

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛООТДАЧИ ПРИ ТЕЧЕНИИ НАНОЖИДКОСТЕЙ

Е. Н. Слободина, И. А. Степашкин, Д. В. Коваленко,
А. Г. Михайлов, Е. А. Рогачев

Омский государственный технический университет,
Россия, 644050, г. Омск, пр. Мира, 11

В статье рассмотрены особенности протекания процессов теплообмена при течении модифицированных теплоносителей (наножидкостей). Приведены способы получения наножидкостей и их классификация. Особое внимание уделено теплофизическим характеристикам модифицированных теплоносителей, которые определяют интенсивность теплообмена при течении наножидкостей. В настоящей работе представлены результаты расчетных исследований теплофизических характеристик наножидкостей и процессов теплообмена при течении модифицированных теплоносителей.

Ключевые слова: наножидкость, теплообмен, теплопроводность, вязкость, режимы течения, плотность.

I. Введение

В настоящее время создание новых теплоносителей для интенсификации теплообмена в теплоэнергетических установках является актуальным. Одним из возможных методов решения этого вопроса является использование наножидкостей в качестве теплоносителей. Наножидкость создают путем добавления наночастиц в базовую жидкость. Вновь полученные жидкости обладают, в том числе, и более высокой теплопроводностью, что создает предпосылки для интенсификации теплообмена.

Наножидкости характеризуются и особыми свойствами переноса, в отличие от крупных дисперсных частиц наночастицы практически не сегментируют, они не подвергают эрозии каналы, по которым движутся. По этим и некоторым другим причинам наножидкости являются весьма перспективным рабочим телом во многих теплофизических приложениях: для охлаждения различных устройств, при создании новых систем транспортировки и производства тепловой энергии и т.п. Это мотивировало интенсивное исследование теплообменных свойств наножидкостей.

Полученные результаты оказались достаточно противоречивыми.

Наножидкости включают в себя наночастицы, материалом которых являются, например, чистые металлы или их оксиды; неметаллы — графены, углеродные нанотрубки; простые вещества — соединения кремния; композиты и многие другие.

На рис. 1 приведены фотографии наночастиц Al_2O_3 , сделанные при помощи электронного микроскопа JEOL JCM-5700 в научно-образовательном ресурсном центре нанотехнологий «Наноцентр» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

В табл. 1 представлены значения коэффициентов теплопроводности для различных материалов наночастиц.

II. Постановка задачи

В литературе приведены результаты экспериментальных исследований процессов теплопереноса при течении наножидкостей. При этом опытные данные различных авторов не всегда совпадают. Это объясняется сложностью описания процессов теплообмена при течении наножидкостей [1–4].

На текущий момент теоретические и экспериментальные исследования свойств наножидкостей проводятся учеными во многих странах, включая Россию. И это сопровождается многочисленными публикациями, посвященными данной тематике. Вышли в свет монография (Das) и ряд обзорных статей, в которых раскрыт обширный круг проблем и вопросов — от теплофизических свойств наножидкостей до практического их использования в технических устройствах (Das, Ding и др.) [1].

Механизм процесса теплообмена при течении наножидкостей на основе опытных данных широко представлен в работах авторов Терехова В. И., Рудяк В. Я., Ding, в которых осуществлено обобщение опытных данных с использованием критериальных уравнений для расчета коэффициента теплоотдачи для различных режимов течений при вынужденном движении наножидкостей. Показано, что при вынужденном движении при смешении наночастиц и базовой жидкости (водой) фиксируется увеличение коэффициента теплопроводности в наножидкости по сравнению с базовой [2].

Достижимый эффект интенсификации теплообмена зависит от режима течения и концентрации наночастиц. При установившемся ламинарном режиме течения наножидкости коэффициент теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплопроводности теплоносителя.

При турбулентном течении увеличение коэффициента теплоотдачи определяется соотношением между коэффициентами теплопроводности и вязкости [2].

