

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

РЯБІКІН СЕРГІЙ СЕРГІЙОВИЧ



УДК 536.248.2: 532.529.5

**ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В
АПАРАТАХ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ШЛЯХОМ
ВИКОРИСТАННЯ НАНОТЕПЛОНОСІВ
(теплофізичний експеримент, моделювання)**

Спеціальність

05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса-2018

Дисертація є рукописом

Робота виконана в Одеській національній академії харчових технологій (ОНАХТ) Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Геллер Володимир Зіновійович
професор кафедри теплофізики і прикладної екології Одеської національної академії харчових технологій. МОН України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Цейтлін Мусій Абрамович
професор кафедри хімічної техніки і промислової екології Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут.” МОН України

доктор технічних наук, професор
Арсирій Василь Анатолійович
зав. кафедри прикладної екології та гідрогазодинаміки Одеського національного політехнічного університету. МОН України

Захист дисертації відбудеться " 04 " 06 .2018 р о 13⁰⁰ год. в ауд. 108 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03. в Одеській національній академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м Одеса, 65082, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці ОНАХТ за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м Одеса, 65082, Україна.

Автореферат розісланий " 26 " 04 2018 року.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 41.088.03,
доктор технічних наук, професор



Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним з перспективних напрямків підвищення енергоефективності та конкурентоспроможності енергетичного і холодильного устаткування є використання нанофлюїдів, замість традиційних теплоносіїв. Вимоги, що пред'являються до холодоносіїв, досить суперечливі. Тому все більше застосування на практиці знаходять багатокомпонентні холодоносії. Визначення складу багатокомпонентних нанохолодоносіїв, концентрації і матеріалу наночастинок є складним багатофакторним завданням, рішення якого вимагає великого обсягу емпіричної інформації про теплофізичні властивості (ТФВ) об'єктів дослідження і даних про інтенсивність тепловіддачі теплообмінних апаратах.

Завдання роботи: підвищення інтенсивності тепловіддачі у теплообмінному обладнанні теплоенергетичних та холодильних систем, зниження масогабаритних характеристик теплообмінного обладнання шляхом науково обґрунтованого впровадження нових теплоносіїв на базі нанофлюїдів; встановлення закономірності впливу концентрації наночастинок на теплофізичні властивості нанотеплоносіїв; встановлення закономірностей процесів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів з вивченням механізмів, що впливають на інтенсивність тепловіддачі при ламінарному режимі течії нанотеплоносіїв.

Питання створення агрегативно стійких нанофлюїдів до цього часу не вивчене в достатній мірі. Статей, присвячених вивченню теплофізичних властивостей нанофлюїдів, опубліковано багато. Однак, по-перше, результати дослідження ТФВ залишаються досить суперечливими у різних авторів, по-друге, в цих роботах зазвичай вимірювалися окремі теплофізичні властивості (як правило, в'язкість і теплопровідність). Дані про вплив домішок наночастинок на калоричні властивості технічно важливих рідин залишаються недостатньо повними. В даний час опубліковано досить багато робіт, присвячених експериментальному дослідженню процесів теплообміну при вимушеній конвекції для нанофлюїдів. Але, по-перше, дані, наведені в цих роботах, вельми суперечливі, по-друге, не розроблено універсальної моделі для оцінки коефіцієнта тепловіддачі (КТО), зокрема, при вимушеній конвекції в однофазних потоках нанофлюїдів. Розрахункові моделі визначення теплофізичних властивостей нанофлюїдів в основному носять емпіричний характер і можуть бути використані тільки для досліджених авторами об'єктів і умов проведення експерименту. Залишаються нез'ясованими механізми підвищення інтенсивності тепловіддачі в однофазних потоках нанофлюїдів. Таким чином, можна констатувати відсутність робіт комплексного характеру, які повинні включати всі об'єктивно необхідні етапи: розробки технології приготування нанотеплоносіїв, вимір і моделювання їх теплофізичних властивостей; дослідження процесів теплообміну при вимушеній конвекції нанофлюїдів; контроль стабільності нанофлюїдів на всіх стадіях експерименту.

З урахуванням викладеного, проблема розробки нового покоління нанохолодоносіїв залишається невирішеною і тому є актуальною.

Серед вчених, що плідно працюють в рамках зазначеного наукового напрямку і на публікації яких автор спирався при вирішенні розглянутих у дисертації задач,

слід назвати імена таких вчених: Федель Л. (Fedele L.), Боббо С. (Bobbo S.), Рудяк В. (Rudyak V.), Бігделі М.Б. (Bigdeli M. B.), Кака С. (Kakaç, S.), Келен А.А. (Celen, A. A.), Хеддад З. (Haddad, Z.), Бьянко В. (Bianco, V.), Чой С. (Choi C.), Мазур В.О., Желєзний В.П.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України, від 01.07.1994, № 74/94-ВР "Про енергозбереження", дисертаційна робота є також складовою частиною досліджень, проведених в рамках виконання держбюджетних науково-дослідних робіт МК 16/03 «Дослідження стабільності і теплофізичних властивостей нанофлюїдів, перспективних для використання в холодильному і енергетичному обладнанні», № держреєстрації: 0116U004683; МК № 16/02 «Експериментальне дослідження та моделювання процесів кипіння нанохолодоагентів», № держреєстрації: 00116U004682 і науково-дослідницької кафедральної теми «Комплексні дослідження теплофізичних властивостей речовин, перспективних для використання в промисловості».

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є: експериментальне дослідження й моделювання властивостей багатокомпонентних теплоносіїв; експериментальне і теоретичне вивчення впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентних холодоносіїв; вивчення впливу домішок наночастинок у багатокомпонентних холодоносіях на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній конвекції в горизонтальній трубі.

Для досягнення зазначеної мети були поставлені та вирішені наступні завдання:

- створено експериментальний стенд для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції в горизонтальній трубі;
- розроблено моделі прогнозування густини та в'язкості холодоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода;
- вивчено вплив наночастинок Al_2O_3 на теплофізичні властивості багатокомпонентних холодоносіїв (пропіленгліколь/вода/речовина що регулює в'язкість)
- виконані експериментальні дослідження впливу домішок наночастинок Al_2O_3 у багатокомпонентних холодоносіях на локальні та середні по довжині коефіцієнти тепловіддачі при вимушеній конвекції в трубі;
- виконано аналіз факторів, що впливають на інтенсифікацію теплообміну при вимушеній конвекції в трубі в багатокомпонентних холодоносіях пропіленгліколь/вода/наночастинки Al_2O_3 ;

Об'єкти дослідження – багатокомпонентні нанохолодоносії пропіленгліколь/вода/речовина, що знижує в'язкість/наночастинки Al_2O_3 .

Предмет дослідження - закономірності впливу домішок наночастинок Al_2O_3 , речовини що знижує в'язкість на теплофізичні властивості розчинів пропіленгліколь/вода, а також на інтенсивність теплообміну при вимушеній конвекції холодоносія при його течії в горизонтальній трубі.

Методи дослідження. Рішення сформульованих завдань досягнуто в рамках таких методів дослідження:

- експериментальних досліджень густини та динамічної в'язкості трикомпонентних розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість; густини, динамічної в'язкості і теплоємності розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість з домішками наночастинок Al_2O_3 ; локальних та середніх по довжині коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанохолодоносіїв у трубі;

- теоретичних досліджень, пов'язаних з розвитком існуючих методів прогнозування теплофізичних властивостей багатокомпонентних холодоносіїв і нанохолодоносіїв у широких діапазонах параметрів стану і вдосконаленням методик оцінки коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції холодоносіїв і нанохолодоносіїв в трубі.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що:

- запропоновані нові моделі прогнозування густини і в'язкості багатокомпонентних теплоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість;

- вперше отримані експериментальні дані про вплив домішок наночастинок Al_2O_3 на в'язкість, густину і теплоємність у багатокомпонентних холодоносіях, створених на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість;

- показано, що у нанохолодоносіях негативний ефект збільшення в'язкості за рахунок домішок наночастинок може бути успішно усунутий спеціальними речовинами що знижують в'язкість;

- вперше отримані експериментальні дані про вплив домішок наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентних холодоносіях, створених на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість на значення коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції в трубі;

- результати проведеного дослідження вказують на те, що інтенсифікація теплообміну при вимушеній конвекції в трубах не може бути пояснена тільки впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентного теплоносія.

