



## EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER COEFFICIENT OF COOLANTS WITH $Al_2O_3$ NANOPARTICLE ADDITIVES

**Olga KHLIYEVA, Sergey RYABIKIN, Vitaliy ZHELEZNY,  
Tatyana GORDEYCHUK**

The Department of Thermal Physics and Applied Ecology, Institute of Refrigeration, Cryogenic Technologies and Eco Energetic, Odessa National Academy of Food Technologies

**Abstract** – Such coolants as aqueous solutions of ethylene glycol or brines are widely used in chillers at present. Coolants that compose of aqueous solutions of propylene glycol have some advantages over mentioned above agents: non-toxicity, low corrosivity. However the aqueous solutions of propylene glycol, especially at low temperatures typical for refrigeration, have the large values of viscosity. Therefore, heat transfer efficiency in heat exchangers with this coolant is low and power consumption of circulation pump is significant. One of the methods to improve the thermophysical properties of the propylene glycol based coolant is additives the agent for the viscosity reducing and the metal or metal oxides nanoparticles as additives for thermal conductivity increasing. The prospects of nanoparticle additives to coolants for using in refrigeration systems have been considered in paper. The results of experimental investigation of the heat transfer coefficient at laminar flow forced convection of coolant and nanocoolant in pipe have been presented. The coolant composed of water /propylene glycol / agent to reduce the viscosity (48.60 / 46.52 / 4.88 mass %) and nanocoolant composed of water /propylene glycol / substance to reduce the viscosity /  $Al_2O_3$  nanoparticles (48.24 / 46.38 / 4.85 / 0.53 mass %) have been used for experimental investigation. Experimental research is carried out on the original setup. It was shown that the heat transfer coefficients for various values of the Reynolds number that typical for laminar flow with using the traditional coolant was generally less, than with using the nanocoolant.

**Keywords** – coolant, nanoparticles, laminar flow, heat transfer coefficient, experiment

## CERCETĂRI EXPERIMENTALE AL COEFICIENTULUI CONVECTIV DE TRANSFER TERMIC A PURTĂTORULUI DE FRIG CU ADAOSUL DE NANOPARTICULE $Al_2O_3$

**Olga HLIEVA, Serghei REABICHIN, Vitali JELEZNÎ, Tatiana GORDEICIUC**  
Catedra termodinamică și ecologie aplicată. Institutul de frig, criotehnologii și ecoenergetică.  
Academia națională a industriei alimentare.

**Rezumat** – Actualmente purtătorii frigorifici în baza soluțiilor apoase de etilenglicol sau a diferitor săruri au căpătat o răspândire largă. Totodată, purtătorii frigorifici în baza soluțiilor de propilenglicol au un șir de avantaje: nu sunt toxici, posedă o activitate joasă de corodare. Însă aceste soluții de propilenglicol, în special la temperaturi caracteristice sistemelor de refrigerare au o viscozitate considerabilă. Acest motiv conduce la o eficiență joasă a procesului de transfer termic în instalațiile pentru schimbul de căldură și la consum sporit de energie pentru circularea purtătorului de termic. Una din măsurile de redresare a proprietăților termofizice a purtătorului de frig în baza propilenglicolului este adaosul substanțelor, care reduc viscozitatea și a nanoparticulelor de metale sau de oxizi, care contribuie la sporirea conductibilității termice a purtătorului frigorific.

În articol sunt examinate perspectivele utilizării purtătorilor frigorifici cu adaosul de nanoparticule în utilajul frigorific. Sunt prezentate rezultatele cercetărilor experimentale a coeficientului termic la mișcare laminară a purtătorului frigorific și a nanopurtătorului prin țevă. În procesul cercetărilor experimentale s-a utilizat purtătorul frigorific, compus din apă, propilenglicol și substanță de reglare a viscozității (48,60/46,52/4,88% masă) și nanorăcitor compus din apă, propilenglicol, substanțe de reglare a viscozității și nanoparticule  $Al_2O_3$  (48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % masă). Cercetările experimentale s-au efectuat la o instalație originală. A fost arătat, că coeficienții schimbului de căldură la diferite valori a numărului Reynolds, caracteristic pentru regimul de mișcare laminară a lichidului prin țevi în cazul utilizării purtătorului frigorific fără adaosuri avea valori mai mici, decât cu adaosuri a nanopurtătorului frigorific.

**Cuvinte cheie** – purtător frigorific, nanoparticule, flux laminar, coeficientul transferului termic, experiment.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНВЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛООТДАЧИ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ С ДОБАВКАМИ НАНОЧАСТИЦ $Al_2O_3$

О.Я. Хлиева, С.С. Рябкин, В.П. Железный, Т.В. Гордейчук

Кафедра теплофизики и прикладной экологии, Институт холода, криотехнологий и экоэнергетики, Одесская национальная академия пищевых технологий

**Реферат** – Хладоносители на основе водных растворов этиленгликоля или различных солей в настоящее время широко используются в холодильных системах. В то же время хладоносители на основе водных растворов пропиленгликоля имеют ряд преимуществ: они не токсичны, обладают низкой коррозионной активностью. Однако, водные растворы пропиленгликоля, особенно при низких температурах характерных для холодильных систем, обладают значительной вязкостью. Это факт приводит к низкой эффективности процесса теплоотдачи в теплообменных аппаратах и значительным затратам энергии на циркуляции теплоносителя. Одним из методов улучшения теплофизических свойств хладоносителя на основе пропиленгликоля является добавка веществ, понижающих вязкость, и наночастиц металлов или оксидов металлов для увеличения теплопроводности хладоносителя.