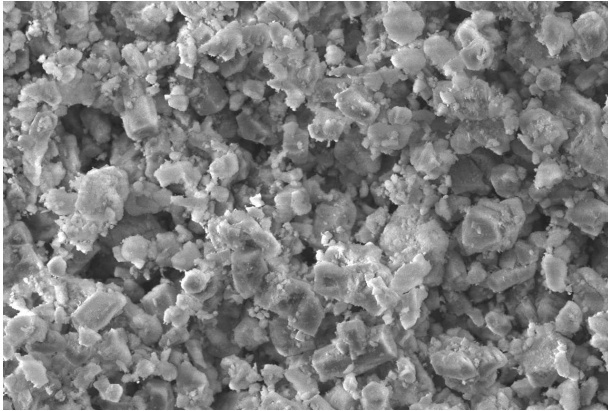


Рис. 1. Наночастицы оксида алюминия
Fig. 1. Nanoparticles of aluminum oxide

Таблица 1. Теплопроводность различных материалов
Table 1. Thermal conductivity of various materials

Название материала	k , Вт/м·К
Глинозем (окись алюминия, Al_2O_3)	20
CuO (окись меди)	40
SiC (карбид кремния)	120
Au (золото)	317
Cu (медь)	401
Углеродные нанотрубки	~3000
Вода	0,55

В настоящей работе представлены методики расчета теплофизических характеристик наножидкостей и процессов теплообмена при течении модифицированных теплоносителей с целью оценки возможности применения данных суспензий в теплоэнергетических установках в качестве теплоносителя.

III. Теория

Существует два основных метода получения наножидкостей.

При реализации первого варианта наночастицы формируются с последующим распределением в базовой жидкости при прохождении химических реакций или возможны к применению методы испарения вещества (диффузии) непосредственно в жидкость.

При реализации второго варианта на первом этапе получают наночастицы, а затем диспергируют их в базовой жидкости с использованием поверхностно-активных веществ, а также ультразвука или магнитного поля. В качестве материалов наночастиц используют, например, чистые металлы, оксиды и углерод. Для формирования базовой жидкости используют воду, различные другие жидкости. Вследствие малых размеров включений (20 – 100 нм), наножидкости обладают особыми теплофизическими характеристиками. Добавление наночастиц в базовую жидкость интенсифицирует процесс конвективного теплообмена, который, в свою очередь, зависит от плотности ρ , вязкости η , теплоемкости C_p и коэффициента теплопроводности k . Далее по тексту введены следующие обозначения: NF — наножидкость; f — жидкость (вода).

Рассмотрим основные теплофизические характеристики, определяющие теплообмен при течении наножидкостей [2, 5].

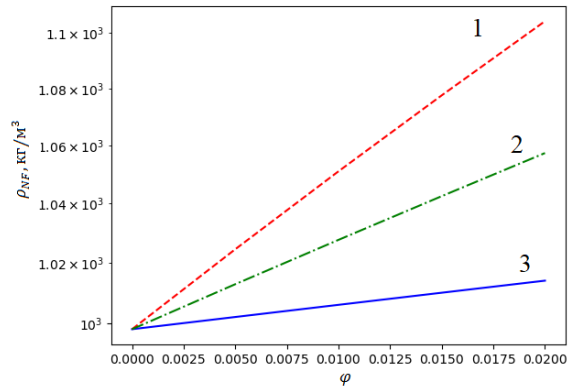


Рис. 2. Изменение плотности наножидкостей в зависимости от концентрации наночастиц:

- 1 — плотность наножидкости на основе углеродных трубок в зависимости от концентрации;
2 — плотность наножидкости на основе CuO в зависимости от концентрации;
3 — плотность наножидкости на основе Al_2O_3 в зависимости от концентрации
- Fig. 2. The variation of nanofluid density as a function of nanoparticle concentration:
1 — density of nanofluid based on carbon nanotubes as a function of concentration;
2 — density of nanofluid based on CuO as a function of concentration;
3 — density of nanofluid based on Al_2O_3 as a function of concentration

Для расчета плотности наножидкости существует следующая зависимость:

$$\rho_{NF} = (1 - \phi)\rho_f + \phi\rho_s,$$

где ϕ — концентрация частиц; ρ_f — плотность базовой жидкости (вода); ρ_s — плотность частиц.

