

## ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ МЕДНОГО ТРУБЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА ЗА СЧЕТ ДОБАВЛЕНИЯ В ПОКРЫТИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Р. Ю. Мухин, И. А. Дьяков, Д. В. Давыдова

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов*

*Рецензент д-р техн. наук, профессор А. Г. Ткачев*

**Ключевые слова и фразы:** гальваника; коэффициент теплоотдачи; сернокислое меднение; трубчатый теплообменник; углеродные нанотрубки.

**Аннотация:** Рассмотрены процессы нанесения гальванических медных покрытий из электролитов с добавлением наноматериала. Проведена серия экспериментов по определению коэффициента теплоотдачи и получена зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода теплоносителя. Подтверждено увеличение коэффициента теплоотдачи до 20 % при использовании нанодисперсных материалов в рассматриваемых процессах.

### Введение

На сегодняшний день теплообменное оборудование пользуется широким спросом на российском промышленном рынке, в частности, речь идет о медных трубчатых теплообменниках. Наряду с традиционными способами интенсификации теплоотдачи все большее внимание уделяется новым методам. Высокую популярность в современных исследованиях приобретают композиционные гальванические покрытия с добавлением нанодисперсных материалов для изменения свойств поверхностей [1 – 6]. Эти методы имеют свои недостатки: одни тяжело реализуемы на практике, другие не дают должного увеличения коэффициента теплоотдачи. Одним из перспективных методов повышения энергоэффективности является способ турбулизации потока теплоотдающей и тепловоспринимающей среды. В качестве одного из способов изменения поверхности предлагается метод увеличения его шероховатости за счет нанесения гальванических

---

Мухин Роман Юрьевич – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», e-mail: mald68@mail.ru; Дьяков Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений»; Давыдова Дарья Валентиновна – аспирант кафедры «Системы автоматизированной поддержки принятия решений», ТамбГТУ, г. Тамбов.

покрытий. Для усиления эффекта шероховатости электроосаждение проводилось из электролитов с добавками наноуглеродного материала «Таунит» [7–9].

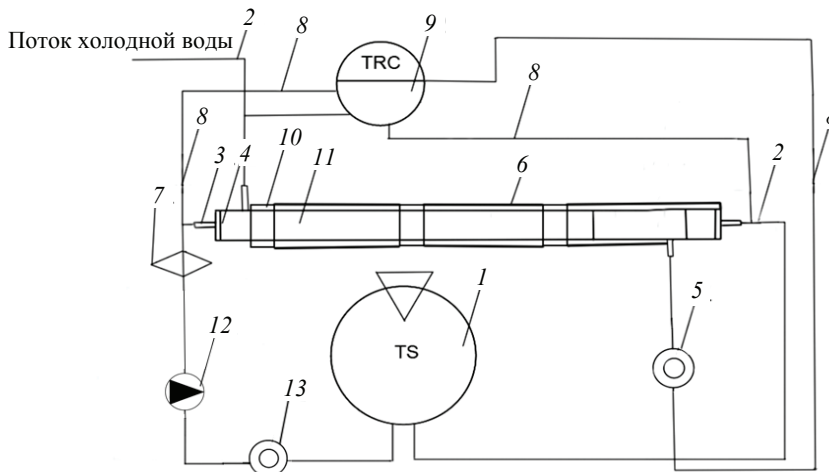
Цель работы – разработка технологии нанесения наномодифицированных медных гальванических покрытий на медные трубчатые элементы теплообменников и проведение экспериментальных исследований для выявления увеличения теплоотдачи.

### Методика экспериментов

В исследовании применялся сернокислый электролит меди состава: медь (II) сернокислая 5-водная 200 мг/л, кислота серная 60 мг/л.

