

А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева
Шәкәрім университет,
071412, Республика Казахстан, г. Семей, ул. Глинки, 20 А
*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ АНТИФРИЗОВ – ОБЗОР

Аннотация: В статье представлен научно-исследовательский обзор современных публикаций, посвященных теплофизическим свойствам антифризов и нанофлюидов на основе этиленгликоля, пропиленгликоля и глицерина, применяемых в теплоэнергетических и инженерных системах. Рассмотрены основные типы низкотемпературных теплоносителей, их температурные диапазоны эксплуатации, а также ключевые требования, предъявляемые к ним при использовании в условиях холодного климата, характерного для регионов с резко континентальными температурными условиями.

Особое внимание уделено анализу влияния добавления наночастиц оксидов металлов и углеродных наноструктур (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , CNT, графен) на теплопроводность, вязкость, плотность и удельную теплоемкость гликолевых теплоносителей. Согласно данным литературы отмечается, что введение наночастиц позволяет существенно повысить коэффициент теплопроводности и интенсивность теплопередачи, однако сопровождается увеличением вязкости, что может приводить к росту гидравлических потерь и энергозатрат на циркуляцию теплоносителя.

В рамках работы выполнен библиометрический анализ научных публикаций за период 2020–2025 гг., позволивший выявить ведущие страны и научные центры, активно развивающие данное направление исследований. Полученные результаты подтверждают перспективность использования наномодифицированных антифризов для повышения энергоэффективности теплотехнических систем и подчеркивают необходимость оптимального подбора состава и концентрации нанодобавок при их практическом применении.

Ключевые слова: антифриз, нанофлюиды, теплофизические свойства, усиление теплопередачи, наночастицы, повышение энергоэффективности.

Введение

В условиях совершенствования теплоэнергетического оборудования и внедрения энергосберегающих технологий тепловые нагрузки в системах технической физики, теплоэнергетики, холодильной и климатической техники неуклонно возрастают. В связи с этим к теплообменному оборудованию и используемым теплоносителям предъявляются повышенные требования, прежде всего в части теплофизических характеристик, эксплуатационной надежности и энергоэффективности. Решение данных задач напрямую связано с принципами устойчивого развития, направленного на рациональное использование энергии, уменьшение выбросов парниковых газов, снижению углеродного следа и повышению энергоэффективности.

Традиционные теплоносители, такие как вода и водные солевые растворы, не всегда обеспечивают требуемую интенсивность теплоотдачи. Кроме того, высокая температура кристаллизации воды (0 °C) и ее склонность к объемному расширению при замерзании существенно ограничивают применение водяных теплоносителей в холодильных установках и системах, эксплуатируемых в условиях отрицательных температур.

В этой связи актуальным является использование незамерзающих теплоносителей – антифризов, способных работать при отрицательных температурах и характеризующихся стабильными эксплуатационными свойствами. Особый интерес представляет модификация таких теплоносителей наночастицами высокотеплопроводных материалов, что позволяет рассматривать наножидкости как перспективное средство интенсификации процессов теплообмена.

Целью данной обзорной статьи является анализ современных научных исследований, посвященных теплофизическим свойствам и тепловым характеристикам наножидкостей, а также оценка перспектив применения наномодифицированных теплоносителей для интенсификации процессов теплообмена в теплоэнергетических системах.

Методы исследования

Настоящая обзорная статья основана на систематическом анализе современных научных публикаций, посвященных исследованию теплофизических свойств и тепловых характеристик наножидкостей, а также оценке эффективности применения наномодифицированных теплоносителей для интенсификации теплообмена в теплоэнергетических системах.

Поиск и отбор литературных источников осуществлялся с использованием международных баз данных Scopus, Web of Science, обеспечивающих доступ к рецензируемым научным журналам. Анализируемые публикации охватывают временной период с 2008 по 2025 годы, что позволяет отразить современные тенденции и актуальное состояние исследуемой области.

В обзор включались научные публикации, соответствующие следующим критериям:

- статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах;
- работы, посвященные экспериментальным, теоретическим или численным исследованиям теплофизических свойств наножидкостей;
- исследования, рассматривающие применение наномодифицированных теплоносителей в теплоэнергетических и теплотехнических системах;
- публикации, содержащие количественные показатели теплофизических характеристик и эффективности теплообмена.

Отобранные публикации были систематизированы и проанализированы для выявления основных закономерностей влияния типа наночастиц, их концентрации и базовой жидкости на теплофизические свойства наножидкостей, а также определения наиболее перспективных направлений дальнейших исследований.

Результаты исследований

Антифризы представляют собой специализированные низкотемпературные теплоносители, предназначенные для обеспечения стабильной работы отопительных, холодильных и климатических систем при отрицательных температурах. В отличие от автомобильных охлаждающих жидкостей, антифризы для инженерных систем имеют иной химический состав и набор присадок, рассчитанных на длительную циркуляцию, широкий диапазон рабочих температур и совместимость с материалами теплотехнического оборудования.

Основными требованиями к теплоносителям данного типа являются: низкая температура замерзания, высокая термическая стабильность, оптимальная вязкость, химическая инертность, антикоррозионная устойчивость, отсутствие склонности к пенообразованию, а также безопасность эксплуатации. Эти параметры определяют эффективность теплообмена, долговечность оборудования и стабильность теплотехнических процессов. Совокупность указанных характеристик определяет эффективность теплообмена, долговечность оборудования и стабильность теплотехнических процессов, что подтверждается результатами исследований физических свойств антифризов, представленных в работе А. Н. Кувшинова и соавторов [1].

Использование антифризов особенно актуально для климатических условий Казахстана, где температура воздуха в зимний период достигает от минус 30 до минус 45 °С [2], что делает эксплуатацию водяных теплоносителей рискованной. Антифризы предотвращают замерзание и разрушение трубопроводов, энергоагрегатов и теплообменных устройств, обеспечивая надежную работу инженерных систем в автономных и централизованных схемах [2].

Химическая классификация антифризов. Антифризы для инженерных систем могут быть классифицированы в зависимости от химического состава, природы базовой жидкости и типа ингибиторов коррозии. Наиболее широко применяются следующие типы теплоносителей:

Этиленгликолевые антифризы (EG). Этиленгликоль ($\text{HO}-\text{CH}_2-\text{CH}_2-\text{OH}$) – наиболее распространенная основа низкотемпературных жидкостей. При смешивании с водой образует растворы, замерзающие при температуре до минус 65 °С. Основные характеристики:

- диапазон рабочих температур: $(-30 \div -65)$ °С;
- верхняя граница нагрева: $(105 \div 110)$ °С;
- оптимальные концентрации: $(40 \div 65)$ %.

Удельная теплоемкость водных растворов этиленгликоля при температуре 20 °С и концентрации $(40 \div 50)$ % составляет в среднем $(3,4 \div 3,7)$ кДж/(кг·К), что ниже теплоемкости воды, но обеспечивает достаточную теплоаккумулирующую способность для большинства теплотехнических систем. Этиленгликолевые теплоносители характеризуются низкой стоимостью, стабильной работой при низких температурах и хорошими условиями теплообмена. Основным недостатком является токсичность, что ограничивает применение в жилых помещениях и системах горячего водоснабжения [2,3].

Пропиленгликолевые антифризы (PG). Пропиленгликоль ($\text{CH}_3-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$) является нетоксичным и безопасным теплоносителем, широко используемым в жилых зданиях, медицинских учреждениях, пищевой промышленности и автономных отопительных системах.

- диапазон рабочих температур: $(-25 \div -55)$ °С;
- верхняя граница нагрева: +120 °С;
- концентрации: $(30 \div 50)$ %.

