при 300%-й деформации полимерных композиционных материалов. В [25] установлено, что реальный (эффективный) модуль упругости УНТ (агломератов) является функцией жесткости полимерной матрицы с учетом межфазной области, которая может быть армирующим элементом нанокompозитов, как и наполнитель. В [26] введена степень дисперсии наполнителя, которая связана с функцией размера агрегатов

наполнителя и его содержания. Показана взаимосвязь уровня дисперсии наполнителя и степени усиления, что дает возможность прогнозирования свойств нанокompозитов. В [27] выявлено, что при анализе плотности УНТ необходим учет реальной (фрактальной) структуры поверхности. В [28] установлено, что для нанокompозита необходимо контролировать жесткость полимера и концентрацию УНТ. Характерно, что эффективный модуль упругости дисперсного наполнителя может быть как ниже, так и выше его номинальной величины. В [29] продемонстрирован перспективный технологический подход, связанный с использованием проводящих эластичных материалов, имеющих различную геометрию для систем борьбы с наледью. Основным дисперсным наполнителем являются МУНТ. Показаны принцип работы и возможности использования в технических системах. В то же время имеется потенциал, позволяющий улучшить работу нагревателей, связанный с применением металлизированных МУНТ.

Целью исследования является разработка композитного электронагревателя с эффектом саморегулирования температуры (антиобледенительной системы) на основе эластичной полимерной



Рис. 1. Прототип нагревательного элемента

Fig.1. Prototype heating element

матрицы, с добавками МУНТ, обладающих металлизированной поверхностью, и анализ режима таяния льда на поверхности электронагревателя.

В соответствии с представленной целью исследования были поставлены следующие задачи:

1. Получение полимерного композита на основе кремнийорганического эластомера, модифицированного МУНТ с металлизированной поверхностью;
2. Исследование режима таяния льда с применением анализа термограмм поверхности нагревателей.

Материалы и методы

СВЧ-синтез МУНТ с использованием ферроцена ($C_{10}H_{10}Fe$) и графита осуществлялся в микроволновой печи Galanz MOS-2009MW (мощностью 700 Вт, Китай). Предварительно ферроцен и графит в соотношении 5:1 подвергались механоактивации в аппарате вихревого слоя (АВС) в течение 20 с для получения развитой поверхности и лучшего контакта смеси с полимерной матрицей.

Методика получения полимерного композита. Полимерный композит получали путем добавления МУНТ в кремнийорганический компаунд (Силагерм 8030), последовательно, сначала в компонент А и Б (отвердители) соответственно. Компаунд тщательно перемешивали на установке WiseStir HT 120DX (Корея) при 300 об./мин в течение 5 мин. Для получения греющего композита использованы металлизированные углеродные нанотрубки, полученные по СВЧ-технологии.

Заданную геометрию и форму полимерных композитов получали в специальной формочной емкости до образования нагревательных элементов в виде плоских пластин в соответствии с [19–21, 29]. После этого полученные образцы помещались в вакуумный термощкаф для удаления летучих компонентов, содержащихся в полимерной матрице. Полученный прототип электронагревателя с эффектом саморегулирования температуры представлен на рис. 1.

Для электропитания электронагревателя использовали программируемый блок питания (БП) Актаком 1351 (Актаком, Россия).

Методика исследования температур бесконтактным методом. Для исследования температурного поля на поверхности нагревательного элемента использовали тепловизор «Testo-875-1»

с оптической линзой $32 \times 23^\circ$ (SE & Co. KGaA, Testo, Ленцкирх, Германия). Измерения проводились в затемненном помещении в отсутствие влияния солнечного излучения. Температуру полимерных композитов измеряли контактным методом с помощью двухканального термометра «Testo 992» (SE & Co. KGaA, Testo, Lenzkirch, Германия) и на основании полученных данных производили сравнение с температурами, которые были получены с помощью тепловизора «Testo-875-1». Также определялись коэффициенты излучения (излучательная способность поверхности) полимерного композита. Тепловизионные изображения полимерных композитов обрабатывали с помощью программы IIRSoft v 5.0 SP1.

