

Автореферат
к 90

Кулешов Д. К.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ



КУЛЕШОВ ДЕНИС КОСТЯНТИНОВИЧ

УДК 621.52

**ВПЛИВ ДОБАВОК НАНОЧАСТОК ДО ХОЛОДОАГЕНТІВ
НА ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕФЕКТИВНОСТІ
ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка,
системи кондиціювання

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Одеса – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в інституті холоду, кріогенних технологій та екоенергетики імені В.С. Мартиновського Одеської національної академії харчових технологій Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник:

доктор технічних наук, професор
Мазур Віктор Олександрович,
завідувач кафедри термодинаміки та
відновлюваної енергетики Одеської
національної академії харчових
технологій МОН України

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Нікульшин Володимир Русланович,
завідувач кафедри теоретичної, загальної
та нетрадиційної енергетики Одеського
національного політехнічного
університету МОН України

кандидат фіз.-мат. наук, доцент
Гоцульський Володимир Якович,
доцент кафедри загальної та хімічної
фізики Одеського національного
університету імені І.І. Мечникова МОН
України

Читання дисертації відбудеться « 20 » квітня 2015 р. о 14³⁰ в ауд. 108 на
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.088.03 при ОНАХТ за адресою: вул.
1/3, м. Одеса, Україна, 65082.

Вашу роботу можна ознайомитись у бібліотеці Інституту холоду,
екоенергетики імені В.С. Мартиновського Одеської
національної академії харчових технологій за адресою: вул. Дворянська, 1/3, м.

20 10 18 3
24 12 16 4 6
березня 2015 г.

В.І. Мілованов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Холодильна техніка споживає приблизно 20% вироблюваної електроенергії. Тому підвищення енергетичної ефективності є пріоритетним напрямком у створенні нового покоління холодильного обладнання. Цієї мети можна досягти шляхом реалізації трьох технологічних напрямків: конструктивного вдосконалення елементів холодильного обладнання; використання нових альтернативних робочих тіл, для яких термодинамічна ефективність холодильних циклів вище в порівнянні з традиційними робочими тілами; впровадження нанотехнологій при створенні нових альтернативних робочих тіл і теплоносіїв на базі вже застосованих в холодильній техніці речовин.

У ряді робіт, опублікованих в літературі, явище аномального росту коефіцієнта теплопровідності в наносупензіях було продемонстровано для різних наночасток. Незважаючи на те, що в літературі запропоновані різні фізичні механізми і моделі, які пояснюють підвищення коефіцієнта теплопровідності, зараз відсутня єдина точка зору на процеси переносу теплоти в нанофлюїдних розчинах.

Дослідження показують, що домішки наночасток сприяють збільшенню в'язкості масел і теплоносіїв. Збільшення в'язкості холодоагентів, масел і розчинів холодоагент/масло виробляє як негативний, так і позитивний вплив на показники енергетичної ефективності компресорної системи. Негативний ефект обумовлений збільшенням витрат енергії на тертя в компресорі. Позитивний ефект може бути досягнутий за рахунок використання в компресорах масел з меншою в'язкістю, що сприятиме кращому виносу масла з випарника і інтенсифікації теплообміну при збереженні коефіцієнта подачі. Результати досліджень різних авторів показують, що присутність наночасток у холодоагенті сприяє інтенсифікації процесів теплообміну при кипінні.

Теоретичні оцінки показують, що збільшення коефіцієнта теплопровідності холодоагенту на 20% за рахунок добавок наночасток веде до збільшення холодильного коефіцієнта майже на 10%. Ця обставина викликає великий науковий інтерес до пошуку оптимальних композицій наночасток у хладагентах IV покоління, що поєднують високу енергетичну ефективність з низьким потенціалом глобального потепління. Загальна фундаментальна проблема, на розв'язання якої спрямована дисертаційна робота - створення нового покоління технологічних середовищ із заданими властивостями на базі розчинів наночасток в традиційних робочих тілах і теплоносіях холодильних систем.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до низки законодавчих актів: «Основні положення енергетичної стратегії України на період до 2030 року», затверджених Кабінетом Міністрів України 15.03.06; Закон України «Про енергозбереження», затверджений постановою Верховної Ради України №79/94 від 01.07.94. Робота пов'язана з науковою тематикою інституту холоду, кріотехнологій і екоенергетики ім. В.С. Мартиновського Одеської національної

академії харчових технологій. Ряд результатів був отриманий при виконанні держбюджетної тематики № Д-2011-6 «Удосконалення холодильної і торговельної техніки з метою зниження енергоспоживання, з підвищенням рівня технічної і екологічної безпеки» Донецького національного університету економіки і торгівлі імені М. Туган-Барановського. В перерахованих наукових дослідженнях автор дисертаційної роботи брав участь як виконавець.

Мета і задачі дослідження. Мета дослідження полягає в теоретичному обґрунтуванні та експериментальній верифікації впливу наночастинок на підвищення енергетичної ефективності холодильних систем, які використовують холодоагенти з низьким потенціалом глобального потепління.

Для досягнення наміченої мети були поставлені та вирішені наступні *основні завдання*:

1. Розробити принципи відбору структурованих наноматеріалів у якості добавок до робочих речовин парокompресійних холодильних циклів на основі методів нечіткого термoeкономічного аналізу;
2. Розробити методи оцінки теплофізичних властивостей холодоагентів з низьким потенціалом глобального потепління, що враховують зміщення критичної точки і прикордонних кривих при добавках різних наноструктурованих матеріалів;
3. Побудувати моделі рівнянь стану холодоагентів R134a і R600a з добавками наночастинок генеалогічного дерева графена (нанотрубки, фулерени і хлоп'я графена) і оксидів металів;
4. Проаналізувати вплив добавок наночастинок на температурні поля в камерах побутового холодильника та удосконалити методи оцінки енергетичної ефективності циклів парокompресійних холодильних машин на основі нанохлагентів;
5. Провести експериментальні дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик холодильних машин, що працюють на ізобутані (R600a) з добавкою наночастинок (TiO_2).

Об'єктами дослідження є холодоагенти з низьким потенціалом глобального потепління, модифіковані добавками наночастинок генеалогічного дерева графена і оксидів металів.

Предмет дослідження – вплив добавок наноструктурованих матеріалів на інтенсифікацію процесів теплопередачі при течії робочих тіл і теплоносіїв, які забезпечують підвищення енергетичної ефективності та екологічної безпеки в холодильних системах.

Методи досліджень – математичне моделювання процесів теплопередачі, побудова моделей рівнянь стану; натурні експерименти, порівняння і аналіз результатів чисельного моделювання з результатами експериментальних досліджень.

