

6. <https://geographyofrussia.com/pochvy-zemelnye-i-lesnye-resursy-rossii/>

7. Барагунов Б.Я. Патент на изобретение «Пульсатор» №2111654 Барагунов Б.Я., Барагунов А.Б., приоритет изобретения 19.03.1996, дата регистрации в Гос. реестре 27.05.1998г.

8. Барагунов Б.Я. Доильный стакан. // Б.Я. Барагунов, Х.У.Бугов, А.Ш.Тешев, Х.Г. Урусмамбетов, А.Б. Барагунов /Патент РФ №2151498 от 27 июня 2000 г.

9. Барагунов А.Б. Патент на изобретение «Доильный стакан» № 22176932 от 27 ноября 2003 г.

10. Барагунов А.Б. Патент на изобретение «Доильный стакан» № 2625658 от 18.07.2017г. Бюл. № 20.

HEAT STORAGE NANOMODIFIED MATERIALS WITH CONTROLLABLE CHARGE AND DISCHARGE

Shchegolkov A.V.,
FSBEI HE TGTU, Tambov,
Trufanov B.S.,
Michurinsky State Agrarian University

Abstracts. The article presents research related to the development of heat-accumulating granules controlled by an electromagnetic field. Heat-accumulating materials have serious prospects for application in various technological processes of agriculture. This is especially true of the drying process. To develop heat-accumulating granules, a paraffin-based heat-accumulating matrix is used. To make the heat-accumulating matrix of properties that allow interacting with the electromagnetic field, carbon nanotubes were used. The granules of heat-accumulating material are distributed in various liquids with different density and thermal parameters. Studies have shown the ability to control the charge / discharge modes in the heat storage material. In order to understand the potential of the application of controlled charge / discharge modes, a method of mathematical modeling was developed, which showed possible options for improving heat accumulators with phase transition heat accumulating materials.

Keywords: thermal accumulator, carbon nanotubes, paraffin, magnetic field, thermal energy.

НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫЕ ТЕПЛОАККУМУЛИРУЮЩИХ МАТЕРИАЛЫ С УПРАВЛЯЕМЫМИ РЕЖИМАМИ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА

Щегольков А. В.
ФГБОУ ВО ТГТУ г. Тамбов,
Труфанов Б. С.
ФГБОУ ВО Мичуринский ГАУ, г. Мичуринск.

Аннотация. В статье представлены исследования связанные с разработкой управляемых электромагнитным полем теплоаккумулирующих гранул. Теплоаккумулирующие материалы имеют серьезные перспективы применения в различных технологических процессах сельского хозяйства. Особенно это касается процессов сушки. Для разработки теплоаккумулирующих гранул используется теплоаккумулирующая матрица на основе парафина. Для придания теплоаккумулирующей матрице свойств позволяющих взаимодействовать с электромагнитным полем были использованы углеродные нанотрубки. Гранулы теплоаккумулирующего материала распределяются в различных жидкостях обладающих разной плотностью и теплофизическими параметрами. Проведенные исследования показали возможность управлять режимами заряда/разряда в теплоаккумулирующем материале. С целью уточнения потенциала применения управляемых режимов заряда/разряда была разработана

методика математического моделирования, которая может быть использована при нахождение возможных вариантов совершенствования тепловых аккумуляторов с фазопереходными теплоаккумулирующими материалами.

Ключевые слова: тепловой аккумулятор, углеродные нанотрубки, парафин, магнитное поле, тепловая энергия.

Повышение энергоэффективности промышленности и АПК связано с разработкой новых технических систем накопления и распределения тепловой энергии. Особую роль в создание энергоэффективных комплексов могут приобрести тепловые аккумуляторы (ТА). Основной ТА являются теплоаккумулирующие материалы (ТМ), которые определяют основные энергетические режимы и конструктивные параметры ТА. В свою очередь ТА могут быть использованы в процессе сушки, термообработке растительных материалов, повышение эффективности отопления зданий и сооружений и т.д.

Существует большое количество ТМ (органических, неорганических и эвтектических), которые можно идентифицировать, как с точки зрения температуры плавления, так и скрытой теплоты плавления. Однако, кроме

температуры плавления в рабочем диапазоне, большинство ТМ не в полной мере удовлетворяют критериям, необходимым для ТА. Поскольку ни один материал не может иметь все необходимые свойства для идеального ТМ. По этой причине используют доступные материалы и пытаются улучшить физические свойства для повышения эффективности работы таких ТМ в составе проектируемых ТА. [1]

Наиболее эффективными считаются ТМ способные накапливать тепловую энергию в фазовом переходе [2-7]. Дальнейшее развитие ТМ может быть связано с получением новых функциональных возможностей, за счет реализации ферромагнитных свойств в самом материале. Однако, материалы обладающие способностями к обратимым фазовым переходам, как правило парамагнетики. Для придания им ферромагнитных свойств необходимо введение ферромагнитных частиц. Это затруднительно, так как ферромагнитные частицы выступают инородными структурами и выпадают в осадок. По этой причине следует рассматривать особые технологические приемы, которые позволяют ввести в их структуру ферромагнитные частицы.