В рамках дисертаційної роботи можна сформулювати таке наукове положення: невеликі добавки наночастинок Al_2O_3 , а також використання речовин, що знижують в'язкість розчинів пропіленгліколь/вода, забезпечують можливість розробки нового покоління багатокомпонентних нанохолодоносіїв, застосування яких сприяють підвищенню показників енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій визначаються: коректною постановкою завдань і виконаних досліджень; застосуванням нового експериментального стенду і сучасних приладів для вимірювання фізичних величин; проведенням тарувальних експериментів і детальним аналізом помилок отриманих експериментальних даних; використанням сучасних математичних методів і програмних засобів обробки даних, отриманими іншими авторами.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що: отримані експериментальні дані про теплофізичні властивості нанотеплоносіїв дозволяють

виконати оцінку впливу наночастинок на в'язкість, густину і теплоємність холодоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода і формувати базу довідкових даних для розвитку методів розрахунку властивостей нанофлюїдів; отримані дані про вплив наночастинок на КТВ в трубі дозволяють виділити ключові фактори, що впливають на доцільність впровадження нанотехнологій в холодильну промисловість. Результати дисертаційної роботи, підвищення інтенсивності процесів теплообміну в апаратах холодильного обладнання шляхом використання нанотеплоносіїв використовуються при проектуванні обладнання на ПрАТ «УКпостач» («UBC Group»), м. Харків).

Особистий внесок здобувача. Результати наведені в дисертації мають важливе значення для холодильної техніки, перспектив наукового та практичного використання результатів. Особисто здобувачем створена і апробована експериментальна установка для дослідження КТВ при вимушеній конвекції при течії теплоносія в трубі, виконано весь обсяг експериментальних досліджень теплофізичних властивостей багатокомпонентних холодоносіїв, нанофлюїдів і локальних КТВ при використанні холодоносіїв з домішками наночастинок, і проведена обробка експериментальних даних. На підставі отриманих експериментальних даних автором запропонований розвиток методів прогнозування густини і в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв.

Апробація результатів дисертації. Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на 12 конференціях, в тому числі 7-ми міжнародних науково-технічних конференціях: XIV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ, г. Казань, октябрь 2014 г.; X международной научно-технической конференции «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», г. Одеса, 2015 и 2017 г.; XVI Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми енергетики і екології», г. Одеса, октябрь 2016 г.; V Міжнародна науково-технічна конференція «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Росія, Санкт-Петербург, листопад 2015 р.; 7th International Conference «Physics of liquid matter: Modern problems», Київ, травень 2016 р; International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development» Chisinau, Republic of Moldova 2016; научно-технической конференции с международным участием «энерго- и экологически эффективные рабочие вещества в теплотехнологиях генерации холода и теплоты», Санкт-Петербург, 2016 года и 2017; 12 Міжнародній науково-технічній конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці», Миколаїв, 2016; 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants, 2017, Seoul, Republic of Korea; 6th Rostocker International Conference: “Thermophysical Properties for Technical Thermodynamics”, 2017, Rostock, Germany.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 8 статтях, опублікованих у фахових періодичних журналах, з яких одна входить в міжнародні наукометричні бази даних, а 4 опубліковані в збірниках наукових праць міжнародних конференцій, і 11 роботах, опублікованих у формі тез в збірниках тез доповідей конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку використаної літератури. Обсяг роботи 135 сторінок тексту, включаючи 43 рисунки, 14 таблиць і 102 найменування джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено її зв'язок з існуючими державними програмами і держбюджетною науковою тематикою ОНАХТ, сформульовані цілі та визначені завдання дослідження. Наведена наукова новизна і практична цінність виконаних досліджень, зазначений особистий внесок здобувача, подано відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи і публікацій.

У **першому розділі** наведено короткий огляд робіт, присвячених оцінці впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній конвекції при течії нанотеплоносіїв в трубі. У першій частині огляду розглянуті публікації, в яких вивчалися фактори, що впливають на ефективність процесів теплообміну при використанні нанотеплоносіїв. У другій частині огляду розглянуті публікації, присвячені дослідженню та аналізу впливів домішок наночастинок на теплофізичні властивості різних рідин, перспективних для застосування в якості компонентів багатокомпонентних холодоносіїв. Виконаний аналіз перспектив застосування технічних нанофлюїдів показує доцільність використання наночастинок в якості домішок до тепло- і холодоносіїв для збільшення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній конвекції в теплообмінних апаратах. З наведеного аналізу випливає, що в літературі недостатньо публікацій, присвячених вивченню КТВ при вимушеній конвекції нанотеплоносіїв на основі розчинів пропіленгліколю.

З аналізу опублікованих робіт випливає, що:

- серед опублікованих робіт практично відсутні статті, присвячені вивченню теплообміну у трикомпонентних тепло- і холодоносіїв з додаванням наночастинок, так і без них;
- автори статей приділяють недостатньо уваги питанням агрегативної стійкості технічно важливих нанофлюїдів, що є одним із стримуючих чинників при впровадженні нанотехнологій в практику;
- незважаючи на численність робіт, присвячених дослідженню стійкості нанофлюїдів, до цього часу не сформовані загальні технології приготування агрегативно стійких нанофлюїдів;
- опубліковані роботи досить суперечливі в оцінці впливу наночастинок Al_2O_3 на в'язкість базових рідин.

Аналізуючи роботи, де розглядається вплив наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі, слід зауважити, що:

- присутність наночастинок Al_2O_3 у базовій рідині, як правило, сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі в порівнянні з базовою рідиною;

• отриманий ефект впливу наночастинок на інтенсивність теплообміну різний у різних авторів.

На підставі виконаного аналізу сформульовано висновок про доцільність дослідження теплофізичних властивостей холодоносіїв на основі водних розчинів пропіленгліколю з додаванням наночастинок Al_2O_3 , а також вивчення впливу наночастинок Al_2O_3 на інтенсивність теплообміну при вимушеній конвекції багатокомпонентних нанохолодоносіїв у трубі.

У **другому розділі** наведені об'єкти дослідження, методика дослідження агрегативної стійкості нанофлюїдів, викладена процедура приготування зразків нанофлюїдів і контролю їх стабільності в базовій рідині, опис експериментальних установок, що застосовувалися автором для вивчення: густини, в'язкості, теплоємності і коефіцієнтів тепловіддачі.

Як об'єкти дослідження теплофізичних властивостей, розглянуті:

- холодоносій складу пропіленгліколь/вода (54,00/46,00 мас.%) - **ХН (ПГ/В)**;
- холодоносій складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість (48,60/46,52/4,88% мас.) - **ХН (ПГ/В/РРВ)**;
- нанохолодоносій складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість/наночастинки Al_2O_3 (48,24/46,38/4,85/0,53 мас. %) - **наноХН 0,53%** ;
- нанохолодоносій складу пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість /наночастинки Al_2O_3 (48,00/46,15/4,82/1,03 мас. %) - **наноХН 1,03%** .

При приготуванні нанофлюїда використовувалися наночастинки Al_2O_3 α -модифікації виробництва Wenzhou Jingcheng Chemical Co з розміром наночастинок у порошку 10 ± 5 нм, чистотою 99,98%, питомою поверхнею (методом БЕТ) $8,7 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для приготування нанохолодоносіїв використовувався двоступеневий метод, відповідно до якого наночастинки у вигляді порошку змішувалися з базовою рідиною і піддавалися диспергуванню (протягом 12 годин). Процес диспергування здійснювався у бісерному млині, заповненому кульками з ZrO_2 діаметром 2 мм. Додатково нанофлюїд піддавався ультразвуковій обробці протягом 3-4 годин. Отриманий нанофлюїд з великою концентрацією наночастинок розбавлявся базовою рідиною до необхідного складу. Нанохолодоносії були приготовлені без використання поверхнево-активних речовин, так як їх добавки можуть вплинути на теплофізичні властивості об'єкта дослідження.

Для нанохолодоносіїв були проведені дослідження їх агрегативної стійкості на основанні вимірювання розміру наночастинок методом спектротурбідиметрії. Для цього проводилися вимірювання оптичної густини зразків нанохолодоносія з концентрацією наночастинок Al_2O_3 0,53 мас.% від довжини хвилі світла, (в інтервалі $\lambda=700\text{-}990\text{ нм}$). При аналізі ефектів впливу концентрації наночастинок Al_2O_3 на КТВ при вимушеній конвекції в трубі необхідно мати інформацію про теплофізичні властивості об'єктів дослідження.

Для дослідження в'язкості холодоносіїв та нанохолодоносіїв був застосований капілярний метод. Експериментальні дослідження виконано з використанням капілярних віскозиметрів із «висячим» рівнем типу ВПЖ-4. Визначення густини нанохолодоносіїв виконано пікнометричним методом. Проведені дослідження показали, що коливання температури в термостаті не перевищували $\pm 0,05 \text{ К}$.

Температура експерименту вимірювалася термометром опору Pt-100 (*Wika*, TR40). Розширена невизначеність вимірювання температури не перевищувала 0,2 К. Всі вимірювання проводилися багато разів з метою зменшення впливу випадкової похибки вимірювань. Дослідження густини і в'язкості багатокомпонентних нанохолодоносіїв виконані в інтервалі температур 248-303 К

Дослідження теплоємності холодоносіїв і нанохолодоносіїв у дисертаційній роботі було виконано методом монотонного нагріву в адіабатному калориметрі.