Наукова новизна одержаних результатів. У роботі вперше отримані наступні нові наукові результати:

- на основі нечіткого термoeкономічного аналізу удосконалено метод відбору структурованих наноматеріалів, використовуваних у якості добавок до робочих речовин парокompресійних холодильних циклів;

- розроблено підхід до визначення теплофізичних властивостей холодоагентів з низьким потенціалом глобального потепління, що враховує зміщення критичної точки і прикордонних кривих при добавках різних наноструктурованих матеріалів;

- на основі теорії подібності побудовані моделі фундаментальних рівнянь стану холодоагентів R134a і R600a з малими концентраціями наночастинок генеалогічного дерева графена (вуглецеві нанотрубки, фулерени, хлоп'я графена) і оксидів металів;

- показано, що вплив добавок наночастинок на температурні поля в камерах побутового холодильника підвищує енергетичну ефективність циклів парокompресійних холодильних машин в порівнянні з традиційними хладагентами;

- проведені експериментальні дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик холодильних машин, що працюють на ізобутані (R600a) з добавкою наночастинок (TiO_2), які підтвердили 5% зниження енергоспоживання побутового холодильника НОРД.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій доводяться

- аналітичними методами, що використовують побудову математичних моделей, для опису термодинамічної поверхні холодоагентів з домішками наночастинок з використанням сучасного апарату обчислювальної математики та перевіркою адекватності теоретичних моделей і експериментальних даних;
- великим об'ємом отриманих експериментальних даних і довідкових матеріалів, що відтворюють на математичних моделях та реальних холодильних системах теплові характеристики процесів в умовах, наближених до практичних ситуацій.

Достовірність запропонованих методів розрахунку базується на зіставленні з власними експериментальними даними і результатами досліджень інших авторів.

Наукове значення роботи полягає в теоретичному обґрунтуванні та експериментальній верифікації впливу наночастинок на підвищення енергетичної ефективності холодильних систем, які використовують традиційні холодоагенти з низьким потенціалом глобального потепління. У роботі приведена раніше невідома інформація про рівняння стану та термодинамічні властивості базисних робочих тіл холодильних агрегатів, що використовують R134a і R600a з домішками наночастинок генеалогічного дерева графена, що дозволяє оцінити принципові можливості використання нових робочих середовищ у холодильній техніці.

Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи полягає в наступному.

Запропоновані в дисертаційній роботі підходи до створення практичних методів розрахунку термодинамічних властивостей холодоагентів з домішками наночастинок є платформою для вибору нових робочих тіл і теплоносіїв для розробки і проектування нових холодильних систем і дозволяють прогнозувати їх енергетичну ефективність. Проведено стендові випробування

експериментального зразка побутового холодильника, працюючого на ізобутані з добавками наночасток TiO_2 , результатом яких є протокол випробувань № 14/02 / 017-001 від 24.03.14.

Особливе практичне значення мають термодинамічні дані для принципово нового класу екологічно безпечних речовин - нанофлюїдів, що сприятиме реалізації міжнародних зобов'язань України в рамках Монреальського та Кіотського протоколів.

Розроблені підходи скорочують обсяг і час дорогих експериментальних досліджень з вибору перспективних нанохолодоагентів, для яких відсутня інформація про теплофізичні властивості в широкому діапазоні параметрів стану, розширюють можливості існуючих баз даних.

Особистий внесок здобувача підтверджується науковими публікаціями, в яких відображаються основні ідеї і положення теоретичних розробок і експериментальних досліджень. Особисто автором проведено аналіз стану проблеми та сформульовані основні завдання роботи. Автор взяв активну участь у випробуваннях всіх холодильних систем з робочими тілами R600a R134a з домішками наночасток TiO_2 та вуглецевих нанотрубок, а також в проведенні всіх наукових досліджень. Безпосередньо автором проведена розробка і запуск системи налаштування і запуск всіх вузлів домашнього холодильника НОРД, підготовка наномасил.

У роботах, виконаних спільно з іншими дослідниками, здобувачу належать вибір об'єктів дослідження, систематизація експериментальних даних про властивості робочих середовищ; проведення експериментальних досліджень і перевірка адекватності запропонованих моделей з дослідними даними.

Низка наукових результатів є результатом співробітництва з д.т.н., проф. Горіним О.М. – питання практичного застосування нанохолодоагентів; д.т.н., проф. Железним В.П. – приготування наномасил; д.т.н., проф. Мазуром В.О. – моделювання термодинамічних властивостей нанохолодоагентів; д.т.н., проф. Хмельнюком М.Г. – випробування компресорів; к.т.н., доц. Красновським І.Н. – стендові випробування побутового холодильника НОРД.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідалися на міжнародних конференціях: 10th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Delft, The Netherlands, 2012; 7th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems New results, Directions and Opportunities. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, Catalonia (Spain), 2013; Обладнання та технології харчових виробництв, Донецьк, 2012; Сучасні проблеми холодної техніки і технології, Одеса, 2013; 6-th International Conference «Physics of Liquid Matter: Modern Problems» (Київ, Україна, 2014); Щорічних (2012-2014 рр.) наукових конференціях викладачів і аспірантів ДонНУЕТ.

Публікації. Основний зміст дисертації приведений у 5 статтях, опублікованих у фахових журналах, які відповідають вимогам МОН України. 4 публікації представлено у вигляді реферованих доповідей в працях міжнародних конференцій.

Об'єм і структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків, списку використаної літератури, що включає 148 джерел і додатків. У ній міститься 126 сторінок основного тексту, 10 таблиць і 46 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання досліджень; визначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, конкретний особистий внесок автора, відомості про апробацію результатів дисертації та публікації.

Перший розділ дисертації присвячений дослідженню термодинамічної поведінки холодоагентів з добавками структурованих наноматеріалів. Розглянуто принципи відбору структурованих наноматеріалів у якості добавок до робочих речовин парокомпресійних холодильних циклів на основі концепції сталого розвитку холодної техніки. Показано, що застосування даної концепції пов'язано з виникненням невизначеностей різної природи в прийнятті остаточного рішення. З точки зору концепції сталого розвитку узагальнений векторний критерій K включає можливі локальні критерії K_i як компоненти, компроміс між якими відображає збалансованість інженерних рішень для проектованої холодної системи. Найбільш раціональний підхід до пошуку нового холодоагенту для сучасних холодильних систем, в якому можна досягти компромісу між високою енергетичною ефективністю, відсутністю займистості і екологічною безпекою - це застосування добавок структурованих наноматеріалів, які компенсують недоліки чистих речовин. В роботі наведені приклади успішного застосування нанофлюїдів для вирішення практичних задач. Порівняно з традиційними робочими тілами і теплоносіями нанофлюїди володіють наступними перевагами:

- наявність розвиненої поверхні, яка сприяє інтенсивнішому теплопереносу між частинками і рідиною;
- зменшена потужність прокачування рідини при однакових параметрах теплопередачі;
- більш низьке забруднення каналів порівняно з традиційними суспензіями, що сприяє зменшенню габаритів систем;
- можливість регулювання теплофізичних властивостей, таких як теплопровідність і поверхневе змочування, за рахунок варіювання концентрації наночасток.