Плотность наножидкости с ростом концентрации растет и зависит от плотностей и концентрации частиц, плотности базовой жидкости (рис. 2).

Для расчета динамической вязкости наножидкости используется модель Эйнштейна в пределах концентраций наночастиц, не превышающих 2 %.

$$\eta_{NF} = \eta_0(1 + k'\phi),$$

где η_{NF} — динамическая вязкость смеси; η_0 — динамическая вязкость чистой жидкости; ϕ — концентрация частиц; k' — коэффициент формы, для сферических частиц равен 2,5. Преимуществом модели Эйнштейна является ее простота и удобство в использовании при расчетах вязкости смесей с небольшими концентрациями частиц.

Вязкость наножидкости растет с увеличением концентрации добавленных в базовую жидкость наночастиц.

Также определяющей является вязкость базовой жидкости (рис. 3).

Теплоемкость наножидкости зависит от теплоемкости базовой жидкости и концентрации наночастиц. Для расчета теплоемкости наножидкости используется следующая модель:

$$(\rho C_p)_{NF} = (1 - \phi)(\rho C_p)_f + \phi(\rho C_p)_s,$$

где C_{pf} — изобарная теплоемкость базовой жидкости; C_{ps} — изобарная теплоемкость частиц; ϕ — концентрация частиц.

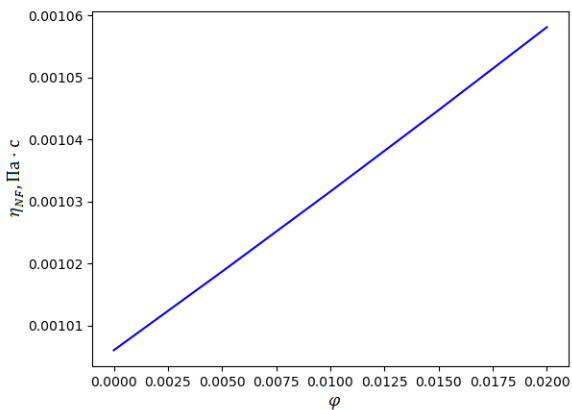


Рис. 3. Зависимость изменения вязкости наножидкости от концентрации наночастиц
Fig. 3. The dependence of viscosity change in the nanofluid on nanoparticle concentration

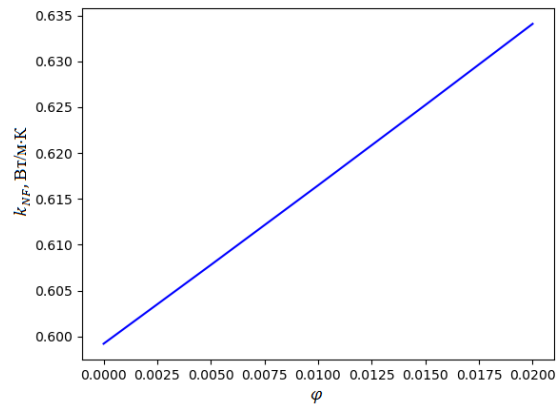


Рис. 5. Зависимость коэффициента теплопроводности наножидкости от концентрации наночастиц
Fig. 5. The dependence of the thermal conductivity coefficient of the nanofluid on the nanoparticle concentration

