

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ЛУК'ЯНОВ МИКОЛА МИКОЛАЙОВИЧ



УДК 536.24+536.532+536.27:536.423.1+544.77

**ВИВЧЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ЗАСТОСУВАННЯ НАНОТЕХНОЛОГІЙ У
ПОБУТОВІЙ ХОЛОДИЛЬНІЙ ТЕХНІЦІ
(теплофізичний експеримент, моделювання, еколого-енергетичний аналіз)**

Спеціальність 05.14.06 -Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Желєзний Віталій Петрович,
професор кафедри теплофізики та 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;

кандидат технічних наук, доцент

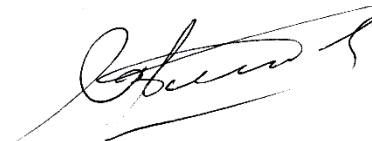
Форсюк Андрій Васильович,
доцент кафедри теплоенергетики та холодильної техніки Національного університету харчових технологій

Захист дисертації відбудеться “23” листопада 2015 р. О 14.00 г. 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 “ 22 ” жовтня 2015 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор технічних наук, професор



Мілованов В.І.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. В даний час раціональне використання енергоресурсів стає необхідною умовою для розвитку холодильної промисловості. Для ефективної роботи холодильного обладнання найважливішу роль відіграє вибір робочого тіла. Тому створення нових перспективних холодоагентів, що відповідають сучасним еколого–енергетичним вимогам, є актуальним напрямком у розвитку холодильної промисловості. Впровадження нанотехнологій при створенні робочих тіл безсумнівно є одним із цих напрямків.

У процесі роботи парокompресійних холодильних машин певна кількість компресорного мастила завжди присутня у випарнику і конденсаторі. Домішки мастила і наночасток в холодоагенті утворюють розчин холодоагент/мастило/наночастки (наноРХМ), який циркулює по контуру компресорної системи.

Домішки нанорозмірних часток у традиційно застосовуваних холодоагентах сприяють зміні їхніх теплофізичних властивостей та підвищенню показників енергетичної ефективності компресорної системи, збільшенню коефіцієнтів тепловіддачі в апаратах холодильного обладнання без внесення змін у конструкцію холодильної установки.

Серед вчених, які плідно працювали в рамках зазначеного наукового напрямку, і на публікації яких автор спирався при вирішенні розглянутих у дисертації завдань, слід назвати імена таких вчених: Шен–шань Бі (Sheng–shan Bi), Кедзіерський М.А. (Kedzierski M.A.), Бен Сан (Bin Sun), Крістен Бартелт (Kristen Bartelt), Хао П. (Hao P.), Том Дж. Р. (Thome J.R.), Чой С. (Choi C.), Геллер В.З., Мазур В.А., Железний В.П. та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з Постановою Кабінету Міністрів України №256 від 04.03.2004 р, що затвердила програму зупинення виробництва та використання озоноруйнівних речовин на 2004–2030 рр. Дисертаційна робота є також складовою частиною досліджень, проведених у рамках виконання держбюджетних науково–дослідних робіт МК 13/02, № держреєстрації 0113U000371 (Структурні, термодинамічні та кінетичні властивості нанофлюїдів – нової генерації інтелектуальних робочих середовищ) та науково–дослідної кафедральної теми «Комплексні дослідження теплофізичних властивостей речовин, перспективних для використання в промисловості».

Мета і завдання досліджень. Метою даного дослідження є: експериментальне і теоретичне вивчення впливу домішок наночасток на теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило; експериментальна оцінка показників ефективності компресорної системи; вивчення впливу домішок наночасток в робочому тілі на процеси кипіння в горизонтальній трубі; еколого–енергетичний аналіз доцільності використання нанотехнологій у побутовій холодильній техніці.

Для досягнення зазначеної мети було поставлено та вирішено такі **завдання**:

- створено експериментальний стенд для дослідження показників ефективності компресорної системи та виконано дослідження впливу домішок наночасток Al_2O_3 і TiO_2 в робочому тілі на показники ефективності компресорної системи;
- вивчено вплив наночасток на теплофізичні властивості розчину холодоагент R600a/мінеральне компресорне мастило;
- у рамках моделі прогнозування SP–QSPR (Scaling Principles – Quantitative Structure–Property Relationship) оброблені отримані експериментальні дані про теплофізичні властивості розчинів R600a/компресорне мінеральне мастило/наночастки (TiO_2 , Al_2O_3);
- виконано експериментальні дослідження впливу домішок наночасток Al_2O_3 і TiO_2 в робочому тілі компресорної системи на локальний коефіцієнт тепловіддачі при кипінні в трубі;
- отримані експериментальні дані про локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні розчинів холодоагент R600a/мінеральне мастило/наночастки (TiO_2 , Al_2O_3) в трубі, які було описано моделлю, запропонованою в роботах ^{*,**};

• виконано еколого–енергетичний аналіз доцільності застосування нанотехнологій у побутовій холодильній техніці.

Об’єкти дослідження - розчини холодоагенту R600a (ізобутан) з компресорним мінеральним нафтовим мастилом і домішками наночасток Al_2O_3 і TiO_2 .

Предмет дослідження - закономірності впливу домішок наночасток на теплофізичні властивості розчинів холодоагент R600a/мінеральне мастило (РХМ), а також на показники ефективності компресорної системи та інтенсивність процесів кипіння РХМ у трубі в залежності від витрати робочого тіла та величини теплового потоку.

Розв’язання сформульованих завдань досягнуто у рамках таких **методів дослідження**:

– експериментальних досліджень густини, тиску насиченої пари, поверхневого натягу, динамічної в’язкості розчинів холодоагент/мастило та розчинів холодоагент/мастило з домішками наночасток TiO_2 і Al_2O_3 ; показників ефективності компресорної системи при використанні в якості робочих тіл розчинів холодоагент/мастило/наночастки (TiO_2 і Al_2O_3); локального коефіцієнта тепловіддачі при кипінні в трубі розчину холодоагент/мастило/наночастки (TiO_2 і Al_2O_3);

– теоретичних досліджень, пов’язаних з розвитком існуючих методів прогнозування теплофізичних властивостей нанофлюїдів у широких діапазонах параметрів стану та вдосконаленням методик прогнозування коефіцієнта тепловіддачі при кипінні в трубі розчину холодоагент/мастило з домішками наночасток.

Наукова новизна виконаної роботи полягає в тому, що:

– вперше отримані дані про концентрацію наночасток в робочому тілі при циркуляції по контуру компресорної системи;

– вперше отримано експериментальні дані про вплив домішок наночасток Al_2O_3 і TiO_2 в робочому тілі холодоагент R600a/мінеральне мастило на показники ефективності парокompресійної холодильної машини;

– отримані нові експериментальні дані про вплив домішок наночасток Al_2O_3 і TiO_2 в розчинах холодоагент R600a/мінеральне мастило і холодоагент R600a/наномастило на локальні та середні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні робочих тіл в трубі;

– показано, що використання експериментальної інформації про теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило (РХМ) та холодоагент/мастило/наночастки (наноРХМ) в модифікованій моделі ^{*}, ^{**} забезпечує високу якість прогнозування локального та середнього по перерізу коефіцієнта тепловіддачі при кипінні в трубі розчину R600a/мінеральне мастило;

– вперше з позицій еколого–енергетичного аналізу показана доцільність застосування нанотехнологій у побутовій холодильній техніці.

У рамках дисертаційної роботи можна сформулювати такий **загальний висновок**:

невеликі домішки наночасток Al_2O_3 - від $0,21 \cdot 10^{-3}$ до $2,2 \cdot 10^{-3}$ мас. % і TiO_2 - від $1,3 \cdot 10^{-3}$ до $5,9 \cdot 10^{-3}$ мас. %, які циркулюють з робочим тілом по контуру компресорної системи, істотно впливають на холодильний коефіцієнт компресорної системи (до 15%) і на середній коефіцієнт тепловіддачі при кипінні робочого тіла в трубі (до 9%). Врахування теплофізичних властивостей

* Kattan, N. Flow boiling in horizontal tubes: part 3 – development of a new heat transfer model based on flow pattern [Text] / N. Kattan, J. R. Thome, D. Favrat // Journal of Heat Transfer. – 1998. – Vol. 120, Issue 1. – P. 156–165

** Chen G.M. An Experimental Investigation and Modelling of Flow Boiling Heat Transfer of Isobutane–Compressor Oil Solution in a Horizontal Smooth Tube [Text] / G.M. Chen, V.P. Zhelezny, A.V. Melnyk, K.O. Shestopalov // Int J. Ref., Vol. 58 2015.–P.137– 145.

робочого тіла дозволяє адекватно описувати процеси кипіння наноРХМ у трубі з похибкою не вище 20%.

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

Практична цінність результатів роботи полягає в тому, що: отримані дані про вплив наночасток на показники ефективності компресорної системи та на процес кипіння робочого тіла в трубі дозволяють виділити ключові фактори, що впливають на доцільність впровадження нанотехнологій у холодильну промисловість; отримані дані про теплофізичні властивості наноРХМ дозволяють підвищити якість оцінки впливу наночасток на властивості реальних робочих тіл (холодоагент/мастило) і формують базу довідкових даних для розвитку методів розрахунку властивостей нанофлюїдів; екоіндикатори, запропоновані в роботі для оцінки еколого–енергетичної ефективності компресорної системи сприяють розвитку методів аудиту та менеджменту в холодильній індустрії.

Особистий внесок автора. Дисертація виконана при консультаціях наукового керівника. На окремих етапах у роботі брали участь співробітники лабораторії кафедри теплофізики та прикладної екології ОНАХТ – співавтори публікацій. Особисто здобувачем створена й апробована експериментальна установка для дослідження показників ефективності компресорної системи, виконано увесь обсяг експериментальних досліджень показників ефективності компресорної системи при використанні робочих тіл з домішками наночасток, а також локального коефіцієнта тепловіддачі при кипінні розчинів холодоагент R600a з компресорним мастилом і наночастками Al_2O_3 і TiO_2 та проведено обробку експериментальних даних. Автором досліджені теплофізичні властивості розчинів R600a/мастило і R600a/мастило/наночастки (Al_2O_3 , TiO_2) і запропоновано розвиток методів прогнозування теплофізичних властивостей складних термодинамічних систем, включаючи нанофлюїди, та методів моделювання теплообміну при кипінні нанофлюїдів у трубі.

Апробація роботи. Основні результати виконаних досліджень доповідалися автором на 10 конференціях, у тому числі: 9-та міжнародна науково–технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології», м. Одеса, 2013 р.; XV Міжнародна науково–технічна конференція «Актуальні проблеми енергетики і екології», м. Одеса, 2013 р.; II Міжнародна науково–технічна конференція «Холод в енергетиці і на транспорті: Сучасні проблеми кондиціонування та рефрижерації», м. Миколаїв, жовтень 2013 р.; VI Міжнародна науково–технічна конференція «Низкотемпературные и пищевые технологии в XXI веке», Росія, Санкт–Петербург, листопад 2013 р.; International symposium on Convective Heat and Mass Transfer, CONV–2014, Turkey, Kusadasi, червень 2014 р.; 6th International Conference «Physics of liquid matter: Modern problems», Київ, травень 2014 р.; XIV Російська конференція (з міжнародною участю) по теплофізичним властивостям речовин, м Казань, 2014 р.; X Міжнародна науково–технічна конференція, Одеса, 2015; The 24th IIR International Congress of Refrigeration, Yokohama, Japan, 2015; 8th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 2015.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 7 статтях у фахових періодичних журналах, 8 друкованих працях, опублікованих у збірниках наукових праць міжнародних конференцій, і 4 роботах, опублікованих у формі тез у збірниках тез доповідей конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 5 розділів, висновків, списку використаної літератури, 113 джерел і 2 додатків. Робота містить 194 сторінок тексту, включаючи 78 рисунків, 26 таблиці.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, відображено її зв'язок з існуючими державними програмами та держбюджетною науковою тематикою ОНАХТ, сформульовано мету і визначено завдання дослідження. Наведено наукову новизну і практичну цінність виконаних досліджень, вказано особистий внесок здобувача, подані відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи і публікації.

