

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТДАЧИ НАНОМОДИФИЦИРОВАННЫХ ЖИДКОСТЕЙ

А. В. Рухов¹, Е. Н. Туголуков², А. Дж. Аль-Шариф²

*Кафедры: «Химия и химические технологии» (1);
«Техника и технологии производства нанопродуктов» (2),
tugolukov.en@mail.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: теплоотдача жидкости; углеродные нанотрубки.

Аннотация: Дано описание экспериментальных исследований процесса теплоотдачи воды, содержащей наномодификатор, представляющий собой функционализированные углеродные нанотрубки серии «Таунит». Приведены схема экспериментальной установки для исследования теплоотдачи жидкостей, методики выполнения экспериментальных исследований и обработки результатов измерений. Представлены результаты исследования влияния концентрации наномодификатора на теплоотдачу воды.

Исследование путей интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании является актуальной научно-технической задачей. Одним из направлений ее решения являются мероприятия, обеспечивающие повышение теплоотдачи от теплоносителя, лимитирующего процесс теплопередачи в целом. При отсутствии фазовых переходов в теплоносителе коэффициент теплоотдачи в значительной мере зависит от теплопроводности теплоносителя, которая определяет термическое сопротивление теплового пограничного слоя.

В ряде публикаций, например [1, 2], приводятся результаты исследований, посвященных зависимостям теплофизических характеристик типовых теплоносителей от концентрации диспергированных в них наноразмерных металлических или неметаллических частиц.

В статье показаны результаты исследования влияния наномодификатора, представляющего собой функционализированные углеродные нанотрубки (УНТ) серии «Таунит», на теплоотдачу воды. Процессы получения УНТ серии «Таунит» и их функционализация рассмотрены во многих работах, в том числе [3]. Целью данного этапа исследований является обоснование целесообразности (или выяснение бесперспективности) проведения полномасштабных исследований интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании путем наномодифицирования типовых теплоносителей, используемых в теплообменных процессах.

Схема лабораторной экспериментальной установки для исследования коэффициентов теплоотдачи жидкостей приведена на рис. 1. Показания датчиков температур и расходов регистрируются во времени до достижения стационарного температурного режима. Погрешности измерения температур и расходов теплоносителей составляет соответственно 0,25 °С и 1,0 мл/с. Для расчета значений коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи используются данные, полученные в стационарном режиме. Расходы теплоносителей задаются таким образом, чтобы

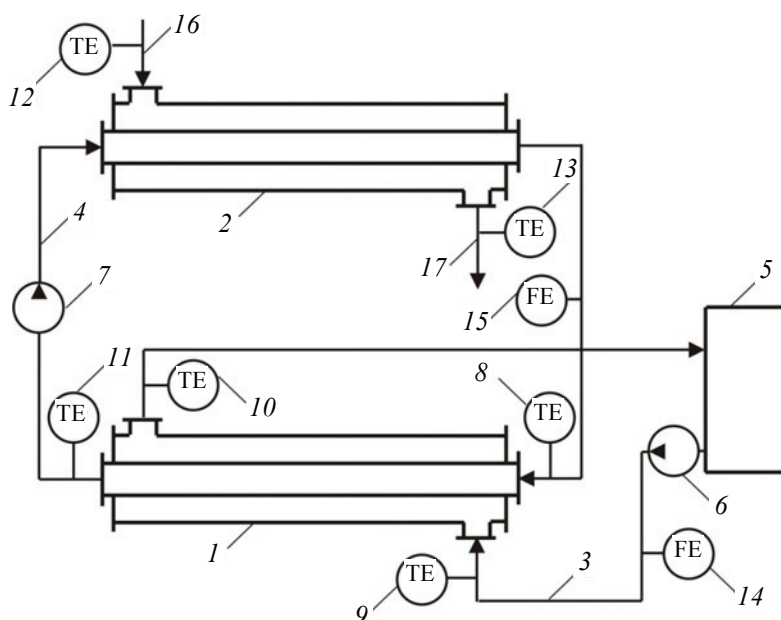


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования коэффициентов теплоотдачи наномодифицированных жидкостей:

1, 2 – стеклянные лабораторные теплообменники «труба в трубе»; 3, 4 – контуры горячего теплоносителя и исследуемой жидкости соответственно; 5 – термостат; 6, 7 – насосы термостата и исследуемой жидкости соответственно; 8 – 13 – температурные датчики; 14, 15 – датчики расхода теплоносителей; 16 – вход магистральной охлаждающей воды; 17 – отвод охлаждающей воды в канализацию

коэффициент теплоотдачи от исследуемой жидкости был существенно меньше коэффициента теплоотдачи от горячего теплоносителя. При этом процесс теплопередачи в целом лимитируется теплоотдачей от исследуемой жидкости, что необходимо для корректного расчета значения коэффициента теплоотдачи от исследуемой жидкости.

Методика выполнения экспериментальных исследований включает определение коэффициентов теплоотдачи от дистиллированной воды и воды с определенной концентрацией наномодификатора при стационарных температурных условиях с одинаковыми начальной температурой горячего теплоносителя и его объемном расходе.

Методика обработки экспериментальных данных основана на использовании математической модели температурных полей теплообменника типа «труба в трубе», включающей температурные поля потоков теплоносителей, стенки трубки, разделяющей потоки, и корпуса теплообменника. В математической модели использованы решения дифференциальных уравнений с соответствующими условиями однозначности [4]. Физическая размерность всех величин – система СИ.

Температурное поле потока исследуемой жидкости в центральном канале теплообменника описывается решением дифференциального уравнения переноса тепла жидкостью, движущейся в режиме идеального вытеснения по каналу в условиях теплообмена со стенкой канала:

$$t(x) = t_F + (t_0 - t_F) \exp(-Kx);$$

$$K = \frac{\alpha \Pi}{Gc}.$$

Здесь $t(x)$ – текущая температура исследуемой жидкости, °С; x – пространственная координата по направлению движения потока жидкости, м; G – массовый расход жидкости, кг/с; c – теплоемкость жидкости, Дж/(кг°С); Π – омываемый периметр внутренней стенки центрального канала, м; α – коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки центрального канала к жидкости, Вт/(м²°С); t_0 – начальная температура жидкости (на текущем участке), °С; t_F – температура внутренней стенки центрального канала, °С.

Температурное поле потока горячего теплоносителя в кольцевом канале теплообменника описывается решением того же дифференциального уравнения, как и температурное поле потока исследуемой жидкости, но с учетом наличия двух поверхностей с различными температурами:

$$t_1(x) = V + (t_0 - V) \exp(-K_1 x);$$

$$K_1 = \frac{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2}{G_1 c_1};$$

$$V = \frac{\alpha_1 \Pi_1 t_{F1} + \alpha_2 \Pi_2 t_{F2}}{\alpha_1 \Pi_1 + \alpha_2 \Pi_2},$$

где $t_1(x)$ – текущая температура горячего теплоносителя, °С; x – пространственная координата по направлению движения потока, м; G_1 – массовый расход горячего теплоносителя, кг/с; c_1 – теплоемкость горячего теплоносителя, Дж/(кг°С); Π_1 – омываемый периметр наружной стенки центрального канала, м; Π_2 – омываемый периметр внутренней стенки корпуса, м; α_1 – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной стенки центрального канала к жидкости; α_2 – коэффициент конвективной теплоотдачи от внутренней стенки корпуса к жидкости; t_{F1} , t_{F2} – температуры наружной стенки центрального канала и внутренней стенки корпуса, °С, соответственно.

Температурное поле стенки центрального канала описывается решением стационарной задачи теплопроводности для полого неограниченного цилиндра:

$$t_i(r) = A \ln(r) + B;$$

$$B = t_c + A \left(\frac{\lambda}{\alpha R_1} - \ln(R_1) \right);$$

$$A = \frac{t_{c1} - t_c}{\frac{\lambda}{\alpha_1 R_2} + \frac{\lambda}{\alpha R_1} + \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)},$$

где r – пространственная радиальная координата, м; $t_i(r)$ – температурное поле стенки центрального канала, °С; λ – теплопроводность материала стенки центрального канала, Вт/(м°С); t_c , t_{c1} – соответственно средние температуры исследуемой жидкости и горячего теплоносителя (на текущем участке), °С; R_1 , R_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы стенки центрального канала, м.

