

ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
ENERGY AND ELECTRICAL ENGINEERING

УДК 621.1.016.001.5

DOI: 10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31

Обзорная статья / Review article

Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике

А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
111250, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14, Россия

Резюме. Цель. Целью работы является исследование вопроса использования наножидкостей в качестве теплоносителей для повышения эффективности отвода тепла в энергетических установках. Для решения поставленной задачи были проанализированы материалы отечественных и зарубежных научных статей, конференций и диссертаций касательно тематики наножидкостей. Многочисленные научные публикации, в том числе цитируемые в международных базах данных Web of Science и Scopus, свидетельствуют о том, что тематика наножидкостей находится в фокусе внимания современной науки. Однако, несмотря на достаточно длительный период исследования флюидов, не все вопросы данной тематики достаточно хорошо освещены и систематизированы, что открывает большие возможности для дальнейших исследований в этом направлении. **Метод.** При достижении поставленной цели рассмотрены области возможного применения флюидов, механизм их синтеза, особенности их эксплуатации, обозначены достоинства как жидкого теплоносителя, а также выявлены недостатки, препятствующие их широкому применению. Особое внимание уделено таким вопросам как: синтез стандартизированных наножидкостей; обеспечение их стабильных свойств; использование поверхностно-активных веществ; увеличение перепада давления внутри теплообменных аппаратов при эксплуатации теплоносителя. **Результат.** Для устранения основного недостатка в виде агломерации наночастиц в базовой жидкости предложено использовать колебательную циркуляцию теплоносителя, которая также позволит дополнительно интенсифицировать теплообмен от принудительной турбулизации флюида. **Вывод.** Полученные результаты могут быть использованы для повышения эффективности работы теплообменных аппаратов с жидким теплоносителем и систем на их основе, а также для снижения массогабаритных параметров таких устройств.

Ключевые слова: интенсификация теплообмена, наножидкость, нанопорошок, базовая жидкость, теплоемкость, теплопроводность, нестабильность наножидкостей, агломерация наночастиц, импульсная циркуляция теплоносителя

Для цитирования: А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин. Проблемы и перспективы использования наножидкостей в теплоэнергетике. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2022; 49(3):24-31. DOI:10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31

Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering

A.N. Makeev, Y.A. Kiryukhin

National Research University «Moscow Power Engineering Institute»,
14 Krasnokazarmennaya Str., Moscow 111250, Russia

Abstract. Objective. The aim of the work is to study the use of nanofluids as heat carriers to increase the efficiency of heat removal in energy facilities. To solve this problem, materials of domestic and foreign scientific articles, conferences and dissertations on the subject of nanofluids were analyzed. Numerous scientific publications, including those cited in the international databases Web of Science and Scopus, indicate that the topic of nanofluids is in the focus of modern science. However, despite a rather long period of fluid research, not all issues of this topic are sufficiently well covered

and systematized, which opens up great opportunities for further research in this direction. **Method.** When achieving this goal, the areas of possible application of fluids, the mechanism of their synthesis, the features of their operation are considered, the advantages as a liquid coolant are indicated, and the disadvantages that prevent their widespread use are identified. Particular attention is paid to such issues as: synthesis of standardized nanofluids; ensuring their stable properties; the use of surfactants; increasing the pressure drop inside heat exchangers during operation of this coolant. **Result.** To eliminate the main drawback in the form of agglomeration of nanoparticles in the base fluid, it is proposed to use the oscillatory circulation of the coolant, which will also further intensify heat exchange from forced turbulence of the fluid. **Conclusion.** The results obtained can be used to improve the efficiency of heat and mass transfer devices with liquid coolant and systems based on them, as well as to reduce the weight and size parameters of such devices.

Keywords: heat transfer intensification, nanofluid, nanopowder, base fluid, heat capacity, thermal conductivity, nanofluid instability, nanoparticle agglomeration, coolant pulsed circulation.

For citation: A.N. Makeev, Y.A. Kiryukhin Problems and prospects for the use of nanofluids in thermal power engineering. Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science. 2022; 49 (3): 24-31. DOI: 10.21822 /2073-6185-2022-49-3-24-31

Введение. Наножидкость - это жидкий теплоноситель, содержащий твердые частицы химически устойчивых металлов и/или оксидов, углеродные нанотрубки и т.п. размером от 1 до 100 нм, диспергированные в базовой жидкости, и характеризующийся улучшенными теплофизическими свойствами [1, 14].