В якості схеми компромісу використана методологія перетину нечітких множин Белмана - Заде, коли кожен з локальних критеріїв відображається власною функцією приналежності для заданого класу структурованих наноматеріалів.

$$\mu_K(X) = \mu_{K1}(X) \cap \mu_{K2}(X) \cap \mu_{K3}(X) \dots \cap \mu_{Kn}(X), \quad (1)$$

Функція приналежності локальних критеріїв призводить функції різного фізичного сенсу і різних розмірностей до інтервалу $[0 \dots 1]$.

$$\mu_{K_i}(X) = \begin{cases} 0, & \text{if } K_i(X) > K_i^{\max} \\ \frac{K_i^{\max} - K_i}{K_i^{\max} - K_i^{\min}}, & \text{if } K_i^{\min} < K_i \leq K_i^{\max}, \\ 1, & \text{if } K_i(X) \leq K_i^{\min} \end{cases} \quad (2)$$

де $K_i^{\min}$ и $K_i^{\max}$ максимальні і мінімальні межі критеріїв.

Ключовими величинами, які визначають термодинамічну і фазову поведінку хладагентів є критична точка для чистих рідин і критичні лінії для бінарних сумішей. До цих пір ці сингулярні властивості для нанофлюїдів не були досліджені. Додавання наноструктурованих матеріалів змінює положення критичної точки чистих компонентів і, відповідно, змінює топологію фазової поведінки сумішей. Основна ідея полягає в дослідженні зсуву критичної точки в класичних рідинах під впливом добавок наноструктурованих матеріалів. Передбачається, що регулярна і сингулярна частини термодинамічної поверхні звичайної рідини і нанофлюїда збігаються у наведеній формі при малих об'ємних концентраціях наночастинок (менше 5%). В якості моделей рівнянь стану для побудови таблиць термодинамічних властивостей холодоагентів з добавками наночастинок обрані спрощені фундаментальні рівняння стану (Lemmon, Span, 2006).

Критична точка ідентифікує термодинамічну поведінку чистої речовини в широкій області параметрів стану. Додавання наночастинок призводить до зміщення лінії рівноваги рідина-пара. Для оцінки термодинамічної поведінки нанофлюїдів ми припускаємо, що рідини з малими добавками наночастинок задовольняють принципам відповідних станів. Звідси випливає, що регулярна і сингулярна частини термодинамічної поверхні базисної рідини і нанофлюїда збігаються у наведеній формі. Рівняння стану нанофлюїда визначається через масштабування змінних стану базисної рідини у формі:

$$Z = Z(\rho_{Cnf}/\rho, T/T_{Cnf}), \quad (3)$$

де Z - фактор стисливості, ρ_{Cnf} , T_{Cnf} - густина і температура нанофлюїда в критичній точці.

Густину нанофлюїда ρ_{nf} вираховували за загальноприйнятим лінійним співвідношенням між об'ємною концентрацією наночастинок ϕ , густиною наночастинок і базисної рідини ρ_{rf} :

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{rf} + \phi\rho_{np}. \quad (4)$$

Для знаходження параметрів критичної точки нанофлюїдів використовували модифікацію алгоритму, запропонованого в роботі (Nikitin, Mazur, 2012). Фундаментальні рівняння стану для базисних рідин використовували для генерації $P - \rho - T$ поверхні поблизу критичної точки з метою встановлення критичних індексів у скейлінговому законі:

$$\frac{\rho_c}{\rho_c} - 1 = N_1 \left(1 - \frac{T_c}{T_c}\right) \pm N_2 \left(1 - \frac{T_c}{T_c}\right)^{\beta} \quad (5)$$

Індекс « σ » відноситься до властивостей на лінії насичення, n_1 , n_2 і β – підгінні параметри. Передбачається, що рівняння (5) справедливе як для чистої речовини, так і для нанофлюїда. Застосування зазначеного рівняння базується на принципі ізоморфізму. Скейлінгові параметри, отримані з даних для чистої речовини, потім використовували для визначення критичних параметрів нанофлюїда. Наприклад, для вуглекислого газу в результаті розрахунків було знайдено, що положення критичної температури ($T_c = 304,13K$) зміщується на 0,1K в інтервалі об'ємних концентрацій вуглецевих нанотрубок, що не перевищують 5% ($T_{cnf} = 304,27K$). Точність роботи алгоритму перевіряли на передбаченні параметрів критичної точки деяких речовин (аміаку, ізобутану і толуолу). Обчислення показали відтворення даних з точністю стандартних довідкових даних.

Нижче в таблиці 1 наведені результати розрахунків зсуву параметрів критичної точки для холодильних агентів (R134a і R600a) з добавками вуглецевих нанотрубок. Зростання об'ємної концентрації веде до невеликого збільшення критичної температури нанофлюїдов. Більш значні зміни спостерігаються для критичної густини (рис. 1). Межі ліній рівноваги рідина - пара для чистих та допованих вуглецевими нанотрубками природних холодоагентів показані на рис. 2.

Таблиця 1
Зміщення критичної точки $\Delta T_c = T_{c,rf} - T_{c,nf}$ в природних і синтетичних холодоагентах з добавками вуглецевих нанотрубок

Речовина	T_c, K	P_c, MPa	$\rho_c, kg/m^3$	$\Delta T_c, K$ ($\phi = 1\%$)	$\Delta T_c, K$ ($\phi = 5\%$)
R134a	405.4	11.333	225	0.049	0.438
R600a	407.81	3.629	225.5	0.002	0.051

Особливості термодинамічної поверхні визначають положення критичної точки, яка на відміну від чистих речовин для нанофлюїдів досі не вивчена. Присутність наноструктурованих матеріалів змінює сингулярність на термодинамічній поверхні і змінює фазову поведінку речовин.

Додавання важких частинок (наприклад, TiO_2 , Fe_3O_4 та ін.), завдяки більш високій густині, змінює положення критичної точки в бік більш високих значень густини. Критичні параметри дають можливість обчислити термодинамічні властивості, виходячи з рівняння стану у формі (3). В дисертації на основі огляду літературних джерел розглянуто загальну картину реологічної поведінки нанофлюїдів з якої випливає, що в'язкість збільшується з ростом концентрації наночастинок, причому при низьких концентраціях нанофлюїди поведуться як ньютонівські рідини.

