Поступила в редакцию *24.11.2021*

УДК 536.24:771.523.4 DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-78-86

Теплофизические свойства материалов с наноразмерными металлическими частицами

Т. В. Цыганова[*,1], **С. С. Кругликов**[**]

** Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, Москва, Россия*
*** РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия*

Аннотация

Рассмотрено влияние наноразмерных частиц, расположенных на поверхности, на теплофизические свойства материалов. Дан анализ процесса теплообмена в условиях естественной конвекции на примере образцов металлических наноструктур, сформированных на основе трековых мембран, которые использовались в качестве шаблонов или матриц. Полученные образцы представляли собой металлическую фольгу, на поверхности которой располагались наноструктуры, повторяющие цилиндрическую форму пор исходной трековой мембраны. Показано, что при наличии наноразмерных частиц формулы для расчета коэффициента теплоотдачи поверхности изменяются. К тепловому сопротивлению неподвижной пленки, окружающей наночастицы, добавляется тепловое сопротивление движущегося вдоль поверхности потока теплоносителя. Показано, что поправки к коэффициенту теплоотдачи поверхности зависят от числа Рэлея. Представлен алгоритм вычисления поправок и порядок его применения.

Ключевые слова

Теплообмен, конвекция, критерий Рэлея, трековые мембраны, наноструктуры

Введение. В последние годы стали широко применяться материалы, содержащие металлические наноразмерные частицы. Их использование приводит к необходимости учитывать наличие наночастиц при исследовании хорошо изученных процессов, в частности, процесса теплообмена.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. В настоящей работе рассматривается естественная конвекция в большом объеме теплоносителя. Расчет коэффициента теплоотдачи обычно производится по формуле

$$\overline{Nu} = B(Gr \cdot Pr)^n, \qquad (1)$$

где значения коэффициента B и показателя степени n выбираются в зависимости от произведения чисел Грасгофа (Gr) и Прандтля (Pr). Формула охватывает поверхности практически любой формы и, в частности, вертикальные пластины. Её вывод дан в работе [1] для вертикально установленного образца с плоской поверхностью. Для материала, содержащего наночастицы, этот вывод нуждается в пересмотре из-за особенностей течения теплоносителя. Необходимо учитывать, что из-

[1] *Для переписки*
Email: tvts1@mail.ru

за наличия наночастиц вдоль поверхности нагретого материала (рисунок 1) происходит образование неподвижной пленки некоторой толщины δ_0 с тепловым сопротивлением r_0, которая препятствует переносу тепла от образца к окружающему теплоносителю. В результате возникают поправки к формуле (1), которые обсуждаются в настоящей работе.

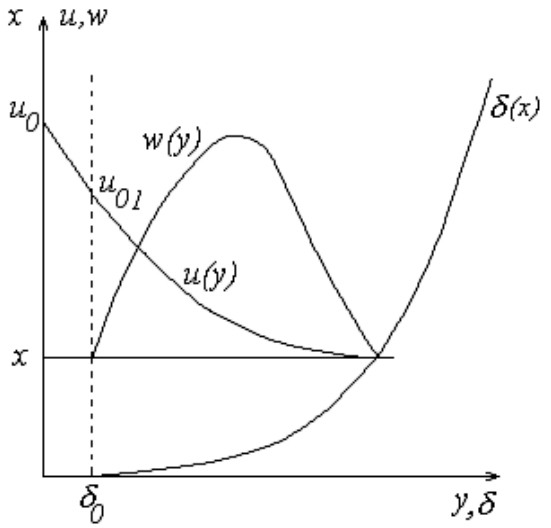

Рисунок 1 — График распределения температуры u(y) и скорости w(y) перпендикулярно поверхности образца; и график функции ширины потока δ(x) вдоль поверхности образца.

Результаты. Будем следовать приближенной теории, изложенной в литературном источнике [1]. Введем систему координат с осью x, направленной вертикально вдоль образца, и осью y, направленной перпендикулярно к его поверхности (y = 0).