Удельная теплоемкость водных растворов пропиленгликоля при температуре 20 °С и концентрации $(40 \div 50)$ % составляет $(3,6 \div 3,9)$ кДж/(кг·К), что на $(3 \div 5)$ % выше, чем у этиленгликолевых растворов аналогичной концентрации. Преимуществом пропиленгликолевых антифризов является безопасность, экологичность, высокая совместимость с алюминием и полимерами, а недостатком – повышенная стоимость по сравнению с этиленгликолем [1, 2, 4].

Глицерин содержащие антифризы (GL). Глицериновые теплоносители представляют собой экологичные жидкости с удовлетворительными низкотемпературными свойствами. Они менее текучие, но устойчивы к разложению и безопасны для жилых помещений.

- диапазон работы: $(-20 \div -40)$ °С;
- температуры нагрева: до +105 °С.

Основной минус – высокая вязкость, требующая установки насосов повышенной мощности. Вязкость глицерин содержащих антифризов при концентрации $(40 \div 50)$ % и температуре 20 °С в $(4 \div 10)$ раз выше, чем у этиленгликолевых, и в $(3 \div 6)$ раз выше, чем у пропиленгликолевых теплоносителей, что существенно ограничивает их применение в циркуляционных системах [2, 3].

Несмотря на значительное количество исследований, посвященных теплофизическим свойствам и тепловым характеристикам наножидкостей, остается недостаточно изученным вопрос влияния различных типов наночастиц на теплопроводность теплоносителя.

Одним из эффективных технологических подходов к повышению интенсивности теплообмена является введение в состав базового теплоносителя твердых наночастиц материалов с высокой теплопроводностью.

На рисунке 1 на основании данных [1-3] показаны различия в температурных диапазонах эксплуатации этиленгликолевых, пропиленгликолевых и глицериновых антифризов.

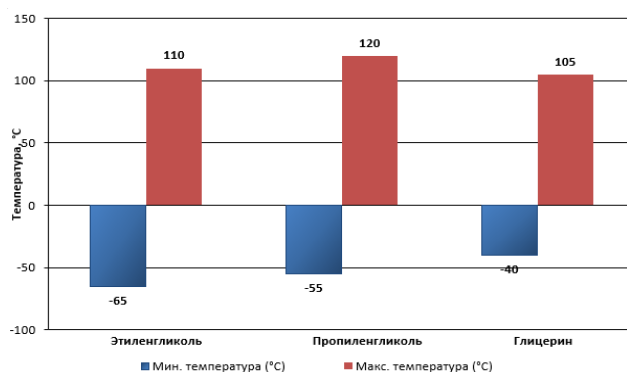


Рисунок 1 – Сравнение рабочих температур различных типов антифризов

Этиленгликоль характеризуется наибольшим диапазоном рабочих температур. Это делает их наиболее эффективными для применения в условиях сурового холодного климата. Пропиленгликолевые антифризы несмотря на худшие низкотемпературные свойства по сравнению с этиленгликолем, выигрывают за счёт более высокой термической стабильности. Глицериновые антифризы обладают ограниченным диапазоном применения вследствие высокой вязкости.

Использование нанофлюидов в современных технологиях началось с 1995 года, после введения понятия «нанофлюид» (nanofluid) ученым Choi S. U. S. [5].

Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. в своей статье отметили ряд преимуществ применения нанофлюидов в качестве теплоносителей по сравнению с использованием истинных растворов:

- при хорошей агрегативной стабильности наночастиц они обладают отличной сегментационной устойчивостью и находятся в жидкости в состоянии броуновского движения;
- нанофлюиды можно использовать в качестве теплоносителей в миниатюрных теплообменных устройствах без опасения засорения теплообменных поверхностей и каналов;

- несмотря на то, что вязкость нанофлюида обычно выше, чем базовой жидкости, потери напора при его циркуляции, отнесенные к переданному количеству теплоты, будут ниже, поскольку интенсивность передачи тепла за счет использования нанофлюидов существенно возрастает;

- свойства нанофлюидов (прежде всего вязкость и теплопроводность) можно регулировать, подбирая требуемую концентрацию наночастиц в базовой жидкости [6].

Наножидкости считаются перспективным способом улучшения теплопередающей способности базовых жидкостей, что подтверждается исследованиями в области применения нанотехнологий для интенсификации теплообмена. Результаты многочисленных научных работ показывают, что добавление наночастиц в теплоносители приводит к увеличению теплопроводности и коэффициента теплоотдачи, что делает наножидкости эффективным средством повышения энергоэффективности теплотехнических и энергетических систем [7-13].

В работе Харисова И.Д. и Осинцева К.В. показано, что введение наночастиц в теплоносители позволяет повысить их теплопроводность и коэффициент теплоотдачи, тем самым интенсифицируя процессы теплообмена и улучшая энергетическую эффективность теплотехнических систем [14].

В статье Sekrani G., Poncet S. предлагается обширный обзор самых последних и актуальных экспериментальных и численных работ по изучению теплофизических свойств и характеристик наножидкостей на основе этилена или пропиленгликоля [15]. В исследовании Krishnan S.S.J., Manjakurram M. рассмотрены проблемы в исследовании наножидкостей, а также перспективы их дальнейшего изучения, обусловленные долгосрочной целью расширения областей применения наножидкостей [16].

Исследования в этой области обобщены в таблице 1

Проведенный обзор научных публикаций показывает, что введение наночастиц в базовые теплоносители (вода, этиленгликоль, пропиленгликоль) позволяет существенно улучшить их теплофизические свойства. Наиболее эффективными являются наночастицы меди, оксида алюминия, оксида меди и углеродных нанотрубок. В работах отмечено, что рост теплопроводности может достигать 150 %, однако он существенно зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, температуры и режима течения. Антифризы на основе этилена- и пропиленгликоля с нанодобавками представляют особый интерес для применения в условиях холодного климата Казахстана, обеспечивая повышение энергоэффективности теплотехнических систем.

Исследование Mirsafi F.S., Zaheer M.U., а также 18 Wang X.Q., Mujumdar A.S. показывают, что использование наножидкостей в качестве охлаждающей жидкости существенно влияет на величину коэффициента теплопередачи [17-18]. Наножидкости, содержащие металлы, оксиды металлов, карбиды, углеродные наноструктуры (CNT, графен и др.), демонстрируют улучшенные теплопередающие свойства и высокую стабильность [17-22].