Методика исследования полимерных композитов. Морфологию МУНТ и графита изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа «TESCAN LYRA 3» (Чехия). Электропитание нагревательных элементов осуществляли с помощью программируемого блока питания (БП) в режиме пульсирующего потенциала. В этом режиме МУНТ с металлизированной поверхностью усиливали электрическое поле поляризуемого полимерного композита. Электрические параметры были измерены с помощью мультиметра «UNIT UT71E» (Китай)

Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлены изображения МУНТ, полученные с помощью СЭМ и ПЭМ.

МУНТ, синтезированные по СВЧ-технологии, представляют собой нитевидные образования (см. рис. 2, а), покрытые железом, а на рис. 2, б показаны отдельно взятые углеродные нанотрубки на просвет (ПЭМ).

На рис. 3 показаны температурные поля нагревательных элементов (плоских пластин).

При подаче питающего напряжения на нагревательные элементы температура на поверхности нагревателей повышается, в результате теплового воздействия происходит процесс таяния льда (см. рис.3). Согласно рис. 4, граница обледеневшей поверхности сужается интенсивно (см. рис. 4 а–е), из-за выхода нагревательного элемента в рабочий режим. В начальный момент времени образовавшийся на поверхности нагревателя лед, толщиной 5 мм и площадью поверхности $S = 5 \times 5$ мм растапливался в течение 210 с. Для нагревателя в режиме предварительного включения (ждуший режим) наледь практически не

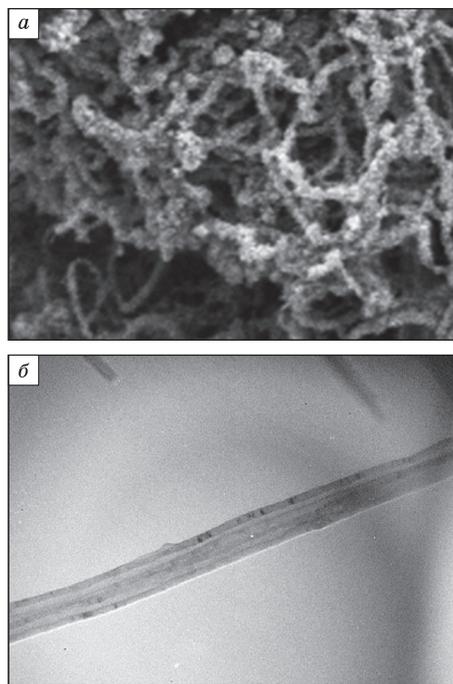


Рис. 2. СЭМ-изображения МУНТ (а) и ПЭМ-изображения МУНТ (б)

Fig. 2. SEM images of MWCNTs (a) and PEM images of MWCNTs (b)

образуется. Интенсивность нагрева коррелируется с мощностью нагревателя, которая в свою очередь регулируется изменением значения переменного питающего напряжения (~0–220 В) на БП, что соответственно приводило к изменению потребляемого тока.

В итоге, в процессе нагрева, на исследуемой поверхности (рис. 4, а–и), образовалась оттаявшая вода, температура, которой составляла 2°C . При этом обеспечивался динамический нагрев, связанный с изменением электрофизического состояния МУНТ, обусловленный изменением температурного поля полимерного композита (рис. 3).

На рис. 5 представлена нелинейная зависимость изменения силы тока при изменении питающего переменного напряжения на полимерном композитном нагревателе ($U_{\text{п}}$: 9, 12, 17, 9,1 В). Согласно рис. 5, образованный при подаче напряжения пик соответствует значению пускового тока, равному 1,5 А и стабилизированному до 0,2 А.