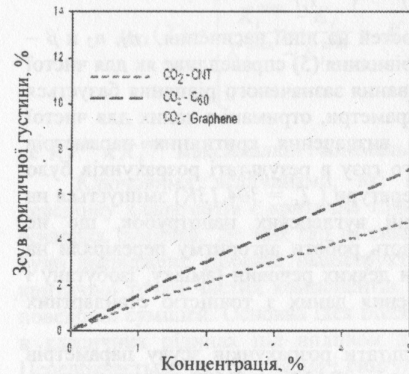


Рис. 1. Зміщення критичної точки R744 під впливом наночастинок генеалогічного дерева графену.

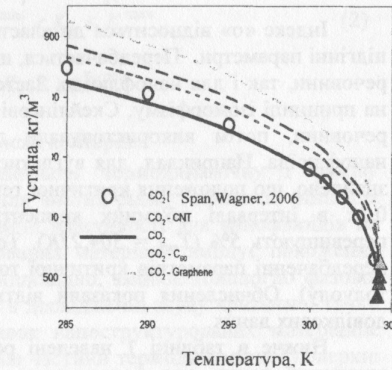


Рис. 2. Зміщення лінії рівноваги рідина - пара R744 під впливом наночастинок генеалогічного дерева графену.

Хоча й існують деякі експериментальні дані, які суперечать загальній картині, більшість дослідників вважають, що з ростом температури в'язкість зменшується. З приводу впливу розміру наночастинок, питання залишається дискусійним, що пов'язано з різними класами досліджених нанорідин і труднощами диспергування.

Найбільш імовірна причина росту холодопродуктивності - динамічна взаємодія між наночастиками і потоками холодоагенту. Наночастки поглинають флуктуації турбулентної кінетичної енергії і покращують характеристики теплопередачі. Очікувані втрати тиску виявляються незначними, що дає підстави розцінювати добавку наночастинок як позитивне явище.

У другому розділі розглянуті моделі енергетичної ефективності циклів холодильних систем. Основна мета даного розділу - оцінка добавок наноструктурованих матеріалів на зміну термодинамічних властивостей холодоагентів. Як приклад, для апробації метода визначення термодинамічних властивостей холодоагентів з наноструктурованими матеріалами розглянута суміш вуглекислого газу - R744 з наночастиками генеалогічного дерева графену.

Для розрахунку термодинамічних властивостей використовували моделі спрощених фундаментальних рівнянь стану NIST (Національний інститут стандартів і технологій) для 20 технічно важливих речовин, розвинені в роботі {Lemmon, Span, 2006}. Рівняння стану представлені у формі суперпозиції вільних енергій Гельмгольца для ідеального газу (індекс «0») і взаємодіючих часток (індекс «r»):

$$a(\rho, T) = a^0(\rho, T) + a^r(\rho, T) \quad (6)$$

В безрозмірній формі рівняння має наступний вигляд

$$\frac{a(\rho, T)}{RT} = \alpha^0(\rho, T) + \alpha^r(\rho, T), \quad (7)$$

де R - універсальна газова постійна, α - безрозмірна вільна енергія Гельмгольца, $\tau = T_c/T$ і $\delta = \rho/\rho_c$ - безрозмірні температура і густина. Вільна енергія Гельмгольца ідеального газу визначається через ентальпію (h) і ентропію (s):

$$a^0 = h^0 - RT - T_s^0 \quad (8)$$

Термодинамічні функції обчислюються на основі алгебраїчних перетворень та операції диференціювання за стандартними співвідношеннями для характеристичних функцій. Наприклад, тиск обчислюється за формулою:

$$Z = \frac{p}{\rho RT} = 1 - \delta \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \delta} \right)_T \quad (9)$$

Алгебраїчні вирази для розрахунку властивостей були запрограмовані в MATLAB. В роботі наведено таблиці термодинамічних властивостей для холодоагентів R744, R134a, R600a з добавками наночастинок генеалогічного дерева графену. Розрахунки показників енергетичної ефективності на основі класичних термодинамічних співвідношень виявилися недостатніми для коректної оцінки впливу наночастинок до холодоагентів. Основні фактори, що сприяють підвищенню енергетичної ефективності холодильної системи, - конкуренція і взаємодія між механізмами переносу імпульсу і енергії.

В роботі розглянуто вплив наночастинок на зміну температурних полів в камерах домашнього холодильника НОРД (рис. 3). Рівняння переносу та необхідні початкові, граничні та крайові умови для розрахунку температурних полів в камерах холодильника наведено в дисертації. Дискретизацію області обчислень проводили за допомогою програмного комплексу ANSYS. Рівняння балансу були представлені в дискретній формі методом кінцевих обсягів. Рішення результуючої скалярної системи рівнянь здійснювали стандартними методами для залежних змінних для осередку, причому для вирішення пов'язаної системи, яка зв'язує тиск і швидкість, використовували алгоритм Патанкара. Сумарний коефіцієнт теплопередачі k_0 враховував коефіцієнти теплопередачі за рахунок радіаційного і конвективного теплообміну з навколишнім середовищем, а також теплопровідність і товщину ізоляції. Для скорочення часу обчислень враховували вертикальну симетрію задачі. Перевірку надійності обчислень проводили з виконанням точності балансових співвідношень для маси і енергії в морозильній (менше 10^{-3} і 0.5%, відповідно) і холодильній (менше 10^{-3} і 0.6%) камерах. Типові результати моделювання полів швидкостей і температур наведені на рис. 3.

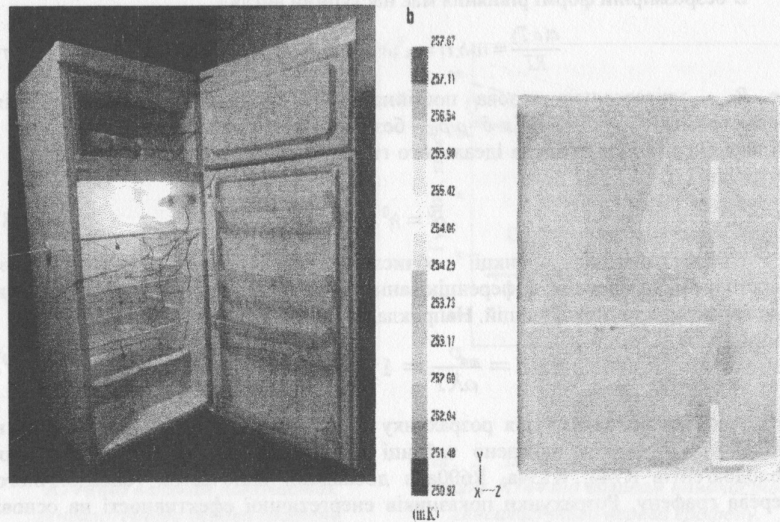


Рис. 3. Температурні поля на стінках холодильної камери

Температурне поле в морозильній камері практично рівномірне. Коливання температури уздовж осі не перевищують 0.5K, за винятком пристінкового простору, де спостерігаються великі градієнти через формування тонкого прикордонного шару внаслідок низького коефіцієнта теплопровідності повітря. Поблизу верхньої частини камер спостерігається максимальне підвищення температури, потім відбувається різке падіння температури на невеликих відстанях від стінок камери за межами теплового прикордонного шару. Вплив наночастинок моделювали зміною коефіцієнтів переносу нанохолодоагенту. При малих концентраціях наночастинок зміна температурних полів незначна і візуально результати розрахунків співпадають.