Таблица 1 – Обзор литературы по наночастицам в теплоносителях

Авторы	Наночастицы	Базовая жидкость	Влияние на теплофизику	Рост теплопроводности	Основные выводы	Работа
Choi S.U.S.	Al ₂ O ₃ , CuO, ZnO, TiO ₂ , SiO ₂	вода	повышение теплопроводности	до 40 %	введено понятие нанофлюидов	[5]
Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S.	Al ₂ O ₃	антифриз	рост теплоотдачи и вязкости	до 25 %	зависимость от концентрации и формы	[6]
Дудинских С.В., Шеремет Е.О.	Al ₂ O ₃ , TiO ₂	вода, антифриз	рост теплоотдачи в системах отопления	до 20 %	применение в отоплении	[7]
Ajith K., Brusly S.A., Sharifpur M.	металлооксиды	вода, EG, PG	рост теплопроводности и теплоотдачи	(10÷60) %	механизмы усиления теплообмена	[10]
Das S.K., Choi S.U.S., Patel H.E.	Al ₂ O ₃ , CuO	вода	улучшение теплообмена	до 40 %	основы теплопереноса	[12]
Харисов И.Д., Осинцев К.В.	наночастицы	вода	интенсификация теплообмена	до 30 %	подтверждена эффективность нанотехнологий	[14]
Sekrani G., Poncet S.	Al ₂ O ₃ , CuO, ZnO, TiO ₂	EG, PG	улучшение теплообмена	(10÷60) %	перспективы для энергетики	[15]
Mirsafi F.S., Zaheer M.U	Металлы, оксиды, углеродные наноструктуры	вода, EG, PG	повышение эффективности охлаждения	(20÷100) %	наножиждкости в системах охлаждения	[17]
Wang X.Q., Mujumdar A.S.	Металлы, CNT (углеродные нанотрубки)	вода	улучшение теплоотдачи	до 150 %	зависимость от условий	[18]
Mohite D.D., Goyal A., Londhe P.V.	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CuO, ZnO и углеродные наноструктуры	вода, EG, PG	улучшение тепловых характеристик	(10÷60) %	технический обзор наножиждкостей	[19]
Suganthi K.S., Rajan K.S.	Металлооксиды	вода, EG, PG	свойства и эффективность	(10÷50) %	металлооксиды наножиждкости	[20]
Rani C.V., Kumar P.	(TiO ₂ + CuO, Al ₂ O ₃ + ZnO)	вода, EG, PG	улучшение теплопередачи	(15÷70) %	обзор наночастиц и эффектов	[21]
Shimchuk N.A., Geller V.Z.	Металлооксиды	вода	нелинейный рост теплопроводности	До 50 %	влияние температуры и концентрации	[24]
Гирфанова В.В., Велькин В.И.	Al ₂ O ₃	вода, EG	оптимизация теплоснабжения	до 25 %	эффект зависит от концентрации	[27]
Бондаренко Б.И.	металлооксиды	вода	улучшение теплофизических свойств	(15÷40) %	наножиждкости перспективны для энергетики	[28]
Bello A. N., Abdulkareem A. S.	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , CuO, CNT	вода, EG, PG	улучшение теплообмена	(10÷60) %	системный обзор наноохлаждаителей	[29]
Морозова М.А.	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂	вода, EG, PG	теплопроводность и вязкость	(5÷35) %	закономерности эксперимента	[31]
Слободина Е.Н. и др.	Al ₂ O ₃	вода	интенсификация теплообмена	до 30 %	подтверждение расчётных моделей	[32]
Yu W. et al.	металлы, оксиды	вода	рост теплопроводности	(10÷50) %	анализ результатов эксперимента	[33]
Pastoriza-Gallego M.J., Lugo L.	Al ₂ O ₃	EG	рост теплопроводности и вязкости	(8÷30) %	результаты экспериментов	[40]
Zhang L., Sun J., Qu P.	Cu	PG/EG	комплексная теплоотдача	(60÷120) %	Си-нанофлюиды оптимальны	[42]
Rudyak V.Y., Minakov A.V.	Al ₂ O ₃ , CuO, ZnO, TiO ₂ , SiO ₂	вода	изменение вязкости и теплопроводности	(15÷30) %	режим течения	[44]
Ignatowicz M., Palm B.	виды наночастиц не указаны	EG, PG	изменение теплоемкости	(5÷15) %	актуально для тепловых насосов	[45,46]
Kusain A.K., Kasymov A.B.	Al ₂ O ₃	EG/вода (60:40)	улучшение теплофизических свойств	до 27 %	оптимальная концентрация наночастиц 3 %	[48]
Касымов А., Адылканова А.	TiO ₂ + CuO, ZnO, Al ₂ O ₃ (гибрид)	EG, PG	улучшение теплофизических свойств	14 %	влияние гибридных добавок	[49]

Существует большое количество научных работ по исследованию воздействия наночастиц на теплопроводность теплоносителей [5, 23-30]. Обзор представленных работ позволяет сделать вывод, что добавки нанометаллов (оксиды металлов, металлы и углеродные нанотрубки) могут приводить как к существенному (до 150 %) так и к незначительному (примерно на 1 %) увеличению теплопроводности базовой жидкости.

Теплофизические свойства наножидкостей. Для более глубокого понимания эффективности применения наножидкостей в качестве теплоносителей и охлаждающих сред необходимо детально рассмотреть их основные теплофизические свойства, к которым относятся теплопроводность, динамическая вязкость, плотность и удельная теплоемкость. Указанные параметры в значительной степени определяют интенсивность теплообмена, гидродинамические характеристики потока и энергетическую эффективность теплоэнергетических систем. Существенный вклад в данное направление внесён в диссертационной работе М.А. Морозовой, где подробно изучены теплопроводность и вязкость наножидкостей с различными типами наночастиц, а также проанализировано влияние их концентрации, температуры и характеристик дисперсной фазы на теплофизические свойства теплоносителей [31].

Анализ литературных источников показывает, что в последние годы опубликовано значительное количество экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию теплофизических свойств наножидкостей [32-35], в том числе и на основе этиленгликоля (EG) и пропиленгликоля (PG) [19, 36-40]. Обобщающие обзоры, выполненные Sekrani G. и Poncet S. охватывают исследования плотности, удельной теплоемкости и теплопроводности наножидкостей, а также анализируют влияние типа базовой жидкости и природы наночастиц на указанные свойства [15].

Теплопроводность. Одним из ключевых факторов, определяющих перспективность наножидкостей, является увеличение коэффициента теплопроводности по сравнению с базовыми теплоносителями. В ряде исследований показано, что введение наночастиц оксидов металлов и углеродных наноструктур приводит к существенному росту теплопроводности, величина которого зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, а также от температуры рабочей среды.

Satti J.R., Das D.K. и Ray D.R. установили, что повышение теплопроводности наножидкостей на основе пропиленгликоля может быть достигнуто (8÷35) % как за счет увеличения концентрации наночастиц, так и при повышении температуры. Кроме того, по мере увеличения диаметра наночастиц наблюдается рост коэффициента теплопроводности наножидкости [41].

Исследования Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. показали, что добавки наночастиц Al_2O_3 приводят к увеличению теплопроводности до 25 % по сравнению с базовой жидкостью, причем эффект усиливается с ростом концентрации нанодобавок [6]. Аналогичные выводы представлены в работах Zhang L., Sun J. и Qu P., где установлено, что наножидкости на основе Cu–пропиленгликоль–вода и Cu–этиленгликоль–вода демонстрируют наилучшие показатели комплексной теплопередачи [42].

На рисунке 2 представлена сравнительная характеристика влияния различных типов наночастиц (Al_2O_3 , CuO, TiO_2 , SiO_2 , ZnO) на относительное увеличение теплопроводности базовой жидкости. Анализ графических данных показывает, что оксидные наночастицы обеспечивают умеренный, но стабильный рост теплопроводности, что подтверждает целесообразность их использования в теплоэнергетических системах.

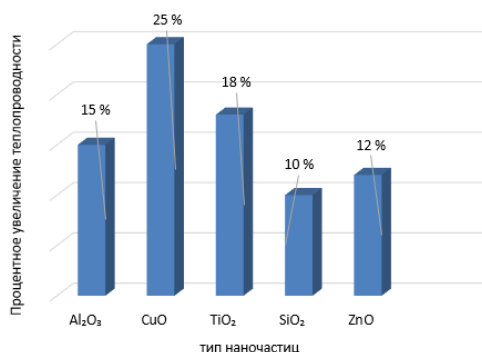


Рисунок 2 – Влияние различных типов наночастиц на теплопроводность теплоносителя

Вязкость. Динамическая вязкость является важнейшей характеристикой наножидкостей, определяющей гидродинамическое сопротивление потока и энергетические затраты на циркуляцию теплоносителя. Анализ экспериментальных данных свидетельствует

о том, что введение наночастиц, как правило, приводит к увеличению вязкости по сравнению с базовой жидкостью.