Распределение температуры по теплоносителю, как и в случае гладкой поверхности, считаем параболическим

$$u = u_{01}\left(1 - \frac{y - \delta_0}{\delta}\right)^2, \qquad (2)$$

но только вне воздушной прослойки, заключенной в слое наноструктур ($y \geq \delta_0$). Вдоль неё распределение температур линейное. Плотность теплового потока через эту прослойку

$$q = \frac{\lambda}{\delta_0}(u_0 - u_{01}),$$

где λ — коэффициент теплопроводности пленки, u_0 — температура образца, u_{01} — температура у пленки движущегося теплоносителя. В силу непрерывности теплового потока, поступающий в движущийся теплоноситель тепловой поток, эта же величина

$$q = -\lambda \frac{\partial u}{\partial y}\Big|_{y=\delta_0} = \frac{2u_{01}}{\delta}\lambda. \qquad (3)$$

Приравнивая найденные величины, заключаем, что из условия непрерывности теплового потока вытекает связь температур на границах неподвижной пленки

$$u_{01} = \frac{u_0}{1 + \varsigma},$$

где

$$\varsigma = \frac{2\lambda r_0}{\delta}.$$

отношение теплового сопротивления неподвижной пленки к сопротивлению теплоотдачи движущемуся слою теплоносителя. Подставляя u_{01} в формулу (3), найдем, что

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta}\frac{1}{1 + \varsigma}. \qquad (4)$$

Формула (4) выражает коэффициент теплоотдачи поверхности движущегося слоя теплоносителя, ширина которого переменна и связана со скоростью движения в этом слое. В отличие от известной теории [1], в (4) входит поправка ζ на тепловое сопротивление неподвижной пленки. Простую физическую интерпретацию формулы (4) можно дать, если ввести сопротивление теплоотдачи $1/\alpha$. В этом случае ее можно записать так

$$\frac{1}{\alpha} = \frac{\delta}{2\lambda} + r_0,$$

т. е. тепловое сопротивление r_0 воздушной прослойки, заключенной в слое наноструктур, и сопротивление теплоотдачи движущемуся вдоль гладкой поверхности теплоносителю просто складываются. Увеличение теплового сопротивления ведет к уменьшению передаваемого тепла к

движущемуся потоку, а следовательно, и к уменьшению величины подъемной силы, формирующей этот поток. Соответственно изменяется и ширина потока δ, что ведет к изменению коэффициента теплоотдачи.

Движение теплоносителя происходит в основном вдоль оси x, т. е. вертикально. При этом толщина δ движущегося слоя теплоносителя ($x = \text{const}$) непрерывно увеличивается. В стационарных условиях подъемная сила, обусловленная законом Архимеда, уравновешивается силой внутреннего трения теплоносителя

$$\mu \frac{d^2w}{dy^2} = -g(\rho_0 - \rho), \qquad (5)$$

где w — вертикальная составляющая скорости теплоносителя, μ — коэффициент внутреннего трения; ρ_0, ρ — плотности теплоносителя при комнатной температуре t_0, и температуре t соответственно. Вводя коэффициент линейного расширения α_v

$$\rho = \rho_0(1 - \alpha_v u),$$

считая, что зависимость температуры от координаты описывается формулой (2), приведем уравнение (5) к виду

$$\frac{d^2w}{dy^2} = -\frac{\rho_0 g \alpha_v u_0}{\mu(1+\varsigma)}\left(1 - \frac{y - \delta_0}{\delta}\right)^2. \qquad (6)$$

Уравнение (6) описывает, как меняется вертикальная составляющая скорости в зависимости от расстояния от поверхности образца. К уравнению необходимо добавить граничные условия.

Слой теплоносителя, примыкающий к неподвижной пленке, имеет равную нулю скорость

$$w(\delta_0) = 0.$$

Соответственно на расстоянии $y = \delta + \delta_0$ от поверхности образца теплоноситель также находится в покое, т.е.

$$w(\delta + \delta_0) = 0.$$

Решение уравнения (6) представляет собой полином четвертой степени по переменной y:

$$w(y) = -\frac{10}{3} w \left(1 - \frac{y - \delta_0}{\delta}\right) \times \times \left[\left(1 - \frac{y - \delta_0}{\delta}\right)^3 - 1\right]. \qquad (7)$$

Зависимость $w(y)$ от расстояния от поверхности образца приведена на рисунке 1.