В третьому розділі розглянуті експериментальні дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик холодильних машин, що працюють на ізобутані (R600a) з додавкою наночастинок (TiO_2).

Для дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик роботи компресора на досліджуваних нанохолодагентах був спроектований калориметричний стенд, який працює по повному циклу одноступінчастої холодильної машини, з використанням калориметра з вторинним холодоагентом. Головний об'єкт дослідження - компресор Bock F2-NH3, що складається з 2 циліндрів, з діаметрами поршнів 45 мм, ходом поршнів 38 мм, частота обертання валу компресора складає близько 940 об / хв.

Тиск агента в системі та вторинного агента вимірювали манометрами класу точності 0,6. Температуру навколишнього повітря підтримували на рівні 20°C за допомогою припливно-витяжної вентиляції і регульованих нагрівачів.

Нанохолодоагент R600a/ TiO_2 був підготовлений на основі техніки приготування стійких нанорідин, рекомендованих в літературі. Наночастки були змішані з холодоагентом, а потім суміш витримували в ультразвуковому генераторі, щоб домогтися повного розчинення наночастинок в ізобутані. Наночастки TiO_2 володіли середнім діаметром часток близько 50 нм і масовою чистотою близько 99,5%. Маса наночастинок були виміряні на вагах AND GR-300 з похибкою, що не перевищує $5 \cdot 10^{-7}$ кг. Найвищою стабільністю володіли суміші R600a / TiO_2 з концентрацією TiO_2 0,1 і 0,5 г на 1 кг R600a. Ці концентрації були відібрані для подальшого дослідження.

Якість холодильної установки оцінювали наступними показниками: холодопродуктивністю холодильного компресора Q_0 (кВт), споживаною потужністю N_E (кВт) і холодильним коефіцієнтом $COP = Q_0 / N_E$. Випробування проводили відповідно до стандарту ISO 917-74 на експериментальному стенді, працюючому по повному циклу холодильної машини з використанням калориметра з вторинним холодоагентом на стороні всмоктування.

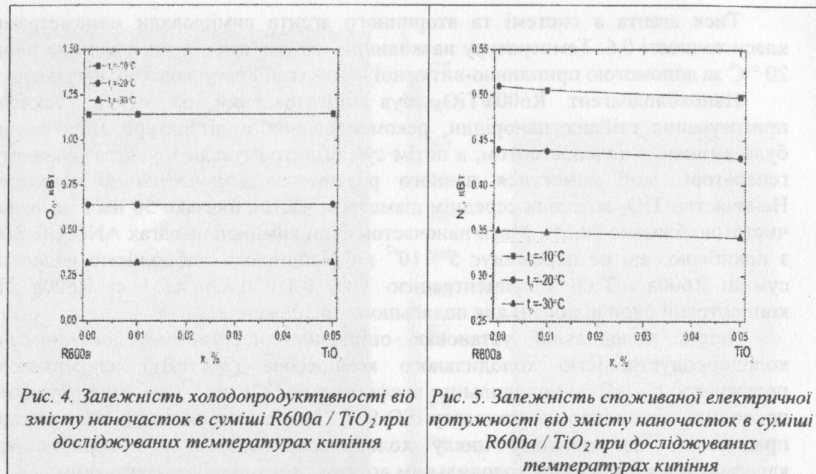
При випробуваннях тиск і температуру на лінії нагнітання (всмоктування) вимірювали в одній і тій же точці, що знаходиться на прямій ділянці трубопроводу на відстані 300 мм від фланця нагнітального (всмоктуючого) патрубку компресора. Холодопродуктивність машини і споживану потужність визначали у всьому діапазоні робочих температур охолоджуваного середовища.

Відносна похибка вимірювання тиску складала менше 2%. Чутливість потенціометра Щ-1516 дорівнює $0,4 \cdot 10^{-2}$ мВ, причому значення 0,25 К відповідає значенню термо-ЕРС $0,1 \cdot 10^{-1}$ мВ, що відповідає абсолютній похибки визначення температури $\sim 0,25 \cdot 10^{-2}$ К.

При дослідженні суміші R600a / TiO_2 маса заправки системи складала 0,584 кг в температурному режимі $t_k = +30^\circ\text{C}$, $t_0 = -10^\circ\text{C}$. Експеримент проводили на чистому R600a і сумішах масовою концентрацією наночастинок 0,01 і 0,05 мас. %. Дослідження проводили при температурах кипіння $t_0 = -10; -20; -30^\circ\text{C}$ і постійній температурі конденсації $t_k = +30^\circ\text{C}$. Перегрів агента на всмоктуванні в компресор становив 10°C . Переохолодження на виході з конденсатора складало $2,5^\circ\text{C}$.

На рис. 4 зображено графік залежності холодопродуктивності від масової концентрації наночастинок при досліджуваних температурах кипіння.

Як показав експеримент, споживана електрична потужність знижується незначно. Як видно з малюнка 6 максимальна споживана потужність установки, що працює на суміші R600a / TiO_2 , знижується на 1 - 1,5% залежно від температури кипіння.



Аналіз експериментальних даних показав, що додавання наночастинок призводить до незначного зростання холодопродуктивності (близько 0.5%), хоча такі малі значення цілком можна списати на погрішність вимірювань. У той же час холодильний коефіцієнт при додаванні наночастинок зростає на 3-4%.

При додаванні наночастинок температура нагнітання знижується на до 1° С залежно від температури кипіння. Що стосується температури кришки клапанів, то при додаванні наночастинок вдалося домогтися максимального зниження температури близько 1.2° С залежно від температури кипіння. Під час проведення експерименту були проведені вимірювання робочих температур компресора, а саме, температури нагнітання, температури кришки клапанів і температури масла в компресорі (температури картера компресора в нижній частині). Як показали отримані результати, при добавці в ізобутан наночастинок термонапруження компресора незначно, але знижується.

У четвертому розділі досліджується вплив добавок структурованих наноматеріалів на підвищення енергетичної ефективності побутового холодильника «НОРД».