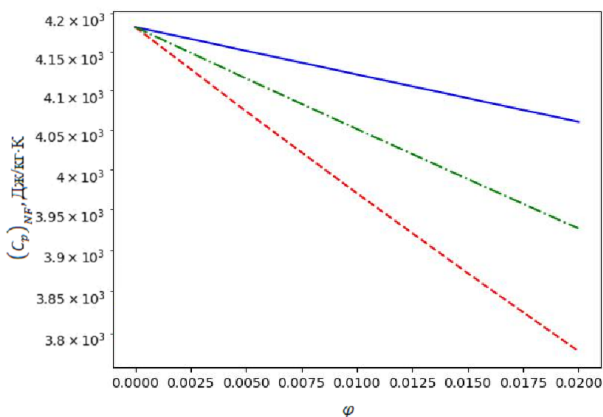


Рис. 4. Изменение теплоемкости наножидкости от концентрации наночастиц:
1 — теплоемкость наножидкости на основе углеродных трубок в зависимости от концентрации;
2 — теплоемкость наножидкости на основе CuO в зависимости от концентрации;
3 — теплоемкость наножидкости на основе Al₂O₃ в зависимости от концентрации
Fig. 4. The change in the specific heat capacity of the nanofluid as a function of nanoparticle concentration:
1 — specific heat capacity of carbon nanotube-based nanofluid as a function of concentration;
2 — specific heat capacity of CuO-based nanofluid as a function of concentration;
3 — specific heat capacity of Al₂O₃-based nanofluid as a function of concentration

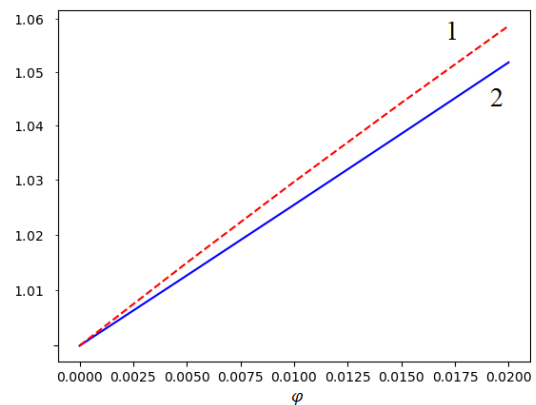


Рис. 6. Изменение относительных коэффициентов теплоотдачи в сравнении с относительным коэффициентом динамической вязкости от концентрации наночастиц:
1 — относительный коэффициент теплоотдачи a_{NF}/a_f наножидкости на основе CuO;
2 — относительный коэффициент динамической вязкости η_{NF}/η_f наножидкости на основе CuO
Fig. 6. Changes in relative heat transfer coefficients compared to the relative dynamic viscosity coefficient as a function of nanoparticle concentration:
1 — relative heat transfer coefficient a_{NF}/a_f of CuO-based nanofluid;
2 — relative dynamic viscosity coefficient η_{NF}/η_f of CuO-based nanofluid

Теплоемкость наножидкости снижается с ростом концентрации наночастиц по сравнению с базовой жидкостью (рис. 4).

Для описания процессов теплопроводности в наножидкостях с низким содержанием наночастиц (до 2 %) применяют модель Максвелла. Результаты расчета с использованием данной модели показывают, что эффективная теплопроводность суспензии, содержащей частицы сферической формы, растет с увеличением концентрации твердых частиц (рис. 5).

$$\frac{k_{NF}}{k_f} = \frac{(k_s + 2k_f) - 2\phi(k_f - k_s)}{(k_s + 2k_f) + \phi(k_f - k_s)},$$

где k_f — коэффициент теплопроводности базовой жидкости; k_s — коэффициент теплопроводности частиц; ϕ — концентрация частиц.

На рис. 5 показано, что с ростом концентрации наночастиц, оксида меди CuO, наблюдается рост коэффициента теплопроводности наножидкости.

Проведенные различными авторами систематические исследования теплопереноса позволяют утверждать, что в общем случае коэффициент теплоотдачи наножидкости существенно выше соответствующего значения для базовой жидкости. Достижимый эффект зависит от режима течения [1, 2]. В ламинарном режиме увеличение коэффициента теплоотдачи достигается во всех случаях и определяется коэффициентом теплопроводности.

В турбулентном режиме получаемый эффект пропорционален комплексу $k^{0.57}/\eta^{0.37}$. Так как теплопроводность наножидкости благодаря наночастицам увеличивается, при ламинарном режиме течения коэффициент теплоотдачи растет вне зависимости от изменения величины коэффициента динамической вязкости.