Согласно обобщённым экспериментальным данным, представленным в работе Mahbubul I.M., Saidur R., Amalina M.A., введение наночастиц, как правило, приводит к увеличению вязкости наножидкости по сравнению с базовой жидкостью в среднем на $(10 \div 40)$ % при объёмных концентрациях частиц до $(1 \div 2)$ %, при этом для более высоких концентраций рост вязкости может достигать $(50 \div 100)$ %. Также отмечается, что повышение температуры приводит к снижению динамической вязкости наножидкостей на $(20 \div 60)$ % в зависимости от состава и диапазона температур [43].

В работе Khlieva O.Ya., Ryabikin S.S. отмечено, что вязкость наножидкостей возрастает до $(20 \div 25)$ % при увеличением концентрации наночастиц, а также зависит от их формы, размера и наличия поверхностно-активных веществ в составе наножидкости [6].

В статье Rudyak V.Y., Minakov A.V. установлено, что увеличение вязкости наножидкостей примерно на $(20 \div 80)$ % связано с уменьшением размера наночастиц, тогда как рост теплопроводности до 30 % соотносится с увеличением их характерных размеров. Исследование показало, что коэффициент теплопередачи определяется режимом течения наножидкости (ламинарный или турбулентный) [44].

Сравнительный анализ наножидкостей на основе EG и PG показывает, что системы на основе пропиленгликоля, как правило, характеризуются более высокой вязкостью, что может ограничивать их применение при высоких скоростях течения и требует оптимизации концентрации наночастиц.

Плотность и удельная теплоемкость. Плотность и удельная теплоемкость наножидкостей оказывают влияние на теплоаккумулирующую способность теплоносителя и расчет тепловых нагрузок в теплоэнергетических системах. Исследования Satti J.R., Das D.K. и Ray D.R. показали, что плотность наножидкостей на основе пропиленгликоля не зависит от размера наночастиц, однако увеличивается с ростом их концентрации и уменьшается при повышении температуры [41].

На рисунке 3 приведено сравнение теплофизических свойств наножидкостей на основе этиленгликоля и пропиленгликоля, модифицированных наночастицами оксидов металлов. Из представленных данных следует, что наножидкости на основе EG обладают более высокой теплопроводностью, тогда как системы на основе PG характеризуются повышенной вязкостью, что необходимо учитывать при выборе теплоносителя для теплоэнергетических установок.

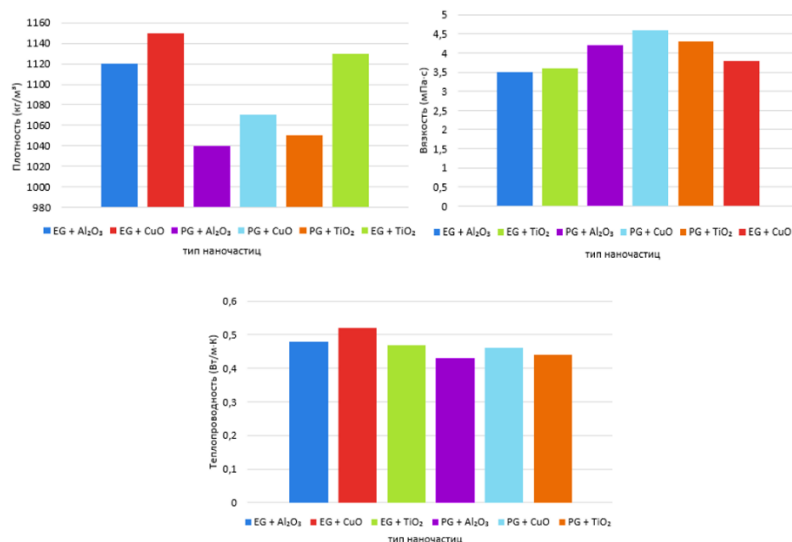


Рисунок 3 – Сравнение теплофизических свойств наножидкостей на основе разных базовых жидкостей (EG, PG)

В работах Ignatowicz M. и Palm B. выполнены детальные исследования теплофизических свойств растворов этиленгликоля и пропиленгликоля при низких температурах, характерных для холодильных и тепловых насосных установок. Авторы показали, что использование растворов с заданной температурой замерзания $(-5 \div -50)$ °C позволяет более корректно оценить эксплуатационные свойства теплоносителей [45, 46].

Дополнительные данные по плотности, вязкости, теплопроводности и теплоемкости нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода с добавками наночастиц TiO_2 представлены в работе [47]. Экспериментальные результаты демонстрируют хорошее согласование с теоретическими моделями, что подтверждает достоверность полученных зависимостей [42, 48].

Результаты исследований Kasymov A., Adylkanova A., Bektemissov A показали, что все наножидкости демонстрируют улучшенную теплопроводность (максимально ~14 %), повышение вязкости (максимально ~140 %) относительно чистой воды [49].

На рисунке 4 показана картограмма географического распределения научных публикаций по тематике теплофизических свойств нанофлюидов и антифризов на основе этиленгликоля, пропиленгликоля и глицерина. Визуализация выполнена с использованием геоинформационной системы QGIS 3.44.7 [50] и отражает пространственную структуру научной активности по странам за период 2020-2025 гг., на основе публикаций, отобранных по ключевым словам.

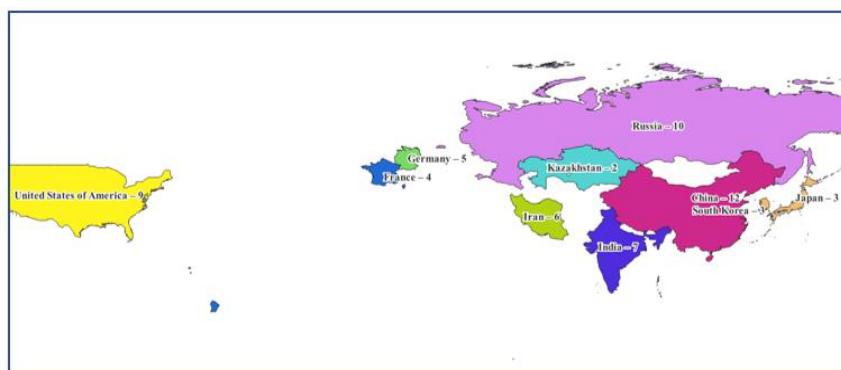


Рисунок 4 – География научных исследований в области теплофизических свойств наножидкостей

Числа на карте показывают количество публикаций по странам. Лидером является Китай (12 публикаций), за ним идут Россия (10) и США (9). Значительный вклад также внесли Индия (7) и Иран (6). Германия (5) и Франция (4) демонстрируют умеренную активность, а Япония и Южная Корея (по 3 публикации) сосредоточены на специализированных исследованиях. Казахстан представлен 2 публикациями, что указывает на имеющийся интерес к теме в регионе.

Следует отметить, что картограмма основана на библиометрических данных, полученных в результате анализа научных баз данных (Scopus, Web of Science, Google Scholar и др.). В список литературы настоящей статьи включены наиболее значимые публикации, непосредственно используемые для анализа, методического обоснования и обсуждения результатов.

Картограмма служит инструментом обобщенного анализа научной активности и выявляет ведущие страны и регионы с перспективами развития в области нанофлюидов.