У більшості публікацій відзначається позитивний вплив наночастинок на теплофізичні властивості теплоносіїв, робочих тіл та інтенсивність теплообміну в апаратах холодильного обладнання. Однак всі опубліковані дослідження носять фрагментарний характер і присвячені окремим аспектам вивчення властивостей нанофлюїдів, теплообміну і їх можливого застосування в практиці холодильного машинобудування. Труднощі формування складу нанохладагентів призводять до того, що результати різних авторів не узгоджуються між собою. Ці обставини гальмують процес впровадження нанотехнологій в холодильному машинобудуванні і роблять актуальними

дослідження з вибору нанохладагентів, що знижують енергоспоживання холодильних машин.

Якість холодильної установки оцінювали по енергоспоживанню. Випробування нанохладагента R600a / TiO₂ проводили в дослідному випробувальному Центрі Українського науково-дослідного проектно-конструкторського інституту побутового машинобудування на серійному зразку побутового холодильника - морозильника ДХ-271010 D 256/255/465 N / ST,2,0 A+ з компресором ОКВ 10-3-К. В якості мастил розглядали два варіанти: 1) мастило ХМН 9 (АЗМОЛ) без добавок наночастинок; 2) мастило ХМН 9 (АЗМОЛ) з добавками 0,01% і 0,05% наночастинок оксиду титану.

Загальні вимоги проведення випробувань відповідали стандарту ISO 1502/2009. Температуру навколишнього середовища для холодильників класів SN, N, ST і T при проведенні випробувань по енергоспоживанню підтримували на рівні $298 \pm 0,5$ K. Холодильник був встановлений на платформі при постійній кімнатній температурі. Кімнатна температура контролювалася двома незалежними нагрівачами і системою вентиляції. Швидкість потоку повітря у випробувальній камері не перевищувала 0,25 м/с. Споживану потужність побутового холодильника вимірювали за допомогою цифрового ваттметра з точністю 1,5%. Схема експериментального стенду наведена на рис. 6.

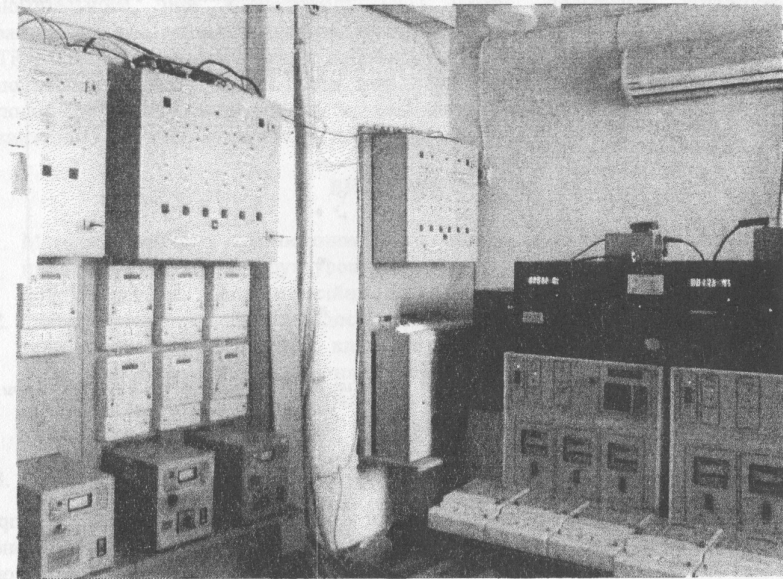


Рис. 6. Експериментальний стенд для вимірювання показників ефективності холодильних систем

Для побутового холодильника проводили експерименти по вимірах спожитої електричної енергії та потужності заморожування. Споживання енергії побутового холодильника вимірювали після того, як він безперервно пропрацював не менше доби і вийшов на робочий режим. При цьому температура в холодильному відділенні повинна бути не вище $+5^{\circ}\text{C}$, а температура заморожування - не вище -18°C . Продуктивність заморожування - це час зміни температури охолоджуваного об'єкта з $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$ до -18°C при заданих умовах випробувань.

Спочатку експеримент проводили на побутовому холодильнику на чистому ізобутані. Ці виміри були взяті за основу. Потім експеримент проводили з наночастками TiO_2 , в стійких концентраціях (0,01 і 0,05%) і отримані дані порівнювали з даними, отриманими на чистому ізобутані. Кількість холодоагенту, заправленого в систему, вимірювали ваговим методом з точністю $\pm 1\text{ г}$. Результати випробувань продемонстрували позитивний ефект від застосування наночастинок TiO_2 в побутовому холодильнику. Було зафіксовано зниження температури випаровування, що, в свою чергу призводить до зниження температур в камері схову (рис.7) і заморожування продуктів (рис.8).

Зниження температури було зафіксовано вже при концентрації наночастинок 0,01%, що пов'язано зі збільшенням коефіцієнта теплопередачі з боку холодоагенту у випарнику.

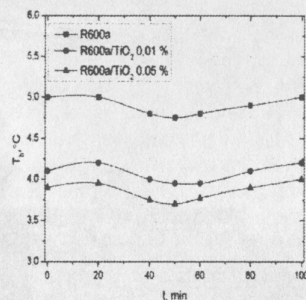


Рис. 7. Залежність температури в холодильній камері від часу роботи холодильника

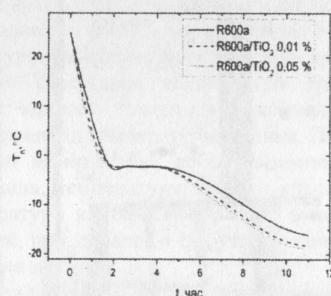


Рис. 8. - Потужність заморожування при роботі домашнього холодильника на чистому ізобутані і з додаванням наночастинок TiO_2 .

Швидкість заморожування системи з нанохолодоагентом вище, ніж при використанні в якості робочого тіла чистого ізобутану, оскільки, ймовірно, суміш R600a-TiO_2 має вищий коефіцієнт теплопровідності, у порівнянні з чистою робочою речовиною, а також поліпшені характеристики тертя масла.

Було проаналізовано вплив використання нанофлюїда R600a / TiO_2 на споживану потужність холодильника (табл. 2). Експерименти з визначення

споживаної потужності проводили не менше 3-х разів за одних і тих же умов з метою підвищення точності отриманих даних і виключення випадкових похибок. З таблиці 2 випливає, що енергоспоживання при застосуванні суміші R600a / TiO_2 нижче, ніж при використанні чистого ізобутану.