Таким образом, температура полимерных композитов может задаваться двумя способами: изменением окружающих условий, температурный режим в этом случае изменяется в узком интервале (эффект саморегулирования температуры);

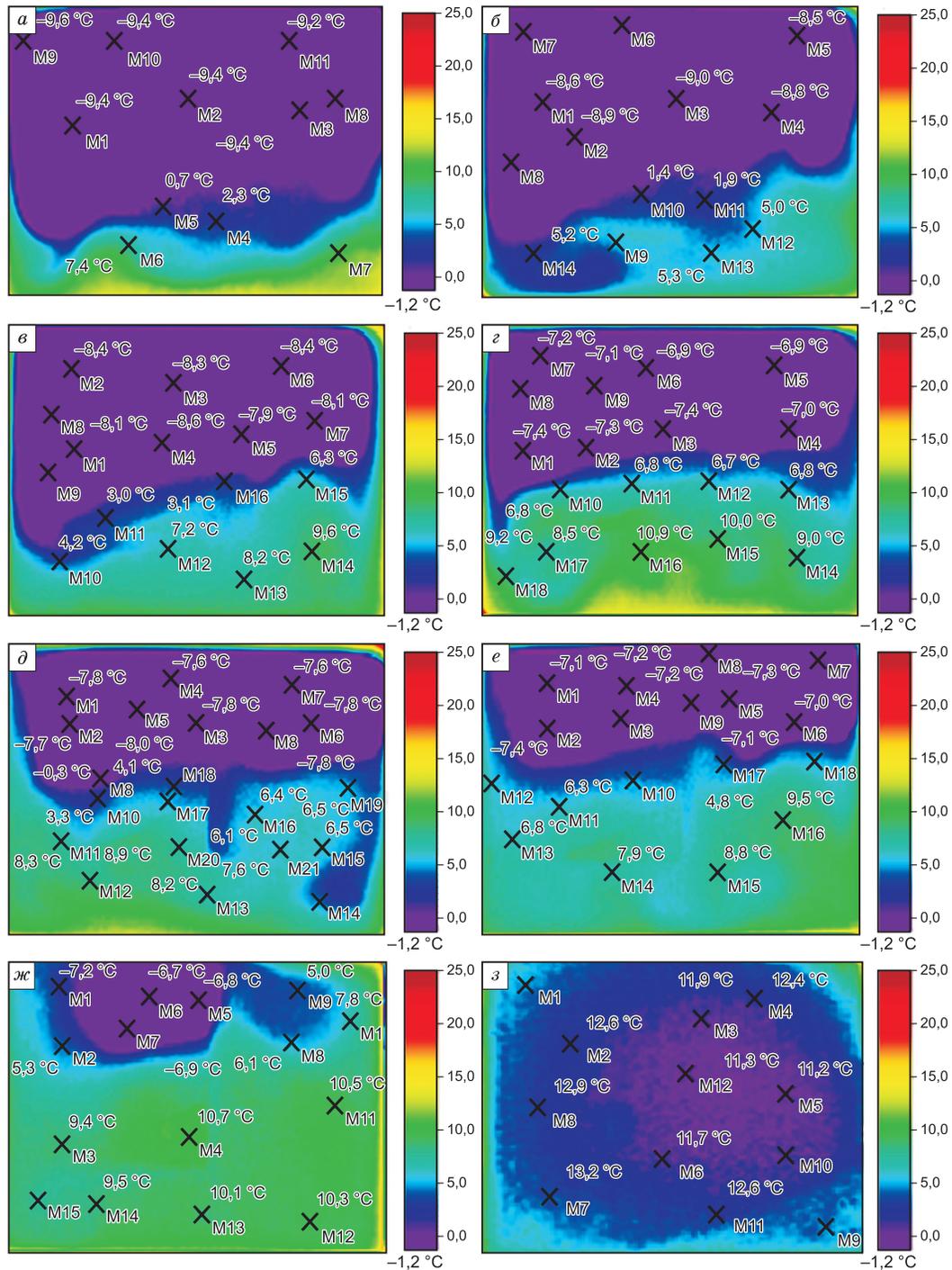


Рис. 3. Термограммы поверхности нагревателей с наледью: включение (а), 30 с (б), 60 с (в), 90 с (г), 120 с (д), 150 с (е), 180 с (ж), 210 с (з)

Fig. 3. Thermogram heater surfaces covered in ice: (a) on; (б) 30 s; (в) 60 s; (г) 90 s; (д) 120 s; (е) 150 s; (ж) 180 s; (з) 210 s.