При турбулентном режиме течения положительный для интенсификации теплообмена эффект определяется соотношением между коэффициентами теплопроводности и динамической вязкости наножидкости [2].

Ламинарный режим течения теплоносителя — наножидкости в теплоэнергетических установках, как правило, является рациональным выбором по сравнению с турбулентным. При этом режиме коэффициент теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплопроводности. Также необходимо учитывать значения динамической вязкости (рис. 6) [6–8].

Определяющим фактором энергетической эффективности жаротрубного котла является условие, при котором $\alpha_{NF}/\alpha_f > \eta_{NF}/\eta_f$.

На рис. 6 показано, что изменение относительно коэффициента теплоотдачи выше коэффициента относительной динамической вязкости в диапазоне концентраций от 0–2 %, что является рабочим диапазоном для теплотехнических характеристик жаротрубного котла.

V. Обсуждение результатов

С увеличением концентрации наночастиц в наножидкости происходит рост количества частиц в единице объема, что приводит к увеличению количества взаимодействий между частицами. Эти взаимодействия приводят к изменению теплофизических характеристик наножидкости, таких как плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность [9, 10].

Ламинарный режим течения теплоносителя — наножидкости, как правило, является рациональным выбором по сравнению с турбулентным. В теплоэнергетических установках при ламинарном режиме коэффициент теплоотдачи пропорционален коэффициенту теплопроводности. Также необходимо учитывать значения динамической вязкости, характеризующие потери удельной энергии.

VI. Выводы и заключение

В результате расчетных исследований показано, что увеличение коэффициента теплоотдачи зависит от режима течения наножидкости. При ламинарном режиме всегда отмечается рост теплоотдачи пропорционально коэффициенту теплопроводности наножидкости. При турбулентном коэффициент теплоотдачи также зависит и от вязкости наножидкости.

Ламинарный режим течения теплоносителя — наножидкости — является рациональным выбором по сравнению с турбулентным в теплоэнергетических установках.

Определяющим фактором энергетической эффективности жаротрубного котла является условие, при котором $\alpha_{NF}/\alpha_f > \eta_{NF}/\eta_f$ в объеме с теплоносителем.

Что создает предпосылки для разработки высокоэффективного жаротрубного котла с модифицированным теплоносителем.

Список источников

1. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы. Часть 2. Конвективный теплообмен // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 2. С. 173–188. EDN: NDNMOT.
2. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. А. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика. 2016. Т. 19, № 1. С. 75–83.
3. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В. [и др.]. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, вып. 2. С. 256–263. DOI: 10.7868/S0040364415020167. EDN: TLOTON.
4. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1652. 012037. P. 1–4. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037.
5. Awais M., Bhuiyan A. A., Salehin S. [et al.]. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview // International Journal of Thermofluids. 2021. Vol. 10 (4). DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100086.
6. Hadad K., Rahimian A., Nemaollahi M. R. Numerical study of single and two-phase models of water/ Al_2O_3 nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor // Annals of Nuclear Energy. 2013. Vol. 60. P. 287–294. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.05.017.
7. Yu W., France D. M., Timofeeva E. V. [et al.]. Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow // Applied Physics Letters. 2010. Vol. 96 (21). 213109. P. 1–3. DOI: 10.1063/1.3435487.
8. Haghghi E. B., Utomo A. T., Ghanbarpour M. [et al.]. Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids in Turbulent Flow: Methods of Comparing Their Performance // Experimental Thermal and Fluid Science. 2014. Vol. 57. P. 378–387. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019.
9. Слободина Е. Н., Михайлов А. Г., Гасс Е. А. Экспериментальные и расчетные исследования процесса кипения наножидкости // Известия Транссиба. 2023. № 1 (53). С. 103–109. EDN: NYYGES.
10. Минаков А. В., Рудяк В. Я., Гузей Д. В. [и др.]. Измерение коэффициента теплоотдачи наножидкости на основе воды и частиц оксида меди // Теплофизика высоких температур. 2015. Т. 53, № 2. С. 256–263. DOI: 10.7868/S0040364415020167. EDN: TLOTON.