При реалізації методу монотонного нагріву швидкості нагрівання досліджуваних зразків в калориметрі не перевищували $dT/dt < 10^{-3}$ град/сек. Теплоємність досліджуваних зразків розраховувалася за співвідношенням:

$$c_s = \frac{P_{sh} - P_{hl}}{m \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t}} - \frac{A(T)}{m}, \quad (1)$$

де P_{sh} - середня потужність що підводиться до калориметра, Вт; P_{hl} - потужність теплових втрат при середній температурі експерименту T_{av} , Вт; ΔT - зміна температури калориметра за час Δt ; m - маса досліджуваного зразка, кг; $A(T)$ - теплове значення калориметра при середній температурі експерименту T_{av} , Дж/К.

Принципова схема експериментальної установки для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі і втрат напору при вимушеній течії нанофлюїдів у трубі представлена на рис.4.

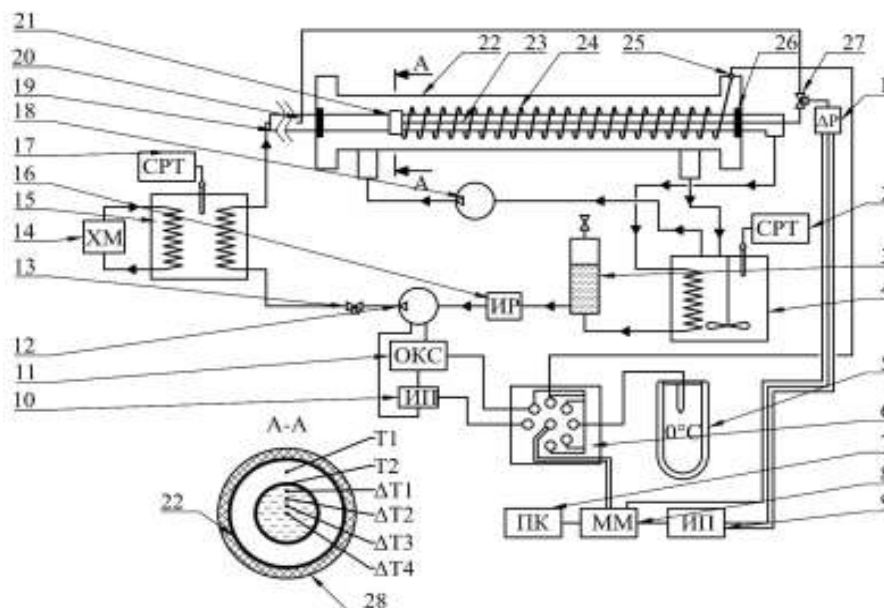


Рис. 4 - Принципова схема експериментальної установки для дослідження коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії теплоносіїв: 1 перетворювач тиску *Vika*; 2, 18 - системи регулювання температури термостатів; 3 - накопичувальний резервуар; 4, 15 - термостати; 5- посуд Дьюара для холодного спая абсолютних термпар; 6 - багатопозиційний перемикач; 7 - комп'ютер; 8 - мультиметр *Picotest M3510A*; 9 - джерело живлення для перетворювача тиску *Vika*; 10 - джерело живлення для циркуляційного насоса; 11 - зразкова котушка опору *P321*; 12 - циркуляційний насос вихрового типу для теплоносія - (насоси *15WBX-12*); 13 - регулюючий вентиль; 14 - холодильна машина; 16 - шестерний витратомір *Oval Gear EM008*; 18 - циркуляційний насос для рідини, що термостатується; 19 -

робоча ділянка установки (рухома мідна труба); 21 - блок вимірювання температури рідини, що термостатується, T1, термопари поверхні внутрішньої труби (стінки) T2, термопари стінки і холодоносія на різній відстані від осі труби $\Delta T1$, $\Delta T2$, $\Delta T3$, $\Delta T4$); 20 і 23 - трубки Піто; 22 - зовнішня труба теплообмінного апарату; 24 – вивід термопар на електричний з'єднувач; 25- електричний з'єднувач; 26 - сальники; 27 - перемикач вимірювання повного напору холодоносія; 28- ізоляція.

Схема руху теплоносіїв у розглянутій експериментальній установці була прийнята прямоточною. Внутрішня труба має діаметр $0,01 \times 0,001$ м, а ділянка труби становить 0,9м. Зовнішній контур теплообмінника підключений до системи термостатування, тому температура води на вході у зовнішній контур у процесі експерименту підтримувалася практично постійною при заданих режимах. В експерименті витрата води в зовнішньому контурі зберігалась незмінною 0,060 кг/с. Витрата холодоносія у внутрішньому контурі варіювалася за допомогою регулюючого вентиля в діапазоні від $20,8 \cdot 10^{-6}$ до $92,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с}$. Максимальна розбіжність у тепловому балансі по воді та холодоносію не перевищувала 5%.

Вимірювання температур, необхідних для оцінки локальних коефіцієнтів тепловіддачі, проводилися на відстані $X=0,10; 0,25; 0,40; 0,55; 0,70$ і $0,85$ м від входу холодоносія в робочу ділянку. Вимірювання температур холодоносія в перерізі труби проводилося за допомогою чотирьох диференціальних термопар, розташованих в одному перерізі на різній відстані від осі труби. Додатково визначалася температура стінки мідної труби в перерізі. Витрата холодоносія визначалася за допомогою витратоміра Oval Gear EM008. Вимірювальна ділянка експериментальної установки для дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі характеризувалася гідродинамічно стабілізованим режимом течії рідини. Для цієї мети входу холодоносія у вимірювальну ділянку передувала практично ізотермічна ділянка труби довжиною близько 1 м.

Втрати тиску при вимушеній течії холодоносіїв у трубі визначалися на вимірювальній ізотермічній ділянці експериментальної установки, розташованій перед входом у робочу ділянку для визначення КТВ.

Виконаний аналіз розширеної невизначеності вимірюваних в експерименті величин показує, що абсолютна невизначеність вимірювання температури становить 0,15 К, діаметра - 0,05 мм, відстані від входу у вимірювальну ділянку до заданого перерізу труби - 5 мм, витрати теплоносія - 1,0%. Виконаний аналіз показує, що з урахуванням приладових і випадкових похибок зазначених величин, розширена невизначеність величини коефіцієнта тепловіддачі не перевищує 15%.

У третьому розділі наведені результати експериментального дослідження густини, в'язкості трикомпонентного розчину вода/(PPV)/пропіленгліколь різного складу.

Проблема вибору оптимального складу багатокомпонентного холодоносія є досить складним завданням. Вирішення цього завдання багато в чому залежить від досконалості методів прогнозування теплофізичних властивостей багатокомпонентних розчинів. Тому на першому етапі розробки нових нанохолодоносіїв доцільно проведення обмеженого обсягу експериментальних досліджень теплофізичних властивостей (перш за все, густини і в'язкості) холодоносіїв, що складаються з пропіленгліколю, води і (PPV).

У дисертаційній роботі при вивченні в'язкості і густини нових холодоносіїв як компоненти використовувалися: пропіленгліколь (1,2-пропандіол) з масовою часткою 99,79%, речовина, що знижує в'язкість теплоносія та бідистильована вода

Стратегію вибору складу холодоносіїв при дослідженні густини та в'язкості низькотемпературних теплоносіїв на основі розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь демонструє рис.5-6. Концентрація компонентів розчинів для дослідження в'язкості холодоносіїв обиралася з урахуванням вимог практичної доцільності їх застосування в холодильному обладнанні.

В роботі були отримані експериментальні данні з густини та в'язкості розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь в інтервалі температур 248-303 К.

У даній роботі для прогнозування густини багатокомпонентних водних розчинів одно- і багатоатомних спиртів рекомендується використовувати формулу:

$$\Delta\rho = \rho_0 \cdot t^{\beta \cdot f(t)}, \quad (1)$$

де ρ_0 – коефіцієнт, який має значення критичної амплітуди для різниці ортобаричної густини, кг/м^3 ; β – критичний індекс для різниці ортобаричної густини $f(t)$ – універсальна кросоверна функція.

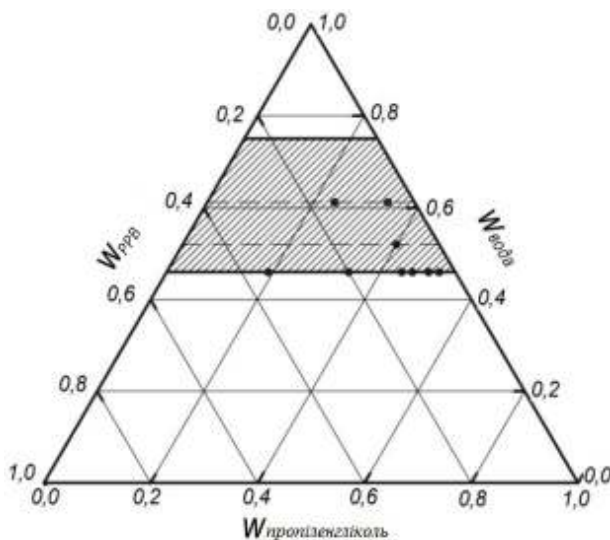


Рис. 5 - Діаграма складів розчину вода/РРВ/пропіленгліколь (заштрихована область відповідає складу розчинів, перспективних для використання в якості холодоносіїв): ● – концентрації, при яких була виміряна густина.