непосредственно управлением переменным питающим напряжением БП – температурный режим изменяется в широком диапазоне.

В ряде случаев важно не допустить обледенение поверхности и своевременно удалить наледь, что реализуется благодаря использованию режи-

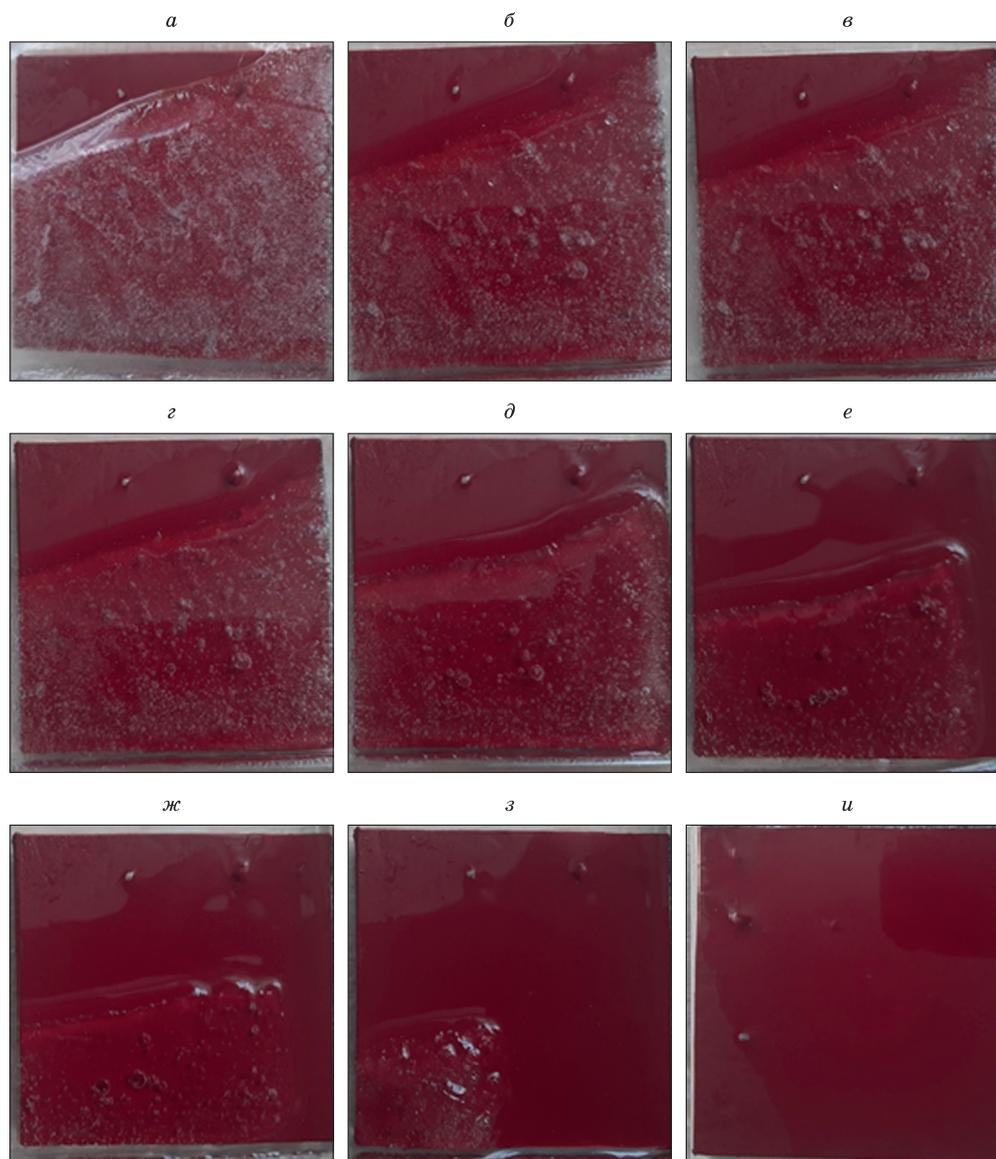


Рис. 4. Таяние льда в зависимости от времени:

(а) включение; (б) 30 с; (в) 60 с; (г) 90 с; (д) 120 с; (е) 150; (ж) 180 с; (з) 210 с.