Обсуждение научных результатов

Проведенный анализ теплофизических свойств антифризов и наножидкостей на их основе подтверждает перспективность использования гликолевых теплоносителей, модифицированных наночастицами, для повышения эффективности теплопередачи, особенно в условиях холодного климата.

Согласно данным, представленным в научной литературе этиленгликолевые антифризы обладают наилучшими низкотемпературными характеристиками – минимальная температура эксплуатации достигает минус 65°C , максимальная рабочая температура составляет около 110°C . Однако их применение ограничено токсичностью. Пропиленгликоль демонстрирует более высокий уровень эксплуатационной безопасности при несколько худших теплофизических показателях: минимальная температура составляет около минус 55°C , а максимальная достигает 120°C . Глицерин характеризуется повышенной вязкостью – в $(4\div 10)$ раз выше, чем у этиленгликолевых, и в $(3\div 6)$ раз выше, чем у пропиленгликолевых теплоносителей, что снижает его практическую эффективность без дополнительной оптимизации состава.

Анализ литературных данных показал, что введение наночастиц (Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , ZnO) в базовые теплоносители приводит к увеличению теплопроводности в диапазоне от 1% до 150% и интенсификации теплообмена. При этом величина эффекта определяется концентрацией, размером и материалом наночастиц, а также температурой рабочей среды. Наиболее выраженный рост теплопроводности (до 60%) характерен для нанофлюидов на основе этиленгликоля и пропиленгликоля, а максимальное улучшение теплоотдачи может достигать 150% в зависимости от условий.

Вместе с тем в ряде публикаций отмечается, что повышение теплопроводности сопровождается ростом динамической вязкости, который варьируется в пределах (10÷40)%, что может приводить к увеличению гидравлических потерь. Данный фактор ограничивает практическое применение наножидкостей и требует оптимального выбора концентрации наночастиц и режима течения.

Обзор научных исследований показывает, что плотность наножидкостей в основном определяется температурой и массовой долей наночастиц, что упрощает инженерные расчеты. Библиометрический анализ за период 2020-2025 гг., визуализированный с использованием QGIS, выявил наибольшую научную активность в Китае, России и США, при сравнительно меньшем числе публикаций из Казахстана, что указывает на потенциал дальнейших исследований в данном направлении.

В целом результаты подтверждают, что наномодифицированные антифризы на основе этилена- и пропиленгликоля являются перспективными теплоносителями, однако их практическое внедрение должно учитывать баланс между ростом теплопроводности и увеличением вязкости.

Заключение

Проведенный обзор современных экспериментальных и теоретических исследований показал, что модификация традиционных теплоносителей наночастицами металлов, оксидов металлов и углеродных наноструктур позволяет существенно улучшить их теплофизические свойства и повысить интенсивность теплообмена. Анализ публикаций свидетельствует о том, что наибольший эффект достигается при использовании наночастиц Al_2O_3 , CuO , TiO_2 , SiO_2 , ZnO , CNT, графена (углеродные нанотрубки) рост теплопроводности может достигать (30÷60)%, а в отдельных экспериментальных условиях – до 150%.

Обобщение представленных в литературе данных показывает, что величина эффекта существенно зависит от концентрации, размера и формы наночастиц, температуры и режима течения, а также от типа базовой жидкости. Наножидкости на основе этилена- и пропиленгликоля представляют особый интерес для эксплуатации в условиях холодного климата Казахстана, обеспечивая работоспособность при температурах до (-55 ÷ -65)°С.

В научных работах отмечается, что плотность наножидкостей увеличивается, как правило, не более чем на (5÷10)%, тогда как вязкость возрастает в диапазоне (10÷40)%, что требует учёта гидродинамических потерь при проектировании систем. Анализ публикационной активности показал, что ведущими странами в области исследований нанофлюидов являются Китай, Россия и США, в то время как Казахстан обладает значительным потенциалом для развития данного научного направления.

Полученные обобщенные зависимости подтверждают перспективность применения наномодифицированных теплоносителей в теплоэнергетических системах и могут быть использованы при выборе оптимального состава теплоносителя с учетом теплофизических, гидродинамических и эксплуатационных характеристик.

Список литературы

1. Изучение физических свойств антифризов / А.Н. Кувшинов и др. // E-Scio. – 2021. – № 3(54). – С. 195-202.
2. Этиленгликоль или пропиленгликоль: сравнение теплоносителей // HOT STREAM URL: <https://hstream.ru/> (дата обращения: 25.10.2025).
3. Сравнительный анализ пропиленгликолевых и этиленгликолевых теплоносителей // Savia <https://euroglykol.ru/> (дата обращения: 25.10.2025).
4. Pereira J.E. The pressing need for green nanofluids: A review / J.E. Pereira, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, Issue 3, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107940>.

5. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles / S.U.S. Choi et al. // ASME-Publications-Fed. – 1995. – № 231. – P. 99-106.
6. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al₂O₃ nanoparticles / O.Ya. Khlieva et al // International Conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91780>.
7. Дудинских С.В. Применение наножидкостей в системе отопления / С.В. Дудинских, Е.О. Шеремет // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. ВГ Шухова. – 2019. – С. 751-757.
8. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – 2023. – P. 327-348. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6>.
9. Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective / B. Bakthavatchalam et al // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 305. – Article 112787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>.
10. Ajith K. Nanofluids for heat transfer augmentation / K. Ajith, A. Brusly Solomon, M. Sharifpur // Materials for Advanced Heat Transfer Systems. – Woodhead Publishing Series in Energy. – 2023. – P. 1-38. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X>.
11. Moshfeghi R. An analytical and statistical review of selected researches in the field of estimation of rheological behavior of nanofluids / R. Moshfeghi, D. Toghraie // Powder Technology. – 2022. – Vol. 398. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117076>.
12. Das S.K. Heat transfer in nanofluids a review / S.K. Das, S.U.S. Choi, H.E. Patel // Heat Transfer Engineering. – 2006. – Vol. 27, № 10. – P. 3-19. <https://doi.org/10.1080/01457630600904593>.
13. Кудинов А.А. Анализ возможности применения наножидкости в качестве теплоносителя для повышения эффективности систем теплоснабжения / А.А. Кудинов, С.К. Зиганшина // Энергосбережение в котельных установках ТЭС и систем теплоснабжения. – Москва: ИНФРА-М, 2016.
14. Харисов И.Д. Применение нанотехнологий для интенсификации теплообмена / И.Д. Харисов, К.В. Осинцев // Энерго-и ресурсосбережение в теплоэнергетике и социальной сфере: материалы Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов, ученых. – 2013. – Т. 1, № 1. – С. 290-294.
15. Sekrani, G. Ethylene- and Propylene-Glycol Based Nanofluids: A Literature Review on Their Thermophysical Properties and Thermal Performances / G. Sekrani, S. Poncet // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 11. – Art. 2311. <https://doi.org/10.3390/app8112311>.
16. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – Elsevier, 2023. – P. 327-348. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6>.
17. Nanomaterial-engineered fluids in cooling Systems: From preparation to performance—A comprehensive review / F.S. Mirsafi et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116309>.
18. Wang X.Q. A review on nanofluids – Part I: Theoretical and numerical investigations / X.Q. Wang, A.S. Mujumdar // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol. 25, № 4. – P. 613-630. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400001>.
19. Improvement of thermal performance through nanofluids in industrial applications: a review on technical aspects / D.D. Mohite et al // Materials Today: Proceedings. – 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X>.
20. Suganthi K.S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance / K.S. Suganthi, K.S. Rajan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.043>.
21. Rani C.V. Enhancement of thermal properties of fluids with dispersion of various types of hybrid/nanoparticles / C.V. Rani, P. Kumar // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1817. – № 1. – Art. 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1817/1/012023>.
22. Nanofluids as a coolant for polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent trends, challenges, and future perspectives / D.K. Madheswaran et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 424. – Article 138763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138763>.

23. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions / S.U.S. Choi et al // *Applied Physics Letters*. – 2001. – Vol. 79. – P. 2252-2254.
24. Shimchuk N.A. Influence of various factors on the thermal conductivity of nanofluids / N.A. Shimchuk, V.Z. Geller // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.31386>.
25. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids / M.S. Liu et al // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. – 2005. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005>.
26. Канцеров П.Н. Наноожидкости в холодильной технике / П.Н. Канцеров, В.А. Винокуров // *Успехи современной науки*. – 2019. – № 2. – С. 13-17.
27. Гирфанова В.В. Анализ возможности применения наноожидкости в качестве теплоносителя для повышения эффективности систем теплоснабжения / В.В. Гирфанова, В.И. Велькин // *Энерго-и ресурсосбережение. Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии*. – Екатеринбург, 2017. – С. 136-141.
28. Исследования по созданию наноожидкостей для энергетики / Б.И. Бондаренко и др. // *Экология и промышленность*. – 2013. – № 3. – С. 51-55.
29. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review of prospects, challenges and applications / A.N. Bello et al // *Next Nanotechnology*. – 2025. – <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214>.
30. Макеев А.Н. Проблемы и перспективы использования наноожидкостей в теплоэнергетике / А.Н. Макеев, Я.А. Кирюхин // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. – 2022. – № 49(3). – P. 24-31. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31>.
31. Морозова М.А. Теплопроводность и вязкость наноожидкостей: дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2019. – 180 с. – Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН.
32. Экспериментальные и расчетные исследования процессов теплообмена при использовании наноожидкостей / Е.Н. Слободина и др. // *Известия Транссиба*. – 2024. – № 2(58). – С. 100-108.
33. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements / W. Yu et al // *Heat Transfer Engineering*. – 2008. – Vol. 29, № 5. – P. 432-460. <https://doi.org/10.1080/01457630701850851>.
34. Сулейманов Б.А. Влияние агрегации наночастиц на теплопроводность нанофлюидов / Б.А. Сулейманов, Х.Ф. Аббасов // *Журнал физической химии*. – 2016. – Т. 90, № 2. – С. 240-248.
35. Gülüm M. Nanofluids for automotive radiators: Thermophysical properties, opportunities, challenges, and research trends / M. Gülüm, A. Çakmak, S. Osman // *Journal of Petroleum Processing and Petrochemicals*. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2025.08.002>.
36. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids // *International Journal of Refrigeration*. – 2023. – Vol. 155. – P. 137-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008>.
37. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // *International Journal of Refrigeration*. – 2024. – Vol. 163. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.009>.
38. Next Nanotechnology. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review // *Next Nanotechnology*. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214>.
39. Mutuku W.N. Ethylene glycol (EG)-based nanofluids as a coolant for automotive radiator / W.N. Mutuku // *Asia-Pacific Journal of Computational Engineering*. – 2016. – Vol. 3, Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40540-016-0021-5>.
40. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al₂O₃ nanofluids / M.J. Pastoriza-Gallego et al // *Discover Nano*. – 2011. – Vol. 6, Article 221. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-221>.
41. Satti J.R. Measurements of densities of propylene glycol-based nanofluids and comparison with theory / J.R. Satti, D.K. Das, D.R. Ray // *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. – 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032671>.

42. Zhang L. Heat transfer characteristics of Cu-based nanofluids in wavy-wall heat exchangers / L. Zhang, J. Sun, P. Qu // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112738>.
43. Mahbubul I.M. Latest developments on the viscosity of nanofluids / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, № 4. – P. 874-885. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>.
44. Rudyak V.Y. Thermophysical Properties of Nanofluids / V.Y. Rudyak, A.V. Minakov // The European physical journal E. – 2018. <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9>.
45. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.11.008>.
46. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids / Étude expérimentale des propriétés thermophysiques des fluides secondaires à base d'éthylène glycol / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008>.
47. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода / В.П. Железный и др. // Вестник НТУ «ХПИ», Харьков.
48. Құсаин А.К. Исследование теплофизических свойств наножидкости Al_2O_3 на основе смеси этиленгликоля и воды (40:60) для геотермального применения / А.К. Құсаин, А.Б. Касымов // Вестник Университета Шакарима. Серия технические науки. – 2025. – № 2(18). – С. 421-426. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-52](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-52).
49. Thermophysical properties of TiO_2 -based mono and hybrid nanofluids / A. Kasymov et al // International Journal of Thermophysics. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03672-9>.
50. СОФТСАЛАТ: QGIS версия 3.44.7. – URL: <https://www.softsalad.ru/software/znaniya/geografiya/qgis> (дата обращения 20.12.25)

References

1. Izuchenie fizicheskikh svoystv antifrizov / A.N. Kuvshinov i dr. // E-Scio. – 2021. – № 3(54). – S. 195-202. (In Russian).
2. Ehtilenglikol' ili propilenglikol': sravnenie teplonositelei // HOT STREAM URL: <https://hstream.ru/> (data obrashcheniya: 25.10.2025). (In Russian).
3. Sravnitel'nyi analiz propilenglikolevykh i ehtilenglikolevykh teplonositelei // Savia <https://euroglykol.ru/> (data obrashcheniya: 25.10.2025). (In Russian).
4. Pereira J.E. The pressing need for green nanofluids: A review / J.E. Pereira, A.S. Moita, A.L.N. Moreira // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2022. – Vol. 10, Issue 3, <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107940>. (In English).
5. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles / S.U.S. Choi et al. // ASME-Publications-Fed. – 1995. – № 231. – P. 99-106. (In English).
6. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al_2O_3 nanoparticles / O.Ya. Khlieva et al // International Conference «Energy of Moldova – 2016. Regional aspects of development» 29 September – 01 October, 2016 – Chisinau, Republic of Moldova. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91780>. (In English).
7. Dudinskikh S.V. Primenenie nanozhidkostei v sisteme otopleniya / S.V. Dudinskikh, E.O. Sheremet // Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh uchenykh BGTU im. VG Shukhova. – 2019. – S. 751-757. (In Russian).
8. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – 2023. – P. 327-348. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6>. (In English).
9. Comprehensive study on nanofluid and ionanofluid for heat transfer enhancement: A review on current and future perspective / B. Bakthavatchalam et al // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 305. – Article 112787. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.112787>. (In English).
10. Ajith K. Nanofluids for heat transfer augmentation / K. Ajith, A. Brusly Solomon, M. Sharifpur // Materials for Advanced Heat Transfer Systems. – Woodhead Publishing Series in Energy. – 2023. – P. 1-38. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X>. (In English).