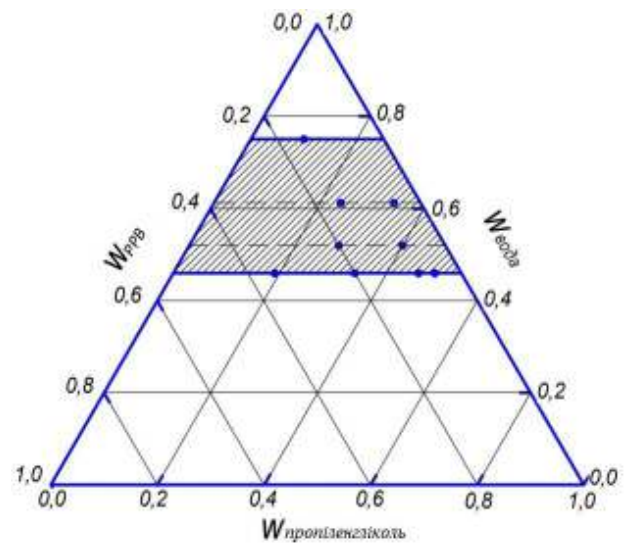


Рис. 6 - Діаграма складів розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь (заштрихована область відповідає складу розчинів, перспективних для застосування в якості холодоносіїв): ● – концентрації, при яких була виміряна в'язкість.

Виконані розрахунки густини трикомпонентних водних розчинів одно- і багатоатомних спиртів показали задовільні результати для вирішення завдання вибору оптимального складу багатокомпонентного холодоносія і якості прогнозування густини (відхилення розрахункових даних від експерименту до 1,4%).

Виконаний аналіз методів прогнозування в'язкості розчинів показує, що в умовах обмеженої експериментальної інформації про в'язкість багатокомпонентних холодоносіїв доцільно використовувати формулу:

$$\frac{1}{\eta_{mix}} = a_{\eta} (V_{mix} - Or_{mix})^{b_{\eta}}, \quad (2)$$

де a_{η} і b_{η} – емпіричні коефіцієнти; V_{mix} – мольний об'єм рідини при температурі визначення в'язкості, м³/моль; Or_{mix} – ортохор, м³/моль.

Для багатокомпонентних холодоносіїв значення ортохора може бути розраховане за адитивністю:

$$Or_{mix} = \sum_i x_i \cdot Or_i, \quad (3)$$

де x – мольна частка i -го компонента розчину, $K_{mоль}/K_{mоль}$; Or_i – ортохор i -го компонента розчину, кг/ $K_{mоль}$. Проведене дослідження показує, що для розширення діапазону кореляції (2) доцільне застосування ψ -фактора (фактора складності міжмолекулярної взаємодії), значення якого може бути визначено з використанням інформації про температуру кипіння і мольний об'єм при нормальних умовах. В даній роботі була запропонована наступна кореляція для прогнозування в'язкості компонентів холодоносіїв і самих холодоносіїв при низьких температурах:

$$\frac{1}{\eta_{mix}} = a_{\eta} (V_{mix} - Or_{mix})^{b_{\eta}} \cdot (1 + \psi \cdot t^8). \quad (4)$$

При адаптації кореляції (4) до задачі прогнозування в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв пропонується розраховувати значення ψ -фактора для розчинів за адитивністю:

$$\psi_{mix} = \sum_i x_i \cdot \psi_i, \quad (5)$$

де x – мольна концентрація компонента в холодоносії.

Проведена в роботі перевірка запропонованої моделі прогнозування в'язкості багатокомпонентних холодоносіїв для розчинів вода/РРВ/пропіленгліколь показала, що відхилення в середньому не перевищують 6%.

На основі виконаних досліджень було прийняте рішення в якості базової рідини використовувати розчин складу: пропіленгліколь/вода/РРВ (49/46/5 мас.%).

Експерименти були виконані на спектрофотометрі Shimadzu UV-120-02 в герметичних оптичних комірках з довжиною оптичного шляху 4,05 мм. Оптичну густину двох зразків наноХН вимірювали протягом 30 діб (щодня без попереднього перемішування для першого зразка та з перемішуванням для другого). При цьому для першого зразка визначалася динаміка зміни середнього розміру наночастинок у рідині в результаті їх часткової седиментації при зберіганні зразка в статичних умовах.

Зміна з часом середнього розміру наночастинок Al_2O_3 у нанохолодоносії показана на рис.7. За умови статичного зберігання зразка середній розмір наночастинок зменшувався від 240 до 145 нм протягом 12 діб і в подальшому розмір наночастинок у зразку залишався майже незмінним.

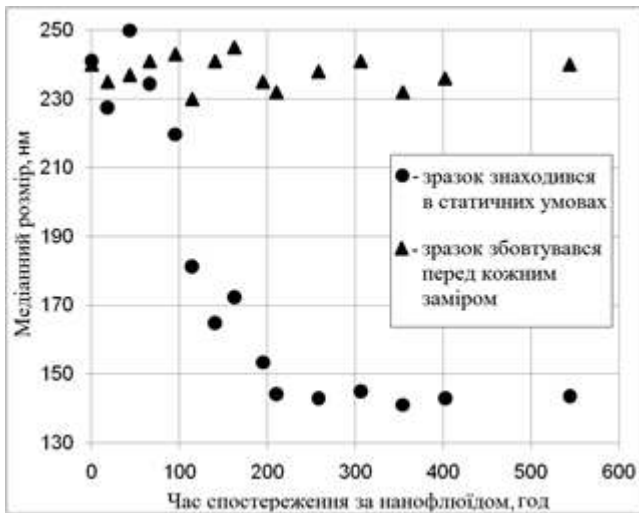


Рис. 7 - Зміна середнього розміру наночастинок у нанофлюїді (метод спектротурбідиметрії) з часом, починаючи з моменту приготування нанохолодоносія з вмістом наночастинок Al_2O_3 0,53 мас.%

Густина нанохолодоносіїв з масовою концентрацією наночастинок Al_2O_3 0,53 мас.% і 1,03 мас.% була розрахована за правилом адитивності. Результати наведено на рис. 8.

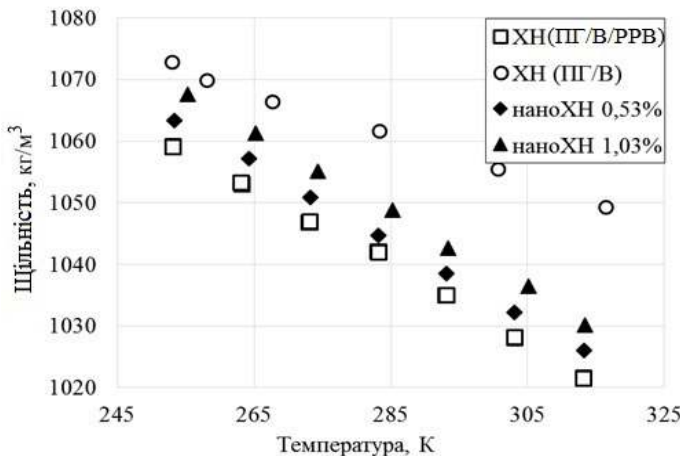


Рис. 8 – Температурна залежність густини холодоносіїв і нанохолодоносіїв в інтервалі температур 253-313 К

З огляду літератури був зроблений висновок, що основна проблема застосування наночастинок в якості добавок до тепло- і холодоносія – це значне підвищення відносної (щодо базової рідини) в'язкості. При проведенні експериментального дослідження отримана нова інформація по в'язкості трикомпонентних об'єктів

Для зразка, що піддавався механічному перемішуванню, розмір наночастинок зберігався приблизно постійним – 240 нм. Одержані дані про розмір наночастинок вказують на відсутність їх агрегації в досліджуваному зразку. Цей результат є важливим, оскільки показує, що отримані зразки нанофлюїдів можна використовувати в пристроях з вимушеною циркуляцією холодоносія. В роботі отримані експериментальні дані по густині ХН (ПГ/В), (ПГ/В/РВ). Отримані експериментальні дані були апроксимовані рівнянням (7) (див. таблицю 1).

Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність вимірювання густини не перевищувала 0,2%.

дослідження в інтервалі температур 248-303 К. Отримані експериментальні дані про в'язкість холодоносіїв були апроксимовані рівнянням Вальтера (8) (див. таблицю 1). Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність вимірюваних значень в'язкості не перевищує 0,4%. Отримані експериментальні дані наведено на рис. 9.