В качестве базовой жидкости обычно выступают дистиллированная вода, спирты, этиленгликоль, машинное масло и т.п. В качестве суспензии для наножидкостей чаще всего используют: алюминий, железо, серебро, титан, цинк, кремний, магний, углеродные нанотрубки, графен, алмаз. Частицы могут быть представлены как в виде чистого элемента (Fe, Al, Ag), так и в виде оксидов одного или нескольких элементов (CuO, Al₂O₃, NiFe₂O₄), сплавов (Ag-Cu, Cu-Zn), карбидов и нитридов металлов (SiC, TiN).

Выбор того или иного химического соединения, обуславливается определенной задачей, для которой создается флюид. Увеличение теплопроводности наножидкостей связывается с различными факторами. Прежде всего, это броуновское движение, которое является основным механизмом, определяющим тепловое поведение дисперсии наночастиц. Другая причина заключается в том, что молекулы жидкости, окружающие наночастицы, образуют слоистые структуры по принципу теплового моста между жидкостью и наночастицами [1-9].

В работе [10] приводится обобщение результатов различных исследований по изучению коэффициента теплопроводности и коэффициента вязкости для различных наножидкостей относительно свойств базовой жидкости. Там же отмечается, что максимальное улучшение теплопроводности на 36% относительно базовой жидкости достигается при использовании многослойных углеродных трубок (MWCNT) в дистиллированной воде. При использовании гибридной наножидкости на основе частиц Cu-TiO₂, диспергированных в деионизированной воде, удалось увеличить теплопроводность базовой жидкости на 68%.

Стоит отметить, что, несмотря на довольно большое количество работ в этом направлении, общепринятой конечной модели описания теплопроводности наножидкостей на сегодняшний момент пока не существует. Однако отправной точкой многих исследователей является модель Максвелла, представляющая классическое описание для теплопроводности суспензий, которая была разработана в 1881 году. Она учитывает две фазы наножидкости и дает удовлетворительные результаты, когда добавленные в базовую жидкость частицы неподвижны, имеют сферическую форму и объемную концентрацию до 25%. В 1935 году Бруггеман предложил уточненную модель, которая может быть применена к суспензиям любой концентрации, а в 1962 году Гамильтон и Кроссер модифицировали модель Максвелла для систем, содержащих несферические частицы [11-15].

Уравнения, основанные на данных моделях, много раз модифицировались с целью повышения точности их решения, однако такие факторы, как конвекция, вызванная электрофорезом, естественная конвекция, вызванная частицами, термофорез и другие явления, все еще не рассматриваются и препятствуют действительной оценке теплопроводности наножидкостей [1].

Постановка задачи. Интенсификация процессов теплообмена - одна из важнейших задач современной энергетики [5]. С ростом научно-технического уровня оперируемая мощность энергосиловых установок повышается, а массогабаритные характеристики теплообменных аппаратов, входящих в их состав, увеличиваются. Поэтому в перспективе необходимости использования высоких удельных мощностей возникает комплексная задача интенсивного отвода теплоты от этих установок при уменьшении их геометрических размеров и массы. Одним из возможных путей решения данной проблемы может стать использование наножидкостей в качестве теплоносителя, который характеризуется относительно высоким коэффициентом теплопроводности.

Методы исследования. Для решения поставленной задачи были проанализированы материалы отечественных и зарубежных научных статей, конференций и диссертаций по тематике наножидкостей. Информация из русскоязычных статей была получена благодаря научным библиотекам eLIBRARY и КиберЛеника. Для доступа к научным публикациям, цитируемым в международных базах данных Web of Science и Scopus, использована система управления библиографической информацией Mendeley. Написание самой научной публикации выполнено с применением библиографического менеджера Zotero. Результаты научных исследований, представленные авторами указанных публикаций, систематизированы и использованы для получения собственных выводов и прогнозов по использованию наножидкостей с учетом собственных разработок.