11. Moshfeghi R. An analytical and statistical review of selected researches in the field of estimation of rheological behavior of nanofluids / R. Moshfeghi, D. Toghraie // Powder Technology. – 2022. – Vol. 398. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.117076>. (In English).
12. Das S.K. Heat transfer in nanofluids – a review / S.K. Das, S.U.S. Choi, H.E. Patel // Heat Transfer Engineering. – 2006. – Vol. 27, № 10. – P. 3-19. <https://doi.org/10.1080/01457630600904593>. (In English).
13. Kudinov A.A. Analiz vozmozhnosti primeneniya nanozhidkosti v kachestve teplonositelya dlya povysheniya ehffektivnosti sistem teplosnabzheniya / A.A. Kudinov, S.K. Ziganshina // Ehnergobezopasnost' v kotel'nykh ustanovkakh TEHS i sistem teplosnabzheniya. – Moskva: INFRA-M, 2016. (In Russian).
14. Kharisov I.D. Primenenie nanotekhnologii dlya intensivatsii teploobmena / I.D. Kharisov, K.V. Osintsev // Ehnergo-i resursobezopasnost' v teploehnergetike i sotsial'noi sfere: materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii studentov, aspirantov, uchenykh. – 2013. – T. 1, № 1. – S. 290-294. (In Russian).
15. Sekrani, G. Ethylene- and Propylene-Glycol Based Nanofluids: A Literature Review on Their Thermophysical Properties and Thermal Performances / G. Sekrani, S. Poncet // Applied Sciences. – 2018. – Vol. 8, № 11. – Art. 2311. <https://doi.org/10.3390/app8112311>. (In English).
16. Progress and challenges in nanofluids research / S.S.J. Krishnan et al // Nanofluid Applications for Advanced Thermal Solutions. – Elsevier, 2023. – P. 327-348. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15239-9.00012-6>. (In English).
17. Nanomaterial-engineered fluids in cooling Systems: From preparation to performance—A comprehensive review / F.S. Mirsafi et al // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116309>. (In English).
18. Wang X.Q. A review on nanofluids – Part I: Theoretical and numerical investigations / X.Q. Wang, A.S. Mujumdar // Brazilian Journal of Chemical Engineering. – 2008. – Vol. 25, № 4. – P. 613-630. <https://doi.org/10.1590/S0104-66322008000400001>. (In English).
19. Improvement of thermal performance through nanofluids in industrial applications: a review on technical aspects / D.D. Mohite et al // Materials Today: Proceedings. – 2024. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90498-8.00004-X>. (In English).
20. Suganthi K.S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance / K.S. Suganthi, K.S. Rajan // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.043>. (In English).
21. Rani C.V. Enhancement of thermal properties of fluids with dispersion of various types of hybrid/nanoparticles / C.V. Rani, P. Kumar // Journal of Physics: Conference Series. – 2021. – Vol. 1817. – № 1. – Art. 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1817/1/012023>. (In English).
22. Nanofluids as a coolant for polymer electrolyte membrane fuel cells: Recent trends, challenges, and future perspectives / D.K. Madheswaran et al // Journal of Cleaner Production. – 2023. – Vol. 424. – Article 138763. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138763>. (In English).
23. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions / S.U.S. Choi et al // Applied Physics Letters. – 2001. – Vol. 79. – P. 2252-2254. (In English).
24. Shimchuk N.A. Influence of various factors on the thermal conductivity of nanofluids / N.A. Shimchuk, V.Z. Geller // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.31386>. (In English).
25. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids / M.S. Liu et al // International Communications in Heat and Mass Transfer. – 2005. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.05.005>. (In English).
26. Kantserov P.N. Nanozhidkosti v kholodil'noi tekhnike / P.N. Kantserov, V.A. Vinokurov // Uspekhi sovremennoi nauki. – 2019. – № 2. – S. 13-17. (In Russian).
27. Girfanova V.V. Analiz vozmozhnosti primeneniya nanozhidkosti v kachestve teplonositelya dlya povysheniya ehffektivnosti sistem teplosnabzheniya / V.V. Girfanova, V.I. Vel'kin // Ehnergo-i resursobezopasnost'. Ehnergoobespechenie. Netraditsionnye i vozobnovlyaemye istochniki ehnergii. – Ekaterinburg, 2017. – S. 136-141. (In Russian).
28. Issledovaniya po sozdaniyu nanozhidkosti dlya ehnergetiki / B.I. Bondarenko i dr. // Ehkologiya i promyshlennost'. – 2013. – № 3. – S. 51-55. (In Russian).
29. Nano coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review of prospects, challenges and applications / A.N. Bello et al // Next Nanotechnology. – 2025. – <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214>. (In English).

30. Makeev A.N. Problemy i perspektivy ispol'zovaniya nanozhidkosti v teploehnergetike / A.N. Makeev, YA.A. Kiryukhin // Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – № 49(3). – R. 24-31. <https://doi.org/10.21822/2073-6185-2022-49-3-24-31>. (In Russian).
31. Morozova M.A. Teploprovodnost' i vyazkost' nanozhidkosti: dis. kand. tekhn. nauk. – Novosibirsk, 2019. – 180 s. – Institut teplofiziki im. S. S. Kutateladze SO RAN. (In Russian).
32. Eksperimental'nye i raschetnye issledovaniya protsessov teploobmena pri ispol'zovanii nanozhidkosti / E.N. Slobodina i dr. // Izvestiya Transsiba. – 2024. – № 2(58). – S. 100-108. (In Russian).
33. Review and comparison of nanofluid thermal conductivity and heat transfer enhancements / W. Yu et al // Heat Transfer Engineering. – 2008. – Vol. 29, № 5. – P. 432-460. <https://doi.org/10.1080/01457630701850851>. (In English).
34. Suleimanov B.A. Vliyanie agregatsii nanochastits na teploprovodnost' nanoflyuidov / B.A. Suleimanov, KH.F. Abbasov // Zhurnal fizicheskoi khimii. – 2016. – T. 90, № 2. – S. 240-248. (In Russian).
35. Gülüm M. Nanofluids for automotive radiators: Thermophysical properties, opportunities, challenges, and research trends / M. Gülüm, A. Çakmak, S. Osman // Journal of Petroleum Processing and Petrochemicals. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jppr.2025.08.002>. (In English).
36. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids // International Journal of Refrigeration. – 2023. – Vol. 155. – P. 137-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008>. (In English).
37. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. – Vol. 163. – P. 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.04.009>. (In English).
38. Next Nanotechnology. Nano-coolants for thermal enhancement in heat exchangers: A review // Next Nanotechnology. – 2025. <https://doi.org/10.1016/j.nxnano.2025.100214>. (In English).
39. Mutuku W.N. Ethylene glycol (EG)-based nanofluids as a coolant for automotive radiator / W.N. Mutuku // Asia-Pacific Journal of Computational Engineering. – 2016. – Vol. 3, Article 1. <https://doi.org/10.1186/s40540-016-0021-5>. (In English).
40. Thermal conductivity and viscosity measurements of ethylene glycol-based Al_2O_3 nanofluids / M.J. Pastoriza-Gallego et al // Discover Nano. – 2011. – Vol. 6, Article 221. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-221>. (In English).
41. Satti J.R. Measurements of densities of propylene glycol-based nanofluids and comparison with theory / J.R. Satti, D.K. Das, D.R. Ray // Journal of Thermal Science and Engineering Applications. – 2016. <https://doi.org/10.1115/1.4032671>. (In English).
42. Zhang L. Heat transfer characteristics of Cu-based nanofluids in wavy-wall heat exchangers / L. Zhang, J. Sun, P. Qu // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.112738>. (In English).
43. Mahbubul I.M. Latest developments on the viscosity of nanofluids / I.M. Mahbubul, R. Saidur, M.A. Amalina // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2012. – Vol. 55, № 4. – P. 874-885. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.10.021>. (In English).
44. Rudyak V.Y. Thermophysical Properties of Nanofluids / V.Y. Rudyak, A.V. Minakov // The European physical journal E. – 2018. <https://doi.org/10.1140/epje/i2018-11616-9>. (In English).
45. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of propylene glycol based secondary fluids for ground source heat pumps and indirect refrigeration systems / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.11.008>. (In English).
46. Ignatowicz M. Experimental investigation of thermophysical properties of ethylene glycol based secondary fluids Étude expérimentale des propriétés thermophysiques des fluides secondaires à base d'éthylène glycol / M. Ignatowicz, B. Palm // International Journal of Refrigeration. – 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.08.008>. (In English).
47. Eksperimental'noe issledovanie teplofizicheskikh svoistv nanoteplonositelei na osnove rastvorov propilenglikol'/voda / V.P. Zheleznyi i dr. // Vestnik NTU «KHPI», Khar'kov. (In Russian).
48. Kysain A.K. Issledovanie teplofizicheskikh svoistv nanozhidkosti Al_2O_3 na osnove smesi ehhtilenglikolya i vody (40:60) dlya geotermal'nogo primeneniya / A.K. Kysain, A.B. Kasymov //

Vestnik Universiteta Shakarima. Seriya tekhnicheskie nauki. – 2025. – № 2(18). – S. 421-426. [https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2\(18\)-52](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2025-2(18)-52). (In Russian).