СЛОБОДИНА Екатерина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теплоэнергетика» Омского государственного технического университета (ОмГТУ), г. Омск.

SPIN-код: 3785-9045

ORCID: 0000-0002-5168-2502

ResearcherID: R-7340-2016

Адрес для переписки: slobodina_e@mail.ru

СТЕПАШКИН Иван Александрович, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 3166-3378

AuthorID (РИНЦ): 948077

AuthorID (SCOPUS): 57214754518

КОВАЛЕНКО Дмитрий Валерьевич, старший преподаватель кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7587-8782

AuthorID (РИНЦ): 901108

ORCID: 0000-0003-4822-4145

AuthorID (SCOPUS): 57193410109

ResearcherID: R-7414-2017



МИХАЙЛОВ Андрей Гаррьевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Теплоэнергетика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 7337-8036

AuthorID (РИНЦ): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

РОГАЧЕВ Евгений Анатольевич, кандидат технических наук, доцент (Россия), доцент кафедры «Физика» ОмГТУ, г. Омск.

SPIN-код: 1373-4622

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

Для цитирования

Слободина Е. Н., Степашкин И. А., Коваленко Д. В., Михайлов А. Г., Рогачев Е. А. Расчетные исследования теплоотдачи при течении наножидкостей // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2023. Т. 7, № 3. С. 46–52. DOI: 10.25206/2588-0373-2023-7-3-46-52.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023 г.

© Е. Н. Слободина, И. А. Степашкин, Д. В. Коваленко,
А. Г. Михайлов, Е. А. Рогачев

CALCULATION STUDIES OF HEAT TRANSFER IN THE FLOW OF NANOFLUIDS

E. N. Slobodina, I. A. Stepashkin, D. V. Kovalenko,
A. G. Mikhailov, E. A. Rogachev

Omsk State Technical University,
Russia, Omsk, Mira Ave., 11, 644050

This research delves into the study of heat transfer in nanofluids, which are specialized fluids containing nanoparticles. The investigation focuses on understanding crucial factors affecting heat transfer in nanofluids, such as thermal conductivity, viscosity, flow patterns, and density. Both experimental and computational methods are employed to explore how various nanofluid compositions perform in different scenarios. The outcomes of this study contribute to an improved comprehension of nanofluid behavior and its potential applications in enhancing heat transfer processes.

Keywords: nanofluid, heat transfer, thermal conductivity, viscosity, flow regimes, density.