Fig. 4. Ice melting over time:

(a) on; (б) 30 seconds; (в) 60 seconds; (г) 90 seconds; (д) 120 seconds; (е) 150 seconds; (ж) 180 seconds; (з) 210 seconds.

ма работы нагревателя на минимальном значении питающего напряжения (режим ожидания).

Заключение

Получен композитный нагревательный элемент на основе эластомера, модифицированного МУНТ с металлизированной поверхностью (проводящий наполнитель). Исследованы режимы таяния льда с применением анализа термограмм поверхности нагревателей (серия тепловизион-

ных снимков поверхности нагревателя) в режиме саморегулирования температуры.

Установлено, что нагревательные элементы обладают возможностью изменять свои электрофизические свойства в зависимости от температуры, благодаря использованию наноструктурированного наполнителя – металлизированных МУНТ, полученных СВЧ-синтезом. В процессе нагрева на исследуемой поверхности образовывалась оттаявшая вода, температура которой со-

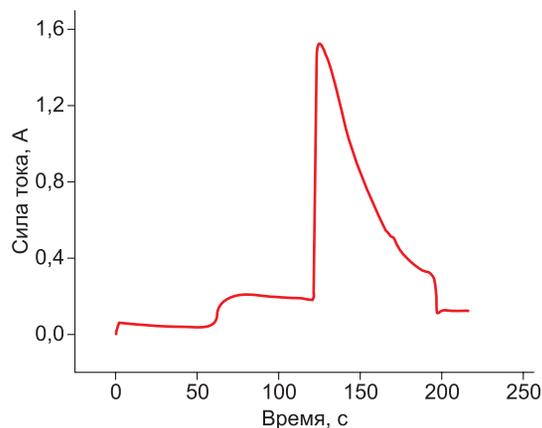


Рис. 5. Изменение силы тока в заданном интервале времени при переменном напряжении

Fig. 5. Variation of electric current over a specific time period under alternating voltage.

ставляла 2 °С. При этом композитом обеспечивалась динамика изменения величины проходящего тока, связанная с переменным электрофизическим состоянием МУНТ, которое обуславливалось в свою очередь изменением температурного поля полимерного композита

Для активного режима таянья льда толщиной 5 мм и площадью $S = 5 \times 5$ мм потребовался режим нагрева с пусковым током, равным 1,5 А и стабилизированным током до 0,2 А (в течение времени 210 с).

Список литературы / References

1. Коваленко М.С., Сибилева Е.В. Ресурсный состав Арктики, сложности добычи и перспективы ее развития. *Арктика XXI век. Гуманитарные науки*. 2023; 31(1):26–36. <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.44.59.003>
Kovalenko M.S., Sibileva E.V. The Arctic's resource composition, production challenges and prospects. *Arctic XXI century. Humanitarian sciences*. 2023;31(1):26–36. (In Russ.). <https://doi.org/10.25587/SVFU.2023.44.59.003>
2. Бузник В.М., Николаев А.И. Экологические аспекты арктических материалов и технологий. *Химия в интересах устойчивого развития*. 2022;30(1):29–40. <https://doi.org/10.15372/KhUR2022355>
Buznik V.M., Nikolaev A.I. Ecological aspects of the Arctic materials and technologies. *Chemistry for sustainable development*. 2022;30(1):26–36. <https://doi.org/10.15372/CSD2022355>
3. Шорина Н.С. Проблема обледенения и краткий обзор современных методов борьбы с ним. В кн.: *Труды международного симпозиума «Надежность и качество»*. Т. 2. Пенза: Изд-во Пензенского государственного университета; 2010. С. 91–93.
Shorina N.S. The problem of icing and a brief review of modern methods of its control. In: *Proceedings of the*

symposium "Reliability and Quality". V. 2. Penza: Penza State University Publishing House; 2010, pp. 91–93. (In Russ.)