У **першому розділі** наведено короткий огляд робіт, присвячених оцінці впливу наночастинок на показники ефективності холодильного обладнання. У першій частині огляду виконано аналіз робіт, присвячених дослідженню впливу наночастинок на показники ефективності компресорної системи. У другій частині огляду розглянуто публікації, присвячені дослідженню впливу наночастинок на процеси кипіння робочих тіл у трубі.

Виконаний аналіз перспектив застосування нанотехнологій в холодильній промисловості показує, що домішки наночастинок в основному позитивно впливають на показники ефективності компресорних систем. Однак більшість робіт, на думку автора, мають такі характерні недоліки:

- у більшості опублікованих робіт, присвячених оцінці показників ефективності компресорних систем, склад робочого тіла не піддавався аналізу; автори не враховували відмінність складів приготованого зразка робочого тіла і робочого тіла, яке циркулює по контуру компресорної системи;

- багато хто з авторів, вивчаючи ефект впливу наночастинок на показники ефективності компресорної системи, розглядають системи з різними мастилами і холодоагентами, що ускладнює зіставлення отриманих результатів;

- при порівнянні холодильного обладнання з різними робочими тілами не враховуються зміни холодопродуктивності і коефіцієнта робочого часу;

Аналізуючи вплив наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі, слід зауважити, що:

- домішки наночастинок в холодоагенті сприяють збільшенню коефіцієнта тепловіддачі, причому при збільшенні концентрації наночастинок інтенсивність теплообміну зростає;

- зі збільшенням ступеня сухості коефіцієнт тепловіддачі при кипінні нанофлюїдів збільшується, але відносний внесок наночастинок у зміну коефіцієнта тепловіддачі зменшується;

- зі збільшенням масової швидкості робочого тіла коефіцієнт тепловіддачі киплячого нанохолодоагенту збільшується, але відносний внесок наночастинок у зміну коефіцієнта тепловіддачі зменшується.

Більшість авторів, здійснюючи оцінку впливу наночастинок на теплообмін, не враховують наявність домішок компресорного мастила в робочому тілі, які впливають як на зміну теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мастило, так і на локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні у випарнику.

Другий розділ дисертації присвячено аналізу результатів експериментального дослідження теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мастило і розчинів холодоагент/наномастило. У розділі наведено опис експериментальних установок, застосованих автором для вивчення густини, в'язкості, поверхневого натягу і тиску насиченої пари розчинів холодоагент/наномастило, викладено процедуру приготування зразків нанофлюїдів і контролю їхньої стабільності, наведено методику проведення досліджень і виконано оцінку похибки отриманої інформації. Отримані результати досліджень дозволили виконати аналіз впливу домішок наночастинок на теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило.

Для правильної інтерпретації отриманих даних про показники ефективності компресорної системи і коефіцієнти тепловіддачі при кипінні робочого тіла в трубі необхідно мати інформацію про розчинність холодоагенту R600a у мінеральному компресорному мастилі. Для виконання цього завдання було проведено експеримент із визначення розчинності холодоагенту R600a в

мінеральному мастилі. Дослідження проводилося при масових частках холодоагенту в РХМ – x_{vref} від 0,3 до 0,98 кг/кг. Проведене дослідження показує, що розчини обраного мінерального компресорного мастила і холодоагенту R600a у вказаному діапазоні концентрацій мають повну взаємну розчинність до температури 213 К.

Виміри тиску насиченої пари розчинів проводилися статичним методом. Вимірювання тиску насичених парів РХМ виконано при масових частках холодоагенту в РХМ – x_{vref} : 0,41; 0,6 і 0,90 кг/кг. Дослідження впливу наночастинок Al_2O_3 на тиск насичених парів РХМ виконано при концентрації наночастинок РХМ – $X_{nano}=0,5$ мас.% та масових частках холодоагенту в РХМ 0,8; 0,65 і 0,39 кг/кг. Дослідження впливу наночастинок TiO_2 на тиск насичених парів РХМ виконано при концентрації наночастинок $X_{nano}=0,5$ мас.% та масовою часткою холодоагенту в РХМ – x_{vref} : і 0,4; 0,71; 0,87 кг/кг. Виконаний аналіз показує, що в проведених дослідженнях сумарна стандартна невизначеність вимірювання температури не перевищує 0,3 К, концентрації холодоагенту – $1,1 \cdot 10^{-5}$ кг/кг, концентрації наночастинок $1,9 \cdot 10^{-5}$ кг/кг, тиску насичених парів РХМ – 2 кПа. Залежність різниці тиску насичених парів наноРХМ і РХМ від концентрації холодоагенту в поверхневому шарі* представлена на рис. 1, 2.

У дисертації аргументовано доведено, що отримані експериментальні дані про тиск насичених парів та поверхневий натяг розчинів холодоагент/мастило і холодоагент/наномастило слід відносити не до концентрації об'ємної фази РХМ, а до концентрації поверхневого шару РХМ. Запропонована методика обробки експериментальних даних дозволила виключити протиріччя при обробці отриманої інформації і підтвердити наявність залежності між поверхневим натягом і тиском насичених парів, встановлену раніше на кафедрі ТiПЕ ОНАХТ**.

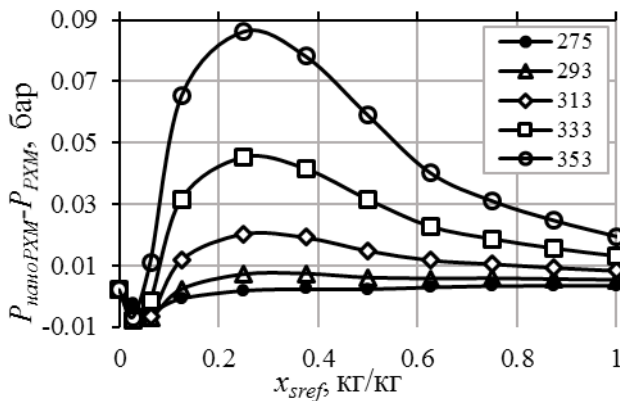


Рис. 1 – Залежність абсолютних відхилень тиску насичених парів для розчинів R600a/мінеральне мастило і R600a/мінеральне мастило/ Al_2O_3 ($X_{nano}=0,5$ мас.%) від концентрації холодоагенту в поверхневому шарі РХМ – x_{sref}

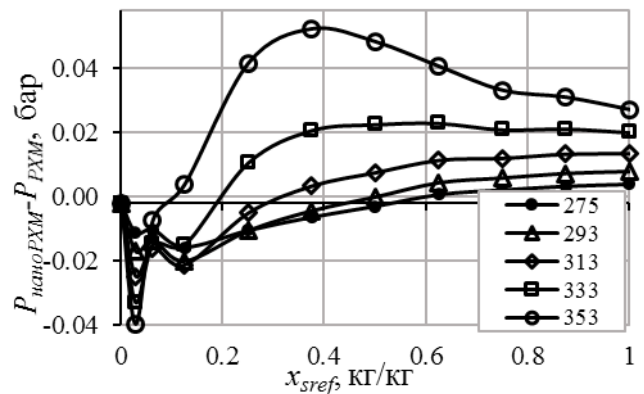


Рис. 2 – Залежність абсолютних відхилень тиску насичених парів для розчинів R600a/мінеральне мастило і R600a/мінеральне мастило/ TiO_2 ($X_{nano}=0,5$ мас.%) від концентрації холодоагенту в поверхневому шарі РХМ – x_{sref}

* Лозовский, Т. Л. Поверхностное натяжение смесевых хладагентов и растворов хладагент/масло. Эксперимент методы прогнозирования. Часть 3: Поверхностное натяжение растворов хладагент/масло [Текст] / Т. Л. Лозовский, Ю. В. Семенюк, Д. А. Ивченко, Н.А. Приходченко, В.П. Железный // Холодильная техника и технология. – 2009. – № 6 (122). – С. 38-46.

** Zhelezny, V.P. Prediction of the surface tension for refrigerants and refrigerant–oil solutions (ROS) [Text] / V. Zhelezny, V. Sechenyh, D. Ivchenko, Y. Semenyuk // International Journal of Refrigeration. – 2014. – Vol.40. – P. 241 – 245

Проведений аналіз показує, що відносний вплив наночастинок Al_2O_3 на тиск насичених парів РХМ залежить як від складу РХМ, так і від температури. Максимальний вплив наночастинок Al_2O_3 (0,7%) і TiO_2 (0,5%) на тиск насичених парів спостерігається при високих температурах і при концентраціях мастила в РХМ 10 мас% і 40 мас%, відповідно.

Дослідження густини РХМ проводилося пікнометричним методом. Оскільки концентрація наночастинок в РХМ незначна, розрахунок густини наноРХМ виконаний з використанням формули

$$\rho_{\text{нано}} \text{РХМ} = \varphi_{\text{нано}} \times \rho_{\text{нано}} + (1 - \varphi_{\text{нано}}) \times \rho_{\text{см}}, \quad (1)$$

де $\varphi_{\text{нано}}$ – об’ємна частка наночастинок в розчині, $\text{м}^3/\text{м}^3$; $\rho_{\text{нано}}$ – густина наночастинок, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{\text{см}}$ – густина РХМ, $\text{кг}/\text{м}^3$.

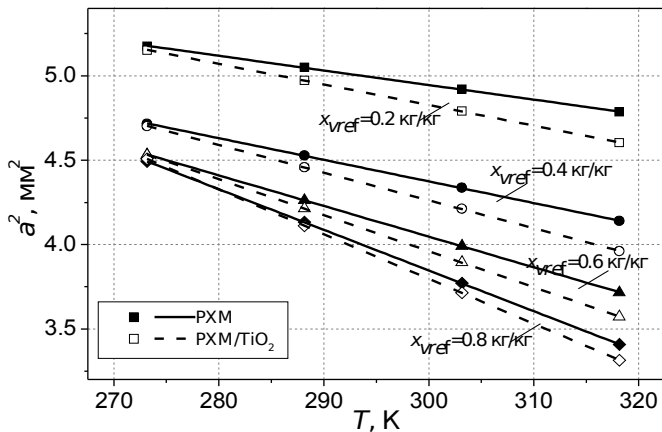


Рис. 3 – Температурна залежність капілярної сталості розчинів R600a/мінеральне мастило і R600a/мінеральне мастило/TiO₂ ($X_{\text{нано}}=0,48$ мас.%) на різних концентраціях – x_{vref}

Дослідження впливу наночастинок TiO₂ на капілярну сталість розчинів холодоагент/мастило здійснювалося при концентрації наночастинок в РХМ – $X_{\text{нано}}=0,49$ мас.%, і масових частках холодоагенту в РХМ – x_{vref} : 0,49; 0,68 і 0,83 кг/кг.

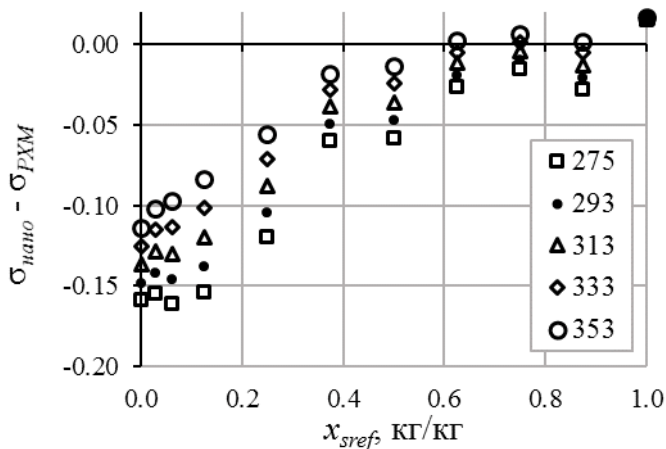


Рис. 4 - Залежність абсолютних відхилень ($\sigma_{\text{наноРХМ}} - \sigma_{\text{РХМ}}$) для розчинів R600a/мінеральне мастило і R600a/мінеральне мастило/Al₂O₃ ($X_{\text{нано}}=0,48$ мас.%) від концентрації холодоагенту в поверхневому шарі РХМ - x_{sref}

З наведеного рисунка випливає, що домішки наночастинок при всіх концентраціях сприяють зниженню поверхневого натягу розчинів холодоагент/мастило (див. рис. 4). Найбільший вплив наночастинок чинять на поверхневий натяг РХМ, в яких концентрація компресорного мастила велика. Зі збільшенням температури ефект впливу наночастинок на поверхневий натяг РХМ знижується.