В приготовленный электролит добавлялся наноуглеродный материал, зарегистрированный под торговой маркой «Таунит», производимый в ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов. Для равномерного распределения наноматериала в объеме, электролит подвергался ультразвуковой обработке, которую проводили диспергатором ИЛ 100-6/4 с характеристиками: частота ультразвука 22 кГц; амплитуда 80 мкм; интенсивность звука 786 Вт/см<sup>2</sup>. Проведенные ранее серии экспериментов на стальных пластинах [10], показали, что наибольшее значение теплоотдачи достигается при концентрации наноматериала в электролите, равной 400 мг/л. Приняв оптимальную концентрацию за неизменную величину, были проведены серии экспериментов изменения поверхности и измерения коэффициента теплоотдачи трубчатого медного теплообменника, с целью переноса и проверки технологии турбулизации.

Подготовительные операции перед нанесением электрохимического медного покрытия, а также финишные операции производились по стандартной технологии [11]. Деталь теплообменника, медная трубка  $L = 500$  мм,



**Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения коэффициента теплоотдачи поверхности медной трубки в жидкой среде:**  
 1 – термостат; 2 – шланг газовый; 3 – испытуемый образец; 4 – заглушка  $d = 50$  мм;  
 5 – счетчик холодной воды; 6 – слой теплоизолирующего материала;  
 7 – вентиль ргулировки потока; 8 – термопары; 9 – электронный самопишущий регулятор температуры; 10 – фиксирующие хомуты; 11 – труба  $d = 50$  мм;  
 12 – насос циркуляционный; 13 – счетчик горячей воды

$d = 9$  мм и толщиной стенок  $h = 1,5$  мм, после подготовительных операций покрывалась с внешней стороны медным гальваническим покрытием при температуре  $18 - 22$  °С в течение 20 мин при плотности тока  $1$  А/дм<sup>2</sup>. Соотношение площадей катода и анода 1:1.

Измерение теплоотдачи испытуемых образцов осуществлялось на экспериментальной установке (рис. 1), имитирующей трубчатый теплообменник «труба в трубе». Испытуемый образец – внутренняя труба.

Для варьирования скорости потока внутри трубы в конструкции предусмотрен внешний насос. Вмонтированный счетчик горячей воды фиксировал расход и скорость водного потока. Установка изготовлена таким образом, что теплообменник располагался выше термостата. Контроль температуры жидкости и испытуемого образца осуществлялся с использованием термопар, подключенных к прибору «Термодат 19Е», работающему в режиме самописца. Температура теплоносителя регулировалась автоматикой термостата. Показания температур считывались в четырех точках: на входе и выходе холодного потока; на входе и выходе горячего потока. Лимитирующая температура нагрева составляла  $60$  °С. Вентилем с ручным управлением регулировалась скорость потока холодной и горячей воды. Стабильность температурного режима достигалась термоизоляцией трубчатого теплообменника и насоса.

### Результаты и их обсуждение

Имитация медного трубчатого теплообменника осуществлялась по схеме, представленной на рис. 2. Нагретый теплоноситель (вода) нагревает холодную воду, подаваемую на вход 1. Изменение температур на входе и выходе теплообменника позволяет провести расчет коэффициента теплоотдачи.

*Методика расчета коэффициента теплоотдачи.* Рассчитаем тепловые потоки холодного и горячего циклов (получив приблизительно равные значения, сделаем вывод, что потоки рассчитаны верно)

$$Q_1 = G_1 c (t_{1\text{вх}} - t_{1\text{вых}}); \quad (1)$$

$$Q_2 = G_2 c (t_{2\text{вх}} - t_{2\text{вых}}), \quad (2)$$

где  $Q_1, Q_2$  – тепловые потоки холодного и горячего циклов соответственно;  $G_1$  – массовый расход теплоносителя, кг/с;  $c$  – удельная теплоемкость воды,  $c = 4190$  Дж / (кг · °С);  $t_{1\text{вх}}$  – температура холодной воды на входе, °С;  $t_{1\text{вых}}$  – температура холодной воды на выходе, °С.