В сфере технологий создания ТМ развиваются новые технологии связанные с разработкой гранулированных ТМ.[8]

В исследовании [9] используется геополимер, полученный из промышленных отходов и дюнного песка (DS) путем щелочно-активированной полимеризации. Этот материал используют в качестве оболочки для предотвращения утечки парафина инкапсулированного в керамзит.

Однако, технология гранулирования значительно снижает накопительные способности фазопереходных материалов. Так, как происходит замещение фазопереходного материала на материал оболочку. В проведенных исследованиях не рассматриваются вопросы связанные с возможностью управления процессами заряда/разряда ТА за счет реализации магнитных свойств для ТМ.

Разработка методики математического моделирования процессов теплоаккумуляции в материалах с фазовыми переходами

Для ТА работающего в режиме накопления тепловой энергии от воздушного потока, на основе теплового баланса, разработана математическая модель. Данная модель позволяет с допустимой точностью произвести расчет параметров и характеристик ТМ в ТА. Учитываются внутренние площади теплообмена и теплофизические особенности среды. Математическая модель представлена в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

$$\begin{aligned}
 \rho_{\text{эн}} C_{\text{эн}} h_{\text{эн}} F_{\text{эн}} \frac{dT_{\text{эн}}}{d\tau} &= (P_{\text{эн}} + P_{\text{за}}) - K_{1-2} F_1 (T_{\text{эн}} - T_{\text{за}}) - K_1 F_{11} (T_{\text{за}} - T_{\text{окр}}); \\
 \rho_{\text{за}} C_{\text{за}} h_{\text{за}} F_{\text{за}} \frac{dT_{\text{за}}}{d\tau} &= K_{1-2} F_1 (T_{\text{эн}} - T_{\text{за}}) - K_{2-3} F_2 (T_{\text{эн}} - T_{\text{т}}); \\
 \rho_{\text{т}} C_{\text{т}} V_{\text{т}} \frac{dT_{\text{т}}}{d\tau} &= K_{2-3} F_2 (T_{\text{эн}} - T_{\text{т}}) - K_3 F_3 (T_{\text{т}} - T_{\text{окр}}); \\
 \text{начальные условия } \tau > 0; & T_{\text{за}} = T_{\text{эн}} = +20^\circ\text{C}; T_{\text{топ}} = T_{\text{окр}} = 20^\circ\text{C}; T \equiv T(\tau); \\
 \text{параметры варьирования } P_{\text{за}}, & P_{\text{эн}}; P \equiv P(T),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $F_{\text{фм}}, F_{\text{о}}, F_1, F_2, F_{11}, F_3$ – площади внутренних элементов ТА, соответственно, м^2 ; Q – теплота теплоаккумулирующего слоя, Вт; $T_{\text{фм}}, T_{\text{о}}, T_{\text{в}}, T_{\text{окр}}$ – температура фазопереходного слоя (теплоаккумулирующего материала) и оболочки (алюминий) теплообменного элемента, воздушного потока и окружающей среды, соответственно, $^\circ\text{C}$; $C_{\text{фм}}, C_{\text{о}}, C_{\text{в}}$ – теплоемкость Дж/(кг \cdot $^\circ\text{C}$); $K_{1-2}, K_{2-3}, K_1, K_3$ – коэффициенты теплопередачи, Вт/($\text{м}^2\cdot^\circ\text{C}$); $\rho_{\text{фм}}, \rho_{\text{о}}, \rho_{\text{в}}$ – плотности фазопереходного материала, алюминия и воздушного потока, соответственно, кг/ м^3 ; $h_{\text{фм}}, h_{\text{о}}$ – высоты, соответственно, м; $V_{\text{в}}$ – объем воздуха, м^3 ; τ – время, с.

Так как ТА претерпевает фазовые изменения в процессе заряда/разряда то следует рассмотреть задачу Стефана.

Задача Стефана сводится к системе уравнений:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial T_1}{\partial \tau} &= a_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq \delta(\tau), \\
 \frac{\partial T_2}{\partial \tau} &= a_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2}, \quad \delta(\tau) \leq x \leq \infty,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

при граничных условиях:

$$\begin{aligned}
 T_1(0, \tau) &= t_{\text{н}}, \quad T_2(x, \tau) = t_{\text{о}}, \\
 T_1(\delta, \tau) &= T_2(\delta, \tau) = t_{\text{пл}}
 \end{aligned}$$

Здесь T_1 и T_2 – температура ТМ в разряженной и разряженной части; a_1 и a_2 , $\text{м}^2/\text{с}$ – коэффициенты теплопроводности ТМ в этих частях.