Експериментальне дослідження динамічної в’язкості - η розчинів холодоагент/мастило і холодоагент/наномасстило виконано на віскозиметрі Гепплера методом кульки, що котиться. Експеримент проводився в діапазоні температур від 263 до 293 К і при масових частках холодоагенту - x_{vref} для РХМ - 0,27 і 0,63 кг/кг, для РХМ/Al₂O₃ - 0,26 і 0,47 кг/кг і для РХМ/TiO₂ –

Дослідження впливу наночастинок Al₂O₃ і TiO₂ на поверхневий натяг РХМ – σ здійснювалося диференціальним методом капілярного підняття. Дослідження впливу домішок мастила на капілярну сталість РХМ здійснювалося при масових частках холодоагенту в РХМ – x_{vref} : 0,25; 0,52; 0,8 і 0,91 кг/кг у діапазоні температур від 275 до 303 К. Дослідження впливу наночастинок Al₂O₃ на капілярну сталість розчинів холодоагент/мастило здійснювалося при концентрації наночастинок – $X_{\text{нано}}=0,48$ мас.%, і масових частках холодоагенту – x_{vref} : 0,51; 0,68 і 0,84 кг/кг.

Результати дослідження впливу наночастинок на капілярну сталість на прикладі наночастинок TiO₂ наведені на рис. 3. Виконаний аналіз показує, що в проведених дослідженнях розширена невизначеність вимірювання капілярної сталості РХМ не перевищує 0,032 мм².

0,1, 0,26 і 0,59 кг/кг. Концентрація наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 в розчині холодоагент/настоїло становила $X_{\text{nano}}=0,5$ мас.%. Результати експериментальних даних демонструє рис 5. Виконаний аналіз показує, що в проведених дослідженнях розширена невизначеність вимірювання динамічної в'язкості РХМ становить від 0,01 до 0,45 мПа·с, залежно від діапазону вимірювання (при високих значеннях в'язкості відносна невизначеність становить 1,4 %, а при низьких значеннях в'язкості - 2,6% від вимірюваної величини).

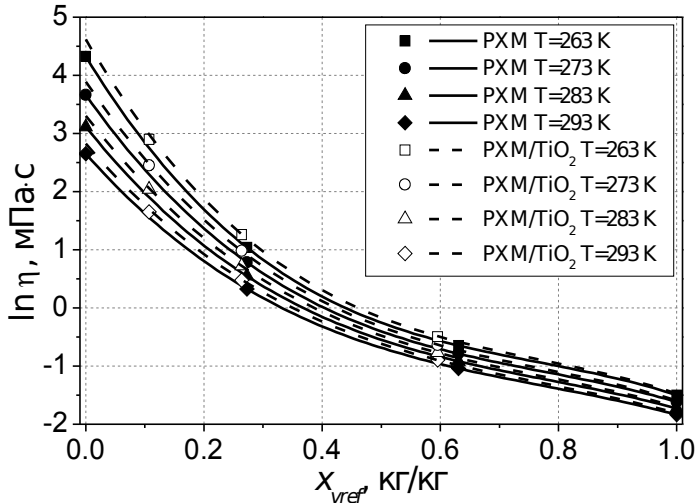


Рис. 5 – Залежність логарифма динамічної в'язкості розчину R600a/мінеральне мастило і R600a/мінеральне мастило/ TiO_2 ($X_{\text{nano}}=0,5$ мас.%) від концентрації холодоагенту в рідкій фазі – x_{vref}

На даний час в літературі відсутні методики прогнозування для більшості теплофізичних властивостей нанофлюїдів у широких інтервалах параметрів стану. У цій роботі автор вперше використав для прогнозування властивостей наноРХМ методику SP-QSPR (Scaling Principles - Quantitative Structure-Property Relationship), яка була раніше запропонована на кафедрі ТіПЕ ОНАХТ**. В основу цієї методики прогнозування властивостей речовин і розчинів покладено застосування малокоefficientних рівнянь розширеного скейлінгу (див. рівняння (2) - (6) у таблиці 1) і встановлених в роботах *,** залежностей між критичним мольним об'ємом і різними структурно-адитивними комплексами (див. рівняння (2) - (6)). В рамках реалізації цієї моделі вперше виконано аналіз впливу наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 на значення псевдокритичних параметрів наноРХМ. Показано, що псевдокритичні параметри наноРХМ незначно відрізняються від аналогічних параметрів для РХМ.

При реалізації зазначеної моделі прогнозування властивостей РХМ і наноРХМ у широких інтервалах параметрів стану використовувалися обмежені експериментальні дані про теплофізичні властивості розчинів – R600a/мінеральне мастило, R600a/мінеральне мастило/ Al_2O_3 і R600a/мінеральне мастило/ TiO_2 . Прогнозування теплофізичних властивостей розчинів R600a/мінеральне мастило, R600a/мінеральне мастило/ Al_2O_3 і R600a/мінеральне мастило/ TiO_2 виконано в інтервалах параметрів застосування цих робочих тіл у побутових холодильних приладах ($245 \leq T \leq 330\text{K}$; $0,3 \leq P \leq 7$ бар; $0,2 \leq x_{ref} \leq 1,0$ кг/кг).

Виконане експериментальне дослідження показує, що домішки наночастинок сприяють збільшенню в'язкості РХМ. Цей ефект проявляється у найбільшій мірі (до 35%) при низьких температурах і високих концентраціях мастила в холодоагенті.

* Chen G.M., Zhelezny V.P., Melnyk A.V., Shestopalov K.O. An Experimental Investigation and Modelling of Flow Boiling Heat Transfer of Isobutane-Compressor Oil Solution in a Horizontal Smooth Tube// Int/ J. Ref., Vol. 58 2015.-P.137- 145.

** Zhelezny, V. P. A New Scaling Principles-Quantitative Structure Property Relationship Model (SP-QSPR) for Predicting the Physicochemical Properties of Substances at the Saturation Line Text. / V. Zhelezny, V. Sechenyh, A. Nikulina // Journal of Chemical & Engineering Data. - 2014. - №59 (2). - P. 485-493.

Таблиця 1

Рекомендовані залежності для прогнозування теплофізичних властивостей РХМ і наноРХМ (міх)

Властивість	Форма рівняння	Рівняння для розрахунку кроссоверних функцій і псевдокритичних параметрів	Визначувана величина	№ рівняння
Капілярна стала	$a_{mix}^2 = a_0(x_{sref}) \times n \times \psi(t)$	$\psi(t) = 1 - 0,04762 \times \frac{t^{1,5}}{\ln t}$, де: $t = 1 - T / \bar{T}_c(x_{sref})$	$\bar{T}_c = f(x_{vref})$; $a_0^2 = f(x_{vref})$; $a_{mix}^2 = f(t, x_{ref})$	(2)
Різниця ортобаричних густин	$\Delta \rho_{mix} = \rho_0(x_{vref}) \times \beta \times F(t)$	$F(t) = 1 - 1,2278 \times \frac{t^2}{\ln t} + 1,3282 \times \frac{t^3}{\ln t}$, де: $t = 1 - T / \bar{T}_c(x_{vref})$	$\bar{T}_c = f(x_{vref})$; $\rho_0 = f(x_{vref})$; $\rho_{mix} = f(t, x_{vref})$	(3)
Поверхневий натяг	$\sigma_{mix} = \sigma_0(x_{vref}) \times \mu \times f(t)$	$f(t) = 1 - 0,03534 \times \frac{t^{1,5}}{\ln t} - 0,31656 \times \frac{t^2}{\ln t} + 0,34246 \times \frac{t^3}{\ln t}$, де: $t = 1 - T / \bar{T}_c(x_{sref})$	$\bar{T}_c = f(x_{vref})$; $\sigma_0 = f(x_{vref})$; $\sigma_{mix} = f(t, x_{ref})$	(4)
Визначення концентрації поверхневого шару. Розрахунок поверхневого натягу по парахору $[P_c]$	$[P_c]_{vref} = 3,027 \times V_0(x_{vref})$	$\sigma_0(x_{vref}) = \left(\frac{[P_c]_{vref} \times \rho_0(x_{vref})}{M_{mix}} \right)^{\mu / \beta}$	Переведення концентрації в об'ємі до концентрації в поверхневому шарі $x_{sref} = f(x_{vref})$; $\sigma_0(x_{sref}) = f(x_{sref})$; $a_0^2 = f(x_{sref})$	
Коригування експериментальних даних з тиску насичених парів на концентрацію поверхневого шару				
Тиск насиченої пари	$\ln(P_{smix}) = \ln(\bar{P}_c(x_{sref})) - \alpha_R(x_{sref}) \times \Omega + b \times \Omega^{2,64}$	$\Omega = \ln(\bar{T}_c(x_{sref}) / T)$	$\bar{T}_c = f(x_{sref})$, $\bar{P}_c = f(x_{sref})$ a_R ; b ; $P_{smix} = f(\Omega, x_{sref})$	(5)
Розрахунок капілярної сталої, тиску насичених парів і поверхневого натягу: $a_{mix}^2 = f(t, x_{sref})$, $P_{smix} = f(\Omega, x_{sref})$, $\sigma_{mix} = f(t, x_{sref})$				
визначення V_0 і Or	$V_0(x_{vref}) = \frac{M_{mix}}{\rho_0(x_{vref})}$		$Or_{mix} = 1,227 \times V_0(x_{vref})$	
Динамічна в'язкість	$1/\eta_{mix} = a_\eta (V_{mix} - Or_{mix})^{b_\eta}$	-	a_η, b_η ; $Or_{mix} = f(x_{vref})$; $\eta_{mix} = f(t, x_{vref})$	(6)

де a^2 - капілярна стала; $\Delta\rho = \rho' - \rho''$ – різниця густин на лінії кипіння і конденсації; ρ' - густина на лінії кипіння; σ - поверхневий натяг; P_s - тиск насиченої пари; a_0 , ρ_0 , σ_0 , - амплітуди, що характеризують індивідуальні властивості речовин (розчинів постійної концентрації); a_η і b_η - емпіричні коефіцієнти; Or - ортохор (мольний об'єм рідини при температурі кристалізації); α_R , b - індивідуальні коефіцієнти, що визначаються з експериментальних даних; n , β , μ - критичні показники ступеня; $\psi(t)$, $f(t)$, $F(t)$ - універсальні кросоверні функції; $\bar{P}_c(x_{sref})$, $\bar{T}_c(x_{sref})$, $\bar{T}_c(x_{vref})$ -

псевдокритичні тиск і температура віднесені до концентрацій холодоагенту у поверхневому шарі РХМ - x_{sref} і об'ємній рідкій фазі РХМ - x_{vref} .

Якість прогнозування теплофізичних властивостей наноРХМ демонструє рис. 6.