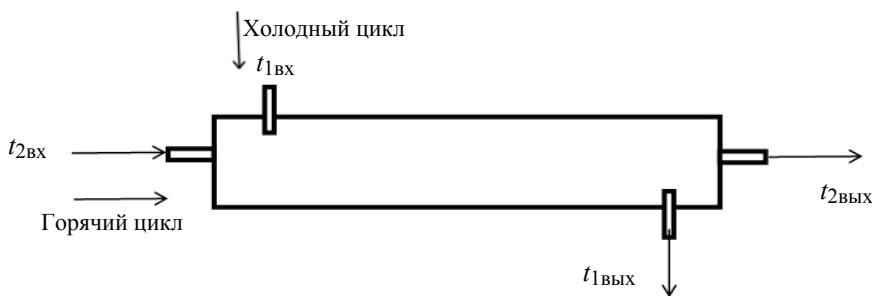


Рис. 2. Схема подачи воды в лабораторную установку

Далее вычисляем коэффициент теплопередачи

$$Q = k F \Delta t_{\text{cp}}, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент теплопередачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $F$  – площадь поверхности теплопередачи, м<sup>2</sup>;  $\Delta t_{\text{cp}}$  – средняя разность температур, °С,

$$F = \pi d_{\text{cp}} L_{\text{тр}},$$

где  $d_{\text{cp}} = (d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})/4 + d_{\text{вн}}$ ;  $L_{\text{тр}}$  – длина трубы, м;  $d_{\text{н}}$  – наружный диаметр медной трубы, м;  $d_{\text{вн}}$  – внутренний диаметр медной трубы, м,

$$\Delta t_{\text{cp}} = (\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}})/\ln(\Delta t_{\text{б}}/\Delta t_{\text{м}}),$$

где  $\Delta t_{\text{б}} = t_{2\text{вх}} - t_{1\text{вх}}$ ;  $\Delta t_{\text{м}} = t_{2\text{вых}} - t_{1\text{вых}}$ .

Далее выражаем искомый  $\alpha_2$ , а недостающие  $\alpha_1$  и  $\lambda_{\text{ст}}$  вычисляем по критерию Нуссельта и Прандтля соответственно

$$K = \left( \frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} \right), \quad (4)$$

где  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициенты теплоотдачи от двух носителей, Вт/(м<sup>2</sup>·°С);  $\delta$  – толщина стенки, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коэффициент теплопроводности стенки, Вт/(м·°С),

$$\delta = (d_{\text{н}} - d_{\text{вн}})/2. \quad (5)$$

Критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \omega \rho d_{\text{cp}} / \mu, \quad (6)$$

где  $\omega$  – скорость холодного потока, м/с;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – вязкость воды, Па·с.

Критерий Нуссельта при  $\text{Re} > 10000$

$$\text{Nu} = 0,021 \text{Re}^{0,8} \text{Pr}^{0,43}. \quad (7)$$

Критерий Нуссельта при  $\text{Re} < 2300$

$$\text{Nu} = 1,55 \left( \frac{\text{Re} d_{\text{вн}}}{L} \right)^{0,33}. \quad (8)$$

где  $d_{\text{вн}}$  – диаметр трубы, м;  $L$  – длина трубы, м.

Критерий Нуссельта через  $\alpha$

$$\text{Nu} = \alpha d_{\text{cp}} / \lambda_{\text{ж}}, \quad (9)$$

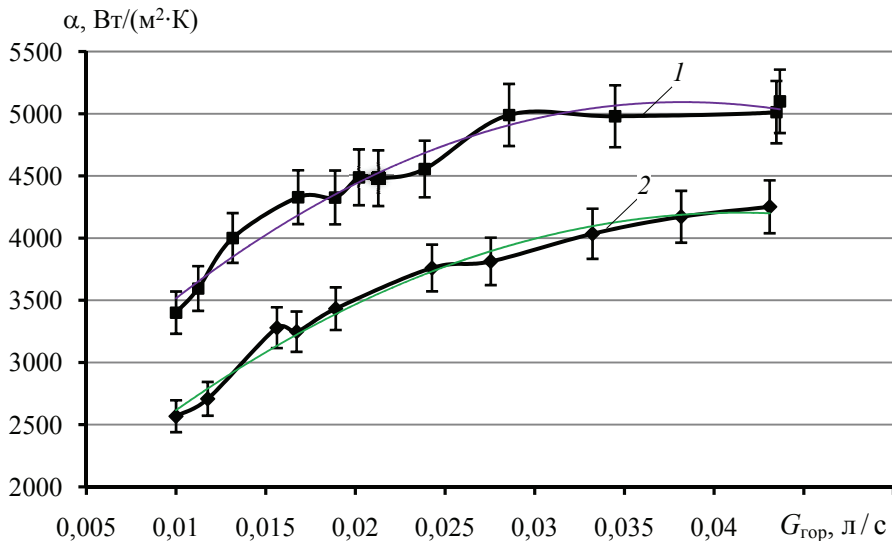
где  $\lambda_{\text{ж}}$  – теплопроводность жидкости, Вт/(м·К);  $\alpha$  – коэффициент теплопроводности.