Решение для ТМ в разряженной части (вариационный метод):

$$T_1(x, \tau) = t_{\text{н}} \left(1 - \frac{x}{\delta(\tau)}\right) + A \left(1 - \frac{x}{\delta(\tau)}\right) \frac{x}{\delta(\tau)}$$

Из условия ортогональности невязки координатной функции

$$\left(1 - \frac{x}{\delta(\tau)}\right) \frac{x}{\delta(\tau)}$$

получим выражение для $\delta(\tau)$ в виде:

$$\delta(\tau) = \left[-60A \frac{a_1}{A + 5t_{\text{н}}} \right]^{\frac{1}{2}} \tau^{\frac{1}{2}} = \beta \tau^{\frac{1}{2}}.$$

Параметры A и β определяются с учетом температурного поля для условия на подвижной границе (условие Стефана), которое имеет вид:

$$w \rho_{\text{о}} r_{\text{пл}} \frac{\partial \delta}{\partial \tau} = \left(\lambda_{\text{м}} \frac{\partial T_1}{\partial x} \right)_{x=\delta-0}$$

Модифицирование парафинов углеродными нанотрубками

В емкость из силикона объемом $0,002 \text{ м}^3$ помещали УНТ (свой тип УНТ для каждого образца) и добавляли разогретый до $80 \text{ }^\circ\text{C}$ парафин марки П2. Смесь обрабатывается ультразвуком с частотой $22,5 \text{ кГц}$ в течение $1,5$ часов при перемешивании механической мешалкой (100 об/мин) и поддержании температурного режима на уровне $70 \text{ }^\circ\text{C}$. В итоге получали черный, непрозрачный материал (рис.1). Для синтеза УНТ использовали $\text{Co-Mo/Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MgO}$ и Ni/MgO катализаторы, полученные методом термического разложения.



Рисунок 1. Парафин, модифицированный УНТ

Исследование формоустойчивости в гранулированном состоянии, магнитной восприимчивости, электрофизических характеристик, плотности, теплопроводность, теплоемкости и температуры фазового перехода.

Исследование формоустойчивости в гранулированном состоянии

Гранулы модифицированного парафина приобретают различную форму в процессе гранулирования. Гранулирование происходит при механическом перетирании за счет поступательного и вращательного воздействия на наномодифицированный парафин металлической пластины – содержащей равноудаленные отверстия. Изменяя диаметр отверстий можно варьировать формой гранул. В качестве фазопереходного материала в гранулах выступает парафин. УНТ обеспечивает придание формы и способствует улучшению теплопроводности, а также в некоторой степени армирует парафин. На изменение формы гранул может повлиять температура среды в которой будут находиться гранулы, а также способность среды растворять материал связку – матрицу гранул (парафин) (рис.2). Гранулирование является способом распределения фазопереходного материала в среде, которая обеспечит эффективный теплообмен. Уменьшение размеров гранул способствует повышению эффективности теплообмена. При этом необходимо добиться наибольшей минимизации размеров гранул. Для этого следует рассмотреть двух стадийный подход. На первой стадии происходит изготовление гранул с минимально возможными размерами. На второй стадии за счет растворения гранул в жидкой среде – размер гранул уменьшается. При этом гранулы с минимальными размерами должны обладать постоянными размерами в установленном температурном диапазоне. Плотность гранул варьируется в зависимости от плотности жидкости в которой они будут распределяться. Это связано с необходимостью равномерного распределения гранул в жидкости.



Рисунок 2. Магнитоуправляемый гранулированный материал

Методика оценки формоустойчивости.

Для оценки формоустойчивости гранулированного, наномодифицированного, парафина было использовано 4 вида наномодифицированного материала с различными видами УНТ (полученных на различных катализаторах №1-4) и разным массовым процентным содержанием УНТ.

Для измерения плотности используется подход при котором из наномодифицированного парафина получают цилиндры с высотой 1 см и радиусом 4 см. На цилиндр помещается груз (от 30 до 100 гр.). Далее цилиндр помещается в емкость с водой и по объему вытесненной воды с учетом приложенного груза рассчитывается плотность модифицированного парафина. Сопоставление результатов полученных в данном методе с табличными данными справочника дает погрешность не более 1%.

Таблица 3 Модифицированный парафин с УНТ на катализаторе №1

№	Тип УНТ	Концентрация УНТ, %	Плотность, кг/м ³
1	УНТ №1	4	860
2		8	830
3		12	820
4		16	800

Таблица 4 Модифицированный парафин с УНТ на катализаторе №2

№	Тип УНТ	Концентрация УНТ, %	плотность
1	УНТ №2	4	855
2		8	825
3		12	815
4		16	795

Таблица 5 Модифицированный парафин с УНТ на катализаторе №3

№	Тип УНТ	Концентрация УНТ	плотность
1	УНТ №3	4	854
2		8	824,5
3		12	814
4		16	878

Таблица 6 Модифицированный парафин с УНТ на катализаторе №4

№	Тип УНТ	Концентрация УНТ	плотность
1	УНТ №4	2	838
2		4	817
3		6	811
4		8	779

Введение УНТ в матрицу парафина приводит к снижению его плотности. Наименьшая плотность свойственна образцу №4. Исходная плотность парафина 890 кг/м³. При этом уменьшение плотности парафина приведет к тому, что гранулы всплывут на поверхность жидкости. Для стабилизации плотности гранулированного материала и усиления магнитных свойств необходимо ввести ферромагнитный порошок. Добавки ферромагнитного порошка составят от 10 до 30 масс. %. При этом плотность возрастет. С учетом плотности жидкости возможно подобрать плотность наномодифицированного парафина. Это обеспечит витание гранул в объеме жидкости, что будет способствовать равномерному накоплению тепловой энергии. Для глицерина плотность наномодифицированного парафина составит 1260 кг/м³, для этиленгликоля 999 кг/м³, для пропиленгликоля 1036 кг/м³, и минерального масла 995 кг/м³, для дистиллированной воды 1000 кг/м³.