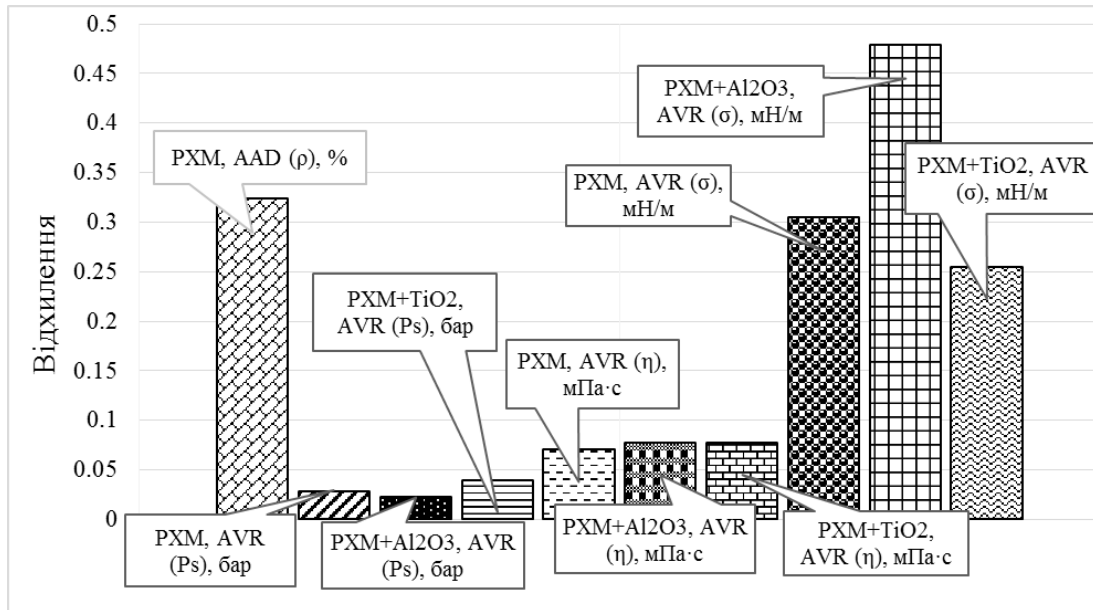


Рис. 6 – Відхилення розрахованих значень теплофізичних властивостей R600a/мінеральне масло, R600a/мінеральне масло/ Al_2O_3 і R600a/мінеральне масло/ TiO_2 від експериментальних даних

$$AAD = 100\% / N \times \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_i^{exp} - Y_i^{calc}}{Y_i^{calc}} \right|; \quad AVR = \frac{1}{N} \times \sum_{i=1}^N \left| Y_i^{exp} - Y_i^{calc} \right|$$

Отримані дані про теплофізичні властивості РХМ і наноРХМ були використані для аналізу отриманої інформації про параметри ефективності компресорних систем і даних про локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні робочих тіл у трубі.

Варто відзначити, що в проведених дослідженнях у склад наноРХМ завжди входив сурфактант - олеїнова кислота. Концентрація сурфактанту була нехтовно мала і проведені дослідження показали, що така кількість сурфактанту не чинять впливу на теплофізичні властивості наноРХМ.

У **третьому розділі** дисертації представлені результати експериментального дослідження впливу наночастинок TiO_2 і Al_2O_3 на показники ефективності компресорної системи заправленої робочим тілом – R600a/мінеральне мастило (нафтенове). Докладно розглянуто схему експериментальної установки, досліджено склад робочого тіла, що циркулює по контуру компресорної системи, наведено результати досліджень впливу наночастинок на холодопродуктивність, споживану компресором потужність і холодильний коефіцієнт. У дисертації наведено результати досліджень, які підтверджують стабільність застосовуваних робочих тіл. Параметри компресорної системи досліджувалися при роботі на робочих тілах з таким брутто складом (концентраціями холодоагенту і наночастинок в робочому тілі, що знаходиться в картері непрацюючого компресора):

- РХМ – холодоагент R600a (ізобутан)/компресорне мастило (мінеральне нафтенове мастило з кінематичною в'язкістю 8 сСт при 40 °С) з концентрацією холодоагенту $x_{ref}=33,4$ мас.%;
- наноРХМ – R600a(/мастило/наночастки TiO_2 з концентрацією 0,32 і 0,66 мас. %;
- наноРХМ – R600a(/мастило/наночастки Al_2O_3 з концентраціями 0,05 і 0,35 мас. %.

Схема створеної автором експериментальної установки для дослідження показників ефективності компресорної системи наведена на рис. 7.

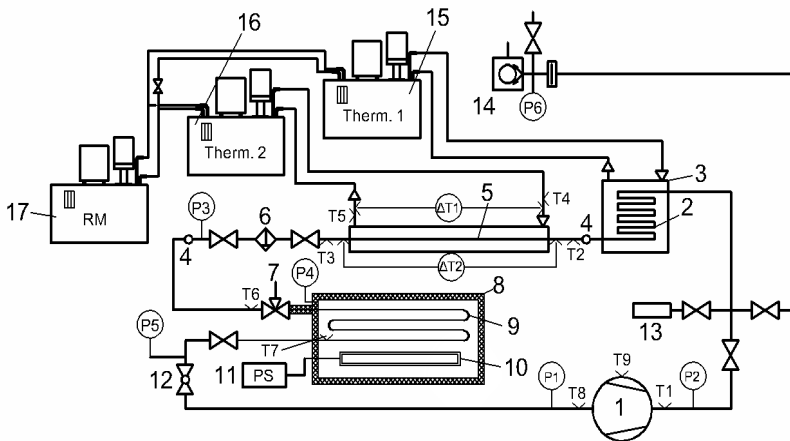


Рис. 7 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження показників ефективності компресорної системи

1 - компресор; 2 - конденсатор; 3 - теплообмінник конденсатора; 4 - оглядове вікно; 5 - калориметричний витратомір; 6 – фільтр-осушувач; 7 – дросель-вентиль; 8 - калориметр із вторинним холодоагентом R134a; 9 - випарник калориметра; 10 - нагрівач; 11 - джерело живлення; 12 - кульовий кран для регулювання тиску кипіння робочого тіла у випарнику; 13 - заправний балон; 14 - вакуум насос; 15 - термостат для регулювання температури теплоносія в системі охолодження конденсатора; 16 - термостат для регулювання температури теплоносія в системі охолодження калориметричного витратоміра; 17 - холодильна машина.

На даній установці для визначення холодопродуктивності компресорної системи використовувався метод калориметра із вторинним холодоагентом (ISO 917-89). Основними елементами компресорної системи є компресор 1 (Atlant СКН 150), конденсатор 2 і калориметр 8 із вторинним холодоагентом R134a. Для вимірювання температур в різних точках компресорної системи були встановлені мідь-константанові термопари: T1 - температура нагнітання робочого тіла; T2-температура рідкого робочого тіла на вході в витратомір 5; T3- температура рідкого робочого тіла на виході з калориметричного витратоміра 5; T4 - температура теплоносія (води) на виході з калориметричного витратоміра 5; T5 - температура води на вході в калориметричний витратомір 5; T6 - температура робочого тіла перед дросельним пристроєм 7; T7 - температура робочого тіла на виході з випарника, значення якої повинно бути на три градуси більше температури кипіння чистого холодоагенту; T8 - температура робочого тіла на всмоктувальному патрубку компресора 1; T9 - температура картера компресора 1. У різних точках компресорної системи встановлені кілька перетворювачів тиску (з межами відхилення значення від його оцінки 0,25% від діапазону): P1 - тиск робочого тіла у всмоктувальній магістралі компресора 1; P2 - тиск робочого тіла в магістралі нагнітання компресора; P3 -тиск конденсації робочого тіла; P4 - тиск вторинного холодоагенту в калориметрі 5; P5 - тиск робочого тіла у випарнику 9.

Крім холодоагенту R600a, в робочому тілі є незначні домішки мінерального компресорного мастила. Склад робочого тіла визначався методом відбору проб з використанням балона 13. Залежність концентрації мастила перед дросельним вентилем 7 від витрати робочого тіла була апроксимована рівнянням

$$w_m = -3.6 - 37859 \times G - 5909.5 \times G \times \ln(G) + 8.3 \times 10^{-8} / G^2, \quad (7)$$

де G – витрата робочого тіла, кг/с.

Теплота конденсації робочого тіла відводиться в теплообміннику 3 теплоносієм із термостата 15. Температура теплоносія підтримується на заданому рівні в залежності від встановлюваного оператором тиску в конденсаторі. Після конденсатора робоче тіло в рідкій фазі проходить через калориметричний витратомір 5, оглядове вікно 4 і дроселюється у вентилі тонкого регулювання 7.

Після дроселювання робоче тіло википає у випарнику 9 калориметра 8. Для регулювання тиску кипіння у випарнику служить кульовий вентиль 12. До вторинного холодоагенту R134a підводиться тепло від електронагрівача 10. Все тепло, яке виділяється на нагрівачі 10, відводиться за рахунок кипіння робочого тіла у випарнику 9. На випарнику калориметра 8 встановлена рухома термопара Т7, яка дозволяє контролювати фіктивний перегрів робочого тіла в калориметрі. У процесі проведених досліджень фіктивний перегрів робочого тіла у випарнику калориметра контролювався і становив 3°C . Електрична потужність, що підводиться до нагрівача 10, визначається компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору Р322 класу точності 0,01. Тепло відводиться робочим тілом у калориметр і розраховується як сума електричної потужності, що підводиться до нагрівача, і теплопритоків з навколишнього середовища.

Експериментальні значення показників ефективності компресорної системи були отримані при встановленні певних режимів. Ці режими характеризуються досягненням обраних витрат робочого тіла, тиску кипіння і конденсації, температури перегріву парів холодоагенту в калориметрі і певної потужності нагрівача калориметра.

Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність визначення параметрів ефективності компресорної системи складає: для холодопродуктивності - не більше 4,7 Вт; для потужності, споживаної компресором, - не більше 1,2 Вт; для електричного холодильного коефіцієнту - 0,16.

Інформація, наведена на рис. 8 і 9, демонструє характер зміни параметрів ефективності компресорної системи для різних робочих тіл.

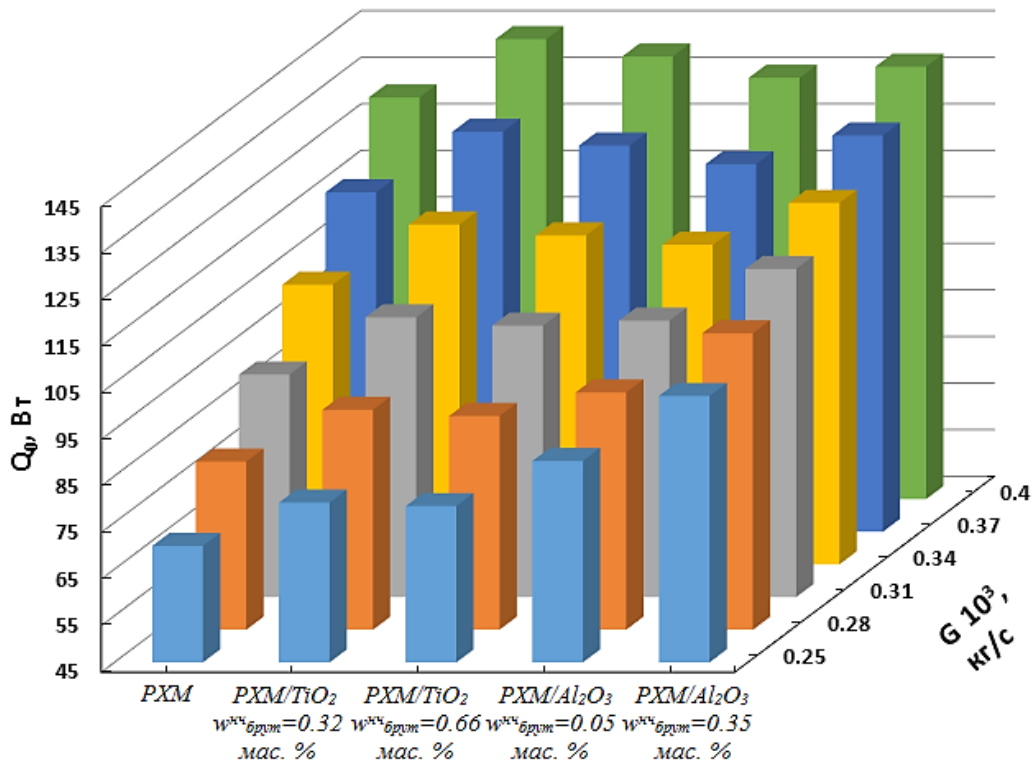


Рис. 8 - Значення холодопродуктивності для розглянутих у дисертації робочих тіл при різних витратах