4. Mao H., Lin X., Li Z., et al. Anti-icing system performance prediction using POD and PSO-BP neural networks. *Aerospace*. 2024;11(6):430. <https://doi.org/10.3390/aerospace11060430>

5. Xiaofeng G., Qian Y., Haoran Z., Wei D. Integrated composite electrothermal de-icing system based on ultrathin flexible heating film. *Applied Thermal Engineering*. 2024;236:121723. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121723>

6. Peiyi X., Donglai Z., Wei G., Anshou L. Hybrid de-icing method combining electrothermal system and ultrasonic guided waves. *Applied Acoustics*. 2024; 217: 109804 <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2023.109804>

7. Cortés A., Sánchez-Romate X.F., Martínez-Díaz D., et al. Recyclable multifunctional nanocomposites based on carbon nanotube reinforced vitrimers with shape memory and joule heating capabilities. *Polymers*. 2024;16(3): 388. <https://doi.org/10.3390/polym16030388>

8. Зуев В.О., Двойнишников С.В., Меледин В.Г. и др. Измерение геометрических параметров наледи методом фазовой триангуляции в ограниченном объеме с преломлением оптических сигналов. *Теплофизика и аэромеханика*. 2023;30(1):127–132.

Zuev V.O., Dvoinishnikov S.V., Meledin V.G., et al. Measuring the geometrical parameters of ice by phase triangulation method in a limited volume with refraction of optical signals. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2023;30(1):127–132. (In Russ.)

9. Deng Y., Liu H., Zhao X., E J., Chen J. Effects of cold start control strategy on cold start performance of the diesel engine based on a comprehensive preheat diesel engine model. *Applied Energy*. 2018;210:279–287. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.093>

10. Борукаев Т.А., Гаев Д.С. Физико-механические свойства композитов на основе полиэтилена высокой плотности и технического углерода. *Прикладная физика*. 2017;(5):76–81.

Borukaev T.A., Gaev D.S. Physico-mechanical properties of composites based on high-density polyethylene and technical carbon. *Applied Physics*. 2017;(5):76–81. (In Russ.)

11. Vertuccio L., Foglia F., Pantani R., et al. Carbon nanotubes and expanded graphite based bulk nanocomposites for de-icing applications. *Composites Part B: Engineering*. 2021;207. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108583>

12. Марков А.В., Гущин В.А., Марков В.А. Термоэлектрические характеристики электропроводящих композитов на основе смесей кристаллизующихся и аморфных полимеров с техническим углеродом. *Пластические массы*. 2019;(1-2):44–47.

Markov A.V., Gushchin V.A., Markov V.A. Thermoelectric characteristics of electrically conducting composites based on mixtures of crystallising and amorphous