Гранулированный материал с соответствующей плотностью помещается в разные типы жидкости (пропиленгликоль, этиленгликоль, минеральное масло, глицерин, дистиллированная вода).

Жидкости располагались в пластиковых цилиндрических колбах(рис.3). Колбы помещали в воду. Температура воды задавалась в диапазоне от 25 до 95 °С. Шаг изменения температуры составил 5 °С. Выдержка при соответствующей температуре – 10 мин. Исследовались разные типы гранул полученных на разных типах УНТ. В диапазоне до 95 °С все гранулы (синтезированные с применением УНТ на 4-х типах катализаторов), располагавшиеся в различных жидкостях, сохранили свою начальную форму и не образовали агломератов. Однако, гранулы в минеральном масле растворяются до более мелких по диаметру гранул (рис.3). С правильно подобранной плотностью гранулы показывают максимально возможную стабильность в объеме колбы и находятся там без усадки. На УНТ синтезированных на катализаторах №1, №2 и №3, которыми модифицирован парафин, наблюдается потеря формы и сборка в крупные агрегаты, а также полное расплавление при температурах около 90°С.



Рисунок 3. Гранулированный материал в минеральном масле

Наилучший результат по формоустойчивости показывает образцы модифицированные УНТ синтезированные на 4 катализаторе. Наилучший результат соответствует максимально возможной концентрации в парафине УНТ.

Исследование магнитной восприимчивости

Исследование магнитной восприимчивости для магнитоуправляемых гранул проводилось с помощью воздействия постоянного магнита на колбу содержащую гранулы (рис.4). К боковой поверхности колбы подводили магнит – гранулы притягивались к магниту, тем самым изменяя свое положение в объеме пластиковой колбы.



Рисунок 4. Исследование магнитной восприимчивости гранул распределенных в жидкости

Уставлено влияние магнитного поля на перемещение гранул в жидкости. Режим перемещения гранул наблюдается уже при значении магнитной индукции 100 мТл.

Исследование теплоемкости и теплопроводности наномодифицированного парафина

Измерение теплофизических параметров модифицированного парафина проводились на приборах ИТ – λ – 400 (измерение теплопроводности (Вт/м²С)) и ИТ – С – 400 (измерение теплоемкости, (Дж/кг²С)) в режиме монотонного разогрева со средней скоростью 0,2 °С/с при адиабатических условиях.

Методика исследования температурного поля

Для исследования распределения температурного поля использовали бесконтактный метод измерения температуры. Использован тепловизор FLUKE Ti9 с приемником излучений 160 x 120 и матрицей в фокальной плоскости и диапазоном измерений от -20 °С до +250 °С, с погрешностью ± 5 °С.

Результаты анализа образцов наномодифицированного парафина

Согласно экспериментальным исследованиям (рис. 5), установлены температурные зависимости теплоемкости для чистого парафина и наномодифицированных парафинов с различными типами катализаторов №1,2,3 и 4 (рис. 5).