Формула (7) отличается от принятой сдвигом вдоль оси y на величину δ_0 и уменьшением по амплитуде на фактор $1/1+\varsigma$. Иными словами, существование неподвижной пленки теплоносителя сдвигает распределение по скоростям в его движущейся части на величину, равную толщине пленки с некоторым сжатием по оси ординат. Средние характеристики распределения меняются пропорционально коэффициенту сжатия. В частности, средняя интегральная скорость по горизонтальному сечению теплоносителя, определяемая по формуле (α_v — коэффициент теплоотдачи)

$$\bar{w} = \frac{\rho_0 g \alpha_v u_0 \delta^2}{40\mu(1+\varsigma)}. \qquad (8)$$

Средняя температура

$$\bar{u} = \frac{1}{3} \cdot \frac{u_0}{1+\varsigma}.$$

Расход теплоносителя через поперечное сечение потока на единицу ширины образца

$$G = \rho_0 w \delta$$

зависит от температуры поверхности, теплофизических постоянных теплоносителя и ширины потока δ. С увеличением x на dx увеличивается ширина потока на $d\delta$ и увеличивается расход теплоносителя

$$dG = d(\rho_0 w \delta).$$

На вовлеченный в поток теплоноситель в расчете на единицу ширины образца затрачивается количество теплоты

$$dQ = c_p u dG,$$

которое поступает от элемента поверхности высотой dx и, согласно закону Ньютона-Рихмана, равно

$$dQ = \alpha \cdot u_0 dx = \frac{2\lambda}{\delta} \cdot \frac{u_0}{1+\varsigma} dx.$$

Приравнивая приведенные величины, найдем уравнение, описывающее изменение δ с ростом x:

$$dG = \frac{6\lambda}{\delta \cdot c_p} dx. \qquad (9)$$

Уравнение (9) — дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными, определяющее увеличение ширины потока δ с ростом расстояния от нижней кромки образца. По сечению потока наряду с изменением его ширины в результате подвода тепла от стенки меняется средняя по сечению температура из-за теплового сопротивления примыкающей к образцу тонкой пленки. Если ввести эффективную ширину пленки $\delta_0 = 2\lambda r_0$ и суммарную ширину участвующего в теплообмене теплоносителя $\delta_s = \delta + \bar{\delta}_0$, то оба эти фактора будут представлены в уравнении (9) отдельными слагаемыми:

$$\frac{\rho_0^2 g \alpha_v u_0 \delta^4}{40\mu\delta_s}\left(1 + \frac{\bar{\delta}_0}{3\delta_s}\right) d\delta = \frac{2\lambda}{c_p} dx. \qquad (10)$$

Второй фактор, как видно из (10), менее существенен по сравнению с первым. Изменение ширины потока увеличивает массовый расход теплоносителя значительно сильнее, чем изменение температуры, обусловленное тепловым сопротивлением пленки. Введем безразмерные критерии Прандтля и Грасгофа

$$Pr = \frac{\mu c_p}{\lambda},$$

$$Gr = \frac{\rho_0^2 g \alpha_v u_0 l^3}{\mu^2}$$

где l — размер образца по вертикали; и запишем дифференциальное уравнение (10) в безразмерном виде:

$$\frac{Ra}{80}\frac{\Delta^4}{\Delta_s}\left(1 + \frac{\Delta_0}{3\Delta_s}\right) d\Delta = d\xi. \qquad (11)$$

Здесь

$$\Delta = \frac{\delta}{l},\ \Delta_s = \frac{\delta_s}{l}, \Delta_0 = \frac{\bar{\delta}_0}{l}, \xi = \frac{x}{l},$$

l — размер образца по вертикали, $Ra = Gr \cdot Pr$ — число Рэлея.