References

1. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. Mekhanizm teploperenosa v nanozhidkostyakh: sovremennoye sostoyaniye problemy. Chast' 2. Konvektivnyy teploobmen [The mechanism of heat transfer in nanofluids: state of the art (review). Part 2. Convective heat transfer] // *Teplofizika i Aeromekhanika. Thermophysics and Aeromechanics*. 2010. Vol. 17, no. 2. P. 173–188. EDN: NDNMOT. (In Russ.).
2. Rudyak V. Ya., Minakov A. V., Krasnolutskii S. L. Fizika i mekhanika protsessov teploobmena v techeniyakh nanozhidkostey [Physics and mechanics of heat exchange processes in nanofluid flows] // *Fizicheskaya Mezomekhanika. Physical Mesomechanics*. 2016. Vol. 19, no. 1. P. 75–83. (In Russ.).
3. Minakov A. V., Rudyak V. Ya., Guzey D. V. [et al.]. Izmereniye koeffitsiyenta teplootdachi nanozhidkosti na osnove vody i chastits oksida medi [Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid based on water and copper oxide particles in a cylindrical channel] // *Teplofizika Vysokikh Temperatur. High Temperature*. 2015. Vol. 53, no 2. P. 246–253. DOI: 10.7868/S0040364415020167. EDN: TLOTOH. (In Russ.).
4. Slobodina E. N., Mikhailov A. G. Application peculiarities of the higherature fluids containing nanoparticles in gas-tube boilers // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1652. 012037. P. 1–4. DOI: 10.1088/1742-6596/1652/1/012037. (In Engl.).
5. Awais M., Bhuiyan A. A., Salehin S. [et al.]. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview // *International Journal of Thermofluids*. 2021. Vol. 10 (4). DOI: 10.1016/j.ijft.2021.100086. (In Engl.).
6. Hadad K., Rahimian A., Nemaollahi M. R. Numerical study of single and two-phase models of water/Al₂O₃ nanofluid turbulent forced convection flow in VVER-1000 nuclear reactor // *Annals of Nuclear Energy*. 2013. Vol. 60. P. 287–294. DOI: 10.1016/j.anucene.2013.05.017. (In Engl.).
7. Yu W., France D. M., Timofeeva E. V. [et al.]. Thermophysical property-related comparison criteria for nanofluid heat transfer enhancement in turbulent flow // *Applied Physics Letters*. 2010. Vol. 96 (21). 213109. P. 1–3. DOI: 10.1063/1.3435487. (In Engl.).
8. Haghghi E. B., Utomo A. T., Ghanbarpour M. [et al.]. Experimental Study on Convective Heat Transfer of Nanofluids on Turbulent Flow: Methods of Comparing Their Performance // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2014. Vol. 57. P. 378–387. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2014.05.019. (In Engl.).
9. Slobodina E. N., Mikhailov A. G., Gass E. A. Eksperimental'nyye i raschetnyye issledovaniya protsessa kipeniya nanozhidkosti [Experimental and computational studies of the nanofluidic boiling process] // *Izvestiya Transsiba. Journal of Transsib Railway Studies*. 2023. No. 1 (53). P. 103–109. (In Russ.).
10. Minakov A. V., Rudjak V. Ya., Guzey D. V. [et al.]. Izmereniye koeffitsiyenta teplootdachi nanozhidkosti na osnove vody i chastits oksida medi [Measurement of the heat transfer coefficient of a nanofluid based on water and copper oxide particles in a cylindrical channel] // *Teplofizika Vysokikh Temperatur. High Temperature*. 2015. Vol. 53, no. 2. P. 256–263. (In Russ.).

SLOBODINA Ekaterina Nikolaevna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Heat Power Engineering Department, Omsk State Technical University (OmSTU), Omsk.
SPIN-code: 3785-9045
ORCID: 0000-0002-5168-2502
ResearcherID: R-7340-2016
Correspondence address: slobodina_e@mail.ru

STEPASHKIN Ivan Alexandrovich, Senior Lecturer of Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 3166-3378
AuthorID (RSCI): 948077
AuthorID (SCOPUS): 57214754518

KOVALENKO Dmitry Valerievich, Senior Lecturer of Heat Power Engineering Department, OmSTU, Omsk.
SPIN-code: 7587-8782
AuthorID (RSCI): 901108
ORCID: 0000-0003-4822-4145
AuthorID (SCOPUS): 57193410109
ResearcherID: R-7414-2017

MIKHAILOV Andrey Garrievich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate



Professor of Heat Power Engineering Department,
OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 7337-8036

AuthorID (RSCI): 385534

AuthorID (SCOPUS): 56503044200

ROGACHEV Evgeny Anatolievich, Candidate of
Technical Sciences, Associate Professor of Physics
Department, OmSTU, Omsk.

SPIN-code: 1373-4622

ORCID: 0000-0003-2622-7492

AuthorID (SCOPUS): 56503848300

ResearcherID: AAS-1459-2020

For citations

Slobodina E. N., Stepashkin I. A., Kovalenko D. V., Mikhailov
A. G., Rogachev E. A. Calculation studies of heat transfer in the
flow of nanofluids // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-
Rocket and Power Engineering. 2023. Vol. 7, no. 3. P. 46–52. DOI:
10.25206/2588-0373-2023-7-3-46-52.

Received September 01, 2023.

© E. N. Slobodina, I. A. Stepashkin,

D. V. Kovalenko,

A. G. Mikhailov, E. A. Rogachev