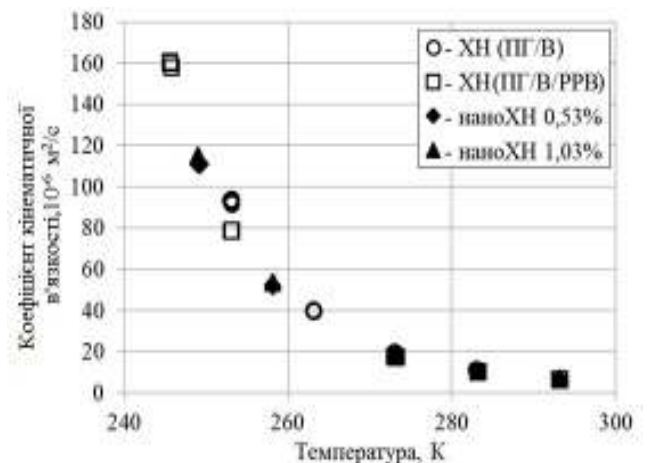


Рис. 9 Температурна залежність в'язкості холодоносіїв і нанохолодоносіїв

Ефекти впливу наночастинок Al_2O_3 на в'язкість базових холодоносіїв демонструють рис.10 і 11.

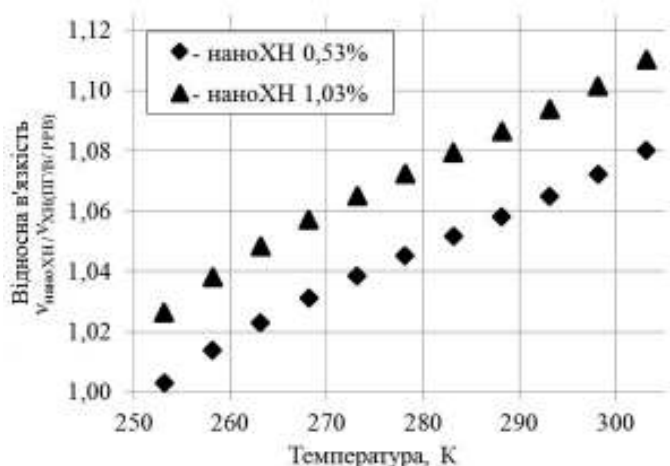


Рис.10 - Температурна залежність відношення в'язкості нанохолодоносіїв до в'язкості холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ)

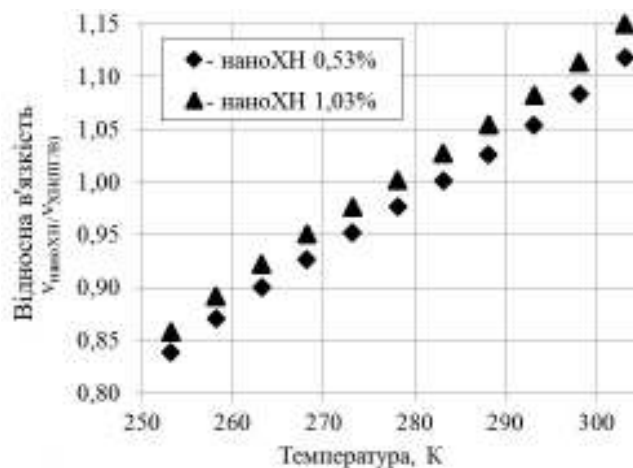


Рис.11 - Температурна залежність відношення в'язкості нанохолодоносіїв до в'язкості холодоносія ХН(ПГ/В)

З наведеної на рис.10 і 11 інформації можна зробити висновок про те, що добавки наночастинок Al_2O_3 у холодоносії на основі водних розчинів пропіленгліколю та РРВ призводять до незначного підвищення в'язкості при низьких температурах. Більш значне підвищення в'язкості спостерігається при високих температурах. Цей висновок є важливим, оскільки визначає перспективи застосування розглянутих нанохолодоносіїв у холодильній техніці. Добавки наночастинок сприятимуть збільшенню теплопровідності і підвищенню інтенсивності тепловіддачі лише при незначному зростанні в'язкості. Ще більше перспектив спостерігається у холодоносіїв при введенні в їх склад речовини, що регулює в'язкість. З рис.11 видно, що в'язкість холодоносія на основі водного розчину пропіленгліколю вище, ніж нанохолодоносія з РРВ. Правильний підбір концентрації РРВ, може повністю нівелювати підвищення в'язкості холодоносіїв від добавок наночастинок.

Експериментальне дослідження теплоємності ХН (ПГ/В), ХН (ПГ/В/РРВ) та наноХН 0,53% проводилися в інтервалі температур від 243 до 328 К. Отримані експериментальні дані по теплоємності були апроксимовані рівнянням (9) (див. таблицю 1). Для наноХН 1,03% теплоємність оцінювалася по формулі:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi(\rho C_p)_n + (1 - \phi)(\rho C_p)_{bf}}{\phi \rho_n + (1 - \phi)\rho_{bf}}, \quad (6)$$

де ρ_{bf} – густина базової рідини, ρ_n – густина наночастинок.

Результати експериментального та розрахункового досліджень теплоємності наведені на рисунках 12 і 13.

Всі емпіричні коефіцієнти в рівняннях по дослідженню теплофізичних властивостей базових холодоносіїв та нанохолодоносіїв представлені в таблиці 1.

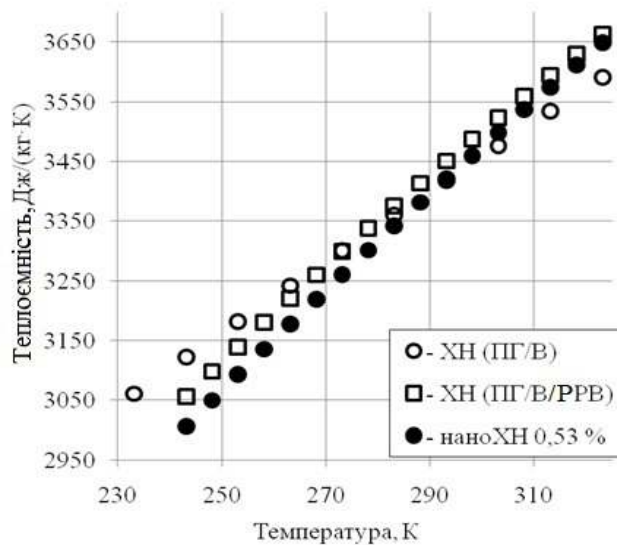


Рис. 12 – Температурні залежності теплоємності холодоносіїв ХН (ПГ/В), ХН (ПГ/В/РРВ) і наноХН 0.53 мас.% наночастинок

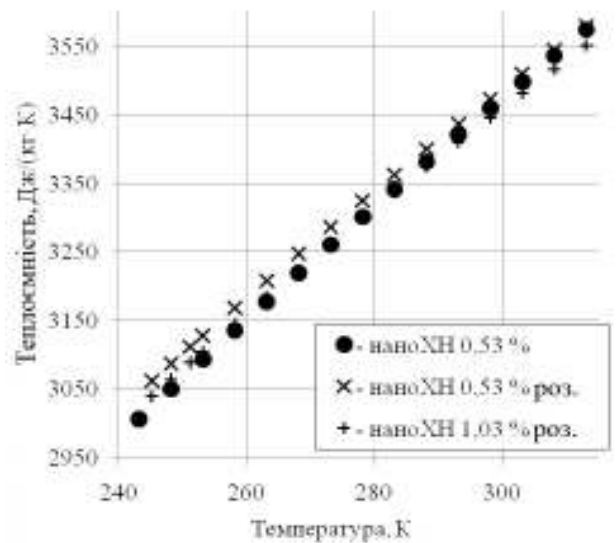


Рис.13 – Температурні залежності теплоємності холодоносіїв наноХН 0.53 мас.% і наноХН 1,03 мас

Таблиця 1. Емпіричні коефіцієнти в рівняннях

Густина	$\rho = A \cdot T + B, (7)$			
Коефіцієнти	Об'єкти дослідження			
	ХН (ПГ/В)	ХН (ПГ/В/РРВ)	наноХН0,53%	наноХН1,03%
A	-0,3431	-0,6245	—	—
B	1158,3	1217,6	—	—
В'язкість	$\lg(\lg(v + A)) = B - C \cdot \lg(T), (8)$			
B	12,61	12,72	11,91	11,99
C	5,12	5,17	4,83	4,87
Теплоємність	$C_p = (A + B / T)^{-1}, (9)$			
A	0,0000959	0,000108	0,0000960	—
B	0,057	0,053	0,057	—

Теплопровідність одного об'єкта дослідження – ХН(П/В) була виміряна нестационарним методом нагрітої нитки. Для інших об'єктів дослідження теплопровідність холодоносіїв розраховувалася за формулою:

$$\lambda_{cm}^r = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \lambda_i^r, \quad (10)$$

де w_i – масова частка і-го компонента в суміші, λ_i^r – теплопровідність компонента суміші; r – показник степеня, для розрахунків прийнятий $r = 2$.

Виконаний аналіз вказує на задовільне узгодження отриманих результатів розрахунку теплопровідності ХН(ПГ/В) з експериментальними даними.