Температурное поле стенки корпуса теплообменника $t_k(r)$ определяется по тем же формулам, что и температурное поле стенки центральной трубки со следующими заменами:

– внутреннего и наружного радиусов стенки центрального канала соответственно на внутренний и наружный радиусы стенки корпуса;

- теплопроводности материала стенки центрального канала на теплопроводность материала стенки корпуса;
- коэффициентов конвективной теплоотдачи от внутренней и наружной стенок центрального канала соответственно на коэффициенты конвективной теплоотдачи от внутренней и наружной стенок корпуса;
- средней температуры исследуемой жидкости на среднюю температуру горячего теплоносителя;
- средней температура горячего теплоносителя на температуру окружающей среды.

Алгоритм обработки экспериментальных данных включает определение поправочного коэффициента к значению коэффициента конвективной теплоотдачи от исследуемой жидкости, рассчитанному по критериальному уравнению для потока при вынужденном движении в прямой трубе круглого сечения [5], при котором расчетное значение выходной температуры исследуемой жидкости отличается от измеренной температурным датчиком 11 менее чем на $0,1$ °С. Такой способ оценки интенсивности процессов теплоотдачи выбран, чтобы обеспечить возможность сравнения результатов исследования при варьировании расходов исследуемой жидкости.

В качестве исследуемой жидкости использовались дистиллированная вода без наномодификатора и с наномодификатором в количествах 0,01, 0,05 и 0,1 масс.%. Выбранный диапазон обусловлен экономической целесообразностью интенсификации теплообменных процессов при минимальных расходах наномодификатора. В качестве наномодификатора использовались УНТ, функционализированные по методике, представленной в [6]. Для каждого вида исследуемой жидкости выполнено не менее 120 независимых измерений стационарных температур при ряде фиксированных расходов и незначительных изменениях температуры окружающей среды. При этом значения критерия Рейнольдса для исследуемой жидкости находились в интервале 900...1600, что обеспечивало требуемое лимитирование процесса теплопередачи теплоотдачей от исследуемой жидкости.

Далее представлены полученные значения степени повышения коэффициента теплоотдачи K от дистиллированной воды с внесенным наномодификатором по отношению к коэффициенту теплоотдачи от дистиллированной воды без добавок:

УНТ, масс.%	0,01	0,05	0,1
K , %	4,7	14,2	21,3

Данные результаты обосновывают целесообразность использования функционализированных УНТ серии «Таунит» в качестве наномодификатора жидких теплоносителей для интенсификации процессов конвективной теплоотдачи в тех случаях, когда теплопередача лимитируется теплоотдачей от теплоносителя. Кроме того, необходимо проведение дальнейших исследований по интенсификации процессов теплопередачи в теплообменном оборудовании для других типов жидких теплоносителей и наномодификаторов на основе УНМ «Таунит».

Список литературы

1. Choi, S. U. S. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles / S. U. S. Choi, J. A. Eastman // Conference: International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 12 – 17 November, 1995, San Francisco, CA (United States). – United States, 1995. – Vol. 231. – P. 99 – 106.
2. Xuan, Y. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids / Y. Xuan, Q. Li // International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2000. – Vol. 21, No. 1. – P. 58 – 64.

3. Окисление многослойных углеродных нанотрубок в парах перекиси водорода: закономерности и эффекты / Т. П. Дьячкова, Ю. А. Хан, Н. В. Орлова, С. В. Кондрашов // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2016. – Т. 22, № 2. – С. 323 – 333. doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333

4. Туголуков, Е. Н. Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств : монография / Е. Н. Туголуков. – М. : Машиностроение-1, 2004. – 100 с.