В статье рассмотрены перспективы применения хладоносителей с добавками наночастиц в холодильном оборудовании. Представлены результаты экспериментального исследования коэффициента теплоотдачи при ламинарном движении хладоносителя и нанохладоносителя в трубе. При проведении экспериментального исследования использовался хладоноситель, состоящий из воды, пропиленгликоля и вещества, регулирующего вязкость (48,60 / 46,52 / 4,88 % масс.) и нанохладоноситель, состоящий из воды, пропиленгликоля, вещества, регулирующего вязкость и наночастиц  $Al_2O_3$  (48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % масс.). Экспериментальные исследования проводились на оригинальной установке. Было показано, что коэффициенты теплоотдачи при различных значениях числа Рейнольдса, характерных для ламинарного режима движения жидкости в трубах, при использовании хладоносителя без добавок наночастиц принимал в среднем более низкие значения, чем при использовании нанохладоносителя.

**Ключевые слова** – хладоноситель, наночастицы, ламинарный поток, коэффициент теплоотдачи, эксперимент.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В связи с совершенствованием техники и внедрением энергосберегающих технологий, тепловые нагрузки в оборудовании в таких отраслях как электроника и микроэлектроника, теплоэнергетика, холодильная промышленность постоянно увеличиваются. Следовательно, при внедрении современных технологий предъявляются более серьезные требования как к теплообменному оборудованию, так и к используемым теплоносителям, которые должны справляться с задачей передачи все большего количества теплоты. Традиционные теплоносители, такие как вода, масла, водные растворы этиленгликоля и пропиленгликоля в силу своих теплофизических свойств не всегда обеспечивают требуемую эффективность процесса теплоотдачи в конкретном теплообменном оборудовании. Одним из достаточно недорогих и не требующих конструктивных изменений оборудования способов интенсификации теплоотдачи является введение в состав традиционного теплоносителя твердых частиц вещества, обладающего высокой теплопроводностью [1]. Практика показала сложность использования таких теплоносителей-суспензий с частицами микронного размера по причине их седиментационной неустойчивости в базовой жидкости. Вместе с тем, наличие в базовой жидкости-теплоносителе наноразмерных частиц (1-100 нм) должно обеспечивать их хорошую седиментационную стабильность. В 1995 году Чои (S. U. S. Choi) [2] впервые ввел термин «нанофлюид» (nanofluid), который применим к ультрадисперсным системам, состоящим из базовой жидкости и наночастиц с

размером порядка 1-100 нм. С данного момента начались активные исследования перспектив применения нанофлюидов в энергетическом оборудовании.

Следует отметить 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.

Исследованию влияния добавок наночастиц на теплопроводность базовой жидкости посвящено много работ [3-6]. Анализ этих работ показывает, что добавки относительно небольших количеств наночастиц разных материалов (оксиды металлов, металлы и углеродные нанотрубки) могут приводить как к существенному (до 160%) так и к незначительному (примерно на 1%) увеличению

теплопроводности базовой жидкости.

На сегодняшний день экспериментальное исследование процесса конвективной теплоотдачи при движении нанofлюидов в трубах и каналах проводилось рядом исследователей [5 - 14].

Анализ работ, посвященных экспериментальным исследованиям интенсивности теплоотдачи при вынужденной конвекции нанofлюидов, позволяет сделать вывод о том, что присутствие наночастиц в базовой жидкости способствует повышению коэффициента теплоотдачи, но этот эффект различен у различных авторов. В работе [8] авторы привели результаты экспериментально исследования коэффициента теплоотдачи при ламинарном движении нанofлюида, состоящего из воды и 1,6 об. % наночастиц  $Al_2O_3$  и показали увеличение коэффициента теплоотдачи на 47%. В большинстве других исследований этот эффект существенно меньше. Четкой зависимости между концентрацией наночастиц и величиной коэффициента теплоотдачи так же не прослеживается. В исследованиях [12, 13] значительного изменения коэффициента теплоотдачи в зависимости от изменения концентрации наночастиц не зарегистрировано, то есть эффект от добавок наночастиц наблюдался уже при малых концентрациях наночастиц в базовой жидкости. А в работе [14] отмечается увеличение коэффициента теплоотдачи приблизительно на 26% при концентрации наночастиц до 1,5 об. % и уменьшений коэффициента теплоотдачи приблизительно на 14 % при концентрации 2,0 об. %.

Интенсификация процесса теплоотдачи с участием нанofлюидов может объясняться рядом причин: наличием броуновского движения наночастиц, а также наличием трения между слоями базовой жидкости и наночастицами и турбулизацией базовой жидкости вблизи движущихся наночастиц. Возможны и другие эффекты, возникающие при наличии градиента температур в ультрадисперсных системах жидкость/твердое тело. Многочисленные эксперименты по изучению процесса конвективной теплоотдачи при участии нанofлюидов показали, что увеличение теплопроводности нанofлюида (по сравнению с базовой жидкостью) не является единственным фактором, определяющим интенсификацию теплоотдачи. Детальный, физически обоснованный механизм интенсификации теплоотдачи с участием нанofлюидов до сих пор остается не разработанным. Ряд исследователей [5, 11] показали, что имеющиеся критериальные зависимости для описания процесса теплообмена при вынужденной конвекции нанofлюида требуют модификации. В связи с изложенным выше, экспериментальное исследование процесса конвективной теплоотдачи с участием нанofлюидов представляет большой научно-практический интерес. Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса теплоотдачи при вынужденной конвекции теплоносителей вода/пропиленгликоль/регулирующее вязкость вещество/наночастицы оксида алюминия в

прямоточном теплообменнике типа труба в трубе.