Теплопровідність нанохолодоносіїв розраховувалася за класичною кореляцією Чои (Choi¹):

$$\lambda_{nf} = \left[\frac{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_{bf} + 2(\lambda_{np} - \lambda_{bf})(1 + \beta)^3 \varphi}{\lambda_{np} + 2 \cdot \lambda_{bf} - (\lambda_{np} - \lambda_{bf})(1 + \beta)^3 \varphi} \right] \lambda_{bf}, \quad (11)$$

де λ_{np} - теплопровідність наночастинок, Вт/(м·К); λ_{bf} - теплопровідність базової рідини Вт/(м·К); β - відношення товщини шару адсорбованої на поверхні наночастинок базової рідини до істинного радіусу наночастинок ($\beta = 0.1$)

Температурні залежності теплопровідності холодоносіїв об'єктів дослідження показані на рис.14.

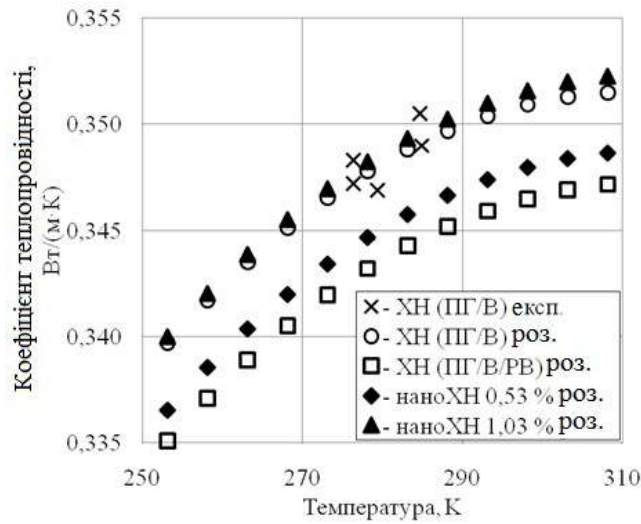


Рис.14 - Температурні залежності теплопровідності холодоносіїв ХН (ПГ/В), ХН (ПГ/В/РВ), наноХН 0,53% і наноХН 1,03%

З наведеного рисунка випливає, що добавки речовин, які регулюють в'язкість, призводять до зниження теплопровідності базового теплоносія. Цей ефект компенсується добавками наночастинок Al_2O_3 .

У четвертому розділі дисертації наведено результати експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі і втрат напору при вимушеній ламінарній течії нанохолодоносіїв у трубі.

Для експериментального визначення значень місцевого (локального) коефіцієнта тепловіддачі в перерізі труби, у якій відбувається вимушена течія теплоносія, використовувалося рівняння:

$$\alpha_{\text{exp}(X)} = q_{(X)} / (T_{w(X)} - T_{fl(X)}), \quad (12)$$

де $q_{(X)}$ - густина теплового потоку в певному перерізі X вимірювальної ділянки труби, Вт/м²; $T_{w(X)}$ - температура внутрішньої поверхні труби в певному перерізі труби, К; $T_{fl(X)}$ - середня температура холодоносія в певному перерізі труби, К.

Середня температура холодоносія в перерізі труби оцінювалася як:

$$T_{fl} = \frac{1}{\bar{v}} \int_0^{f_0} v_{(r)} T_{(r)} df, \quad (13)$$

де $\bar{v}$ – середня швидкість потоку м/с; $T_{(r)}$ – виміряне в експерименті значення температури холодоносія на відстані r від осі труби, К; $v_{(r)}$ – швидкість рідини на відстані r від осі труби при ламінарному режимі, яка визначалася за рівнянням (14), м/с:

$$v_{(r)} = 2\bar{v}\left(1 - (r/r_0)^2\right), \quad (14)$$

де r_0 – радіус труби, м.

Середня густина теплового потоку на ділянці труби довжиною $L = X_i - X_{i+1}$, (де X_i і X_{i+1} – відстані від входу холодоносія в робочу ділянку труби до перерізу i і $i + 1$, відповідно, м) розраховувалася по рівнянню:

$$q_{(X_i - X_{i+1})} = \frac{G_{fl} \cdot C_{pfl} (T_{fli} - T_{fli+1})}{\pi \cdot 2 \cdot r_0 \cdot (X_i - X_{i+1})}, \quad (15)$$

де G_{fl} – масова витрата холодоносія в трубі, кг/с; C_{pfl} – теплоємність холодоносія при середній температурі на ділянці $X_i - X_{i+1}$, Дж/(кг К); T_{fli} і T_{fli+1} – середня по перерізу труби температури холодоносія в перерізі X_i і X_{i+1} , відповідно. За отриманою залежністю була визначена величина $q_{(X)}$ для кожного розглянутого перерізу труби.

На підставі розрахованих значень густини теплового потоку по ділянках знаходилась залежність $q_{(X)} = f(X)$.

Середнє по довжині труби значення коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії теплоносія розраховувалося за формулами:

$$q_{(X_1 - X_6)} = \frac{G_{fl} \cdot C_{pfl} (T_{fl1} - T_{fl6})}{\pi \cdot 2 \cdot r_0 \cdot (X_1 - X_6)}, \quad (16)$$

$$\alpha_{\text{exp}} = q_{(X_1 - X_6)} / (T_w - T_{fl}), \quad (17)$$

де T_w – середня температура внутрішньої поверхні вимірювальної ділянки труби, К; T_{fl} – середня по довжині вимірювальної ділянки температура холодоносія, К.

Отримана в результаті проведених досліджень залежність середніх значень числа Нуссельта для різних холодоносіїв від числа Пекле для початкової термічної ділянки круглої труби, представлена на рис.16.

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (18)$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності теплоносія (для якого визначається коефіцієнт тепловіддачі, α), Вт/(м·град); l – определяющий геометрический размер, м

$$Pe = \frac{v \cdot l}{\alpha}, \quad (19)$$

де v – швидкість потоку рідини відносно поверхні теплообміну, l – характерний лінійний розмір поверхні теплообміну, α – коефіцієнт температуропровідності;

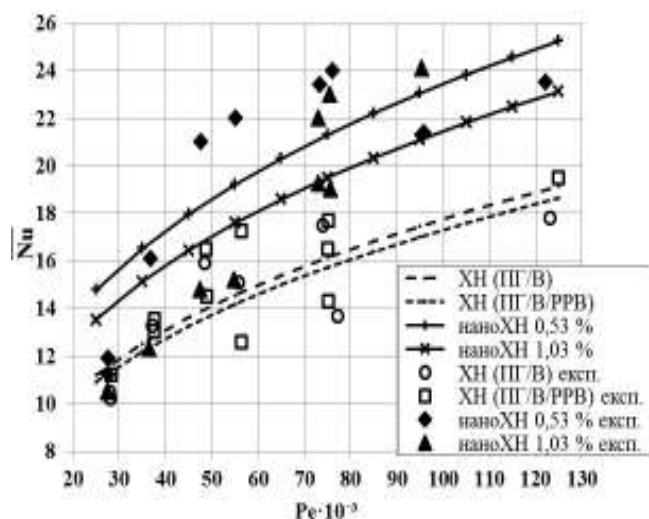


Рис.16 - Залежність середніх значень числа Нуссельта від числа Пекле при вимушеній течії холодоносіїв у трубі при $d = 0,01$ і $l = 0,85$ м (початкова термічна ділянка) для холодоносія ПГ/В, базового холодоносія ПГ/В/РРВ і нанофлюїдів наноХН 0,53% і наноХН 1,03%.

залежністю (20) тепловіддачі для базового холодоносія (ПГ/В/РРВ). Рівняння (20) застосовується для розрахунку локального коефіцієнта тепловіддачі для початкової термічної ділянки при $T_{cm} = \text{const}$

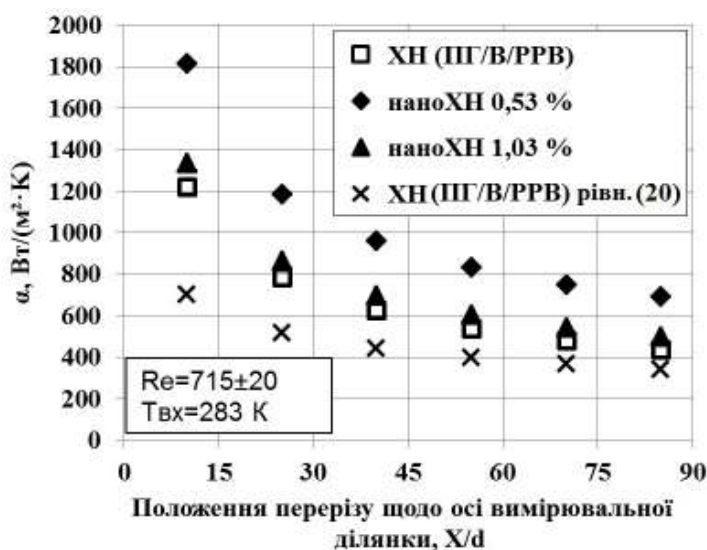


Рис.17 - Залежність локального коефіцієнта тепловіддачі по довжині початкової ділянки при вимушеній течії холодоносіїв у трубі ($d=0,01$ і $l=0,85$ м)