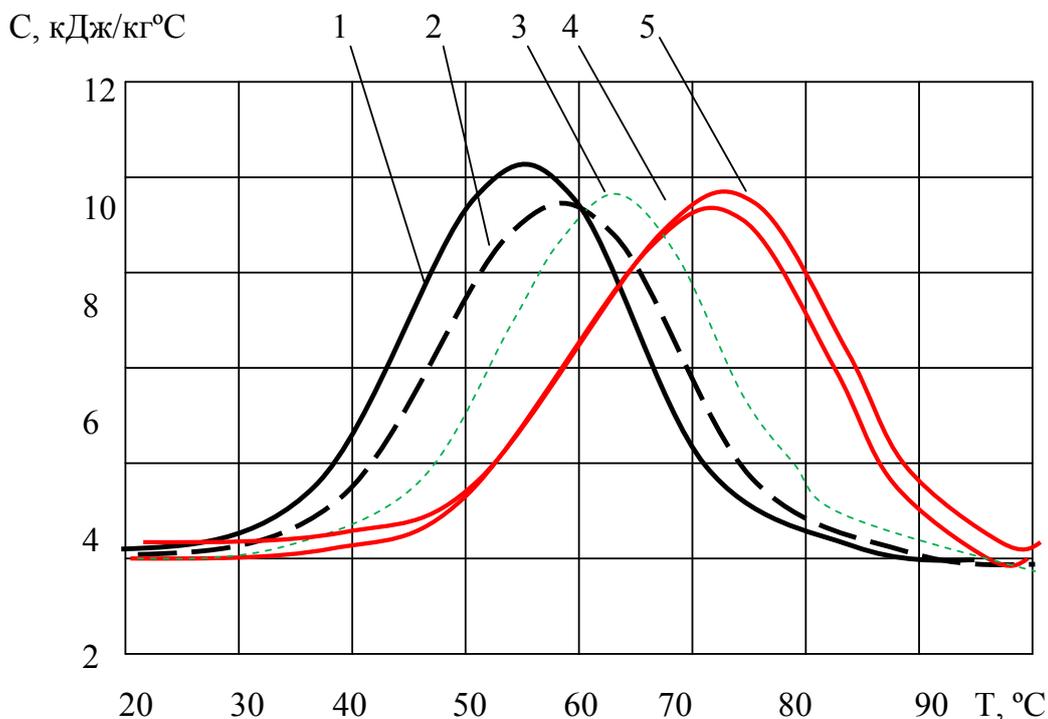


Рисунок 5. Температурная зависимость теплоемкости парафина, модифицированного УНТ: 1 – парафин; 2 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №1; 3 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №2; 4 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №3; парафин, 5 – модифицированный УНМ с катализатором №4.

На рис. 6. представлены исследования температурной зависимости теплопроводности парафина, модифицированного УНТ.

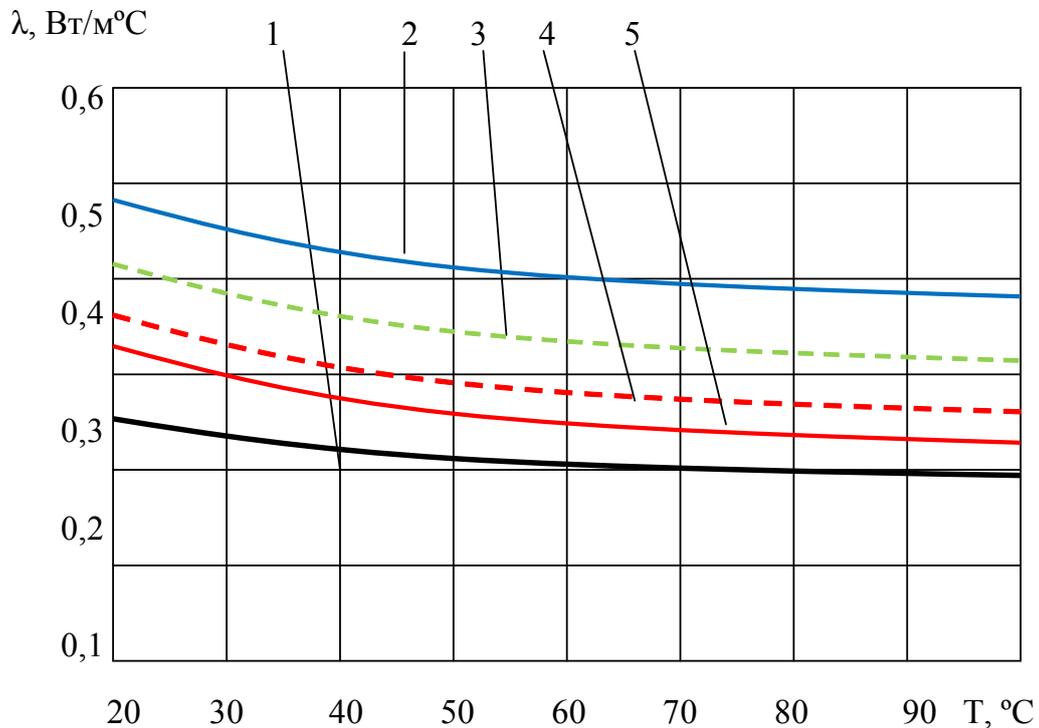
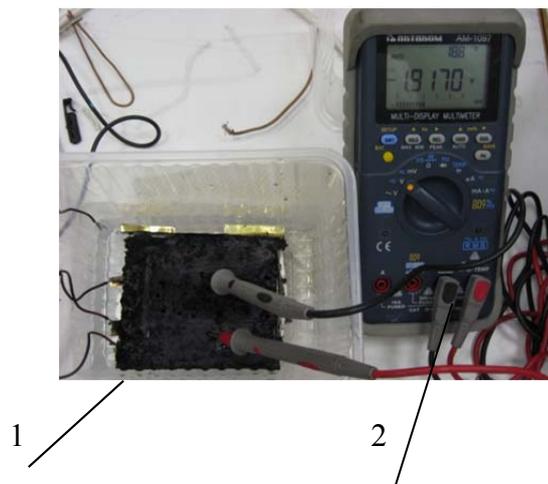


Рисунок 6. Температурная зависимость теплопроводности парафина, модифицированного УНТ: 1 – парафин; 2 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №1; 3 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №2; 4 – парафин, модифицированный УНМ с катализатором №3; парафин, 5 – модифицированный УНМ с катализатором №4.

Электрофизические параметры наномодифицированного парафина

На рисунке 7 представлено распределение электрического потенциала на поверхности наномодифицированного парафина, вызванное подачей на питающие электроды напряжения 24 В.