## 2. ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования в работе были рассмотрены следующие растворы, перспективные для применения в качестве тепло и хладоносителей в энергетическом оборудовании и холодильной технике:

- раствор пропиленгликоля, воды и регулирующего вязкость вещества с концентрациями компонентов 48,60 / 46,52 / 4,88 % масс. - ХН;

- нанofлюид, состоящий из пропиленгликоля, воды, регулирующего вязкость вещества и наночастиц  $Al_2O_3$  с концентрацией компонентов 48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % масс. - наноХН.

При приготовлении нанofлюида использовались наночастицы  $Al_2O_3$   $\alpha$ -модификации производства Wenzhou Jingcheng Chemical Co с размером наночастиц в порошке  $10 \pm 5$  нм, чистотой 99,98 %, удельной поверхностью (методом БЭТ)  $8,7 \text{ м}^2/\text{гр}$ .

Для приготовления хладоносителей с наночастицами  $Al_2O_3$  в данном исследовании использовалась следующая методика. На первом этапе определенная масса сухих наночастиц в смеси с регулирующим вязкость веществом, количество которого определялось в соответствии с требуемым составом нанохладоносителя, подвергались перемешиванию с помощью вибромешалки в толстостенной кварцевой колбе, заполненной шариками из  $ZrO_2$  диаметром 2 мм. Для более эффективного разрушения агломератов периодический (каждые 3-4 часа) нанofлюид, находящейся в колбе подвергался ультразвуковому воздействию в течение 30 минут с использованием ультразвуковой ванны Codison CD 4800 (частота 42 кГц, мощность 0.07 кВт). Длительность процесса дробления наночастиц составляла 24 часа. Далее определенное количество полученного нанofлюида заправлялось в установку, в которую предварительно было заправлено заданное количество смеси воды и пропиленгликоля. Концентрация полученного нанofлюида определялась исходя из известных масс всех компонентов, заправленных в систему.

В процессе циркуляции хладоносителя с добавками наночастиц по контуру системы может происходить их оседание и отложение на стенках теплообменного оборудования. При этом вопросы агрегативной и седиментационной стабильности термодинамической системы хладоноситель/наночастицы в контуре циркуляции остаются недостаточно изученными. Поэтому одной из целей выполненного исследования было исследование стабильности нанofлюида в процессе его использования в качестве хладоносителя в экспериментальной установке.

Для оценки тенденции к агломерации и седиментации наночастиц со временем были проведены следующие исследования. Для двух одинаковых образцов нанохладоносителя были определены медианные размеры агломератов наночастиц с использованием метода турбодиметрии [15-17]. Практическая

реализация этого метода заключалась в измерении спектральной зависимости оптической плотности образца. Полученные данные позволяют рассчитать медианный размер агрегатов наночастиц с использованием функций светорассеяния, рассчитанных по теории Ми [17].

Измерение зависимости оптической плотности образцов нанохладоносителя (наноХН) с концентрацией наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,53 % масс. от длины волны проходящего света (в интервале  $\lambda = 700 - 990$  нм) осуществлялось на спектрофотометре Shimadzu UV-120-02 в герметичных оптических ячейках с длиной оптического пути 4,05 мм. Фотографии оптических ячеек с образцами исследуемых хладоносителей через 12 дней после начала проведения исследования приведены на рисунке 1. Оптическая плотность первого образца наноХН измерялся в течении 30 дней (каждый день без предварительного взбалтывания) для оценки изменения медианного размера агрегатов наночастиц в жидкости в результате их частичной седиментации при хранении образца в статических условиях. Второй образец наноХН перед каждым измерением взбалтывался непосредственно в оптической ячейке. Таким образом, имитировались условия постоянного механического перемешивания рабочего тела с наночастицами при его циркуляции в системе. Изменение со временем медианного размера агрегатов наночастиц  $\text{Al}_2\text{O}_3$  в нанохладоносителе с концентрацией 0,53 % масс. показано на рисунке 2. При условии статического хранения образца медианный размер наночастиц уменьшался от 240 до 145 нм в течении 12 дней и в дальнейшем размер наночастиц в образце оставался почти постоянным. Этот факт объясняется частичной седиментацией наиболее крупных частиц не участвующих в броуновском движении.



Рис. 1. Фотография хладоносителя (ХН) без добавок наночастиц (слева), нанохладоносителя (наноХН) хранящегося в статических условиях в течении 12 суток (посередине) и нанохладоносителя (наноХН) подвергавшегося механическому перемешиванию перед проведением исследований (справа) в ячейках с длиной оптического пути 4,05 мм

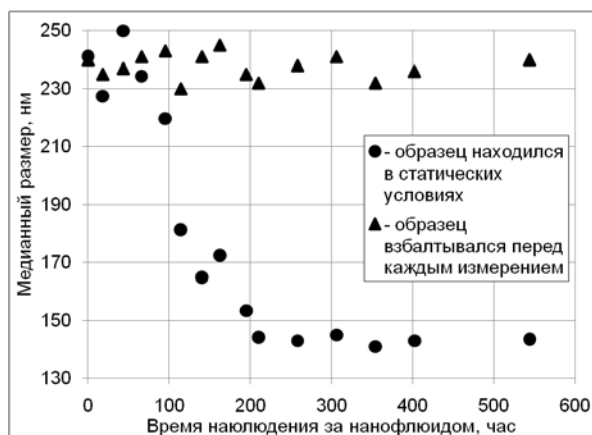


Рис. 2. Изменение медианного размера агрегатов наночастиц в нанофлюиде (метод спектротурбидиметрии) со временем начиная с момента приготовления нанохладоносителя

Для образца, подвергаемого взбалтыванию медианный размер агрегатов наночастиц сохранялся приблизительно постоянным 240 нм. Полученные данные указывают на отсутствие агрегации наночастиц в исследуемом образце. Этот результат является важным, поскольку показывает, что полученные образцы нанофлюидов можно использовать в устройствах с вынужденной циркуляцией хладоносителя. Размер агрегатов наночастиц в нанохладоносителе, оцененный после одного месяца хранения в статических условиях и последующего механического перемешивания образца, соответствовал размеру, зарегистрированному сразу после приготовления нанофлюида.