У цьому ж розділі наведені результати дослідження втрат тиску при ламінарній течії холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ) і нанохолодоносія наноХН 1,03%. Для визначення коефіцієнта опору від тертя при течії холодоносія у трубах використовувалася залежність:

Результати експериментального дослідження показують збільшення середнього по довжині числа Нуссельта для обох досліджених нанофлюїдів у порівнянні з базовою рідиною. Разом з тим, вплив домішок наночастинок на інтенсивність теплообміну не пропорційний концентрації наночастинок. Інтенсивність тепловіддачі для нанохолодоносія з вмістом наночастинок 0,53 мас.% більше, ніж для нанохолодоносія з 1,03 мас.% наночастинок. Залежність локальних значень коефіцієнтів тепловіддачі досліджуваних холодоносіїв у різних перерізах початкової термічної ділянки для числа $Re=715$ наведено на рис.17. На цьому рисунку, крім експериментальних даних, так само наведені розраховані за

$$\overline{Nu} = 1,03 \left(\frac{Re_d \cdot Pr}{X/d} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_{cm}} \right)^{0,14}, \quad (20)$$

З рис.16-17 видно, що коефіцієнт тепловіддачі для нанохолодоносіїв вище, ніж для базового холодоносія, що не може бути пояснено лише зміною його теплофізичних властивостей. Показано, що теоретичні значення коефіцієнтів тепловіддачі для базового холодоносія не в повній мірі узгоджуються з експериментальними, отже є необхідність у розробці моделей для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів.

$$f_{\text{exp}} = \frac{4 \cdot \Delta P \cdot r_0}{\bar{v}^2 \cdot \rho \cdot l}, \quad (21)$$

де ΔP – експериментальне значення втрат тиску на вимірювальній ділянці труби, Па; ρ – густина рідини при середній температурі, кг/м³; l – довжина вимірювальної ділянки труби, м.

В роботі показано, що при ламінарному режимі течії холодоносіїв в трубі добавки наночастинок Al_2O_3 призводять до збільшення значення ΔP у порівнянні з втратами напору при течії базової рідини (див. рис. 18).

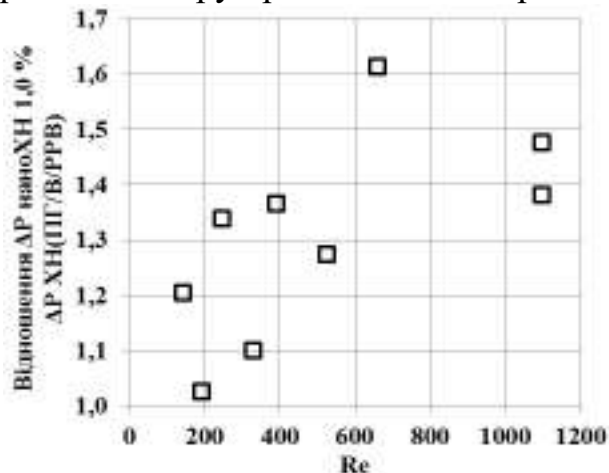


Рис. 18 - Залежність відношення втрат тиску для наноХН 1,0% до втрат тиску для базового холодоносія ХН (ПГ/В/РРВ) від числа Рейнольдса.

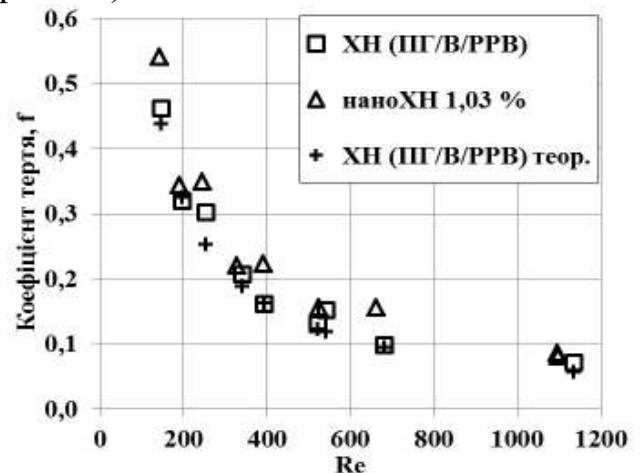


Рис. 19 – Залежність коефіцієнта тертя по довжині від числа Рейнольдса для базового холодоносія ПГ/В/РРВ) і нанофлюїда наноХН 1,03%.

Використання експериментальних даних про втрати тиску за формулою (21) були розраховані значення коефіцієнта тертя – f . Залежності величини f від числа Рейнольдса для ХН (ПГ/В/РРВ) і наноХН 1,03% наведені на рис.19.

З рис.18 і 19 випливає, що для нанохолодоносія величина коефіцієнта тертя дещо більше, ніж для базового холодоносія. Відповідно до отриманих результатів можна також сформулювати висновок про те, що збільшення в'язкості не є єдиним поясненням зростання втрат тиску при ламінарній течії нанохолодоносія в трубі. Отримані результати дослідження коефіцієнта тепловіддачі і тертя при ламінарній течії нанохолодоносія в трубі вказують на досить складний характер взаємодії наночастинок з потоком теплоносія. Отримані в роботі дані про теплофізичні властивості нанохолодоносіїв, коефіцієнти тепловіддачі при ламінарному режимі течії холодоносіїв у трубі необхідні для подальшого вдосконалення холодильної техніки з метою підвищення її енергоефективності. Дослідження можуть бути корисними також при розробці нових тепло- і холодоносіїв в інших галузях, таких як теплоенергетика, електроніка і т.д.

ВИСНОВКИ І РЕЗУЛЬТАТИ

Проблема впровадження нанотехнологій в холодильному обладнанні аж до теперішнього часу залишається недостатньо вивченою. Основна причина ситуації, що склалася, полягає в складності урахування позитивних і негативних факторів

впливу наночастинок на теплофізичні властивості холодоносіїв і коефіцієнти тепловіддачі при ламінарній течії холодоносіїв у трубі.

В дисертації отримані експериментальні дані про теплофізичні властивості (густини, в'язкості) трикомпонентних водних розчинів одно- і багатоатомних спиртів. Вперше вивчено вплив наночастинок Al_2O_3 на теплофізичні (густини, в'язкості і теплоємності) властивості системи вода/пропіленгліколь/PPB. Отримано експериментальні дані про значення локального і середнього коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів на основі водних розчинів пропіленгліколю, речовини, що регулює в'язкість і наночастинок Al_2O_3 в трубі в інтервалі чисел Рейнольдса, що відповідає ламінарному режиму течії.

1. Запропонована в дисертації методика приготування агрегативно стійкого нанофлюїда на основі водного розчину пропіленгліколя, речовини, що регулює в'язкість і наночастинок Al_2O_3 (0,53 мас.% і 1,03 мас.%) дозволила розробити нанохолодоносії без домішок поверхнево-активних речовин.

2. Нові моделі прогнозування густини і в'язкості на лінії насичення розчинів води, пропіленгліколя і PPB на відміну від існуючих моделей розрахунку не вимагають для свого використання значного обсягу експериментальної інформації, що забезпечує можливість розробки холодоносіїв оптимального складу.

3. Показано, що добавки наночастинок Al_2O_3 в багатокомпонентних холодоносіях сприяють незначному збільшенню в'язкості і зменшенню теплоємності. Однак негативний ефект збільшення в'язкості може бути успішно усунутий спеціальними речовинами, які знижують в'язкість, що визначає перспективу використання багатокомпонентних нанохолодоносіїв на практиці.

4. Створено оригінальну експериментальну установку для дослідження локальних та середніх коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній течії теплоносіїв і холодоносіїв в трубі. Установка відрізняється від аналогічних можливістю дослідження локальних по довжині початкової термічної ділянки коефіцієнтів тепловіддачі при сталому гідродинамічному режимі течії теплоносіїв. Відмінною особливістю установки є можливість дослідження профілю температур на різних відстанях від входу в початкову термічну ділянку труби. Дана інформація є необхідною для виявлення і уточнення механізмів впливу добавок наночастинок на інтенсифікацію тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїда.

5. Вперше отримані експериментальні дані про коефіцієнт тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів вода/пропіленгліколь/PPB з добавками 0,53 мас.% і 1,03 мас. % наночастинок Al_2O_3 в інтервалі чисел Рейнольдса 280-1372. Показано збільшення як локального, так і середнього по довжині коефіцієнта тепловіддачі в розглянутому інтервалі чисел Рейнольдса. Показано, що найбільший вплив наночастинок на інтенсивність тепловіддачі спостерігається при концентрації наночастинок в нанофлюїді 0,53 мас.%.