Таблиця 2

Експериментальні дані, отримані при вимірюванні споживаної потужності побутового холодильника-морозильника

Концентрація наночастинок (%)	Споживча потужність, (кВт*г/добу)	Час роботи компресора, %	Економія енергії, %
0	0,744	48,87	0
0,01	0,713	46,32	4,2
0,05	0,709	45,59	4,7

Енергоспоживання холодильника НОРД на суміші R600a-TiO_2 при концентрації наночастинок 0,05% склало 0,709 кВт*год/добу, що в свою чергу було нижче на 4,7% від номінального значення енергоспоживання для чистого R600a . Також відмічено зниження часу роботи компресора на 3,28% від номінального, при концентрації TiO_2 0,05%, збільшення потужності заморожування, зниження енергоспоживання на 5,2% (при концентрації R600a / TiO_2 0,05%), а також зниження добового часу роботи компресора на 3,28% в порівнянні з чистим R600a . Крім того, додавання наночастинок призводить до поліпшення циркуляції масла в холодильній машині і, найімовірніше, зниженню тертя в компресорі.

ВИСНОВКИ

1. Методи нечіткого термoeкономічного аналізу є найбільш адекватними принципами відбору структурованих наноматеріалів в якості добавок до робочих речовин парокompресійних холодильних циклів.
2. Оцінка властивостей малодосліджених нанохолодоагентів на основі термодинамічної подібності класичних рідин і нанофлюїдів дозволила розробити методи прогнозування теплофізичних властивостей холодоагентів з низьким потенціалом глобального потепління і врахувати зміщення критичної точки та кривих фазових рівноваг під впливом добавок наночастинок.
3. Розроблені моделі рівнянь стану холодоагентів R134a і R600A з добавками наночастинок генеалогічного дерева графену (вуглецеві нанотрубки, фулерени і хлоп'я графену) та оксидів металів дозволили здійснити передбачення перспективності нанохолодоагентів для підвищення показників ефективності холодильних систем.
4. Температурне поле в морозильній камері практично рівномірне. Коливання температури уздовж осі не перевищують 0.5K , за винятком пристінкового простору, де спостерігаються великі градієнти через формування тонкого

прикордонного шару внаслідок низького коефіцієнта температуропровідності повітря. Поблизу верхньої частини камер спостерігається максимальне підвищення температури, потім відбувається різке падіння температури на невеликих відстанях від стінок камери за межами теплового прикордонного шару. При малих концентраціях наночастинок температурні поля практично не змінюються.

5. Застосування наночастинок TiO_2 в холодильному контурі: покращує розчинність холодоагенту з холодильними маслами; збільшує коефіцієнти теплопровідності і теплопередачі хладагентів; знижує коефіцієнти тертя в компресорі. В результаті експериментальних досліджень було встановлено, що суміш R600a / TiO_2 призводить до підвищення ефективності холодильних систем. Порівняно з системою, що використовує чистий R600a в якості робочого тіла, застосування ізобутана з додаванням наночастинок TiO_2 з концентраціями 0,01 і 0,05% призводить до зниження температур в холодильній і морозильній камерах, збільшенню потужності заморожування, зниження енергоспоживання в середньому на 8% (при концентрації R600a / TiO_2 0,05%), а також до зниження добового часу роботи компресора на 3% порівняно з системою, що використовує чистий R600a в якості робочого тіла, застосування ізобутана з додаванням наночастинок TiO_2 з концентраціями 0,01 і 0,05% призводить до зниження температур в холодильній і морозильній камерах, збільшенню потужності заморожування, зниження енергоспоживання на 5,2% (при концентрації R600a / TiO_2 0,05%), а також до зниження добового часу роботи компресора на 3,28% порівняно з чистим R600a.
6. В результаті проведених експериментальних досліджень було встановлено, що використання нанохолодоагенту R600a / TiO_2 призводить до підвищення ефективності холодильних систем. Енергоспоживання холодильника-морозильника ДХ-271010 D 256/255/465 N / ST2.0 A + з компресором ОК V 10-3-K. склало 0,744 кВт год / добу, що відповідає індексу енергоефективності $\text{EEI} = 41,84$. Порівняно з системою, що використовує чистий R600a в якості робочого тіла, застосування ізобутана з додаванням наночастинок TiO_2 з концентраціями 0,01 і 0,05% призводить до зниження температур в холодильній і морозильній камерах, збільшенню потужності заморожування, зниження енергоспоживання на 5,2% (при концентрації R600a / TiO_2 0,05%), а також до зниження добового часу роботи компресора на 3,28% порівняно з чистим R600a.

СПИСОК ОСНОВНИХ ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kuleshov D. Critical point shift of nanorefrigerants [Text] / D. Kuleshov, P. Krijgsman, D. Nikitin // *Обладнання та технології харчових виробництв.* – 2012. – Вип. 29, т. 1. – С.114 – 118.
Внесок здобувача: пошук параметрів математичної моделі, розрахунки зсуву критичних точок нанохолодоагентів, аналіз результат
2. Bondarenko V. Thermodynamic and phase behaviour of natural refrigerants embedded with nanostructured materials [Text] / V. Bondarenko, D. Kuleshov, M. Khmelhuk, and V. Mazur // *Refrigeration Science and Technology* - 2012. – vol. 2, pp. 833 – 841. ISBN: 978-1-62276-273-6
Внесок здобувача: побудова математичної моделі, розрахунки

термодинамічної ефективності, підготовка матеріалів публікації.

3. Kuleshov D. Fuzzy thermoeconomic approach to nanofluid selection in vapor compression refrigeration cycle [Text] / D. Kuleshov, and V. Mazur // *Холодильна техніка і технологія.* - 2013. - т.126, №2. – С.
Внесок здобувача: огляд літературних даних, селекція моделі компромісу, розрахунки термодинамічної ефективності циклу холодильної машини, аналіз результатів.
4. Кулешов Д. Экспериментальное исследование характеристик домашнего холодильника, использующего наножид R600a/ TiO_2 [Text] / Д. Кулешов, И. Красновский // *Холодильна техніка і технологія.* - 2014. - т.126, №5. – С.
Внесок здобувача: виконання експериментальних досліджень, обробка експериментальних даних, аналіз результатів.
5. Кулешов Д. Влияние наночастиц TiO_2 на энергетическую эффективность холодильных машин, работающих на изобутане [Текст] / Д. Кулешов // *Восточно-европейский журнал передовых технологий.* - 2014. - Т.5/6, №41. - С.47- 51.
6. Critical point shift under nanoparticle doping. D. Kuleshov, V. Mazur // 7th International Discussion Meeting on Relaxations in Complex Systems New results, Directions and Opportunities. Book of Abstracts Universitat Politècnica de Catalunya Barcelona, Catalonia (Spain) Sunday, July 26th, 2013 <https://idmres7.upc.edu>
Внесок здобувача: побудова математичної моделі зсуву критичної точки, розрахунки критичної точки, підготовка матеріалів для презентації та публікації
7. Thermodynamic properties of graphene nanofluids. D. Kuleshov, V. Mazur // 6th International conference physics of liquid matter: modern problems : Book of Abstracts. – Kyiv, Ukraine: PLMMP 2014. – 7-14P.
Внесок здобувача: ідея роботи, огляд літературних джерел, аналіз інформації

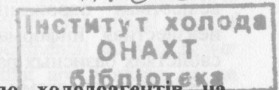
АНОТАЦІЯ

Кулешов Д.К. Вплив добавок наночастинок до холодоагентів на підвищення показників ефективності холодильних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за фахом 05.05.14 – холодильна, вакуумна та компресорна техніка, системи кондиціонування. – Одеська національна академія харчових технологій МОН України, Одеса, 2015.