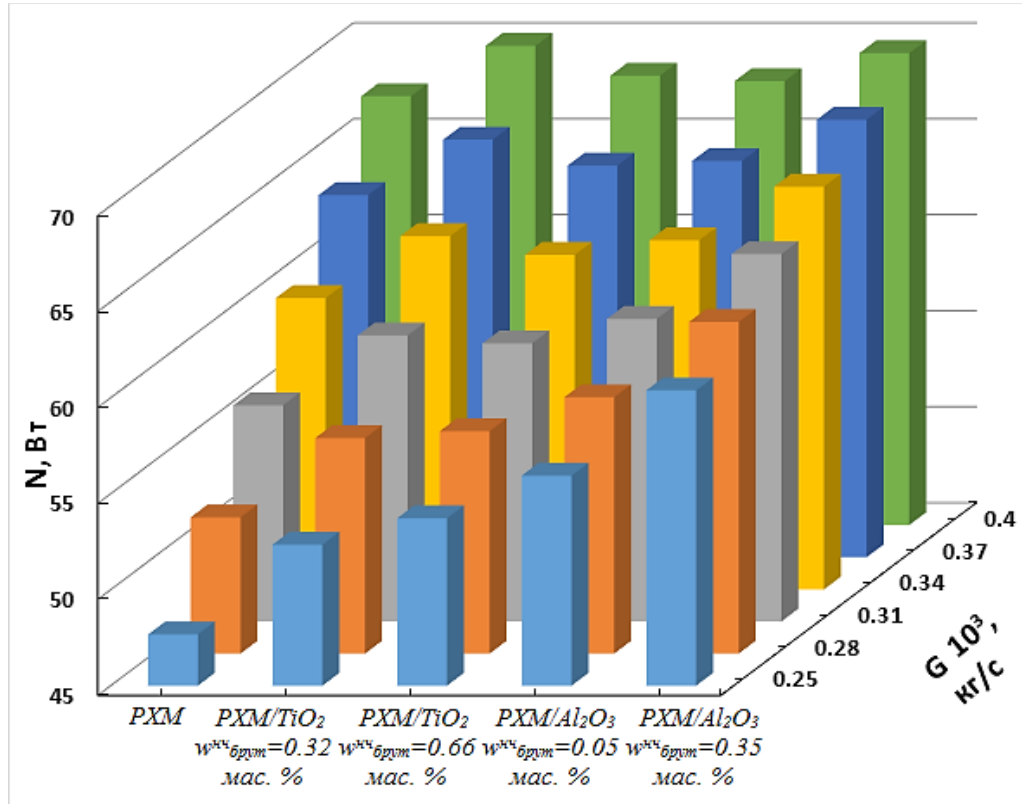


Рис. 9 - Значення потужності споживаної компресором для різних робочих тіл при різних витратах

Результати проведеного дослідження дозволяють сформулювати такі висновки:

- концентрація наночастинок в робочому тілі значно менше брутто концентрації наночастинок, що завантажуються в компресор. Ця концентрація залежить від витрати і змінюється від 0,0002 мас.% до 0,004 мас.%;

- при використанні робочих тіл з домішками наночастинок показники ефективності компресорної системи (холодопродуктивність і холодильний коефіцієнт) збільшуються;

- збільшення показників ефективності компресорної системи залежить як від типу і концентрації наночастинок, так і від масової витрати робочого тіла. Так, домішки наночастинок TiO_2 з брутто концентрацією 0,32 мас.% вносять максимальний вклад при високих витратах робочого тіла, холодильний коефіцієнт зростає на 5,4%. А при малих витратах робочого тіла максимальне збільшення холодильного коефіцієнта становить 3,2%;

- найбільший вклад у підвищення холодильного коефіцієнта вносять наночастинок Al_2O_3 при малих витратах робочого тіла (збільшення становить 15,3% при брутто концентрації наночастинок 0,35 мас.%)

- інтенсивне перемішування робочого тіла в компресорній системі забезпечує його стабільність протягом тривалого часу.

У четвертому розділі наводяться результати дослідження впливу наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні робочого тіла в трубі.

Дослідження впливу домішок наночастинок на інтенсивність кипіння робочого тіла в трубі виконано на установці, схема якої наведена на рис. 10.

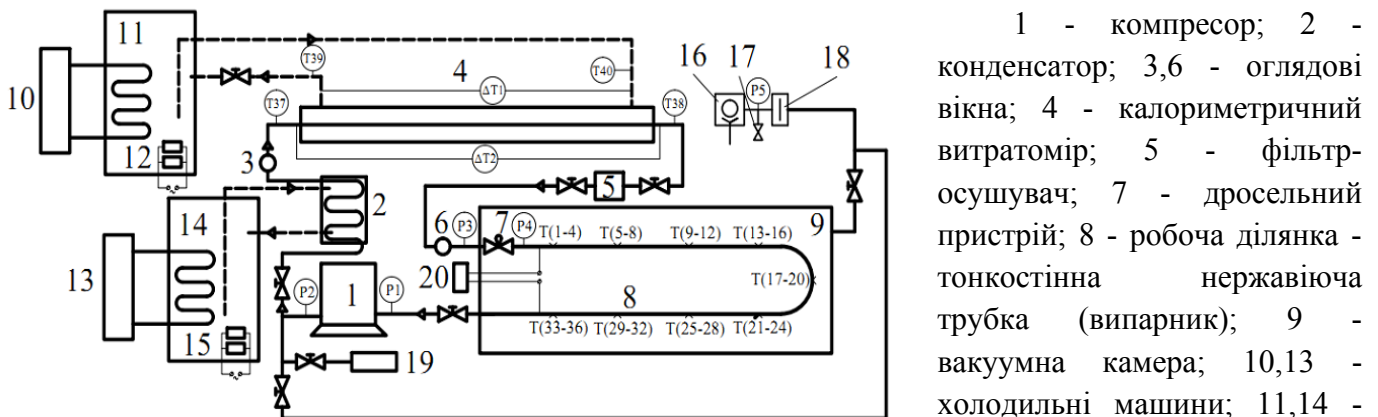


Рис. 10 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження теплообміну при кипінні робочого тіла в трубі натікач; 18 - вакуумна пастка; 19 - заправний балон; 20 - джерело постійного струму.

1 - компресор; 2 - конденсатор; 3,6 - оглядові вікна; 4 - калориметричний витратомір; 5 - фільтр-осушувач; 7 - дросельний пристрій; 8 - робоча ділянка - тонкостінна нержавіюча трубка (випарник); 9 - вакуумна камера; 10,13 - холодильні машини; 11,14 - термостати; 12,15 - нагрівачі; 16 - вакуумний насос; 17 -

пара холодильного агенту разом з дрібними краплями мастила, які утворюються в процесі стиснення робочого тіла компресором 1 (Atlant СКН 150), нагнітається в конденсатор 2. Після конденсації пари робочого тіла рідкий розчин холодоагенту з домішками мастила (РХМ) надходить у калориметричний витратомір 4, де відбувається його подальше охолодження. На виході з витратоміра встановлено фільтр-осушувач 5 марки ADK-052S фірми Alco, оглядове вікно 6 і вентиль тонкого регулювання 7 марки ВТ-5 фірми «ЭНАЛ». Далі робоче тіло надходить у трубу (випарник), де більша частина холодоагенту випаровується, і перегріта пара із залишками РХМ надходить у компресор.

Теплові навантаження у випарнику забезпечувалися за рахунок джоулевої теплоти при пропусканні постійного струму через тонкостінну нержавіючу трубку 8. Робоча ділянка експериментальної установки (випарник) 8, виконана у вигляді гладкої U-подібної трубки з нержавіючої сталі (ГОСТ 9941-81) з внутрішнім діаметром $(5,4 \pm 0,05)$ мм, товщиною стінки $(0,3 \pm 0,05)$ мм і шорсткістю 0,5-0,8 мкм. Довжина робочої ділянки випарника складала (1691 ± 2) мм. Випарник розділений на дев'ять секцій. На межах кожної секції встановлені мідь-константанові термопари для вимірювання температур кипіння рідкого робочого тіла і

температури стінки випарника. На кожній секції випарника розміщені диференціальні термометри, які необхідні для вимірювання різниці температур між стінкою випарника і киплячим робочим тілом у верхній і нижній точках випарника. Значення ЕРС термометрів вимірювалися за допомогою мультиметру (Time Electronics 5065). Випарник 8 знаходиться у вакуумній камері 9, що дозволяє знехтувати впливом теплопритоків з навколишнього середовища на результати дослідження процесу кипіння робочого тіла. Алюмінієвий екран навколо випарника виключає теплопритоки випромінюванням від стінок вакуумної камери. Експериментальна установка оснащена трьома перетворювачами тиску фірми Wika (з межами відхилення значення від його оцінки 0,25% від діапазону), які вимірювали тиск на вході робочого тіла у випарник P4, на вході робочого тіла в дросельний пристрій P3 і тиск у вакуумній камері P5.

З метою визначення концентрації мастила перед дросельним пристроєм було проведено низку експериментів з відборами зразків робочого тіла. Присутні в робочому тілі домішки наночастинок потрапляють з компресора у випарник за рахунок виносу дрібних крапельок розчину холодоагент/мастило/наночастинок. Проведені дослідження показують, що концентрації домішок мастила і наночастинок при кипінні у випарнику розчинів R600a/мінеральне мастило/наночастинок TiO_2 і R600a/мінеральне мастило/наночастинок Al_2O_3 безперервно зростають зі збільшенням ступеня сухості робочого тіла (див рис. 11). Крім того, концентрації домішок мастила і наночастинок при

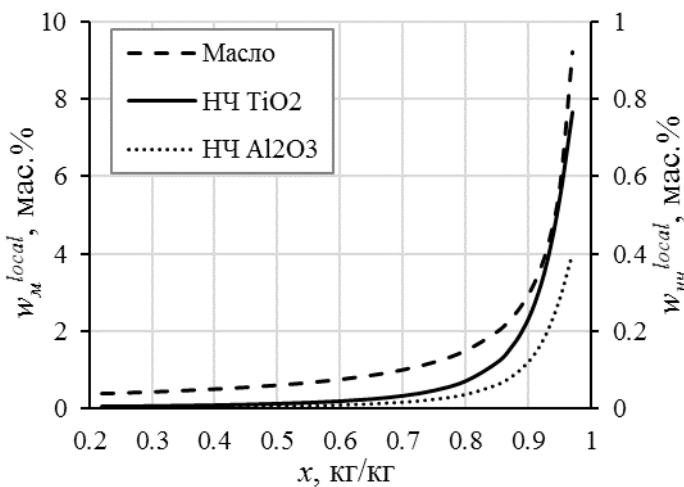


Рис. 11 - Залежність концентрації домішок мастила - w_M^{local} і наночастинок - w_{nch}^{local} в розчині R600a/мінеральне мастило від ступеня сухості робочого тіла у випарнику при масовій швидкості $M \approx 14,3$ (кг/м²·с) і тепловому потоці $q \approx 3550$ Вт/м²

Дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі проведено при температурі кипіння робочого тіла 256 К, в діапазоні масових швидкостей робочого тіла від 10,5 до 18,3 кг/м²·с, і діапазоні теплових навантажень від 2804,4 до 4930,7 Вт/м². Брутто концентрація наночастинок в даному дослідженні становила для наночастинок TiO_2 0,66 мас.% і для наночастинок Al_2O_3 0,35 мас.%.

Дослідження отриманої експериментальної інформації показує, що детальний аналіз впливу наночастинок на значення локальних коефіцієнтів тепловіддачі можливий тільки із застосуванням моделей теплообміну, в яких використовується інформація про теплофізичні властивості

однакових ступенях сухості робочого тіла залежать від масової швидкості і теплового навантаження. Таким чином, при інтерпретації даних про вплив наночастинок на процес кипіння робочого тіла потрібно керуватися не даними про концентрації наночастинок у наноРХМ, заправленому в компресор (в даному дослідженні 0,66 мас.% наночастинок TiO_2 і 0,35 мас.% наночастинок Al_2O_3), а інформацією про концентрацію наночастинок в робочому тілі перед дросельним пристроєм (при використанні наночастинок TiO_2 - від 0,0027 до 0,0036 мас.% і для наночастинок Al_2O_3 - від 0,0015 до 0,003 мас.%).