Решение (11) выражает ξ как функцию от Δ, или x как функцию от δ:

$$\xi = \frac{Ra}{240} F(\Delta, \Delta_0), \qquad (12)$$

где $F(z, \Delta_0)$ — функция, определяемая следующим интегралом:

$$F(z, \Delta_0) = \int_0^z \frac{(3z + 4\Delta_0) z^4}{(z + \Delta_0)^2} dz.$$

Подынтегральная функция положительна, следовательно, $F(z)$ монотонно возрастающая функция от z. Соответственно, Δ растет с ростом ξ, достигая максимального значения Δ_{max} при $\xi = 1$. Величина Δ_{max} в зависимости от Δ_0 определяется уравнением

$$F(\Delta_{max}, \Delta_0) = \frac{240}{Ra}.$$

Отметим, что в уравнения, описывающие процесс охлаждения, входит средний по высоте образца коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = \frac{1}{l}\int_0^l \alpha \cdot dx = \frac{1}{l}\int_0^l \frac{2\lambda}{\delta} \cdot \frac{1}{1+\varsigma} dx,$$

откуда

$$\overline{Nu} = \frac{\bar{\alpha} l}{\lambda} = \int_0^1 \frac{2}{\Delta_s} d\xi. \qquad (13)$$

Из уравнения (12) следует, что

$$d\xi = \frac{Ra}{240} \cdot \frac{(3\Delta + 4\Delta_0)\Delta^4}{\Delta_s^2} d\Delta.$$

Нормируем входящие в интегралы переменные интегрирования по Δ_{max} и приведем формулу (13) к виду

$$\overline{Nu} = B \frac{\beta_1}{\gamma_1^{0.75}} Ra^{0.25}. \qquad (14)$$

Формула (14) отличается от формулы (1) поправочным множителем $\beta_1 / \gamma_1^{0.75}$, величина которого зависит от числа Рэлея. Порядок нахождения поправок состоит в следующем. Находится сначала Δ_{max},

затем $z_0 = {\Delta_0}/{\Delta_{\max}}$ и затем вычисляются поправки на толщину пленки

$$\gamma_1 = \frac{4}{3}\int_0^1 \frac{(3z + 4z_0)z^4}{(z + z_0)^2}\,dz, \qquad (15)$$

$$\beta_1 = \int_0^1 \frac{(3z + 4z_0)z^4}{(z + z_0)^3}\,dz. \qquad (16)$$

Когда $\Delta_0 = 0$, эти величины обращаются в единицу.

Прежде чем производить дальнейшие вычисления, проведем некоторые оценки.

Применим приведенные расчеты к металлическим структурам, имеющим на своей поверхности наноразмерные вертикально расположенные цилиндрические столбики (Рисунок 2). Фотография на рисунке 2 выполнена с помощью электронного сканирующего микроскопа Carl Zeiss Supra 40-30-87 в лаборатории «Криоэлектроника» МГУ им. М. В. Ломоносова. Диаметр наноструктур, расположенных перпендикулярно поверхности, около 30 нм, высота 5 мкм.

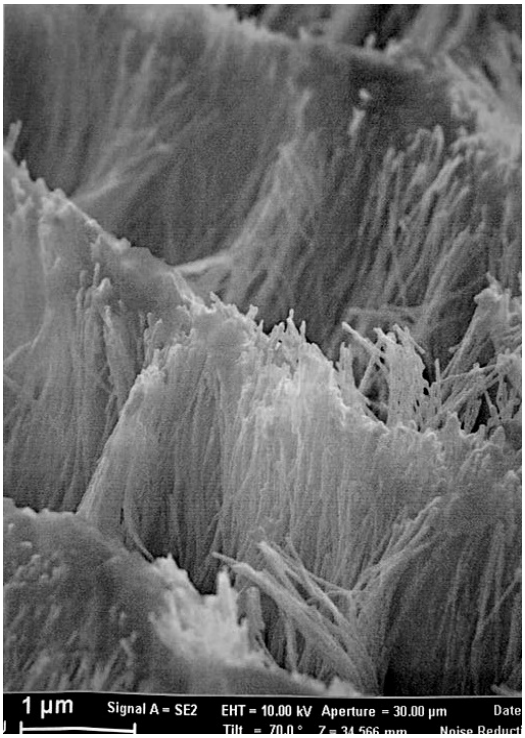

Рисунок 2 — Микрофотография наноструктурированной металлической пластины

Такие металлические наноструктуры были сформированы на основе трековых мембран, использовавшихся в качестве шаблонов или матриц [2–5]. Для получения таких металлических структур на поверхность полиэтилентерефталатной трековой мембраны (ТМ) с цилиндрическими порами наносился тонкий проводящий слой меди методом вакуумного термического напыления. Затем на проводящую поверхность электрохимическим методом осаждалась медь, формируя на поверхности ТМ металлическую фольгу, а внутри цилиндрических пор соответствующие наноструктуры [7–9].