Критерий Прандтля

$$\text{Pr} = c_{\text{ж}} \mu_{\text{ж}} / \lambda_{\text{ж}}, \quad (10)$$

где  $c_{\text{ж}}$  – теплоемкость воды, Дж/(кг·°С);  $\alpha = \alpha_1$  – холодный цикл.

В результате проведенных экспериментов и последующих расчетов была получена следующая зависимость (рис. 3).



**Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи медных трубок в водной среде от расхода теплоносителя:**  
 1 – покрытие с добавлением УНМ «Таунит»;  
 2 – покрытие без добавления УНМ «Таунит»

Коэффициент теплоотдачи  $\alpha_2$  покрытия, полученного из сернокислого электролита меднения с добавлением наноматериала «Таунит» выше, чем в чистом медном покрытии.

По полученным результатам методом наращивания была осуществлена аппроксимация данных. В результате получены выражения (9) и (10), отражающие зависимость коэффициента теплоотдачи от расхода теплоносителя в наномодифицированном медном и чистом медном покрытиях соответственно:

$$\alpha_{2T}(G_{top}) = (-2E + 06) G_{top}^2 + 151141 G_{top} + 2202,9; \quad (11)$$

$$\alpha_{2N}(G_{top}) = (-2E + 06) G_{top}^2 + 133263 G_{top} + 1445,5, \quad (12)$$

где  $\alpha_{2T}$  – коэффициент теплоотдачи в покрытии с применением УНТ Таунит (концентрации 400 мг/л), Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\alpha_{2N}$  – коэффициент теплоотдачи в покрытии без применения УНТ Таунит, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $G_{top}$  – расход теплоносителя, л/с.

Проведен расчет погрешности аппроксимации и получены следующие данные:

$$\Delta_{\alpha_{2T}} = 2,867306 \%;$$

$$\Delta_{\alpha_{2N}} = 2,833621 \%.$$

Погрешность аппроксимации составила менее 3 %, что соизмеримо с погрешностью измерения переменных в процессе эксперимента. Полученные выражения могут быть использованы при вычислении коэффициента теплоотдачи поверхностей меднения в водной среде.

## Заключение

По предварительным расчетам делаем вывод, что ввод в гальваническое медное покрытие нанодобавки «Таунит» обеспечил увеличение коэффициента теплоотдачи порядка 15 – 20 % в зависимости от расхода теплоносителя. Из этих данных вытекает, что применение нанодисперсного медного гальванического покрытия увеличит энергоэффективность медных трубчатых теплообменников без увеличения их площади и дополнительных материалозатрат.