реального робочого тіла - R600a/мінеральне мастило/наночастки TiO_2 і R600a/мінеральне мастило/наночастки Al_2O_3 .

У рамках даного дослідження для опису експериментальних даних про локальні коефіцієнти тепловіддачі була використана модель, запропонована в роботах (див. сторінку 2 *, **). Відповідно до цієї моделі, коефіцієнт тепловіддачі двофазного потоку розраховувався за рівнянням

$$\alpha_{\text{aver}} = \frac{d_{\text{in}} \cdot \theta_{\text{dry}} \cdot \alpha_v + d_{\text{in}} \cdot (2\pi - \theta_{\text{dry}}) \cdot \alpha_{\text{wet}}}{2\pi \cdot d_{\text{in}}}, \quad (8)$$

де d_{in} - внутрішній діаметр робочої ділянки, м; θ_{dry} - кут осушення, рад; α_v - коефіцієнт тепловіддачі з боку парової фази, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; α_{wet} - коефіцієнт тепловіддачі з боку змоченої поверхні, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. У свою чергу, величина α_{wet} визначається двома складовими - коефіцієнтом тепловіддачі при бульбашковому кипінні у вільному об'ємі α_{nb} і коефіцієнтом тепловіддачі при вимушеній конвекції α_{cb} . Величина, що характеризує тепловіддачу зі змоченої поверхні α_{wet} , розраховувалася за формулою

$$\alpha_{\text{wet}} = (\alpha_{\text{nb}}^3 + \alpha_{\text{cb}}^3)^{1/3}. \quad (9)$$

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при бульбашковому кипінні α_{nb} проводився за рівнянням

$$\alpha_{\text{nb}} = \frac{10^{6,3(1-w_R)} + [0,22 - 26(1-w_R)^2] \dot{q}}{1,0197 \cdot p_{\text{suc}}^{0,75-2(1-w_R)}}, \quad (10)$$

де w_R - масова частка холодоагенту, $\text{кг}/\text{кг}$; p_{suc} - тиск всмоктування, бар; q - густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Конвективна складова коефіцієнта тепловіддачі при кипінні робочого тіла в трубі визначалася за рівнянням

$$\alpha_{\text{cb}} = A \cdot \left[\frac{4 \cdot m(1-x)\delta}{(1-\varepsilon)\mu_{\text{ROS}}} \right]^n \left[\frac{c_p^{\text{ROS}} \mu_{\text{ROS}}}{\lambda_{\text{ROS}}} \right]^{0,4} \frac{\lambda_{\text{ROS}}}{\delta}, \quad (11)$$

де A і n - емпіричні коефіцієнти; μ_{ROS} - динамічна в'язкість РХМ (наноРХМ), $\text{Па} \cdot \text{с}$; c_p^{ROS} - теплоємність РХМ (наноРХМ), $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; λ_{ROS} - коефіцієнт теплопровідності РХМ (наноРХМ), $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; δ - товщина плівки РХМ (наноРХМ), м.

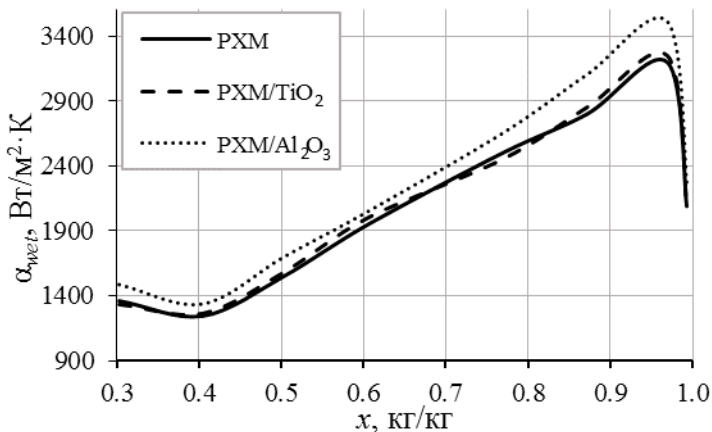


Рис. 12 - Залежність локального коефіцієнта тепловіддачі робочих тіл з боку змоченої поверхні труби α_{wet} від ступеня сухості x на різних ділянках випарника при масовій швидкості $M \approx 14,3 \text{ кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ і тепловому потоці $q \approx 3550 \text{ Вт}/\text{м}^2$

При обробці отриманих даних про локальний коефіцієнт тепловіддачі при кипінні РХМ і наноРХМ у трубі використовувалися не розрахункові, а експериментальні дані про теплофізичні властивості розчинів R600a/мінеральне мастило і нанофлюїдів R600a/мінеральне мастило/ TiO_2 , R600a/мінеральне мастило/ Al_2O_3 . Виконаний аналіз показує, що похибка визначення локальних коефіцієнтів тепловіддачі за даною методикою не перевищує 20%.

Вплив домішок наночастинок на інтенсивність процесів кипіння робочого тіла демонструє рис 12.

При цьому середнє відхилення експериментальних точок від моделі складає приблизно 13%.

З урахуванням отриманих результатів дослідження можна сформулювати кілька висновків:

- домішки наночастинок в робочому тілі впливають на локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні робочих тіл як за рахунок утворення додаткових центрів пароутворення, так і за рахунок впливу на теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило;
- зміна теплофізичних властивостей розчинів R600a/мінеральне мастило/наночастки (Al_2O_3) призводить до збільшення локальних значень коефіцієнта тепловіддачі;
- зміна коефіцієнта тепловіддачі під впливом домішок наночастинок залежить як від ступеня сухості робочого тіла у випарнику, так і від масової витрати. При цьому середній по довжині випарника коефіцієнт тепловіддачі для робочого тіла РХМ/мінеральне мастило/ Al_2O_3 збільшується приблизно на 9% порівняно з робочим тілом РХМ/мінеральне мастило при концентрації наночастинок в робочому тілі перед дросельним пристроєм приблизно 0,0016 мас. %.
- ефект впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні розчинів холодоагент/мастило залежить від матеріалу наночастинок;
- модель розрахунку коефіцієнта тепловіддачі, запропонована в роботах (див. сторінку 2 ^{*,**}) дозволяє адекватно описувати процеси кипіння наноРХМ з похибкою не вище 20% при коректному врахуванні впливу наночастинок на теплофізичні властивості робочого тіла.

На підставі вищевикладених результатів можна прийти до висновку, що зміна локальних коефіцієнтів тепловіддачі від домішок наночастинок залежить як від ступеня сухості робочого тіла у випарнику, так і від масової витрати. При цьому середній по довжині випарника коефіцієнт тепловіддачі для робочого тіла РХМ/мінеральне мастило/ Al_2O_3 збільшується приблизно на 9% порівняно з робочим тілом РХМ/мінеральне мастило, при концентрації наночастинок в робочому тілі перед дросельним пристроєм приблизно 0,0016 мас.%. Наночастки в робочому тілі холодильної машини впливають на локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні робочих тіл як за рахунок утворення додаткових центрів пароутворення, так і за рахунок впливу на теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило.

У **п'ятому розділі** дисертації наведено еколого-енергетичний аналіз роботи компресорної системи з використанням як робочого тіла розчинів холодоагент/наномасстило. При виконанні еколого-енергетичного аналізу пропонується розглядати увесь технологічний ланцюжок виробництва конкретного продукту від видобутку палива та руди для отримання конструкційних матеріалів до його утилізації. При цьому враховуються енергетичні витрати (пропорційні їм викиди парникових газів (ПГ)) на створення та утилізацію виробничого обладнання, споруд і т.п., а також енергетичний еквівалент праці робітників і співробітників. У роботі представлена загальна схема матеріальних, енергетичних і антропогенних (пряма і непряма емісія парникових газів) потоків на повному життєвому циклі устаткування (продукції).

Повна еквівалентна емісія парникових газів (ПЕЕПГ) для аналізованої установки (обладнання), що виробляє один конкретний вид продукції, на її повному життєвому циклі була розрахована за формулою

$$\begin{aligned}
 \text{ПЕЕПГ}_{\text{об}} = & \beta \cdot (e_{\text{ВВП}} \cdot c_i^{\text{об}} + e^{\text{л.п}}) + e_{\text{ВВП}} \cdot \beta \cdot c_i^{\text{об}} \cdot (k_a + k_p) \cdot \tau + \\
 & + \beta \cdot N \cdot \tau \cdot 365 \cdot 24 + \sum m_k \cdot \text{GWP}_k \cdot n
 \end{aligned} \quad (12)$$

де β - викиди CO_2 при виробництві 1 кВт·рік електроенергії (для України), кг CO_2 /(кВт·рік); $e_{\text{ВВП}}$ - енергоемність ВВП (для України), кВт·год/грош.од.; $c_i^{\text{об}}$ - собівартість виробництва обладнання, грош.од.; $e^{\text{л.п}}$ - енергетичний еквівалент людської праці при створенні обладнання, кВт·год/(чол·год); k_a+k_p - частка річних витрат (від капітальних) на амортизацію і ремонт устаткування, рік⁻¹

¹; τ - термін експлуатації обладнання, рік; N - потужність, споживана системою, кВт; m_k - маса k -го ПГ, що виділяється у виробничому процесі при створенні і експлуатації одиниці продукції, кг/одиницю продукції; GWP_k - потенціал глобального потепління k -го ПГ, кг CO_2 /кг; n - річна продуктивність установки, одиниць продукції/рік.

Результати розрахунку наведені на рис 13. Для зручності оцінки еколого-енергетичної ефективності холодильної машини при різній холодопродуктивності в цій роботі пропонується як питомий екоіндикатор використовувати питомі викиди ПГ на одиницю виробленого холоду на певному рівні температур у випарнику – $\mu = ПЕЕПГ_{об} / Q$. Результати розрахунку питомого екоіндикатора наведені на рис 14.

З наведеної на рис. 13 інформації випливає, що домішки наночасток в робочому тілі (РХМ) сприяють збільшенню ПЕЕПГ практично при всіх витратах робочого тіла. Найзначніше збільшення ПЕЕПГ (до 2.5% при витраті $0.25 \cdot 10^{-3}$ кг/с) спостерігається при низьких витратах робочого тіла в компресорній системі. Зі збільшенням витрати робочого тіла цей негативний ефект присутності наночасток в робочому тілі усувається.

Однак слід підкреслити, що отриманий висновок не відображає збільшення

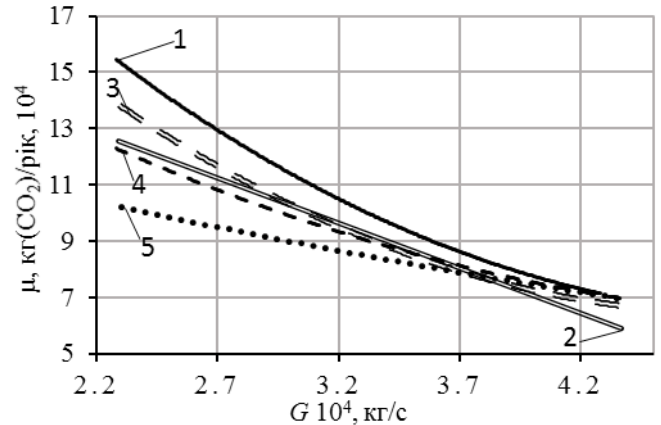


Рис. 13 – Залежність ПЕЕПГ від витрати робочого тіла: 1 — $R600a$ /мастило; 2 — $R600a$ /мастило/НЧ TiO_2 ($w^{нч}_{орум}=0,32\%$ мас.); 3 — $R600a$ /мастило/НЧ TiO_2 ($w^{нч}_{орум}=0,66\%$ мас.); 4 — $R600a$ /мастило/НЧ Al_2O_3 ($w^{нч}_{орум}=0,05\%$ мас.); 5 — $R600a$ /мастило/НЧ Al_2O_3 ($w^{нч}_{орум}=0,35\%$ мас.)