После того как в растворе щелочи стравливалась исходная полимерная матрица [10], были получены исследуемые образцы в виде металлической фольги, на поверхности которой расположены наноструктуры, повторяющие цилиндрическую форму пор исходной трековой мембраны [11].

Обсуждение полученных результатов. Тепловое сопротивление слоя представленных наноструктур (рисунок 2) высотой $\delta_0 \approx 5\cdot10^{-6}$ м составляет $r_0 \approx 1{,}7\cdot10^{-6}$ м^{2}К/Вт. Для образца с размером по вертикали $l \approx 10$ см, $\Delta_0 \cong 5\cdot10^{-6}$. На протяжении всей поверхности образца ${\Delta_0}/{\Delta_{\max}} \ll 1$. Следовательно, в первом приближении можно пренебречь толщиной воздушной прослойки, заключенной в наноструктурах. Это есть так называемое нулевое приближение для коэффициента теплоотдачи.

Таким образом, для определения коэффициента теплоотдачи нужно сначала найти коэффициент теплоотдачи в нулевом порядке теории возмущений, а затем определить приведенные поправки.

Заключение

Наноразмерные частицы, расположенные на поверхности материала, меняют его теплофизические свойства. При обтекании поверхности наноструктурированного образца в условиях естественной конвекции его тепловое сопротивление изменяется. В этом случае при вычислении коэффициента теплоотдачи в критерии Нуссельта необходимо учитывать представленный в работе поправочный множитель, величина которого зависит от числа Рэлея. Предложен метод вычисления указанного поправочного множителя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1]. Пчелкин И. М. Конвективный и лучистый теплообмен. М. Изд-во АН СССР. 1960. С.56–64.

[2]. Волков В. В., Мчедлишвили Б. В., Ролдугин В. И., Иванчев С. С., Ярославцев А. Б. Мембраны и нанотехнологии. *Российские нанотехнологии.* 2008. Т. 3. № 11–12. С. 67–101.

[3]. Апель П. Ю., Березкин В. В., Васильев А. Б., Жданов Г. С. и др. Критические технологии. *Мембраны.* 2006. № 3. С. 45.

[4]. Мчедлишвили Б. В. Трековые мембраны сегодня и в перспективе. *Мембраны-2013. Тезисы докладов XII Всероссийской научной конференции (с международным участием).* Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Ордена Трудового Красного Знамени Институт нефтехимического синтеза им. А. В. Топчиева Российской академии наук. 2013. С. 32–33.

[5]. Соловьева А. Б., Тимофеева В. А., Ерина Н. А., Встовский Г. В. и др. Особенности формирования структуры трековых мембран по данным атомно-силовой микроскопии и рассеяния рентгеновских лучей *Коллоидный журнал.* 2005. Т. 67. № 2. С. 248–258.

[6]. Сергеев А. В., Нечаев А.Н., Первов Н. В., Власов С. В. и др. Трековые мембраны как элемент темплейного синтеза наноструктур. Модифицированные трековые мембраны. *Мембраны.* 2004. № 1. С. 19.

[7]. Реутов В. Ф., Микляев М. Ф., Мчедлишвили Б. В. Методика подготовки образцов из металлических нанопроволочек для электронной и атомно-силовой микроскопии. *Приборы и техника эксперимента.* 2007. № 3. С. 144–147.

[8]. Подойницын С. Н., Цыганова Т. В., Мчедлишвили Б. В. Вольтамперные характеристики и пробой металлизированных трековых мембран. *Мембраны и мембранные технологии.* 2012. Т. 2. № 4. С. 276.