1 – наномодифицированный парафин ; 2 – мультиметр Актаком 1097
 Рисунок 7. Исследование напряженности электрического поля на поверхности наномодифицированного парафина

На рис. 8 показано распределение эквипотенциальные линии на поверхности наномодифицированного парафина.

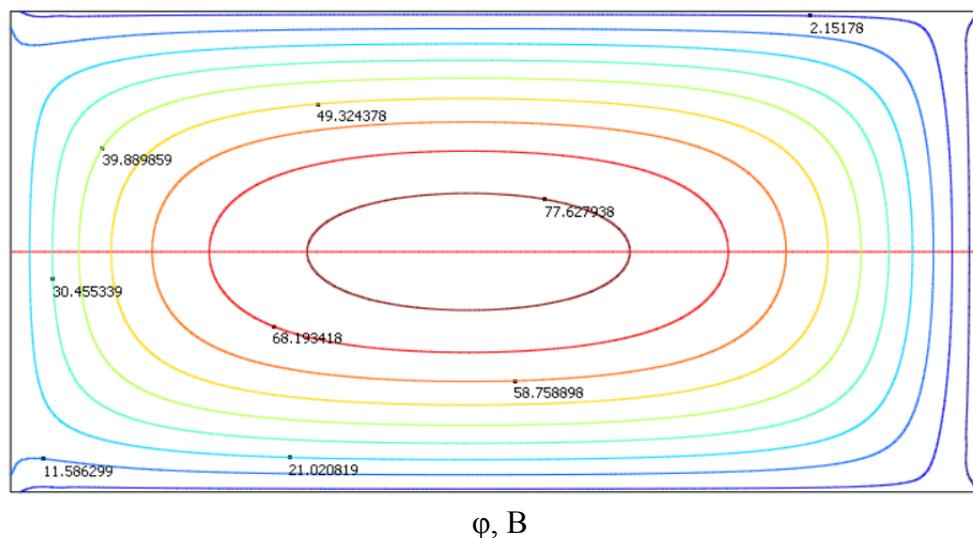


Рисунок 8. Распределение эквипотенциальные линии на поверхности наномодифицированного парафина (продольное расположение электродов)

Из проведенных исследований следует (рис.8), что в условиях электромагнитного поля в наномодифицированном парафине может индуцироваться электрический ток.

Изучение поведения модифицированного парафина в условиях жидких сред

Электромагнитное поле может индуцировать ток в гранулах наномодифицированного парафина. Это приведет к тому, что электрический ток в гранулах вызовет тепловыделение. Реализация управляемого режима заряда/разряда и перемещение гранул в зону наименьшего теплообмена может способствовать повышению эффективности хранения тепловой энергии. Электроконвекция может быть достигнута при использовании электрических полей высокой напряженности. В тоже время используя подход связанный с формированием непосредственно в жидкости электропроводности за счет УНТ и используя магнитное поле от постоянного магнита можно обеспечить контролируемое вращение жидкости. Таким образом на параметры вращения жидкости будут влиять характеристики жидкости связанные с электропроводностью. Для реализации электроконвекции наиболее подходит дистиллированная вода в которой распределяются УНТ, при этом после распределения УНТ вводятся гранулы наномодифицированного парафина. После этого происходит нагрев воды с гранулами до температуры 70°C и воздействие ультразвука. В емкость помещаются два электрода из медного провода с сечением 3 мм. Один электрод в виде кольца помещается на дно емкости, а другой в виде стержня устанавливается по середине емкости. На электроды подается постоянное электрическое напряжение в диапазоне от 2 до 40 В. Происходит вращение жидкости совместно с гранулами на основе наномодифицированного парафина.

На рисунках 9-11 показано изменение температурного поля под действием магнитного поля.