Рис. 14 - Залежність індикатора μ від витрати робочого тіла: 1 — $R600a$ /мастило; 2 — $R600a$ /мастило/НЧ TiO_2 ($w^{нч}_{орум}=0,32\%$ мас.); 3 — $R600a$ /мастило/НЧ TiO_2 ($w^{нч}_{орум}=0,66\%$ мас.); 4 — $R600a$ /мастило/НЧ Al_2O_3 ($w^{нч}_{орум}=0,05\%$ мас.); 5 — $R600a$ /мастило/НЧ Al_2O_3 ($w^{нч}_{орум}=0,35\%$ мас.)

холодопродуктивності компресорної системи внаслідок присутності наночасток в робочому тілі. Цей позитивний ефект, безсумнівно, сприятиме зменшенню часу роботи компресора в побутовому холодильному приладі. Отже, непряма емісія парникових газів від витрат енергії на роботу компресора буде зменшуватися. Значно більшу інформацію несе аналіз значень питомого індикатора.

З аналізу інформації, наведеної на рис.14, випливає що, по-перше, новий індикатор μ значно чутливіший від екстенсивної величини ПЕЕПГ. Якщо значення ПЕЕПГ змінюється в діапазоні вимірюваних витрат робочого тіла на 2-3%, то індикатор μ змінює свою величину на 50%. Аналіз даних про величину екоіндикатора μ дозволяє сформулювати однозначний висновок про доцільність застосування нанотехнологій при виробництві холодильної техніки. При використанні нанотехнологій питомі витрати енергії при виробництві одиниці холоду на заданому температурному діапазоні значно нижчі (до 6% при витраті робочого тіла $0,00033$ кг/с).

По-друге, вибір матеріалу і концентрації наночастинок в робочому тілі компресійних холодильних машин має принципове значення. З проведеного дослідження випливає, що домішки наночастинок Al_2O_3 з брутто концентрацією 0,35 мас. % надають позитивний екологічний ефект.

Для практики більш цінною інформацією є еколого-енергетичний аналіз не експериментальної холодильної установки, а реального побутового холодильного приладу (ПХП). Тому в даному розділі була зроблена спроба перенести отримані у попередньому розрахунку експериментальні дані про показники енергетичної ефективності компресорної системи на побутовий холодильник.

Отримана інформація про показники ефективності компресорної системи дозволяє за запропонованою вище методикою виконати еколого-енергетичний аналіз побутового холодильника, який експлуатується при параметрах лабораторної компресорної системи. Автор розуміє певну умовність такого підходу. Але мета пропонованого дослідження - розглянути теоретичну можливість застосування нанотехнологій для підвищення еколого-енергетичних показників холодильника, нехай навіть не при нормованих показниках ефективності ПХП. Важливо оцінити як теоретичну можливість підвищення класу енергетичної ефективності ПХП за рахунок застосування нанотехнологій, так і вплив наночастинок на роботу випарника, компресора і т.п.

Оскільки за величиною ПЕЕПГ можна однозначно судити про еколого-енергетичну ефективність побутового приладу (в силу екстенсивності цієї функції), то для зручності порівняння роботи холодильника на різних робочих тілах пропонується використовувати новий питомий індикатор

$$\delta = \frac{ПЕЕПГ}{V_{ин} \times \tau}, \quad (9)$$

де τ - термін експлуатації обладнання; $V_{ин}$ - внутрішній об'єм холодильника.

Отримана інформація про значення питомого індикатора δ в залежності від витрати робочого тіла представлена на рис 15.

У розділі наведено результати розрахунку індексу енергетичної ефективності для розглянутих робочих тіл при різних значеннях масової витрати $I = E_{факт} / E_{станд}$, де $E_{факт}$ - фактичне річне споживання електроенергії холодильним приладом, кВт·рік; $E_{станд}$ - стандартне річне споживання електроенергії для холодильного приладу даного типу, який визначається розрахунковим шляхом. Результати розрахунку представлені на рис 16.

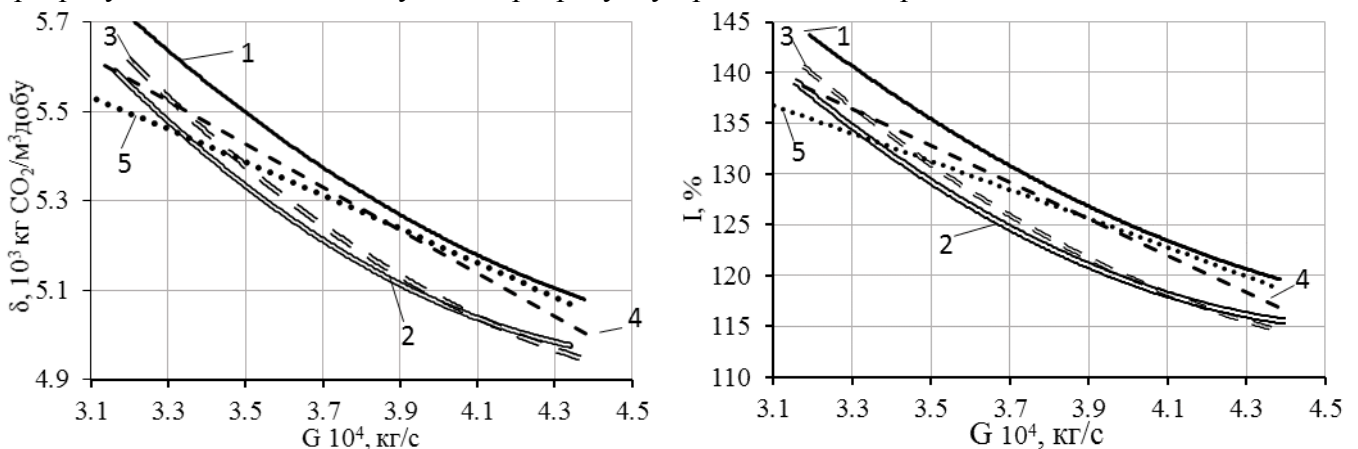


Рис. 15 - Залежність питомої емісії парникових газів на одиницю об'єму побутового холодильного приладу δ від витрати робочого тіла: 1 — $R600a/мастило$; 2 — $R600a/мастило/НЧ TiO_2$ ($w^{нч}_{брутто}=0,32\% \text{ мас.}$); 3 — $R600a/мастило/НЧ TiO_2$ ($w^{нч}_{брутто}=0,66\% \text{ мас.}$); 4 — $R600a/мастило/НЧ Al_2O_3$ ($w^{нч}_{брутто}=0,05\% \text{ мас.}$); 5 — $R600a/мастило/НЧ Al_2O_3$ ($w^{нч}_{брутто}=0,35\% \text{ мас.}$)

Рис. 16 - Залежність індексу енергетичної ефективності побутового холодильника від витрати робочого тіла: 1 — $R600a/мастило$; 2 — $R600a/мастило/НЧ TiO_2$ ($w^{нч}_{брутто}=0,32\% \text{ мас.}$); 3 — $R600a/мастило/НЧ TiO_2$ ($w^{нч}_{брутто}=0,66\% \text{ мас.}$); 4 — $R600a/мастило/НЧ Al_2O_3$ ($w^{нч}_{брутто}=0,05\% \text{ мас.}$); 5 — $R600a/мастило/НЧ Al_2O_3$ ($w^{нч}_{брутто}=0,35\% \text{ мас.}$)

З наведених на рис 16 даних можна зробити висновок про зменшення індексу енергетичної ефективності при використанні в розглянутому побутовому холодильнику нанохолодоагентів, що говорить про підвищення його класу енергетичної ефективності. Причому як при малих, так і при великих витратах холодоагенту, домішки наночасток TiO_2 у робочому тілі призводять до значнішого зменшення індексу енергетичної ефективності побутового холодильного приладу, ніж домішки наночасток Al_2O_3 . Таким чином, проведений аналіз показує, що додавання наночасток в робоче тіло може призвести до підвищення класу енергетичної ефективності побутового приладу, що має велике практичне значення.

ВИСНОВКИ ТА РЕЗУЛЬТАТИ

Проблема впровадження нанотехнологій в холодильному обладнанні аж до теперішнього часу залишається недостатньо вивченою. Основна причина такої ситуації полягає в складності врахування численних і позитивних і негативних факторів впливу наночасток на показники ефективності компресорних систем.

У представленому дослідженні зроблено спробу комплексного врахування впливу домішок наночасток як на теплофізичні властивості робочого тіла (розчини холодоагенту $R600a$ в мінеральному мастилі), так і на показники ефективності компресорної системи і локальні коефіцієнти тепловіддачі при кипінні розчинів $R600a/мінеральне \text{ мастило/наночастки}$ (TiO_2 і Al_2O_3). За результатами проведеного дослідження можна сформулювати такі висновки.

1. Показано, що домішки наночасток Al_2O_3 і TiO_2 в розчинах $R600a/мастило$ сприяють зниженню поверхневого натягу і збільшенню тиску насиченої пари та в'язкості, зростанню псевдокритичних параметрів РХМ. Кількісно цей ефект залежить як від концентрації холодоагенту в РХМ, так і від температури. У даній роботі вперше показано, що модель SP-QSPR може використовуватись для прогнозування теплофізичних властивостей наноРХМ в широких діапазонах параметрів стану з використанням мінімального об'єму емпіричної інформації. Проведені дослідження підтверджують наявність раніше встановленого зв'язку між змінами поверхневого натягу і тиску насиченої пари не тільки РХМ, але й наноРХМ.

2. Застосування робочих тіл з домішками наночасток Al_2O_3 і TiO_2 сприяє підвищенню показників ефективності компресорної системи (холодопродуктивності й холодильного коефіцієнта). Збільшення показників ефективності компресорної системи залежить як від типу і концентрацій наночасток, так і від масової витрати робочого тіла. Так, домішки наночасток TiO_2 з брутто концентрацією в РХМ 0,32 мас.% вносять максимальний вклад при високих витратах робочого тіла, при цьому холодильний коефіцієнт зростає на 5,4%. А при малих витратах робочого тіла максимальне збільшення холодильного коефіцієнта становить 3,2%. Найзначніший вклад у збільшення холодильного коефіцієнта вносять наночастки Al_2O_3 при малих витратах робочого тіла (збільшення становить 15,3% при брутто концентрації наночасток 0,35 мас.%).

3. Домішки наночастинок в робочому тілі впливають на локальні коефіцієнти тепловіддачі при його кипінні як за рахунок утворення додаткових центрів пароутворення, так і за рахунок впливу на теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило при високих ступенях сухості робочого тіла. Зміна коефіцієнта тепловіддачі від домішок наночастинок залежить як від ступеня сухості робочого тіла у випарнику, так і масової витрати робочого тіла. При цьому середній по довжині випарника коефіцієнт тепловіддачі для робочого тіла РХМ/мінеральне мастило/ Al_2O_3 (при концентрації наночастинок в робочому тілі приблизно 0,0016 мас.%) збільшується приблизно на 9% порівняно з робочим тілом РХМ/мінеральне мастило. Показано, що ефект впливу наночастинок на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні розчинів холодоагент/мастило залежить від матеріалу наночастинок.

4. Запропонована модель розрахунку коефіцієнта тепловіддачі дозволяє адекватно описувати процеси кипіння наноРХМ з похибкою не вище 20% при коректному врахуванні впливу наночастинок на теплофізичні властивості робочого тіла.

5. Застосований метод розрахунку повної еквівалентної емісії парникових газів і запропоновані в роботі нові екоіндикатори дозволяють сформулювати висновок про доцільність застосування нанотехнологій у побутовій холодильній техніці. Показники еколого-енергетичної ефективності залежать від фізичної природи наночастинок, їх концентрації та від масової витрати робочого тіла.