[9]. Подойницын С. Н., Цыганова Т. В., Мчедлишвили Б. В. Особенности шаблонного формирования металлических наноструктур в порах трековых мембран при электрохимическом осаждении меди. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* 2013. Т. 15. № 6–2. С. 464–468.

[10]. Рудакова Т. Е., Кулева С. С., Самойлова Л. И. Макрокинетика деструктивных процессов, происходящих при травлении облученных лавсановых пленок в водных растворах щелочей. *Высокомолекулярные соединения.* Т.А22. 1980. С. 443–448.

[11]. Цыганова Т. В., Соколовский Р. И., Федосеев А. И., Уваров А. В. Теплопередача в наномодифицированных метаматериалах. *Современные задачи инженерных наук. Сборник научных трудов VI-ого Международного научно-технического Симпозиума «Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии СЭТТ–2017».* 2017. С. 264–267.

Цыганова Татьяна Владимировна — канд. физ.–мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории ядерных фильтров, Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (Российская Федерация, 119333, Москва, Ленинский пр-т, д. 59).

Кругликов Сергей Сергеевич — д–р хим. наук, профессор, кафедра технологии неорганических веществ и электрохимических процессов РХТУ им. Д. И. Менделеева (Российская Федерация, 125047, Москва, Миусская площадь, д. 9).

Thermophysical properties of materials with nanosized metal particles

T. V. Tsyganova[*,1], S. S. Kruglikov[**]

** Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
*** Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow, Russia*

Abstract

Influence of nanoscale particles located on surface on thermophysical properties of materials is considered. Analysis of heat exchange process under conditions of natural convection is given by example of samples of metal nanostructures formed on the basis of track membranes, which were used as templates or matrices. The obtained samples were metal foil, on the surface of which nanostructures were located, repeating the cylindrical shape of the pores of the original track membrane. It is shown that the presence of nanosized particles change the formulas for calculating the heat transfer coefficient of the surface. Thermal resistance of the heat carrier flow moving along the surface is added to the thermal resistance of the fixed film surrounding the nanoparticles. It is shown that corrections to the surface heat transfer coefficient depend on the Rayleigh number. The algorithm of calculation of corrections and the order of its application is presented.

Keywords

Heat exchange, convection, Rayleigh number, track membranes, nanostructures

[1] *Corresponding author*
Email: tvts1@mail.ru

REFERENCES

[1]. Pchelkin I. M. Konvektivnyj i luchistyj teploobmen [Convective and radiant heat exchange]. Moscov. AN USSR Publ., 1960, pp. 56–64. (In Russ.)

[2]. Volkov V. V., Mchedlishvili B. V., Roldugin V. I., Ivanchev S .S., Yaroslavtsev A. B. Membrany i nanotekhnologii. [Membranes and Nanotechnology]. *Rossijskie nanotekhnologii* [Russian nanotechnologies], 2008, vol. 3, № 11-12, pp. 67–101. (In Russ.)

[3]. Apel P.Yu., Berezkin V. V., Vasiliev A. B., Zhdanov G. S. et al. Kriticheskie tekhnologii [Critical Technologies]. *Membrany* [Membranes], 2006, № 3, p. 45. (In Russ.)

[4]. Mchedlishvili B.V. Trekovye membrany segodnya i v perspective [Track membranes today and in the future]. *Membrany-2013. Tezisy dokladov HII Vserossijskoj nauchnoj konferencii (s mezhdunarodnym uchastiem). Federal'noe gosu-darstvennoe byudzhetnoe uchrezhdenie nauki Ordena Trudovogo Krasnogo Znameni Institut neftekhimicheskogo sinteza im. A.V. Topchie-va Rossijskoj akademii nauk.* [Membranes-2013. Abstracts of the XII All-Russian Scientific Conference (with international participation). Federal State Budgetary Institution of Science of the Order of the Red Banner of Labor Institute of Petrochemical Synthesis. A.V. Topchiev Russian Academy of Sciences], 2013, pp. 32–33. (In Russ.)