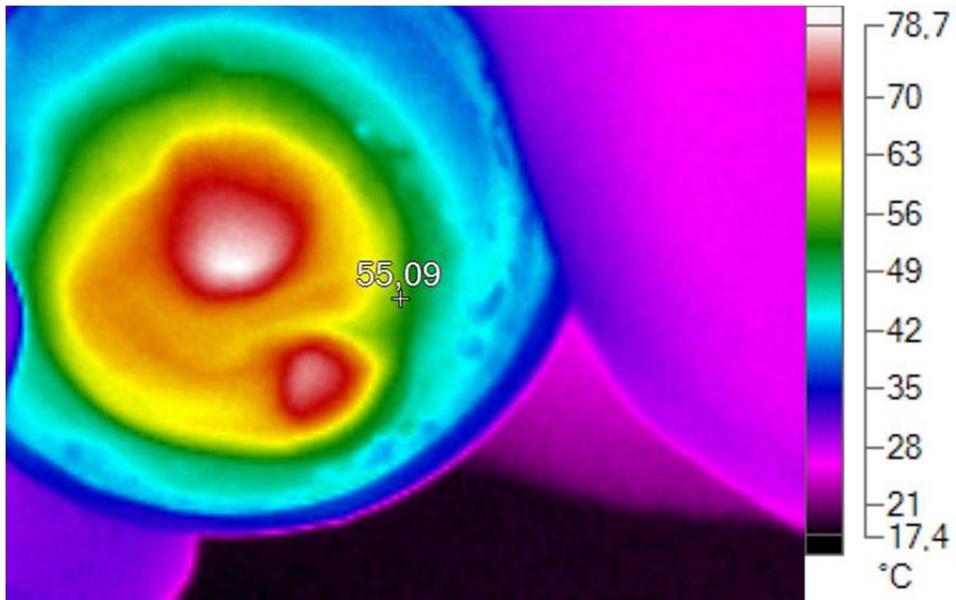


Рисунок 9. Термограмма наномодифицированного парафина распределенного в жидкости

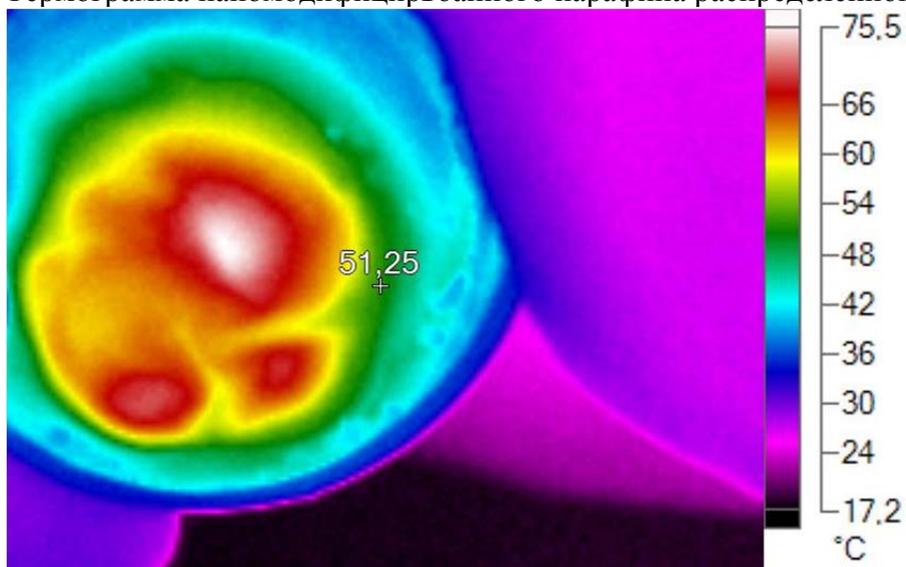


Рисунок 10. Термограмма наномодифицированного парафина распределенного в жидкости

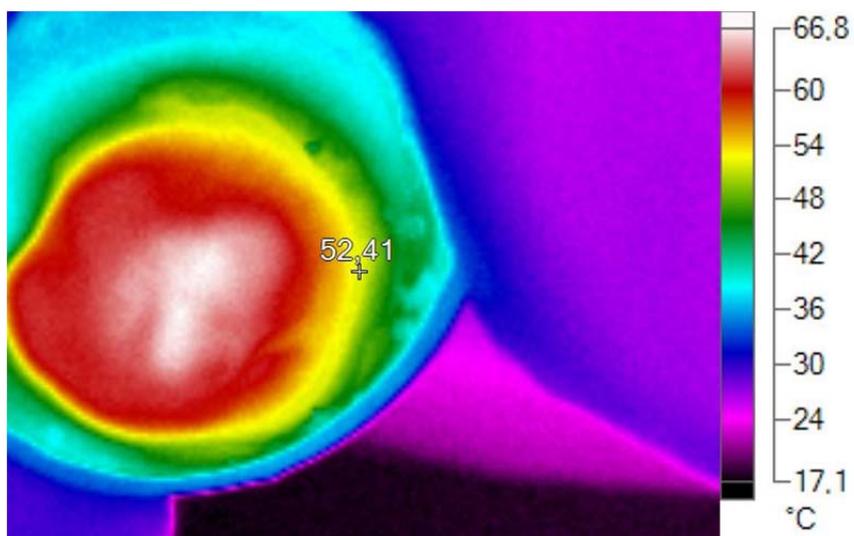


Рисунок 11. Термограмма наномодифицированного парафина распределенного в жидкости

Из анализа рисунков 9-11 следует возможность быстрого перераспределения температурного поля, что позволяет убрать застойные зоны при теплообмене. Парафин обеспечивает накопление теплоты, жидкость интенсифицирует внутренний теплообмен между частицами парафина. Управляемость внутренней структурой позволяет интенсифицировать процесс заряда/разряда.

Пример применения ТА для процесса сушки

Основной недостаток вакуумных сушильных шкафов – неравномерность удаления влаги из материала по лоткам. Для исследования температурного поля в вакуумном шкафу был использован бесконтактный метод измерения температуры с применением тепловизора Testo 871-1.

На рис 12 представлена термограмма в сушильном шкафу.