- polymers with technical carbon. *Plastic Masses*. 2019;(1-2): 44–47. (In Russ.)
13. Lagrève C., Feller J.F., Linossier I., Levesque G. Poly (butylene terephthalate) / poly (ethylene-co-alkylacrylate) / carbon black conductive composites: Influence of composition and morphology on electrical properties. *Polymer Engineering and Science*. 2001;41:1124–1132. <https://doi.org/10.1002/pen.10813> 2001
14. Ha J.-H., Chu K., Park S.-H. Electrical properties of the carbon-nanotube composites film under extreme temperature condition. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2019;19(3):1682–1685. <https://doi.org/10.1166/jnn.2019.16250>
15. Xiaoli W., Yunyi L., Ting Y., et al. The alignment of CNTs perpendicular to electric field resulted in effective electrothermal de/anti-icing performance at high voltage for CNT/XLPE composites. *Composite Structures*. 2024;330:117835, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.117835>.
16. Xiaofeng G., Qian Y., Haoran Z., Wei D. Optimization of power distribution for electrothermal anti-icing systems by differential evolution algorithm. *Applied Thermal Engineering*. 2023;221:119875. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119875>.
17. Jian-Min H., Yin-Fa Y., Yi-Tao S., et al. Positive temperature coefficient material based on silicone rubber/ paraffin/ graphite/ carbon nanotubes for wearable thermal management devices. *Chemical Engineering Journal*. 2024;493:152427. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.152427>.
18. Zhi-Xing W., Pei-Yao D., Wen-Jing L. Highly rapid-response electrical heaters based on polymer-infiltrated carbon nanotube networks for battery thermal management at subzero temperatures. *Composites Science and Technology*. 2023;231:109796. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2022.109796>.
19. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Комаров Ф.Ф. и др. Электро- и теплофизические свойства кремний-органических эластомеров, модифицированных углеродными нанотрубками и микроразмерными металлическими структурами. *Российский химический журнал*. 2023;67 (4):48–53. <https://doi.org/10.6060/rcj.2023674.9>.
- Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Komarov F.F., et al. Electro- and thermophysical properties of organosilicon elastomers modified with carbon nanotubes and micro-sized metallic structures. *Russian Chemical Journal*. 2023;67 (4):48–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.6060/rcj.2023674.9>.
20. Щегольков А. В., Щегольков А. В., Земцова Н. В. Аспекты применения электронагревателей с эффектом саморегулирования температуры для систем ИК-нагрева и тепловентиляторов. *Вести высших учебных заведений Черноземья*. 2022;18(1):25–39. https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_1_25.
- Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V., Zemtsova N.V. Aspects of application of electric heaters with the effect of temperature self-regulation for IR-heating systems and heat fans. *Vesti vysshee vysshee obrazovaniye Chernozemlya*. 2022;18(1):25–39. (In Russ.) https://doi.org/10.53015/18159958_2022_18_1_25.
21. Щегольков А.В., Щегольков А.В., Чумак М.А. Синтез углеродных нанотрубок с помощью СВЧ излучения для модификации эластомера с улучшенной электро- и теплопроводностью. *Перспективные материалы*. 2024;(4):54–65. <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2024-4-54-65>.
- Shchegolkov A. V., Shchegolkov A. V., Chumak M. A. Synthesis of carbon nanotubes using microwave radiation for elastomer modification with improved electrical and thermal conductivity. *Perspective Materials*. 2024;(4):54–65. (In Russ.) <https://doi.org/10.30791/1028-978X-2024-4-54-65>.
22. Горбунова Л.Н., Панова З.Н. Анализ методов и средств борьбы с наледью и сосульками. *Вестник КрасГАУ*. 2012;71(8):206–209.
- Gorbunova L.N., Panova Z.N. Analysis of methods and means of struggle with ice and icicles. *Vestnik KrasGAU*. 2012;71(8):206–209. (In Russ.)
23. Бойков А.Г. Температурная характеристика электрического нагревателя в начале нестационарного распространения тепла в шаровом слое. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2010; 38(19):105–107.
- Boikov A.G. Temperature characteristic of an electric heater at the beginning of unsteady heat spreading in a globular layer. *Bulletin of Volgograd State Architecture and Construction University. Series: Construction and architecture*. 2010; 38(19):105–107. (In Russ.)
24. Родионов В.В., Мякишев А.М. Обзор применений углеродных нанотрубок в полимерных композиционных материалах. *Современные материалы, техника и технологии*. 2019;27(6):8–12.
- Rodionov V.V., Myakishev A.M. Review of applications of carbon nanotubes in polymer composite materials. *Sovremennye materialy, tekhnika i tekhnologii*. 2019;27(6):8–12. (In Russ.)
25. Магомедов М.А., Долбин И.В. Оценка степени усиления нанокompозитов полимер/углеродные нанотрубки в рамках микромеханической и перколяционной моделей. *Справочник. Инженерный журнал*. 2024;328(7):3–7. <https://doi.org/10.14489/hb.2024.07.pp.003-007>.
- Magomedov M.A., Dolbin I.V. Estimation of the degree of reinforcement of polymer/carbon nanotube nanocomposites within the framework of micromechanical and percolation models. *Reference book. Journal of Engineering*. 2024;328(7):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/hb.2024.07.pp.003-007>.
26. Атлуханова Л.Б., Долбин И.В. Взаимосвязь свойств и степени дисперсии нанонаполнителя для нанокompозитов полимер/углеродные нанотрубки. *На-*