Следует отметить, что аналогичные результаты были получены в работе [18], где размер наночастиц  $\text{TiO}_2$  в воде измерялся методом динамического рассеяния света (фотонной корреляционной спектроскопии) каждый день в течении месяца после предварительной ультразвуковой обработки образца. Но в реальных условиях важнее знать как будет изменяться размер агрегатов при механическом перемешивании, а не при ультразвуковой обработке.

### 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НАНОХЛАДОНОСИТЕЛЯ

Информация о теплофизических свойствах нанофлюидов необходима для корректной интерпретации результатов исследования влияния добавок наночастиц в хладоноситель на коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции. Конечно, при моделировании коэффициента теплоотдачи лучше всего располагать экспериментальными данными о теплофизических свойствах нанофлюида. Однако, по мнению многих авторов, например [5, 19], такие свойства как плотность и теплоемкость можно оценить по правилу аддитивности.

Такие важные при оценке интенсивности процесса теплообмена свойства теплоносителя как теплопроводность и вязкость не могут быть выражены через объемную концентрацию наночастиц и оценены

по правилу аддитивности. Очевидно, что теплофизические свойства нанофлюидов зависят не только от концентрации наночастиц, но и от таких параметров как размер и форма наночастиц, присутствие в нанофлюидах ПАВ и других факторов. Выполненные на сегодняшний день экспериментальные исследования выявили общую закономерность влияния добавок наночастиц на вязкость и теплопроводность жидкости: значения как вязкости, так и теплопроводности увеличиваются с увеличением концентрации наночастиц, по сравнению с этими же свойствами для базовой жидкости [5, 18, 19]. Накопленный объём экспериментальных данных позволил разработать ряд в различной степени приемлемых с точки зрения точности корреляций для оценки вязкости и теплопроводности нанофлюидов [5, 18, 19, 20].

В лаборатории кафедры теплофизики и прикладной экологии ОНАПТ были выполнены экспериментальные исследования плотности, вязкости и теплоемкости хладагента, состоящего из пропиленгликоля, воды и регулирующего вязкость вещества (48,60 / 46,52 / 4,88 % масс.) и нанохладагента, состоящего из пропиленгликоля, воды, регулирующего вязкость вещества и наночастиц (48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % масс.) в интервале температур, характерном для области применения рассмотренных систем в качестве тепло- и хладагентов.

Исследование плотности базового хладагента и нанохладагента производилось пикнометрическим методом. Пикнометр был помещен в термостат, оснащенный системой автоматического регулирования температуры. Колебания температуры в термостате не превышали  $\pm 0,02$  К. Для измерения уровня образца хладагента в пикнометре использовался катетометр КМ-8. Эксперимент проводился в интервале температур от 253 до 313 К. Расширенная неопределенность измерения плотности не превышала 0,3 %. Полученные экспериментальные данные о плотности хладагента и нанохладагента приведены в таблице 1.

Экспериментальные исследования вязкости базового хладагента и нанохладагента проведены на экспериментальной установке, основным элементом которой является стеклянный капиллярный вискозиметр с висязим уровнем. Проведенные исследования показали, что колебания температуры в термостате не превышали  $\pm 0,05$  К. Неопределенность измерения температуры составляла менее 0,2 К. Все измерения проводились многократно с целью уменьшения влияния случайной погрешности измерений. Выполненный анализ показывает, что расширенная неопределенность измерения кинематической вязкости в исследованном диапазоне параметров не превышал  $0,5 \text{ мм}^2/\text{с}$ . Полученные экспериментальные данные о вязкости хладагента и нанохладагента приведены в таблице 1. Температурная зависимость относительной вязкости хладагента и нанохладагента приведена на рис. 3.

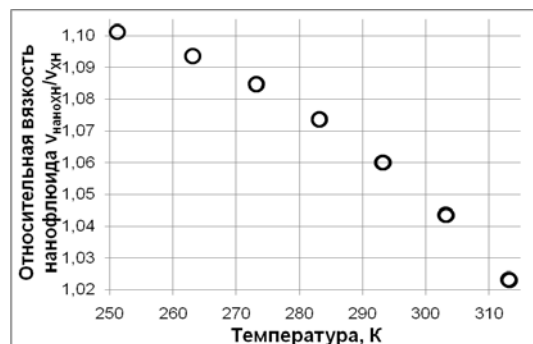


Рис. 3. Температурная зависимость относительной вязкости хладагента (ХН) и нанохладагента (наноХН) в интервале температур 253 – 313 К.

Исследование теплоемкости базового хладагента и нанохладагента производилось методом монотонного нагрева в адиабатном калориметре [21]. Эксперимент проводился в интервале температур от 243 до 328 К. Расширенная неопределенность измерения теплоемкости не превышала 0,45 %. Полученные экспериментальные данные о теплоемкости хладагента и нанохладагента приведены в таблице 1.

Таблица 1. Теплофизические свойства хладагента (ХН) - пропиленгликоль / вода / регулирующее вязкость вещества (48,60 / 46,52 / 4,88 % масс.) и нанохладагента (наноХН) - пропиленгликоль / вода / регулирующее вязкость вещество / наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % масс.) в интервале температур 243 – 313 К.