Обсуждение результатов. Различают два способа получения наножидкостей - одностадийный и двухстадийный. В первом случае, наночастицы непосредственно производятся и распределяются в базовой жидкости в течение одного технологического цикла при помощи химических методов и методов испарения в жидкости [15]. Во втором случае сначала получают наночастицы, затем добавляют их в базовую жидкость, а затем полученную таким образом смесь подвергают разным методам диспергирования.

Наилучшим считается одностадийный метод, поскольку в этом случае возможно получение и растворение более мелких наночастиц, а вероятность их агломерации в таких флюидах достаточно мала. Однако двухстадийный метод представляет наибольший практический интерес, так как транспортировка сухого нанопорошка к месту непосредственного использования наножидкости значительно проще и дешевле, чем готовой наножидкости. Для двухстадийного метода обычно используют частицы на основе оксидов металлов, так как наножидкости на их основе получаются более устойчивыми к агломерации [16].

Возможно использование сразу нескольких компонентов суспензии, взвешенных в базовой жидкости - это продвинутая категория наножидкостей. Основной подход к их использованию заключается в получении преимуществ над однокомпонентными наножидкостями за счет увеличения теплопередачи. Так в работе [10] зафиксировано максимальное повышение теплопередачи на 68% при использовании частиц Cu-TiO₂ в деионизированной воде.

Численное исследование гибридной наножидкости на основе Al₂O₃-Cu и воды в условиях ламинарного течения в прямой трубе [9] показало улучшение теплопроводности на 4,73% по сравнению с наножидкостью с использованием только Al₂O₃ при той же объемной концентрации наночастиц в базовой жидкости.

Диспергирование. Как было сказано выше, особенность получения наножидкостей предполагает равномерное распределение наночастиц в объеме базовой жидкости. Для этой цели чаще всего используют обработку ультразвуком, когда перемешивание наночастиц осуществляется воздействием на них волн определенной частоты, которое приводит к диспергиро-

ванию взвешенных частиц [15]. Создаваемые ультразвуковым воздействием быстро меняющиеся напряжения сжатия и растяжения в жидкости создают разрывающие усилия и обеспечивают кавитацию, которая способствует активному диспергированию частиц в объеме базовой жидкости.

Такими образом, диспергирование наночастиц в базовой жидкости возможно только при определенной интенсивности генерируемых ультразвуком колебаний, которая в каждом случае индивидуальна и зависит как от кавитационной прочности самой базовой жидкости, так и от сил взаимодействия между отдельными частицами твердой фазы.

Согласно [17] оптимальная интенсивность воздействия для разных базовых жидкостей может принимать значения от 1,73 до 34,4 Вт/см² (табл.1).

Таблица 1. Значения оптимальных интенсивностей воздействия для различных сред, используемых на практике

Table 1. Values of optimal exposure intensities for various media used in practice

Наименование жидкости Liquid name	Начальная вязкость, Па·с Initial viscosity	Оптимальная интенсивность, Вт/см ² Optimal intensity
Вода Water	0,00082	1,73
Оливковое масло Olive oil	0,085	4,51
Моторное масло ПМС-400 Engine oil PMS-400	0,4	19,25
Глицерин Glycerol	0,6	34,4
Эпоксидная смола ЭД-5 Epoxy resin ED-5	3	19,95...24,77
Трехфункциональный олигоэфирциклокарбонат на основе окиси пропилена Trifunctional oligoethercyclocar- bonate based on propylene oxide	4	11,92...23,4
Водоугольная суспензия (массовая концентрация 20%) Water-coal suspension (wt. owl concentration 20%)	0,1	13,74...18,74

Для диспергирования также используют метод магнитной мешалки. Принцип такого метода основан на воздействии вращающегося магнитного поля на ведомый элемент, погруженный в емкость с жидкостью и наночастицами.

Стабилизация. Долгосрочная стабильность дисперсии наночастиц является одним из элементарных требований к применению наножидкостей, поскольку от нее напрямую зависит долгосрочность теплофизических характеристик (сохранение высокой теплопроводности) и предотвращение роста вязкости и образования застойных зон в рабочем оборудовании.