6. Домішки наночастинок в робочому тілі дозволяють підвищити холодопродуктивність побутового холодильного приладу, а, отже, зменшити коефіцієнт робочого часу побутового холодильного приладу і підвищити клас енергетичної ефективності холодильників, які випускаються в Україні. При використанні нанотехнологій при виробництві ПХП питомі витрати енергії на виробництво одиниці холоду при температурі кипіння мінус 18°C значно знижуються (до 6% при витраті робочого тіла 0,00032 кг/с).

7. Наведені в дисертації нові результати про вплив наночастинок на показники ефективності компресорних систем і теплообмін при кипінні робочого тіла в трубі вказують на перспективність застосування нанотехнологій у холодильному обладнанні. Подальші дослідження в цьому перспективному напрямку сприятимуть підвищенню еколого-енергетичної ефективності застосовуваного холодильного обладнання.

ОСНОВНІ ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Никулин А.Г. Экспериментальная установка для исследования процессов кипения чистых жидкостей и растворов в свободном объеме [Текст] / А.Г. Никулин, Ю.В. Семенюк, Н.Н. Лукьянов // Холодильна техніка і технологія, №4 (144), 2013.- С. 12-18. *Особистий внесок: проведення експериментів, обробка та аналіз експериментальних даних.*

2. Железный В. П. Экспериментальное исследование поверхностного натяжения и давления насыщенных паров растворов хладагент/наномасло [Текст] / В. П. Железный, Н. Н. Лукьянов, С. С. Рябикин, А. Г. Никулин, М. П. Полюганич, Д. А. Ивченко // Вестник Казанского технологического университета. – Казань. – 2014. – Т.17, №20. – С. 106-108. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів публікації.*

3. Железный В.П. Комплексное экспериментальное исследование теплофизических свойств нанодисперсий изопропиловый спирт/ Al_2O_3 на линии кипения [Текст] / В.П. Железный, В.З. Геллер, Н.А. Шимчук, Н. Н. Лукьянов, А. Г. Никулин // Вестник казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17, № 21. – С. 97-99.

4. Железный В.П. Методические особенности экспериментального изучения процессов кипения нанодисперсий в свободном объеме [Текст] / В.П. Железный, Ю.В. Семенюк, А.Г.

Никулин, Н.Н. Лукьянов // Вестник Международной академии холода. – 2014. – № 3. – С 4-9. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних.*

5 Железный В. П. Методические особенности изучения процессов кипения в свободном объеме наноплюида изопропанол/ Al_2O_3 [Текст] / В. П. Железный, Ю. В. Семенюк, В. Я. Гоцульский, А. Г. Никулин, Н. А. Шимчук, Н. Н. Лукьянов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2014. – №2/5(68). – С. 39-45. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних.*

6. Nikulin A. Effect of nanoparticles on pool boiling characteristics [Text] / Artem Nikulin, Andrii Melnyk, Yury Semenyuk, Mykola Lukianov, Vitaly Zhelezny // Int. Symp. On Convective Heat and Mass Transfer. June 8 – 13, 2014, Turkey. – CONV-14 – №244. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних.*

7. Лукьянов Н. Н. Исследование перспектив применения нанохладагентов с целью повышения эколого-энергетической эффективности оборудования [Текст] / Н. Н. Лукьянов, О. Я. Хлиева, В. П. Железный, Ю. В. Семенюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №3/5(75). – С. 32-40. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів публікації.*

8. Железный В.П. Экспериментальное и расчетное исследование влияния наночастиц Al_2O_3 на теплофизические свойства растворов хладагента R600a с компрессорным маслом [Текст] / В.П. Железный, Н.Н. Лукьянов, О.Я. Хлиева, А.С. Никулина // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – №51 (4). – С. 82-91. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних.*

9. Chen G. An experimental and theoretical investigation of the compressor oil and nanoparticles admixtures influence on the performance of the compressor systems [Text] / Guangming Chen, Vitaly Zhelezny, Kostyantyn Shestopalov, Nikolay Lukianov, Maksim Polyuganich // Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration 2015, August 16 - 22 - Yokohama, Japan. – ID:318. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів публікації.*

10. Lukianov M. An influence of the nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 admixtures on thermophysical properties and flow boiling heat transfer coefficient of the R600a/mineral oil solutions [Text] / Mykola Lukianov, Andrii Melnyk, Olga Khliyeva, Vitaly Zhelezny, Maksim Polyuganich // Proceedings of the Eight International Symposium On Turbulence, Heat and Mass Transfer 2015. – 15-18 September 2015, Bosnia and Herzegovina, Sarajevo. – P. 697-700. *Особистий внесок: виконання експериментальних досліджень, обробка й аналіз експериментальних даних, підготовка матеріалів публікації.*

АНОТАЦІЯ

Лук'янов М.М. **Вивчення перспектив застосування нанотехнологій у побутовій холодильній техніці (теплофізичний експеримент, моделювання, еколого-енергетичний аналіз).** - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.06 - Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, 2015

Дисертація присвячена експериментальному і теоретичному вивченню впливу домішок наночастинок на: теплофізичні властивості розчинів холодоагент/мастило; показники ефективності компресорної системи; інтенсивність процесів кипіння робочого тіла в горизонтальній трубі. У дисертації проведено еколого-енергетичний аналіз доцільності використання нанотехнологій у побутовій холодильній техніці.

У роботі наведено отримані експериментальні дані про вплив домішок наночастинок TiO_2 і Al_2O_3 на густину, тиск насиченої пари, поверхневий натяг і динамічну в'язкість розчинів холодоагент/мастило. Показано, що домішки наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 у розчинах R600a/мастило сприяють зниженню поверхневого натягу і збільшенню тиску насиченої пари та в'язкості, зростанню псевдокритичних параметрів розчинів R600a/мастило.

Експериментальні дослідження показують, що домішки наночастинок Al_2O_3 і TiO_2 у робочому тілі сприяють підвищенню холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта. Найбільший вклад у збільшення холодильного коефіцієнта вносять наночастинок Al_2O_3 при малих витратах робочого тіла.

Експериментальне та теоретичне дослідження локальних коефіцієнтів тепловіддачі при кипінні робочого тіла з домішками наночастинок Al_2O_3 показало, що середній по довжині випарника коефіцієнт тепловіддачі для робочого тіла РХМ/мінеральне мастило/наночастинок Al_2O_3 збільшується приблизно на 9% порівняно з робочому тілом РХМ/мінеральне мастило.

Застосований у дисертації метод розрахунку повної еквівалентної емісії парникових газів і запропоновані в роботі нові екоіндикатори дозволяють сформулювати висновок про доцільність застосування нанотехнологій у побутовій холодильній техніці.

Ключові слова: наночастинок, нанофлюїд, розчини холодоагент/мастило, теплофізичні властивості, ефективність компресорної системи, локальний коефіцієнт тепловіддачі, повна еквівалентна емісія парникових газів, екоіндикатор.

АННОТАЦИЯ

Лукьянов Н.Н. **Изучение перспектив применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике (теплофизический эксперимент, моделирование, эколого-энергетический анализ).** – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.14.06 – Техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, 2015 г.

Диссертация посвящена экспериментальному и теоретическому изучению влияния примесей наночастиц на: теплофизические свойства растворов хладагент/масло; показатели эффективности компрессорной системы; интенсивность процессов кипения рабочего тела в горизонтальной трубе. Кроме того, в диссертации приведены результаты эколого-энергетического анализа целесообразности использования нанотехнологий в бытовой холодильной технике.

В работе приведены экспериментальные данные о влиянии примесей наночастиц TiO_2 и Al_2O_3 на плотность, давление насыщенных паров, поверхностное натяжение, динамическую вязкость растворов хладагент/масло. Для описания и прогнозирования теплофизических свойств многокомпонентных нанофлюидов впервые применена методика SP-QSPR (Scaling Principles - Quantitative Structure-Property Relationship). Показано, что примеси наночастиц Al_2O_3 и TiO_2 в растворах R600a/масло способствуют понижению поверхностного натяжения и увеличению давления насыщенных паров и вязкости, возрастанию псевдокритических параметров растворов R600a/масло. Количественные эффекты влияния наночастиц на свойства объектов исследования зависят как от концентрации примесей компрессорного масла и наночастиц в хладагенте, их химического состава, так и от температуры.

Проведенные экспериментальные исследования указывают, что примеси наночастиц Al_2O_3 и TiO_2 способствуют повышению холодопроизводительности и холодильного коэффициента. Увеличение показателей эффективности компрессорной системы зависит как от типа и концентраций наночастиц, так и от массового расхода рабочего тела. Наибольший вклад в

увеличение холодильного коэффициента вносят наночастицы Al_2O_3 при малых расходах рабочего тела (увеличение составляет 15,3 % при брутто концентрации наночастиц в компрессоре 0,35 мас. %).

Экспериментальное и теоретическое исследование локальных коэффициентов теплоотдачи при кипении рабочих с примесями наночастиц Al_2O_3 способствует интенсификации теплообмена как за счет образования дополнительных центров парообразования, так и за счет влияния наночастиц на теплофизические свойства растворов хладагент/масло. Кроме того, изменение локального коэффициента теплоотдачи от примесей наночастиц зависит как от степени сухости рабочего тела в испарителе, так и массового расхода рабочего тела. Показано, что средний по длине испарителя коэффициент теплоотдачи для рабочего тела РХМ/минеральное масло/наночастицы Al_2O_3 увеличивается примерно на 9 % по сравнению с рабочем телом РХМ/минеральное масло (при концентрации наночастиц в рабочем теле примерно 0,0016 мас. %).

Применённый в диссертации метод расчета полной эквивалентной эмиссии парниковых газов и предложенные в работе новые экоиндикаторы позволяют сформулировать вывод о целесообразности применения нанотехнологий в бытовой холодильной технике.

Ключевые слова: наночастицы, нанофлюид, растворы хладагент/масло, теплофизические свойства, эффективность компрессорной системы, локальный коэффициент теплоотдачи, полная эквивалентная эмиссия парниковых газов, экоиндикатор.

ABSTRACT

Lukianov M.M. **The study of application prospects of nanotechnology in domestic refrigeration equipment (thermophysical experiment, modeling, ecological and energy analysis).** - Manuscript.

Thesis for Candidate of science (Engineering) degree by specialty 05.14.06 – «Engineering thermophysics and industrial Heat-and-Power engineering». – Odessa National Academy of Food Technologies, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2015.

The thesis is devoted to experimental and theoretical study of an influence of the nanoparticles admixtures on: thermophysical properties of the refrigerant/oil solutions (ROS); performance efficiency of the compressor system; intensity of the flow boiling. The thesis also presents the results of ecological and energy analysis and application feasibility of the nanotechnology in domestic refrigeration equipment.

The thesis reports experimental data on the influence of the Al_2O_3 and TiO_2 nanoparticles admixtures on the density, vapor pressure, surface tension, dynamic viscosity of the refrigerant/oil solutions. It is shown that the nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 admixtures in the R600a/oil solution contribute to decreasing the surface tension and increasing the saturated vapor pressure, viscosity and pseudocritical parameters of the R600a/oil solutions.

Experimental studies indicate that the nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 admixtures enhance the cooling capacity and coefficient of performance. The largest contribution to increasing the coefficient of performance makes the nanoparticles Al_2O_3 at low flow rates of the working fluid.

The thesis presents the results of experimental and theoretical study of the local heat transfer coefficients at boiling of the working fluids with nanoparticles Al_2O_3 and TiO_2 . The study demonstrated that using ROS/mineral oil/ Al_2O_3 working fluid increases the average of the heat transfer coefficient approximately to 9% compared to working fluid ROS/mineral oil.

The method of calculating the total equivalent emission of greenhouse gases and new ecological indicators are proposed in the thesis. It makes possible to conclude about expediency of using the nanotechnology in domestic refrigeration equipment.

Keywords: nanoparticles, nanofluid, refrigerant/oil solutions, thermophysical properties, efficiency of the compressor system, local heat transfer coefficient, total equivalent emission of greenhouse gases, ecological indicator.