Т, К	Плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$		Вязкость, $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$		Теплоемкость, Дж/(кг·К)		Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	
	ХН	Нано ХН	ХН	Нано ХН	ХН	Нано ХН	ХН	Нано ХН
243.15					3056.4	3006.0		
248.15					3098.2	3049.7		
253.15	1059.5	1069.2	82.94	91.24	3139.4	3092.9	0.287	0.314
258.15	1056.4	1065.9	53.64	58.85	3180.1	3135.6	0.285	0.313
263.15	1053.3	1062.7	36.29	39.69	3220.3	3177.8	0.284	0.311
268.15	1050.1	1059.4	25.52	27.80	3259.9	3219.5	0.282	0.309
273.15	1047.0	1056.1	18.54	20.11	3299.0	3260.8	0.281	0.308
278.15	1043.9	1052.9	13.85	14.95	3337.6	3301.5	0.279	0.306
283.15	1040.8	1049.6	10.60	11.38	3375.6	3341.8	0.277	0.304
288.15	1037.7	1046.3	8.280	8.836	3413.3	3381.7	0.275	0.302
293.15	1034.5	1043.1	6.580	6.976	3450.4	3421.1	0.273	0.299
298.15	1031.4	1039.8	5.308	5.585	3487.0	3460.0	0.271	0.297
303.15	1028.3	1036.5	4.335	4.524	3523.2	3498.6	0.269	0.295
308.15	1025.2	1033.3	3.579	3.701	3559.0	3536.7	0.267	0.292
313.15	1022.0	1030.0	2.981	3.051	3594.3	3574.4	0.265	0.290

В данном исследовании для оценки теплопроводности использовалась корреляция (4) из [20]:

$$\lambda_{nf} = \left[ \frac{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_f + 2(\lambda_{np} - \lambda_f)(1 + \beta)^3 \varphi}{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_f - (\lambda_{np} - \lambda_f)(1 + \beta)^3 \varphi} \right] \lambda_f, \quad (4)$$

где  $\lambda_{np}$  - теплопроводность наночастиц, Вт/(м·К);  $\lambda_f$  - теплопроводность базовой жидкости, Вт/(м·К);  $\varphi$  - объемная доля наночастиц в нанофлюиде;  $\beta$  - отношение толщин слоя адсорбированной на поверхности наночастиц базовой жидкости к истинному радиусу наночастицы, для расчетов принято значение  $\beta=0,1$  [20].

Теплопроводность базовой жидкости (пропиленгликоль 48,60 % масс. / вода 46,52 % масс. / регулирующее вязкость вещество 4,88 % масс.) была рассчитана по корреляции для расчета теплопроводности многокомпонентных растворов, предложенной в [22]. Информация о температурной зависимости теплопроводности компонентов хладоносителя была получена из данных приведенных в [23, 24].

Рассчитанные значения теплопроводности исследуемых образцов хладоносителя и нанохладоносителя в интервале температур 253 – 313 К приведены в таблице 1. Анализируя полученную информацию от теплопроводности хладоносителя и нанохладоносителя можно констатировать, что в среднем расчетное значение теплопроводности нанохладоносителя на 8-9% выше значения теплопроводности базового хладоносителя.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ХЛАДОНОСИТЕЛЯ И НАНОХЛАДОНОСИТЕЛЯ В ТРУБЕ

Эксперименты по изучению процесса теплообмена при вынужденной конвекции хладоносителя и нанохладоносителя на его основе в трубе проводились на экспериментальной установке, разработанной в лаборатории кафедры теплофизики и прикладной экологии ОНАХТ. Установка представляет собой прямоточный теплообменный аппарат типа «труба в трубе», в котором исследуемый хладоноситель движется в трубе, а второй теплоноситель (вода) – в межтрубном пространстве. Схема экспериментальной установки описана в работе [25].

Схема движения теплоносителей в рассматриваемой экспериментальной установке была принята прямоточной. Внутренняя труба имеет диаметр  $0,01 \times 0,001$  м, длина рабочего участка трубы составляет 0,9 м. Внешний контур теплообменника подключен к холодильной системе, поэтому температура воды на входе во внешний контур в процессе эксперимента на одном из выбранных режимов поддерживалась практически постоянной. В эксперименте расход воды во внешнем контуре был фиксирован и равен 0,0600 кг/с. Расход хладоносителя во внутреннем контуре варьировался при помощи регулирующего вентиля в диапазоне от  $20,8 \cdot 10^{-6}$  до  $92,5 \cdot 10^{-6}$  м<sup>3</sup>/с.

Параметры обоих теплоносителей, при которых были проведены экспериментальные исследования процесса конвективной теплоотдачи при

вынужденном движении хладоносителей в трубе, приведены в таблице 2.

Измерение локальных коэффициентов теплоотдачи проводились на расстоянии  $X=0,15; 0,30; 0,45; 0,60; 0,75$  и  $0,90$  м от входа хладоносителя в рабочий участок. Данный участок характеризовался гидродинамически стабилизированным режимом течения жидкости, так как входу хладоносителя в рабочий участок предшествовал практически изотермичный участок длиной около 1 м. Выполненный анализ расширенной неопределенности измеряемых в эксперименте величин показывает, что абсолютная неопределенность измерения температуры составляет 0,15 К, диаметра - 0,05 мм, длины - 5 мм, относительная неопределенность измерения теплоемкости составляет 0,45%, расхода - 1,0 %. Исходя из указанных величин, расширенная неопределенность определении коэффициента теплоотдачи с учетом случайной составляющей не превышает 15 %.