Дело в том, что наночастицы практически всегда образуют агломерации из-за существенного эффекта Ван-дер-Ваальсовых взаимодействий. Как правило, решением данной проблемы является приложение внешней силы к кластеризованным коллоидным наночастицам,

модификация их поверхности добавлением поверхностно-активных веществ и изменение pH среды наножидкостей.

В случае добавления поверхностно-активных веществ получающиеся химические соединения концентрируются на поверхности раздела фаз, вызывая снижение сил поверхностного натяжения. Кроме того, они способствуют изменению теплофизических свойств. Например, согласно [8] наножидкость с добавлением 0,5% графитовых нанотрубок обеспечивала увеличение теплопроводности на 3,8%, в то время как при той же объемной концентрации наночастиц с добавлением поверхностно-активных веществ в виде гуммиарабики обеспечивало увеличение теплопроводности на 25,7% относительно базовой жидкости. В исследовании [6] было рассмотрено добавление лаурилсульфата натрия в качестве стабилизатора, что также привело к увеличению теплофизических свойств гибридной наножидкости на основе алюминия и серебра на 16%.

Для устранения такого негативного эффекта как агломерация наночастиц авторами научной статьи [7] предлагается использовать вибрацию поверхности теплопередачи. В подтверждение приводятся результаты экспериментальных исследований, согласно которым наножидкость на основе углеродных трубок демонстрирует увеличение коэффициента теплопередачи в двухтрубном теплообменнике на 100% при уровне электродинамической вибрации 9 м/с^2 .

Особо следует подчеркнуть, что использование вибраций и колебаний поверхности теплообмена или же самого теплоносителя, содержащего наночастицы, может быть использовано для дополнительной интенсификации теплообмена [18].

Исследования в области применения наножидкостей в теплообменниках в последние годы были очень активными, и большинство научных публикаций указывают на то, что такие флюиды могут повышать эффективность теплоэнергетических систем на их основе. Наножидкости обладают улучшенными теплофизическими свойствами (прежде всего, теплопроводность и теплоемкость) и могут являться альтернативным решением проблемы снижения габаритных размеров теплообменных аппаратов при увеличении их тепловых мощностей.

В научной статье [13] приводятся сведения о применении наножидкости на основе графитовых нанотрубок в кожухотрубных, пластинчатых и двухтрубных теплообменниках для улучшения характеристик теплообмена. Авторами научной статьи подчеркивается, что использование такой наножидкости в сопоставлении с наножидкостями на основе металлов дает наилучшие результаты, поскольку они обладают более высокой теплопроводностью.

В работе [11] представлены результаты исследования характеристик наножидкости на основе частиц Al_2O_3 и MgO , диспергированных в воде, и применяемой в качестве теплоносителя в теплообменнике типа «труба в трубе». Суть научной работы заключалась в том, что на внутреннюю трубу теплообменника накладывались обмотки различных типов: сходящихся (С), расходящихся (D) и сходящихся-расходящихся (С-D). Результаты показали, что число Нуссельта наножидкости с использованием проволоки D-типа, С-D-типа и С-типа улучшилось на 84, 47 и 57%, соответственно, в то время как соответствующие значения коэффициента трения составили 71, 68 и 46%, по сравнению с этим же теплоносителем в этом же теплообменнике, но без вставок на внутренней трубе.

Метод улучшения конвективной теплоотдачи наножидкости при стремлении к уменьшению перепада давления в компьютерной модели теплообменника типа «труба в трубе» рассмотрен в работе [3]. Флюид подвергался воздействию внешнего магнитного поля, вызывающего закручивание потока теплоносителя при его движении вдоль теплообменника. Результаты такого моделирования показали, что применение вращающегося магнитного поля позволило увеличить теплопередачу на 320%. Такой эффект объясняется тем, что создаваемый вихревой поток разрушает тепловой пограничный слой и, следовательно, улучшает перемешивание потока внутри теплообменного аппарата.