[5]. Solov'eva A. B., Timofeeva V. A., Erina N. A., Vstovsky G. V. et al. Osobennosti formirovaniya struktury trekovyh membran po dannym atomno-silovoj mikroskopii i rasseyaniya rentgenovskih luchej [Features of formation of magnetite coatings on low-carbon steel in hot nitrate solutions]. *Kolloidnyj zhurnal* [Colloid journal] 2005, vol. 67, № 2, pp. 248–258. (In Russ.)

[6]. Sergeev A.V., Nechaev A.N., Pervov N. V., Vlasov S. V. et al. Trekovye membranv kak element templejnogo sinteza nanostruktur. Modificirovannye trekovye membrany [Track membranes as an element of template synthesis of nanostructures. Modified track membranes]. *Membrany* [Membranes], 2004, № 1, p. 19. (In Russ.)

[7]. Reutov V.F., Miklyaev M.F., Mchedlishvili B.V. Metodika podgotovki obrazcov iz metallicheskih nanoprovolochek dlya elektronnoj i atomno-silovoj mikroskopii [A technique for preparing samples of metal nanovires for electron and atomic-force microscopy] *Pribory i tekhnika eksperimenta* [Instruments and Experimental Techniques], 2007, № 3, pp. 144-147. (In Russ.)

[8]. Podoynitsyn S. N., Tsyganova T. V., Mchedlishvili B. V. Voltampernye harakteristiki i proboj metallizirovannyh trekovyh membran [Current-voltage characteristics and electric breakdown of metal-coated track-etched membranes]. *Membrany i membrannye tekhnologii* [Membranes and Membrane Technologies], 2012, vol. 2, № 4, p. 276. (In Russ.)

[9]. Podoynitsyn S. N., Tsyganova T. V., Mchedlishvili B. V. Osobennosti shablonnogo formirovaniya metallicheskih nanostruktur v porah trekovyh membran pri elektrohimiche-skom osazhdenii medi [Features of template formation of metal nanostructures in pores of track membranes during electrochemical deposition of copper] *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2013, vol. 15, № 6-2, pp. 464–468. (In Russ.)

[10]. Rudakova T.E., Kuleva S.S., Samojlova L.I. Makrokinetika destruktivnyh proces-sov, proiskhodyashchih pri travlenii obluchennyh lavsanovyh plenok v vodnyh rastvorah shchelochej [Macrokinetics of degradation reactions taking place during etching irradiated polyethyleneterephthalate films in aqueous alkaline solutions]

Vysokomolekulyarnye soedineniya [Polymer Science], vol. A 22, 1980, pp. 443–448. (In Russ.)

[11]. Tsyganova T. V., Sokolovsky R. I., Fedoseev A. I., Uvarov A. V. Teploperedacha v nanomodificirovannyh metamaterialah [Heat transfer in the nanomodified metamaterials]. *Sovremennye zadachi inzhenernyh nauk. Sbornik nauchnyh trudov VI-ogo Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo Simpoziuma «Sovremennye energo- i resursosberegayushchie tekhnologii SETT-2017»* [Modern problems of engineering sciences. Collection of scientific papers of the VI International Scientific and Technical Symposium «Modern Energy and Resource Saving Technologies SETT – 2017»], 2017, pp. 264–267. (In Russ.)

Tsyganova T. V. — Cand. Sc. (Phys. and Math.), Senior Researcher, Laboratory of Nuclear Filters of Shubnikov Institute of Crystallography of Federal Scientific Research Centre «Crystallography and Photonics» of Russian Academy of Sciences (Leninsky pr-t 59, Moscow, 119333, Russian Federation).

Kruglikov S. S. — Dr. Sc. (Chem.), Professor, Department of Technology of Inorganic Substances and Electrochemical Processes, Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (Miusskaya square, 9, Moscow, 125047, Russian Federation).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Теплофизические свойства материалов с наноразмерными металлическими частицами / Т. В. Цыганова, С. С. Кругликов // Промышленные процессы и технологии. 2022. Т. 2. № 1. С. 78 – 86.

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-78-86

Please cite this article as:

Tsyganova T. V., Kruglikov S. S. Thermophysical properties of materials with nanosized metal particles. Industrial processes ang Technologies, 2022, vol. 2. no. 1, pp. 78 – 86

DOI: 10.37816/2713-0789-2022-2-1-78-86