Таблица 2 - Параметры теплоносителей при проведении экспериментальных исследований процесса конвективной теплоотдачи при вынужденном движении хладоносителя в трубе

Хладо-носитель	$T_{вex},$ К	$V_{XH},$ $10^{-6}$ м <sup>3</sup> /с	$\bar{v},$ м/с	Re	$T_{XH ex},$ К
XH	278,5	20,83	0,267	280	278,5
	278,5	41,67	0,532	543	278,2
	273,4	20,83	0,267	192	273,4
	273,4	36,11	0,462	326	273,4
	283,5	27,78	0,355	432	283,2
	283,5	55,56	0,709	837	283,2
	283,7	92,50	1,179	1294	283,2
наноXH	278,5	20,83	0,267	254	278,2
	278,5	41,67	0,532	496	278,2
	273,4	20,83	0,267	182	273,4
	273,4	36,11	0,461	295	273,4
	283,5	27,78	0,355	405	283,2
	283,5	55,56	0,709	785	283,2
	283,5	92,50	1,180	1372	283,2

где  $T_{вex}$  - температура охлаждаемой воды на входе в рабочий участок, К;  $V_{XH}$  - расходов хладоносителя, м<sup>3</sup>/с;  $\bar{v}$  - средняя скорость хладоносителя (определенная по экспериментальному значению расхода хладоносителя) в трубе, м/с;  $T_{XH ex}$  - температура хладоносителя на входе в рабочий участок, К

Для экспериментального определения местного (локального) коэффициента теплоотдачи в сечении трубы, в которой происходит вынужденное движение теплоносителя использовалось уравнение:

$$\alpha_{эсн} = q / (T_c - T_{XH}), \quad (5)$$

где  $q$  - плотность теплового потока в рассматриваемом сечении трубы, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_c$  - температура внутренней поверхности трубы в

рассматриваемом сечении трубы, К;  $T_{XH}$  – расчетная температура хладоносителя в рассматриваемом сечении трубы, К.

Значение  $q$  и  $T_c$  рассчитываются для элемента поверхности  $dF$ . Известно, что выбор расчетной температуры  $T_{XH}$  законом Ньютона – Рихмана не predetermined. В настоящей работе за расчетную была принята среднеинтегральная в данном сечении трубы температура жидкости:

$$T_{жс} = \int_{r=0}^{r=r_0} T dr, \quad (6)$$

где  $T$  – измеренное в эксперименте значение температуры хладоносителя на расстоянии  $r$  от центра трубы, К.

Тепловой поток, проходящий через стенку трубы длиной  $L=X_2-X_1$  (где  $X_1$  и  $X_2$  – расстояние от входа хладоносителя в рабочий участок до сечения 1 и 2, соответственно, м), при  $C_{pXH} = const$  определялся следующим образом:

$$Q_{1-2} = G_{XH} \cdot C_{pXH} (T_{XH X_2} - T_{XH X_1}), \quad (7)$$

где  $G_{XH}$  – массовый расход хладоносителя в трубе, кг/с;  $C_{pXH}$  – теплоемкость хладоносителя при средней на участке  $X_2 - X_1$  температуре, Дж/(кг·К);  $T_{XH X_1}$  и  $T_{XH X_2}$  – средние по сечению трубы температуры хладоносителя в сечении  $X_1$  и  $X_2$ , соответственно, К.

Плотность теплового потока определялась по формуле:

$$q = \frac{Q_{1-2}}{\pi \cdot 2 \cdot r_0 \cdot (X_2 - X_1)} \quad (8)$$

Для экспериментального определения среднего по длине трубы коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении теплоносителя использовалось уравнение:

$$\bar{\alpha}_{экс} = q / (\bar{T}_c - \bar{T}_{XH}), \quad (9)$$

где  $\bar{T}_c$  – средняя (среднеарифметическая по ряду экспериментальных значений) температура внутренней поверхности экспериментального участка трубы, К;  $\bar{T}_{XH}$  – средняя по длине экспериментального участка (среднеарифметическая по ряду экспериментальных значений) температура хладоносителя, К.

Зависимость экспериментальных значений локальных коэффициентов теплоотдачи от расстояния от входа в рабочий участок для разных параметров проведения экспериментальных исследований для хладоносителя и нанохладоносителя показана на рис. 4.

Для практического применения важно иметь

информацию не только о локальных коэффициентах теплоотдачи, но и средних по длине теплообменной поверхности. В данном исследовании по полученным экспериментальным данным были определены средние значения коэффициента теплоотдачи по длине рабочего участка при всех параметрах проведения экспериментальных исследований. Для анализа полученной экспериментальной информации о коэффициенте теплоотдачи при вынужденной конвекции в трубе, полученные экспериментальные данные были представлены в виде чисел подобия, которые характеризуют процесс теплоотдачи при вынужденном движении жидкостей:

$$\text{среднее число Нуссельта} - Nu = \bar{\alpha}_{экс} \cdot 2 \cdot r_0 / \lambda_{f(nf)};$$

$$\text{число Рейнольдса} - Re = \bar{v} \cdot 2 \cdot r_0 / \nu_{f(nf)}.$$

Зависимость экспериментальных значений числа Нуссельта от числа Рейнольдса для всех выбранных для проведения эксперимента режимов приведена на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что примеси наночастиц  $Al_2O_3$  в хладоносителе способствуют увеличению интенсивности конвективного теплообмена при ламинарном движении в трубе в среднем на 8 %.