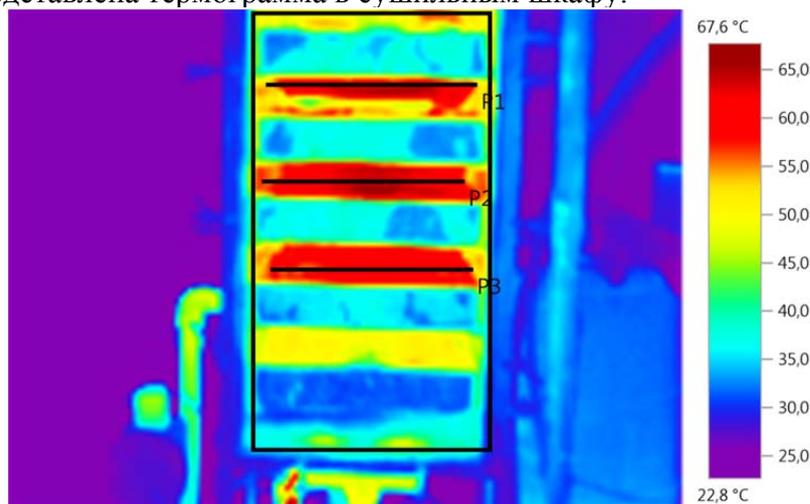


Рисунок 12. Термограмма сушильного шкафа

Из данных представленных на рис.12 следует, что в процентном соотношении доминирует режим с температурой 36 -38 °С. Максимальная температура доходит до значения 66 °С, а минимальная 29,7 °С. Максимально нагревается средняя часть сушильного шкафа, в тоже время нижняя часть работает в наименьшей температурой. Увеличение температуры теплоносителя в данном случае является не желательным, так как это приведет к увеличению тепловых потерь и перегреву сырья на верхних полках. Техническое решение, которое позволит выравнять температурный режим в сушильном шкафу является применение децентрализованно распределенных ТА с ТМ управляемым магнитным полем.

Заключение

- 1) Проведено модифицирование парафинов углеродными нанотрубками
- 2) Исследована формоустойчивость наномодифицированного парафина в гранулированном состоянии, а также магнитная восприимчивость, электрофизические характеристики, плотности, теплопроводность, теплоемкости и температуры фазового перехода.
- 3) Получены данные о взаимодействии наномодифицированного гранулированного материала, в различных типах жидкостей, с магнитным и электромагнитным полем.
- 4) Разработана методика математического моделирования процессов теплоаккумуляции в материалах с фазовыми переходами
- 5) Исследовано поведение модифицированного парафина в условиях жидких сред (глицерин, дистиллированная вода, этиленгликоль, пропиленгликоль и минеральное моторное масло) под воздействием электромагнитных полей.

Благодарности: Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и управления образования и науки Тамбовской области в рамках научного проекта № 18-43-680012.

Библиографический список

1. Sharma, S. D., Sagara, K.: Latent Heat Storage Materials and Systems. International Journal of Green Energy, 2: 1–56, 2005. Taylor & Francis Inc. ISSN: 0197-1522
2. Zhao, C.Y. Heat transfer enhancement for thermal energy storage using metal foams embedded within phase change materials (PCMs) [Text] / C.Y. Zhao, W. Lu, Y. Tian // Solar Energy. – 2010. – V. 84. – P. 1402-1412.
3. Fan, L. Thermal conductivity enhancement of phase change materials for thermal energy storage: A review / L. Fan L., J.M. Khodadadi // Renewable and sustainable energy reviews. – 2011. – V. 15. P. 24-46.
4. Warzoha R. J., Zhang D., Feng G., Fleischer A. S. Engineering interfaces in carbon nanostructured mats for the creation of energy efficient thermal interface materials R. J. Warzoha, D. Zhang, G. Feng, A. S. Fleischer // CARBON. –2013. – V. 61. P. 441-457.
5. Warzoha, R. J. Effect of carbon nanotube interfacial geometry on thermal transport in solid–liquid phase change materials / R. J. Warzoha, A. S. Fleischer // Applied Energy. 2015. –V. 154. – P. 271-276.
6. Li, M. Carbon nanotube/paraffin/montmorillonite composite phase change material for thermal energy storage / M. Li, Q. Guo Q., S. Nutt // Solar energy. 2017. – V. 146. –P. 1-7.
7. Zhang, N. Effect of carbon nanotubes on the thermal behavior of palmitic–stearic acid eutectic mixtures as phase change materials for energy storage / N. Zhang, Ya. Yuan, X. Cao, X. Yang // Solar Energy. –2014. – V. 110. –P. 64-70.
8. Jayalath, A, Nicolas, RS, Sofi, M, Shanks, R, Ngo, T, Aye, L, Mendis, P, “Properties of Cementitious Mortar and Concrete Containing Micro-encapsulated Phase Change Materials.” Constr. Build. Mater., 120 408–417 (2016)
9. Xuesen Lv Pei, Guo Haifeng Liu Li, Cui Xuemin Cui. Preparation of paraffin-based phase-change microcapsules and application in geopolymer coating //Journal of Coatings Technology and Research (2018) Volume 15, Issue 4, pp 867–874.