5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Гос. науч.-техн. изд-во хим. литературы, 1961. – 830 с.

6. Исследование теплопроводности наномодифицированных жидкостей / Е. Н. Туголуков, А. Дж. Аль-Шариф, Т. П. Дьячкова, Е. А. Буракова // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2019. – Т. 25, № 4. – С. 671 – 677. doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.671-677

The Research into Heat Transfer of Nanomodified Liquids

A. V. Rukhov¹, E. N. Tugolukov², A. J. Al-Sharif²

*Departments of Chemistry and chemical technology (1);
Technique and production technology of nanoproducs (2),
tugolukov.en@mail.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: heat transfer of liquid; carbon nanotubes.

Abstract: A description of experimental studies of the heat transfer process of water containing a nanomodifier, which is a functionalized carbon nanotube of the Taunitseries, is given. A diagram of an experimental setup for studying the heat transfer of liquids, methods for performing experimental research and processing measurement results are presented. The results of a study of the effect of the concentration of nanomodifier on the heat transfer of water are discussed.

References

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Conference, International Mechanical Engineering Congress and Exhibition, 12 - 17 November, 1995, San Francisco, CA (United States), United States, 1995, vol. 231, pp. 99-106.

2. Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2000, vol. 21, no. 1, pp. 58-64.

3. D'yachkova T.P., Khan Yu.A., Orlova N.V., Kondrashov S.V. [Oxidation of multilayer carbon nanotubes in hydrogen peroxide vapor: patterns and effects], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2016, vol. 22, no. 2, pp. 323-333, doi: 10.17277/vestnik.2016.02.pp.323-333 (In Russ., abstract in Eng.)

4. Tugolukov Ye.N. *Matematicheskoye modelirovaniye tekhnologicheskogo oborudovaniya mnogoassortimentnykh khimicheskikh proizvodstv: monografiya* [Mathematical modeling of technological equipment of multi-assortment chemical plants: monograph], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2004, 100 p. (In Russ.)

5. Kasatkin A.G. *Osnovnyye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Main processes and apparatuses of chemical technology], Moscow: Gosudarstvennoye nauchno-tekhnicheskoye izdatel'stvo khimicheskoy literatury, 1961, 830 p. (In Russ.)

6. Tugolukov Ye.N., Al'-Sharif A.Dzh., D'yachkova T.P., Burakova Ye.A. [The study of thermal conductivity of nanomodified liquids], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2019, vol. 25, no. 4, pp. 671-677, doi: 10.17277/vestnik.2019.04.pp.671-677 (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der Wärmeübertragung der nanomodifizierten Flüssigkeiten

Zusammenfassung: Es ist die Beschreibung der experimentellen Untersuchungen des Wärmeübertragungsprozesses von Wasser mit einem Nanomodifikator beschrieben, der funktionalisierte Kohlenstoffnanoröhrchen der Taunit-Reihe ist. Es ist ein Schema der experimentellen Anlage für die Untersuchung der Wärmeübertragung von Flüssigkeiten, Verfahren zur Durchführung von experimentellen Studien und Verarbeitung von Messergebnissen angeführt. Die Ergebnisse der Untersuchung der Auswirkungen der Konzentration von Nanomodifikatoren auf die Wärmeübertragung von Wasser sind vorgestellt.

Etude de la dissipation thermique des fluides nanomodifiés

Résumé: Est donnée une description des études expérimentales du processus du transfert de la chaleur de l'eau contenant un nanodifiant, qui présente une série de nanotubes de carbone fonctionnalisés de la série «taunite». Sont mentionnés le schéma de l'installation expérimentale pour l'étude du transfert de la chaleur des liquides, les méthodes d'exécution des études expérimentales et le traitement des résultats de mesure. Sont présentés les résultats de l'étude de l'influence de la concentration de nanodifiant sur la dissipation de la chaleur de l'eau.

Авторы: *Рухов Артём Викторович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Химия и химические технологии»; *Туголуков Евгений Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов»; *Аль-Шариф Али Джалаль* – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Карпушкин Сергей Викторович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.