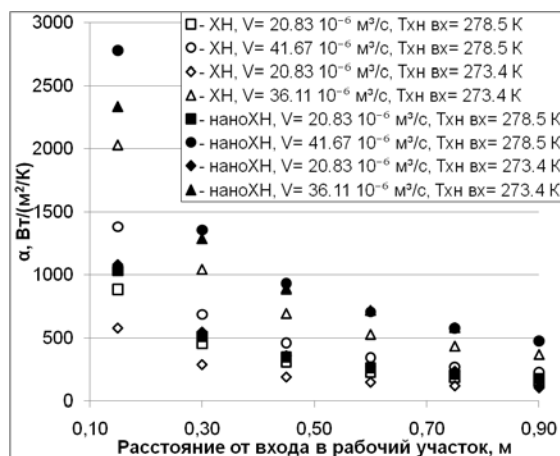


Рис. 4.а

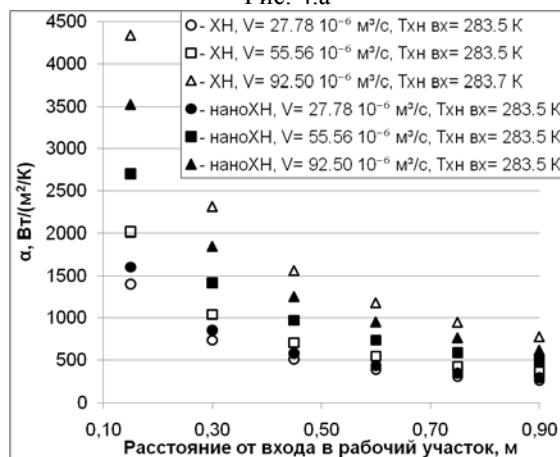


Рис. 4.б

Рис. 4. Зависимость экспериментальных значений локальных коэффициентов теплоотдачи от расстояния от входа в рабочий участок при вынужденном ламинарном движении хладоносителя (XH) и нанохладоносителя (наноXH) в трубе

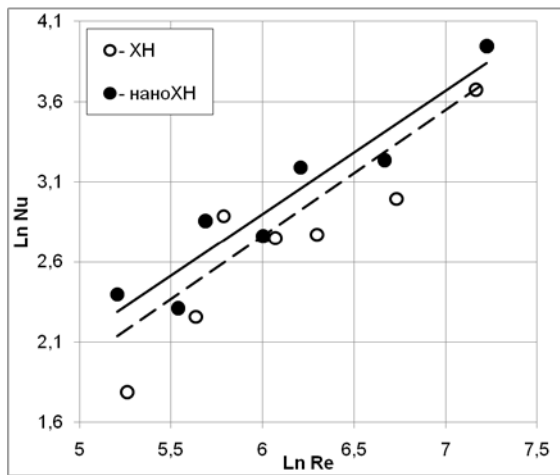


Рис. 5. Зависимость средних по длине экспериментального участка значений числа Нуссельта от числа Рейнольдса при вынужденной конвекции хладоносителя (ХН) и нанохладоносителя (наноХН)

## 5. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

В работе представлены результаты экспериментального исследования плотности, теплоемкости и вязкости хладоносителя пропиленгликоль / вода / регулирующее вязкость вещество (48,60 / 46,52 / 4,88 % масс.) и нанохладоносителя пропиленгликоль / вода / регулирующее вязкость вещество / наночастицы  $Al_2O_3$  (48,24 / 46,38 / 4,85 / 0,53 % масс.). Показано, что примеси наночастиц  $Al_2O_3$  0,53 % масс. способствуют увеличению вязкости базового теплоносителя до 10% при низких температурах (253 К). Влияние наночастиц на вязкость снижается с увеличением температуры нанохладоносителя и при температуре 313 вязкость нанохладоносителя незначительно (на 2 %) выше вязкости базовой жидкости. Экспериментально показано увеличение плотности и снижение теплоемкости нанохладоносителя по сравнению с этими величинами для базового хладоносителя.

Исследования агрегативной и седиментационной устойчивости нанохладоносителя в течении одного месяца указывают на хорошую агрегативную устойчивость наночастиц в хладоносителе. Медианный размер агрегатов наночастиц в нанохладоносителе, оцененный после одного месяца хранения в статических условиях и последующего механического перемешивания образца, соответствовал размеру, зарегистрированному сразу после приготовления нанофлюида. Полученные результаты являются основанием для рекомендации использования разработанного нанохладоносителя пропиленгликоль / вода / регулирующее вязкость вещество / наночастицы  $Al_2O_3$  в холодильной технике. Получены новые результаты экспериментального исследования конвективного коэффициента теплоотдачи при ламинарном движении

хладоносителя и нанохладоносителя в трубе при температурах, характерных для их применения в холодильном оборудовании и системах кондиционирования воздуха. Экспериментально показано увеличение как локального (по длине термически нестабилизированного участка трубы) значения коэффициента теплоотдачи, так и среднего по длине трубы коэффициента теплоотдачи при вынужденном движении нанохладоносителя, по сравнению с хладоносителем без добавок наночастиц. Анализ зависимости среднего числа Нуссельта от числа Рейнольдса показывает увеличение числа Нуссельта в исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса в среднем на 8 % в случае применения нанохладоносителя, по сравнению с базовым хладоносителем.