Дисертація присвячена обґрунтуванню та розвитку науково - технічних підходів щодо вивчення впливу добавок наночастинок до холодоагентів на підвищення показників ефективності холодильних систем.

В роботі на основі нечіткого термoeкономічного аналізу удосконалено метод відбору наночастинок, що використовуються в якості добавок до робочих речовин пароконденсійних холодильних циклів. Розроблено підхід до визначення теплофізичних властивостей холодоагентів з низьким потенціалом



глобального потепління, що враховує зміщення критичної точки і кривих фазової рівноваги при добавках різних наноструктурованих матеріалів. Наведена раніше невідома інформація про рівняння стану та термодинамічні властивості базисних робочих тіл холодильних агрегатів, що використовують R134a і R600a з домішками наночастинок генеалогічного дерева графена, що дозволяє оцінити принципові можливості нових робочих середовищ у холодильній техніці. Показано, що вплив добавок наночастинок на температурні поля в камерах побутового холодильника підвищує енергетичну ефективність циклів парокомпресійних холодильних машин в порівнянні з традиційними хладагентами. Проведені експериментальні дослідження енергетичних і експлуатаційних характеристик холодильних машин, що працюють на ізобутані (R600a) з добавкою наночастинок (TiO_2), підтвердили 5% зниження енергоспоживання побутового холодильника НОРД.

Ключові слова: Нанофлюїди – Холодильні системи – Нанохолодагенти R134a, R600a – Наночастишки генеалогічного дерева графена – Показники енергетичної ефективності

АННОТАЦИЯ

Кулешов Д.К. Влияние добавок наночастиц к хладагентам на повышение показателей эффективности холодильных систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.14 – холодильная, вакуумная и компрессорная техника, системы кондиционирования. – Одесская национальная академия пищевых технологий МОН Украины, Одесса, 2015.

Диссертация посвящена обоснованию и развитию научно - технических подходов к исследованию влияния добавок наночастиц к хладагентам на повышение показателей эффективности холодильных систем. В работе на основе нечеткого термозакономерного анализа усовершенствован метод отбора наночастиц, которые используются в качестве добавок к рабочим веществам парокомпрессионных холодильных циклов. Приведена ранее неизвестная информация об уравнениях состояния и термодинамических свойствах базисных рабочих тел холодильных агрегатов, использующих R 134a и R600a с добавками наночастиц. Показано, что влияние добавок наночастиц на температурные поля в камерах бытового холодильника повышает энергетическую эффективность циклов парокомпрессионных холодильных машин по сравнению с традиционными хладагентами. Экспериментальные исследования энергетических и эксплуатационных характеристик холодильных машин, которые работают на изобутане (R600a) с добавкой наночастиц (TiO_2) подтвердили 5% снижение энергопотребления бытового холодильника НОРД. В результате экспериментальных исследований было установлено, что смесь R600a/ TiO_2 приводит к повышению эффективности холодильных систем по сравнению с системой, использующей чистый R600a. Энергопотребление холодильника-морозильника ДХ-271 с компрессором ОК V 10-3-К. составило 0,744 кВт ч/сутки, что отвечает индексу энергоэффективности $EEL=41,84$. По сравнению с системой, использующей чистый R600a, применение изобутана с

добавлением наночастиц TiO_2 с концентрациями 0,01 и 0,05% приводит к понижению температур в холодильной и морозильной камерах, снижению энергопотребления на 5,2%. Кроме того, добавление наночастиц приводит к улучшению циркуляции масла в холодильной машине и уменьшает трение в компрессоре.

Ключевые слова: Нанофлюиды – Холодильные системы – Нанохладагенты R134a, R600a – Наночастицы генеалогического дерева графена – Показатели энергетической эффективности

THE SUMMARY

Kuleshov D.K. Effect of nanoparticle additives for improving the efficiency of refrigeration systems. – Manuscript.

Thesis for a candidate of science (engineering) degree by specialty 05.05.14 - refrigeration, vacuum and compressor technologies, air conditioning systems.– Odessa National Academy of Food Technologies. Odessa. 2015.

Thesis is devoted to the rationale and development of scientific approach for studying the nanoparticle additives impact to increase the efficiency indexes for the refrigeration systems. Nanofluids (NF), i.e. fluids embedded with nanostructured materials, demonstrate thermal conductivity exceeding those of conventional suspensions Fuzzy thermoeconomic analysis was applied to select the nanoparticles as additions to the working fluids of vapor compression refrigeration cycles. New information about equations of state and thermodynamic properties of base working fluids of refrigeration machines using R 134a and R600a with nanoparticle additives is given. It is shown that nanoparticles additives change the temperature fields in the domestic refrigerator chambers and promote power efficiency of vapor compression cycles as compared to traditional refrigerants. The objective of this work is to study the effect of nanoparticle doping on thermodynamic and phase behavior of working fluids embedded with nanostructured materials. Since the diameter of nanoparticle is quite small, the nanostructured materials have specific properties and critical point of conventional fluids is shifted by adding nanoparticles. Experimental study of power and operating characteristics of refrigeration machines that are working on an isobutane (R600a) with addition of nanoparticles (TiO_2) demonstrated a 5% energy saving.

The exploitation of nanofluid phenomena allows to create a new class of efficient natural working and heat transfer media for wide range of technological application and bring such benefits like energy efficiency (e.g. improving heat transfer, reducing pumping power), lower operating costs, smaller/lighter systems (small heat exchangers) and cleaner environment (e.g. reducing heat transfer fluid inventory).

Keywords: Nanofluids – Refrigerating Systems – Nanorefrigerants R134a, R600a – Nanoparticles of graphene genealogic tree – Energy

Підписано до друку 12.03.2015 р.
Формат 60х84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Times. Друк різнографічний.
Зам. № 12. Тираж 100 прим.

Надруковано ТОВ "Зовнішрекламсервіс"
65011, м.Одеса, вул. Успенська, 40.
тел. 37-70-76, 777-70-76