49. Thermophysical properties of TiO₂-based mono and hybrid nanofluids / A. Kasymov et al // International Journal of Thermophysics. – 2025. <https://doi.org/10.1007/s10765-025-03672-9>. (In English).

50. SOFTSALAT: QGIS versiya 3.44.7. – URL: <https://www.softsalad.ru/software/znaniya/geografiya/qgis> (data obrashcheniya 20.12.25)/. (In Russian).

А.Н. Шалаганова, О.А. Степанова, М.В. Ермоленко*, А.Р. Хажидинова, Е.П. Евлампиева

Шәкәрім университет,

071412, Қазақстан Республикасы, Семей қ., Глинка к-сі, 20 А

*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

МОДИФИКАЦИЯЛАНҒАН АНТИФРИЗДЕРДІҢ ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ НАНОБӨЛШЕКТЕРДІҢ ӘСЕРІ – ШОЛУ

Мақалада жылуэнергетикалық және инженерлік жүйелерде қолданылатын этиленгликоль, пропиленгликоль және глицерин негізіндегі антифриздер мен нанофлюидтердің жылуфизикалық қасиеттеріне арналған заманауи ғылыми жарияланымдарға ғылыми-зерттеу шолу ұсынылған. Төмен температуралы жылу тасымалдағыштардың негізгі түрлері, олардың жұмыс істеу температуралық диапазоңдары, сондай-ақ күрт континенттік климаттық жағдайлары тән аймақтарда пайдалану кезінде қойылатын негізгі талаптар қарастырылған.

Металл оксидтерінің және көміртекті наноқұрылымдардың (Al₂O₃, CuO, TiO₂, SiO₂, ZnO, CNT, графен) нанобөлшектерін қосудың гликольді жылу тасымалдағыштардың жылуөткізгіштігіне, тұтқырлығына, тығыздығына және меншікті жылу сыйымдылығына әсерін талдауға ерекше назар аударылған. Нанобөлшектерді енгізу жылуөткізгіштік коэффициентін және жылуалмасу қарқындылығын едәуір арттыруға мүмкіндік беретіні көрсетілген, алайда бұл тұтқырлықтың өсуімен қатар жүреді, өз кезегінде гидравликалық шығындардың және жылу тасымалдағышты айналдыруға кететін энергия шығынының артуына әкелуі мүмкін.

Жұмыс аясында 2020–2025 жылдар аралығындағы ғылыми жарияланымдарға библиометриялық талдау жүргізіліп, аталған зерттеу бағытын белсенді дамытып отырған жетекші елдер мен ғылыми орталықтар анықталды. Алынған нәтижелер наномодификацияланған антифриздерді жылу техникалық жүйелердің энергия тиімділігін арттыру мақсатында қолданудың перспективалы екенін растайды және оларды тәжірибеде пайдалану кезінде наноқоспалардың құрамын және концентрациясын оңтайлы таңдаудың маңыздылығын көрсетеді.

Түйін сөздер: антифриз, нанофлюидтер, жылу физикалық қасиеттері, жылу берудің жоғарылауы, нанобөлшектер, энергия тиімділігін арттыру.

A. Shalaganova, O. Stepanova, M. Yermolenko, A. Khazhidinova, Y. Yevlampiyeva

Shakarim University,

071412, Republic of Kazakhstan, Semey, 20A Glinka Street,

*e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz

INFLUENCE OF NANOPARTICLES ON THE THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MODIFIED ANTIFREEZES – A REVIEW

This article presents a scientific review of recent publications focused on the thermophysical properties of antifreezes and nanofluids based on ethylene glycol, propylene glycol, and glycerin, used in thermal power and engineering systems. The main types of low-temperature heat transfer fluids, their operating temperature ranges, and key requirements for their use in cold climates characteristic of regions with sharply continental temperature conditions are examined.

Special attention is given to analyzing the effects of adding metal oxide nanoparticles and carbon nanostructures (Al₂O₃, CuO, TiO₂, SiO₂, ZnO, CNT, graphene) on the thermal conductivity, viscosity, density, and specific heat capacity of glycol-based heat transfer fluids. It is shown that the introduction of nanoparticles significantly increases the thermal conductivity coefficient and heat transfer intensity, but is accompanied by an increase in viscosity, which may lead to higher hydraulic losses and increased energy consumption for circulating the heat transfer fluid.

Within the scope of this work, a bibliometric analysis of scientific publications from 2020 to 2025 was conducted, identifying leading countries and research centers actively developing this field. The results confirm the potential of using nanomodified antifreezes to improve the energy efficiency of thermal engineering systems and emphasize the necessity of optimizing the composition and concentration of nanoparticle additives for practical applications.

Key words: antifreeze, nanofluids, thermophysical properties, enhancement of heat transfer, nanoparticles, improving energy efficiency.

Сведения об авторах

Алмагуль Ныгметовна Шалаганова – докторант кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика»; Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5592-3392>.

Ольга Александровна Степанова – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2911-4427>.

Михаил Вячеславович Ермоленко* – кандидат технических наук, ассоциированный профессор кафедры «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD; и.о. ассоциированного профессора, кафедра «Техническая физика и теплоэнергетика», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Елена Петровна Евлампиева – кандидат биологических наук, старший преподаватель кафедры «Химия и экология», Шәкәрім университет, Республика Казахстан; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Авторлар туралы мәліметтер

Алмагуль Ныгметовна Шалаганова – «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының докторанты, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5592-3392>.

Ольга Александровна Степанова – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2911-4427>.

Михаил Вячеславович Ермоленко* – техника ғылымдарының кандидаты, «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Акбота Рыспековна Хажидинова – PhD; «Техникалық физика және жылуэнергетика» кафедрасының қауымдастырылған профессор міндетін атқарушы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Елена Петровна Евлампиева – биология ғылымдарының кандидаты, «Химия және экология» кафедрасының аға оқытушысы, Шәкәрім университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

Information about the authors

Almagul Shalaganova – doctoral student at the department of Technical physics and thermal power engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: shalaganova_alma@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-5592-3392>.

Olga Stepanova – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: aug11@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2911-4427>.

Mikhail Yermolenko* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: m.ermolenko@shakarim.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-8023>.

Akbota Khazhidinova – PhD; acting Associate Professor at the Department of Technical Physics and Thermal Power Engineering, Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: nadyrova.akbota@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8802-1559>.

Yelena Yevlampiyeva – Candidate of Biological Sciences, Head of Scientific Editorial Department; Shakarim University, Republic of Kazakhstan; e-mail: elena_semei@mail.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1953-3686>.

*Поступила в редакцию 23.01.2026
Поступила после доработки 12.02.2026
Принята к публикации 13.02.2026*