ноиндустрия. 2024;17(1):74–79. <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>.

Aflukhanova L.B., Dolbin I.V. Relationship between properties and degree of dispersion of nanofiller for polymer/carbon nanotube nanocomposites. *Nanoindustry*. 2024; 17(1):74–79. (In Russ.) <https://doi.org/10.22184/1993-8578.2024.17.1.74.79>.

27. Долбин И.В., Давыдова В.В., Кудрова Е.Г. Солодовник С.Г. Определение плотности углеродных нанотрубок. *Известия Кабардино-Балкарского государственного университета*. 2024;14(1):11–14.

Dolbin I.V., Davydova V.V., Kudrova E.G. Solodovnik S.G. Determination of density of carbon nanotubes. *Izvestiya Kabardino-Balkaria State University*. 2024;14(1):11–14. (In Russ.)

28. Долбин И.В., Магомедов Г.М., Козлов Г.В. Влияние жесткости полимерной матрицы на эффективность армирования нанокompозитов углеродными нанотрубками. *Известия высших учебных заведений*.

Физика. 2022;65(12):128–131. <https://doi.org/10.17223/00213411/65/12/128>.

Dolbin I.V., Magomedov G.M., Kozlov G.V. Influence of polymer matrix stiffness on the efficiency of reinforcement of nanocomposites by carbon nanotubes. *Izvestiya vysshee obrazovaniya*. Physics. 2022;65(12):128–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.17223/00213411/65/12/128>.

29. Щегольков А.В., Щегольков А.В. Антиобледенительные системы на основе эластомеров, модифицированных углеродными наноструктурами, с эффектом саморегулирования температуры. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2022;27(1):141–151. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-141-151>

Shchegolkov A.V., Shchegolkov A.V. Anti-icing systems based on elastomers modified with carbon nanostructures with the effect of temperature self-regulation. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2022;27(1):141–151. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-141-151>

Об авторах

ЩЕГОЛЬКОВ Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>, Scopus Author ID: 57193830510; ResearcherID: S-1475-2016, SPIN: 4893-5232, e-mail: Energynano@yandex.ru

ЩЕГОЛЬКОВ Алексей Викторович, кандидат технических наук, доцент, <https://orcid.org/0000-0002-1838-3842>, Scopus Author ID: 58248982800, SPIN: 4929-5059, e-mail: alexxx5000@mail.ru

Вклад авторов

Щегольков Александр Викторович – разработка концепции, верификация данных, руководство исследованием; **Щегольков Алексей Викторович** – проведение исследований, редактирование рукописи

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

About the authors

SHCHEGOLKOV, Alexander Viktorovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-4317-0689>, Scopus Author ID: 57193830510; ResearcherID: S-1475-2016, SPIN: 4893-5232, e-mail: Energynano@yandex.ru

SHCHEGOLKOV, Alexei Viktorovich, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, <https://orcid.org/0000-0002-1838-3842>, Scopus Author ID: 58248982800, SPIN: 4929-5059, e-mail: alexxx5000@mail.ru

Authors' contribution

Shchegolkov Alexander Viktorovich – concept development, data verification, research management; **Shchegolkov Aleksei Viktorovich** – conducting research, editing the manuscript

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interests.

Поступила в редакцию / Submitted 11.06.2024

Поступила после рецензирования / Revised 06.08.2024

Принята к публикации / Accepted 12.08.2024