В последнее время также проводятся исследования эффективности применения наножидкостей в циклах ГТУ, в том числе и с промежуточным охлаждением [2]. В указанной научной работе показано, что наножидкость на основе графитовых нанотрубок увеличивает эффективность работы промежуточного теплоносителя на 1-2 % в диапазоне температур от 40 до 50 градусов соответственно. Авторами научной статьи также сообщается, что в условиях использования наножидкости в цикле ГТУ в качестве промежуточного теплоносителя, на процесс теплообмена влияет не только конструкция самого промежуточного охладителя и состав рабочей жидкости, но и температура газа на входе в этот охладитель. При ее повышении эффективность наножидкости также увеличивается.

Несмотря на свои улучшенные теплофизические свойства, наножидкости имеют и ряд недостатков, которые явно следуют из рассмотренных выше особенностей их получения и эксплуатации.

Первой проблемой является синтез стандартизированных по своим свойствам флюидов. Наночастицы в исходном состоянии часто характеризуются отклонением размеров в довольно большом диапазоне и не только у разных производителей, но и в различных партиях одного поставщика.

Другой проблемой является стабильность наножидкостей. Свойства их легко меняются и сильно зависят от внешнего воздействия. Кроме этого, агломерация самих наночастиц пагубно влияет на промышленное оборудование, так как их осаждение ведет к образованию застойных зон, сужению и закупориванию проходного сечения для циркуляции теплоносителя.

Вопрос о правильном выборе и оптимальной концентрации поверхностно-активных веществ, применяемых для стабилизации, также стоит очень остро, - с одной стороны добавки улучшают теплопроводность при одних температурах, а с другой стороны - способствуют образованию пены при отклонении от номинального диапазона температур, которая ведет к противоположному эффекту. Кроме того, необходимо проводить исследования коррозионного поведения поверхностно-активных веществ и наночастиц при поддержании надлежащего значения pH. В настоящее время этот вопрос обозначен многими исследователями и остается открытым [12].

Также, проведено мало экспериментальных работ по исследованию поведения наножидкостей при высоких температурах (выше 100 °C). Большинство доступных исследований в этой области применения являются теоретическими исследованиями, основанными на численном моделировании и прогнозах. При этом авторы ссылаются на сложность приготовления и обеспечения стабильной работы при таких условиях [4].

Использование таких флюидов как наножидкость в качестве рабочей жидкости теплообменников серьезно увеличивает перепад давления внутри них, главным образом из-за более высокой вязкости. Следовательно, говоря об эффективности использования таких флюидов, нужно также учитывать и мощность, потребляемую насосами для обеспечения их циркуляции. В этой связи ставится задача на нахождение оптимума «вязкость флюида - эффективность его работы в конкретной энергетической системе».

В зависимости от стоимости исходного сырья и метода получения наножидкостей, стоимость готового к применению флюида может достигать величины, которая сопоставима с затратами на эксплуатацию теплообменного оборудования на основе традиционных теплоносителей. Следовательно, количественные затраты на различные категории наножидкостей и требуемое для их создания оборудование в различных областях теплоэнергетики требуют дальнейших исследований и обоснования практического применения.

Вывод. Несмотря на отмеченные недостатки применение наножидкости - перспективная работа на стыке нанотехнологий и теплоэнергетики. Многочисленное количество научных работ в этом сегменте свидетельствует о том, что тематика наножидкостей находится в фокусе внимания современной науки. Учитывая последнее обстоятельство, важным моментом в перспективе масштабного применения наножидкостей может стать их использование в системах с

колебательной циркуляцией теплоносителя [19]. В таких системах циркуляция теплоносителя обеспечивается в импульсном или пульсирующем режиме, что, в условиях эксплуатации наножидкости позволит:

1. Снизить вероятность агломерации и осаждения наночастиц;
2. Отказаться от применения стабилизаторов-присадок, эффект влияния которых на теплопроводность жидкости вносит некоторую неопределенность в их применение;
3. Поддерживать стабильные свойства наножидкости в условиях постоянного активного перемешивания теплоносителя от использования эффекта прогнозируемого гидродара;
4. Интенсифицировать теплообмен не только от применения самой наножидкости, но и от использования колебательной циркуляции теплоносителя.

Указанные преимущества, полученные в рамках теоретического анализа многочисленных научных публикаций, несомненно, требуют проведения дальнейших экспериментальных исследований в этом направлении, результаты которых будут изложены в последующих работах. В настоящий момент пока лишь стоит отметить, что на имя ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» подана заявка на изобретение №2022104706 от 22.02.2022 «Система солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения», где представлена техническая возможность эксплуатации наножидкости в режиме колебательной циркуляции [20].