Полученные в результате проведенного исследования данные указывают на перспективу применения нанохладоносителей в теплообменных аппаратах холодильного оборудования.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A. S. Ahuja, *Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. I. Experiments and results*, Journal of Applied Physics, 1975, 46 (8), pp. 3408-3416.
- [2] S. U. S. Choi et al., *Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles*, ASME-Publications-Fed, 1995, 231, pp. 99-106.
- [3] S.U.S. Choi, Z.G. Zhang, W. Yu, F.E. Lockwood, E.A. Grulke, *Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions*, Applied Physics Letter, 2001, 79, pp. 2252-5.
- [4] M. S. Liu et al., *Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2005, 32 (9), pp. 1202-1210.
- [5] L. S. Sundar, M. K. Singh, *Convective heat transfer and friction factor correlations of nanofluid in a tube and with inserts: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013, 20, pp. 23-35.
- [6] M. Lomascolo et al., *Review of heat transfer in nanofluids: conductive, convective and radiative experimental results*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43, pp. 1182-1198.
- [7] Y. Xuan, Q. Li, *Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids*, Journal of Heat transfer, 2003, 125 (1), pp. 151-155.
- [8] D. Wen, Y. Ding, *Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluid at the entrance region under laminar flow conditions*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47 (24), pp. 5181-5188.
- [9] S.Z. Heris, M.N. Esfahany, S.G. Etemad *Experimental investigation of convective heat transfer of  $Al_2O_3$ /water nanofluid in circular tube*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2007, 28 (2), pp. 203-210.
- [10] C.J. Ho, L.C. Wei, Z.W. Li *An experimental investigation of forced convective cooling performance of a microchannel heat sink with  $Al_2O_3$ /water nanofluid*, Applied Thermal Engineering, 2010, 30 (2), pp. 96-103.
- [11] B.C. Pak, Y.I. Cho *Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles*, Experimental Heat Transfer, 1998, (11), pp. 151-170.
- [12] S.M. Fotukian, M.N. Esfahany, *Experimental study of turbulent convective heat transfer and pressure drop of dilute  $CuO$ /water nanofluid inside a circular tube*, International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 37 (2), pp. 214-219.
- [13] S.M. Fotukian, M.N. Esfahany, *Experimental investigation of turbulent convective heat transfer of dilute  $Al_2O_3$ /water nanofluid inside a circular tube*, International Journal of Heat and Fluid Flow, 2010, 31 (4), pp. 606-612.
- [14] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, *An experimental study on the heat transfer performance and pressure drop of  $TiO_2$ -water*



- nanofluids flowing under a turbulent flow regime*, International Journal of Heat and Mass Transfer, 2010, 53, pp. 334–44.
- [15] T. Kourtí, *Turbidimetry in particle size analysis*, in Encyclopedia of Analytical Chemistry: Instrumentation and Applications, Wiley, 2000, pp. 5549–5579.
- [16] G. Crawley, M. Cournil, D. Di Benedetto, *Size analysis of fine particle suspensions by spectral turbidimetry: potential and limits*, Powder Technology, 1997, 91, pp. 197–208.
- [17] В.И. Кленин, С.Ю. Щеголев, В.И. Лаврушин, *Характеристические функции светорассеяния дисперсных систем*, из-во Саратовского университета, 1977, 177 р.
- [18] L. Fedele, L. Colla, S. Bobbo, *Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles*, International Journal of Refrigeration, 2012, 35, pp. 1359 – 1366.
- [19] X.Q. Wang, Mujumdar A.S., *A review on nanofluids - part I: Theoretical and numerical investigations*, Braz. J. Chem. Eng., 2008, 25(4), pp. 613-630.
- [20] W. Yu, S.U.S. Choi, *The role of intermolecular layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model*, Journal on Nanoparticle Research, 2003, 5, pp. 167–171.
- [21] Т.Л. Лозовский, Н.А. Шимчук, И.В. Мотовой, В.П. Железный, *Влияние примесей наночастиц  $Al_2O_3$  на теплоемкость изопропилового спирта*, Холодильная техника и технология, 2016, 52 (1), С. 70 -79.
- [22] Р. Рид, П. Дж. Т. Шервуд, *Свойства газов и жидкостей. Справочное пособие*, 1982, Пер. с англ., Химия, 592 с.
- [23] REFPROP: Reference fluid thermodynamic and transport properties, NIST standard reference database 23, Version 8.0 / E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden. - Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology, 2007.
- [24] О.Н. Дымент, К.С. Казанский, А.М. Мирошников, Гликоли и другие производные окисей этилена и пропилена, М.: «Химия», 1976, 376 с.
- [25] С.С. Рябкин, О.Я. Хлиева, В.З. Геллер, В.П. Железный *Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладающих в трубе*, VII Международная научно-техническая конференция «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (Санкт-Петербург, 17–20 ноября 2015 г.), Ч. I: Материалы конференции, С. 273-276.

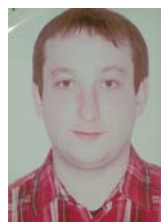
## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



теплофизических

**Ольга Яковлевна Хлиева**, к.т.н. сп. «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика», каф. теплофизики и прикладной экологии, института холода, криотехнологий и эконенергетики, Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: исследование свойств нанофлюидов, процессов

теплообмена с участием нанофлюидов, перспектив применения нанофлюидов в холодильной технике, эколого-энергетический анализ холодильного и теплоэнергетического оборудования. E-mail: khliyev@ukr.net.



холодильной технике. E-mail: [ryabkin90@mail.ru](mailto:ryabkin90@mail.ru)

**Сергей Сергеевич Рябкин**, аспирант каф. теплофизики и прикладной экологии, института холода, криотехнологий и эконенергетики, Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: исследование процессов теплообмена с участием нанофлюидов, перспектив применения нанофлюидов в



**Виталий Петрович Железный**, профессор, д.т.н. сп. «Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика», каф. теплофизики и прикладной экологии, института холода, криотехнологий и эконенергетики, Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: исследование теплофизических свойств хладагентов, растворов хладагент/масло, нанофлюидов, процессов теплообмена с участием нанофлюидов, перспектив применения нанофлюидов в холодильной технике, эколого-энергетический анализ холодильного и теплоэнергетического оборудования. E-mail: [vzhelezny@mail.ru](mailto:vzhelezny@mail.ru).



**Татьяна Васильевна Гордейчук** аспирант каф. теплофизики и прикладной экологии, института холода, криотехнологий и эконенергетики, Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: исследование перспектив применения нанофлюидов в холодильной технике. E-mail: [tetyana\\_gordeychuk@mail.ru](mailto:tetyana_gordeychuk@mail.ru)