7. Виконаний аналіз основних механізмів збільшення тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїдів показує, що сучасні моделі розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі при вимушеній конвекції нанофлюїдів не є універсальними і адаптовані тільки до конкретних об'єктів дослідження. На підставі отриманих експериментальних даних запропоновано полуміричні рівняння для оцінки

середнього коефіцієнта тепловіддачі при вимушеній течії нанофлюїду вода/пропіленгліколь/РРВ/наночастинки Al_2O_3 .

8. Результати, наведені в дисертації показують, що інтенсифікація теплообміну при ламінарній течії холодоносія в трубі не може бути пояснена тільки впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентного теплоносія. Необхідно також враховувати локальну турбулізацію при ламінарній течії теплоносія, в якому присутні наночастинок.

9. Результати наведені в дисертації, які відмічаються науковою новизною, передані для практичного застосування в ПрАТ «УКпостач».

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ивченко Д. А., Рябикин С. С., Шимчук Н.А. Экспериментальное исследование теплофизических свойств нанотеплоносителей на основе растворов пропиленгликоль/вода. *Вестник Казанского технологического университета*. Казань. 2014. Т. 17. № 19 С.64-66. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка до публікації.*

2. Рябикин С.С. О.Я. Хлиева, В.З. Геллер, В.П. Железный. Установка для исследования локальных коэффициентов теплоотдачи при вынужденной конвекции нанохладоносителей в трубе. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (17–20 ноября 2015 г. Санкт-Петербург). Ч. I.; С. 273-276. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, підготовка до публікації.*

3. О.Я. Хлиева, Н.А. Шимчук, С.С. Рябикин, М.П. Полюганич, В.П. Железный. Новый класс низкотемпературных нанотеплоносителей с улучшенными теплофизическими свойствами. Материалы конференции VII международной научно-технической конференции «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке» (17–20 ноября 2015 г. Санкт-Петербург). Ч. I.; С. 490-493. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел за темою статті підготовка до публікації.*

4. О. Я. Хлиева, М. П. Полюганич, С. С. Рябикин, А. С. Никулина, В. П. Железный. Исследования плотности бинарных и тройных водных растворов этиленгликоля, пропиленгликоля и этанола. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. №52 (2). С. 78-86. *Особистий внесок: аналіз літературних джерел, виконання експериментальних досліджень.*

5. O. Ya. Khliyeva, A. S. Nikulina, M. P. Polyuganich, S. S. Ryabikin, V. P. Zhelezny Viscosity of ternary solutions composed of propylene glycol, ethanol and water. *Холодильна техніка та технологія*. 2016. №52 (3). С. 30-35. UDC 621.564.3 *Особистий внесок: аналіз літературних джерел за темою статті, виконання експериментальних досліджень.*

6. Khliyeva O, S.Ryabikin, V. Zhelezny, T. Gordeychuk. Experimental investigation of the convective heat transfer coefficient of coolants with Al_2O_3 nanoparticle additives. International conference «Energy of Moldova – 2016. Regional Aspects of Development» (Chisinau, Republic of Moldova 2016.) P. 391–399. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних.*

7. O. Khliyeva, S. Ryabikin, N. Lukianov, V. Zhelezny. Experimental study of heat exchange and hydrodynamics at the laminar flow of nanocoolant based on propylene glycol and Al_2O_3 nanoparticles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. №1/8(85).Р. 4-12. *Личный вклад: Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних.*

8. Zhelezny V., Chen G., Khliyeva O., Ryabikin S., Shestopalov K. Influence of Al_2O_3 nanoparticle additives on the thermophysical properties of aqueous solution of propylene glycol and on the heat transfer coefficient in forced convection flow in a tube. Proc. 5th IIR International Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants. (23 - 26 April 2017, Seoul, Republic of Korea). DOI: 10.18462. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, аналіз літературних джерел за тематикою статті.*

АНОТАЦІЯ

Рябікін С. С. Підвищення інтенсивності процесів теплообміну в апаратах холодильного обладнання шляхом використання нанотеплоносіїв (теплофізичний експеримент, моделювання). – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика. – Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2017 р.

Дисертація присвячена експериментальному і теоретичному вивченню впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентних холодоносіїв на основі розчинів пропіленгліколь/вода/речовина, що регулює в'язкість (PPV)/ наночастинки Al_2O_3 , інтенсивність процесів теплообміну при вимушеній конвекції при ламінарному режимі течії холодоносіїв у горизонтальній трубі.

В роботі наведені експериментальні дані про вплив домішок наночастинок Al_2O_3 на густину, теплоємність, динамічну в'язкість багатокомпонентних холодоносіїв. Для опису і прогнозування теплофізичних властивостей багатокомпонентних холодоносіїв вперше запропоновані нові методики, що вимагають для свого застосування мінімальний обсяг експериментальної інформації. Показано, що добавки наночастинок Al_2O_3 у багатокомпонентних холодоносіях сприяють незначному збільшенню в'язкості та незначному зменшенню теплоємності. Однак цей негативний ефект від збільшення в'язкості може бути успішно усунуто додаванням речовин, що регулюють в'язкість.

Кількісні ефекти впливу наночастинок на теплофізичні властивості об'єктів дослідження залежать як від концентрації компонентів холодоносіїв, їх хімічного складу, так і від температури. Показано, що при низьких температурах вклад наночастинок в збільшення в'язкості базової рідини значно нижче, ніж при високих температурах.

Результати експериментального дослідження показують збільшення середнього по довжині числа Нусельта для обох досліджених нанофлюїдів, порівняно з числом Нусельта для базової рідини. Разом з тим, вплив домішок наночастинок на інтенсивність теплообміну непропорційний концентрації наночастинок. Інтенсивність тепловіддачі для нанохолодоносія із вмістом наночастинок 0,53 мас. % більше, ніж для нанохолодоносія з 1,03 мас. %

наночастинок. З урахуванням отриманих результатів експериментального дослідження коефіцієнта тепловіддачі при ламінарній течії нанофлюїдів у трубі можна сформулювати висновок: збільшення теплопровідності не є єдиною причиною інтенсифікації процесу тепловіддачі.

Результати, що наведені в дисертації показують, що інтенсифікація теплообміну при ламінарній течії холодоносія в трубі не може бути пояснена тільки впливом наночастинок на теплофізичні властивості багатокомпонентного теплоносія. Необхідно також враховувати локальну турбулізацію при ламінарній течії теплоносія, в якому присутні наночастинок.

Ключові слова: наночастинок, нанофлюїд, багатокомпонентний холодоносій, теплофізичні властивості, коефіцієнт тепловіддачі, втрати тиску.

ABSTRACT

Ryabikin S. S. **Increase in the intensity of heat transfer processes in refrigeration equipment through the use of nanotubes (thermophysical experiment, modeling).** – Manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Heat Power Engineering. - Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, 2017.

The thesis is devoted to the experimental and theoretical study of the effect of impurities of nanoparticles on: the thermophysical properties of multicomponent refrigerants based on propylene glycol / water / viscosity regulating substances (BPB) / Al_2O_3 nanoparticles, the intensity of heat transfer processes in forced convection during the laminar flow of coolant in a horizontal pipe.

The paper presents experimental data on the influence of impurities of Al_2O_3 nanoparticles on the density, heat capacity, and dynamic viscosity of multicomponent refrigerants. To describe and predict the thermophysical properties of multicomponent refrigerants, new methods have been proposed for the first time, requiring for their application a minimum volume of experimental information. It is shown that the impurities of Al_2O_3 nanoparticles in multicomponent refrigerants contribute to an increase in viscosity and a slight decrease in the heat capacity. However, this negative effect can be successfully eliminated by special substances that reduce viscosity.

Quantitative effects of the effect of nanoparticles on the properties of the objects of investigation depend both on the concentration of the components of the coolants in the heat carriers, their chemical composition, and on the temperature. It is shown that at low temperatures the quantitative effect of nanoparticle influence on the viscosity will depend both on the nanoparticle concentration and the rheological properties of the coolant.

The results of the experimental study show an increase in the average length of the Nusselt number for both investigated nanofluids, compared to the base fluid. At the same time, the effect of nanoparticle impurities on the heat transfer intensity is not proportional to the concentration of nanoparticles. Intensity of heat transfer for a nanocooler with a

content of nanoparticles of 0.53 wt. % More than for the nanocooler with 1.03 mass. % of nanoparticles. Taking into account the obtained results of the experimental study of the heat transfer coefficient for laminar flow of nanofluids in a pipe, we can formulate the conclusion that an increase in the thermal conductivity is not the only reason for the intensification of the heat transfer process.

The results given in the thesis show that the intensification of heat transfer during the laminar flow of the coolant in the pipe can not be explained only by the influence of nanoparticles on the thermophysical properties of the multicomponent heat carrier. It is also necessary to take into account the local turbulence in the laminar flow of heat-bearing in which nano-particles are present.

Key words: nanoparticles, nanofluid, multicomponent coolant, thermal properties, local heat transfer coefficient, heat transfer coefficient.

Видавництво: «Діол-Прінт» (СПЛ Сlepченко)

Т. 048 233 13 33

Тираж: 100 прим.