### Список литературы

1. Carbon Nanotube Composites for Thermal Management // M. J. Biercuk [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2002. – Vol. 80. – P. 2767 – 2769.
2. Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions / S. U. S. Choi [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 79. – P. 2252 – 2254.
3. Торопов, А. Д. Получение и свойства композиционных никелевых покрытий с ультрадисперсными алмазами / А. Д. Торопов, П. Я. Детков, С. И. Чухаева // *Гальванотехника и обработка поверхности*. – 1999. – Т. VII, № 3. – С. 14 – 19.
4. Interface Effect on Thermal Conductivity of Carbon Nanotube Composites / C. W. Nan [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2004. – Vol. 85. – P. 3549 – 3551.
5. Burmeister, L. C. Convective Heat Transfer / L. C. Burmeister. – Lawrence : Willey, 1983. – 720 p.
6. Investigation on Characteristics of Thermal Conductivity Enhancement of Nanofluids / Y. J. Hwang [et al.] // *Current Applied Physics*. – 2006. – Vol. 6. – P. 35 – 37.
7. Модифицирование никелевых покрытий углеродными нанотрубками разными методиками / Ю. И. Головин [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2009. – № 3. – С. 218 – 220.
8. Интенсификация теплоотдачи на алюминиевых поверхностях путем оксидирования их наномодифицированными электролитами / А. А. Гравин [и др.] // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2012. – Т. 18, № 4. – С. 928 – 935.
9. Интенсификация теплоотдачи от поверхностей с наномодифицированными гальваническими покрытиями / Ю. В. Литовка [и др.] // *Тепловые процессы в технике*. – 2013. – Т. 5, № 4. – С. 170 – 176.
10. Интенсификация теплообмена при нанесении наномодифицированных гальванических покрытий на теплоотдающие поверхности / Ю. В. Литовка [и др.] // *Хим. и нефтегаз. машиностроение*. – 2012. – № 9. – С. 10 – 13.
11. Кудрявцев, Н. Т. Электролитические покрытия металлами : учебник / Н. Т. Кудрявцев. – М. : Химия, 1979. – 352 с.

### References

1. Biercuk M.J., Llaguno M.C., Radosavljevic M., Hyun J.K., Johnson A.T., Fischer J.E. *Applied Physics Letters*, 2002, vol. 80, pp. 2767-2769.
2. Choi S.U.S., Zhang Z.G., Yu W., Lockwood F.E., Grulke E.A. *Applied Physics Letters*, 2001, vol. 79, pp. 2252-2254.
3. Toropov A.D., Detkov P.Ya., Chukhaeva S.I. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti*, 1999, vol. VII, no. 3, pp. 14-19.
4. Nan C.W., Liu G., Lin Y., Li M. *Applied Physics Letters*, 2004, vol. 85, pp. 3549-3551.
5. Burmeister L.C. *Convective heat transfer*, Lawrence: Willey, 1983, 720 p.

6. Hwang Y.J., Ahn Y.C., Shinnet H.S., Lee C.G., Kim G.T., Park H.S., Lee J.K. *Current Applied Physics*, 2006, vol. 6, pp. 35-37.
  7. Golovin Yu.I., Tkachev A.G., Litovka Yu.V., Vasyukov V.M., Stolyarov R.A., Shuklinov A.V., Polyakov L.E., Isaeva E.Yu. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2009, vol. 15, no. 3, pp. 218-220.
  8. Gravin A.A., Litovka Yu.V., Tugolukov E.N., Tkachev A.G., D'yakov I.A., Pakhomov A.N. *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 4, pp. 928-935.
  9. Litovka Yu.V., Tugolukov E.N., Tkachev A.G., D'yakov I.A., Gravin A.A., Mukhin R.Yu. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2013, vol. 5, no. 4, pp. 170-176.
  10. Litovka Yu.V., Tugolukov E.N., Tkachev A.G., D'yakov I.A., Gravin A.A., Mukhin R.Yu. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2012, no. 9, pp. 10-13.
  11. Kudryavtsev N.T. *Elektroliticheskie pokrytiya metallami* (Electrolytic coating metals), Moscow: Khimiya, 1979, 352 p.
- 

### **Improving Energy Efficiency of Copper Tube Heat Exchanger by Adding Nanodisperse Materials to the Coating**

**R. Yu. Mukhin, I. A. Dyakov, D. V. Davydova**

*Tambov State Technical University, Tambov*

**Key words and phrases:** carbon nanotubes; electroplating; heat transfer coefficient; sulfate copper plating; tube heat exchanger.

**Abstract:** The authors studies the processes of copper electroplating with the addition of nanomaterials. A series of experiments to determine the heat transfer coefficient and the dependence of the heat transfer coefficient on the coolant flow rate were conducted. An increase in the heat transfer coefficient up to 20 % when using nanodispersed materials in these processes was verified.

---

© Р. Ю. Мухин, И. А. Дьяков, Д. В. Давыдова, 2014

*Статья поступила в редакцию 19.05.2014 г.*

## ДЛЯ ЗАМЕТОК

---