Библиографический список:

1. Ali N., Teixeira J. A., Addali A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 6978130.
2. Almurtaji S. [и др.]. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Nanofluids on Marine Gas Turbine Intercooler Performance *Nanomaterials*. 2021; 11: 2300.
3. Bezaatpour M., Goharkhah M. Convective heat transfer enhancement in a double pipe mini heat exchanger by magnetic field induced swirling flow. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 167: 114801.
4. Chavez Panduro E. A. [и др.]. A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211: 118346.
5. Gugulothu R. [и др.]. A Review on Enhancement of Heat Transfer Techniques. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4: 1051–1056.
6. Hormozi F., ZareNezhad B., Allahyar H. R. An experimental investigation on the effects of surfactants on the thermal performance of hybrid nanofluids in helical coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 78: 271–276.
7. Hosseini A., Meghdadi Isfahani A. H., Shirani E. Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coefficient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 90: 275–285.
8. Leong K. Y. The effect of surfactant on stability and thermal conductivity of carbon nanotube based nanofluids. *Thermal Science*. 2016; 20: 429–436.
9. Moghadassi A., Ghomi E., Parvizian F. A numerical study of water based Al₂O₃ and Al₂O₃–Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 92: 50–57.
10. Safiei W. [и др.]. Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020;74: 66–84.
11. Singh S. K., Sarkar J. Improving hydrothermal performance of hybrid nanofluid in double tube heat exchanger using tapered wire coil turbulator. *Advanced Powder Technology*. 2020;5 (31): 2092–2100.
12. Urmi W. [и др.]. Preparation Methods and Challenges of Hybrid Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 78:56–66.
13. Yu S.-P. [и др.]. Enhanced Heat Transfer Performance of the Tube Heat Exchangers Using Carbon-Based Nanofluids *Applied Sciences*. 2021;17 (11).
14. Рудяк В. Я., Минаков А. В., Краснолуцкий С. Л. Физика и механика процессов теплообмена в течениях наножидкостей // Физическая мезомеханика. - 2016. - Т. 19. - № 1. - С. 75-83.
15. Морозова, М.А. Теплопроводность и вязкость наножидкостей: диссертация ... кандидата Физико-математических наук: 01.04.14 / Морозова Марина Анатольевна; [Место защиты: ФГБУН Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук], 2019.
16. Терехов В. И., Калинина С. В., Леманов В. В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Синтез и свойства наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т. 17, № 1. С. 1-15.
17. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в гетерогенных системах с несущей высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой: автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.17.08 / Голых Роман Николаевич. – Бийск, 2014.
18. Галицкий Б. М. Тепловые и гидродинамические процессы в колеблющихся потоках / Б. М. Галицкий, Ю. А. Рыжов, Е. В. Якуш. – М. : Машиностроение, 1977. – 256 с.
19. Макеев, А. Н. Импульсная система теплоснабжения общественного здания: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А. Н. Макеев. — Пенза, 2010. — 20 с.

20. Система солнечного теплоснабжения и горячего водоснабжения: заявка на выдачу патента на изобретение №2022104706 Рос. Федерация / ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» / заявл. 22.02.2022.

References:

1. Ali N., Teixeira J. A., Addali A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. *Journal of Nanomaterials*. 2018; 6978130.
2. Almurtaji S. [и др.]. Effect of Multi-Walled Carbon Nanotubes-Based Nanofluids on Marine Gas Turbine Intercooler Performance *Nanomaterials*. 2021; 11: 2300.
3. Bezaatpour M., Goharkhah M. Convective heat transfer enhancement in a double pipe mini heat exchanger by magnetic field induced swirling flow. *Applied Thermal Engineering*. 2020; 167: 114801.
4. Chavez Panduro E. A. [и др.]. A review of the use of nanofluids as heat-transfer fluids in parabolic-trough collectors. *Applied Thermal Engineering*. 2022; 211: 118346.
5. Gugulothu R. [и др.]. A Review on Enhancement of Heat Transfer Techniques. *Materials Today: Proceedings*. 2017; 4: 1051–1056.
6. Hormozi F., ZareNezhad B., Allahyar H. R. An experimental investigation on the effects of surfactants on the thermal performance of hybrid nanofluids in helical coil heat exchangers. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2016; 78: 271–276.
7. Hosseini A., Meghdadi Isfahani A. H., Shirani E. Experimental investigation of surface vibration effects on increasing the stability and heat transfer coefficient of MWCNTs-water nanofluid in a flexible double pipe heat exchanger. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2018; 90: 275–285.
8. Leong K. Y. The effect of surfactant on stability and thermal conductivity of carbon nanotube based nanofluids. *Thermal Science*. 2016; 20: 429–436.
9. Moghadassi A., Ghomi E., Parvizi F. A numerical study of water based Al₂O₃ and Al₂O₃–Cu hybrid nanofluid effect on forced convective heat transfer. *International Journal of Thermal Sciences*. 2015; 92: 50–57.
10. Safiei W. [и др.]. Thermal Conductivity and Dynamic Viscosity of Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 74: 66–84.
11. Singh S. K., Sarkar J. Improving hydrothermal performance of hybrid nanofluid in double tube heat exchanger using tapered wire coil turbulator. *Advanced Powder Technology*. 2020; 5 (31): 2092–2100.
12. Urmi W. [и др.]. Preparation Methods and Challenges of Hybrid Nanofluids: A Review. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*. 2020; 78:56–66.
13. Yu S.-P. [и др.]. Enhanced Heat Transfer Performance of the Tube Heat Exchangers Using Carbon-Based Nanofluids *Applied Sciences*. 2021;17 (11).
14. Rudyak V. Ya., Minakov A.V., Krasnolutsky S. L. Physics and mechanics of heat transfer processes in nanofluid flows. *Physical mesomechanics*. 2016; 19(1): 75-83. (In Russ)
15. Morozova, M.A. Thermal conductivity and viscosity of nanofluids: dissertation ... Candidate of Physical and Mathematical Sciences: 01.04.14 / Morozova Marina Anatolyevna; [Place of protection: S.S. Kutateladze Institute of Thermophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences], 2019. (In Russ)
16. Terekhov V. I., Kalinina S. V., Lemanov V. V. The mechanism of heat transfer in nanofluids: the current state of the problem (review). Part 1. Synthesis and properties of nanofluids. *Thermophysics and aeromechanics*. 2010; 17(1): 1-15. (In Russ)
17. Golykh, R.N. Improving the efficiency of ultrasonic cavitation effects on chemical and technological processes in heterogeneous systems with a carrier high-viscosity or non-Newtonian liquid phase : abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences 05.17.08 / Naked Roman Nikolaevich. – Biysk, 2014. (In Russ)
18. Galitseisky B. M. Thermal and hydrodynamic processes in oscillating flows / B. M. Galitseisky, Yu. A. Ryzhov, E. V. Yakush. *M. : Mashinostroyeniye*, 1977; 256. (In Russ)
19. Makeev, A. N. Pulse heat supply system of a public building: abstract. dis. ... Candidate of Technical Sciences / A. N. Makeev. Penza, 2010; 20. (In Russ)
20. Solar heat supply and hot water supply system: patent application for invention No. 2022104706 Ros. Federation / FGBOU VO "NIU MEI" / application. 22.02.2022. (In Russ)

Сведения об авторах:

Макеев Андрей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ теплотехники им. М.П. Вукаловича, tggi@rambler.ru ORCID 0000-0001-5356-2144

Кирюхин Ярослав Артурович, студент, институт энергоэффективности и водородных технологий; ykiruhin@gmail.com ORCID 0000-0002-0009-5391

Information about authors:

Andrey N. Makeev, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering named after M.P. Vukalovich, tggi@rambler.ru ORCID 0000-0001-5356-2144

Yaroslav A. Kiryukhin, Student, Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies; ykiruhin@gmail.com ORCID 0000-0002-0009-5391

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 08.08.2022.

Одобрена после рецензирования/Revised 27.08.2022.

Принята в печать/Accepted for publication 27.08.2022.