УДК 621.56

В. І. Мілованов, д.т.н., **Д. О. Балашов**

Одеська національна академія харчових технологій, м. Одеса

ВПЛИВ НАНОЧАСТИНОК НА ЯКІСТЬ РОБОТИ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ МАЛОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

У статті наведена інформація про перспективи використання наночастинок для покращення характеристик теплообмінних апаратів холодильної машини, що працює на ізобутані. Вплив нанодомішок в холодоагент розглянуто на прикладі експериментального дослідження конденсатора. Дослідження показало високу перспективність застосування в малих холодильних машинах конденсаторів типа «труба в трубі» і можливості суттєвого підвищення їх теплообмінних характеристик шляхом застосування нанофлюїдів в якості холодоагенту. Результати свідчать про підвищення коефіцієнта теплопередачі в конденсаторі на 4,5-16 %.

Ключові слова: *холодильна машина, компресор, калориметричний стенд, наночастинка, нанодомішка, нанофлюїд, коефіцієнт теплопередачі, коефіцієнт тепловіддачі, конденсатор, холодоагент, ізобутан.*

В. И. Милованов, д.т.н., **Д. А. Балашов**

ВЛИЯНИЕ НАНОЧАСТИЦ НА КАЧЕСТВО РАБОТЫ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ МАЛОЙ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

В статье приведена информация о перспективах использования наночастиц для улучшения характеристик теплообменных аппаратов холодильной машины, работающей на изобутане. Влияние нанопримесей в хладагент рассмотрено на примере экспериментального исследования конденсатора. Исследование показало высокую перспективность применения в малых холодильных машинах конденсаторов типа "труба в трубе" и возможности существенного повышения их теплообменных характеристик путем применения нанофлюидов в качестве хладагента. Результаты свидетельствуют о повышении коэффициента теплопередачи в конденсаторе на 4,5-16 %.

Ключевые слова: *холодильная машина, компрессор, калориметрический стенд, наночастица, нанофлюид, коэффициент теплопередачи, коэффициент теплоотдачи, конденсатор, хладагент, изобутан.*

V. I. Milovanov, DSc, D. O. Balashov

INFLUENCE OF NANOPARTICLES ON THE QUALITY OF WORK OF HEAT EXCHANGERS OF A SMALL REFRIGERATOR

In recent years, a new direction of energy saving in small refrigeration machines has been widely studied in the world, namely the use of new classes of substances as a working fluid. Studies of the thermophysical properties of colloidal solutions of nanoparticles with oils and refrigerants show the high prospects for the use of this class of substances in refrigeration. Therefore, the task of studying heat exchangers operating as part of small refrigeration machines on nanofluids seems relevant. The article provides information on the prospects for the use of nanoparticles in heat exchangers of a refrigeration machine running on isobutane. The influence of nano impurities is considered in the example of theoretical and experimental study of the capacitor. At the same time, modern studies of the influence of nanofluids on the heat exchange characteristics of heat exchangers of refrigeration machines were taken into account. Experimental study of a small refrigeration machine running on isobutane with nanoparticle impurities was performed on a calorimetric stand, which allows the machine to operate in a wide range of modes with support for specified cycle parameters and high-precision determination of the key performance of all elements of the refrigerator, including compressors and heat exchangers. The study showed the high prospects for the use in small refrigeration machines of condensers such as "pipe in a pipe" and the possibility of significantly improving their heat transfer characteristics through the use of nanofluids as a refrigerant. The results show an increase in the

heat transfer coefficient in the condenser by 4.5-16 %.

Keywords: *refrigeration machine, compressor, calorimetric stand, nanoparticle, nanodump, nanofluid, heat transfer coefficient, heat transfer coefficient, condenser, refrigerant, isobutane.*

DOI 10.32684/2412-5288-2021-1-18-23-30

Вступ

Ефективним напрямком в енергозбереженні, яке дозволяє знизити споживання електроенергії, є застосування нових класів речовин в якості робочого тіла. Проведені в Україні та за кордоном дослідження теплофізичних властивостей колоїдних розчинів наночастинок з мастилами і холодоагентами показують високу перспективність використання подібного класу речовин в холодильній техніці. Використання нанофлюїдів дозволяє істотно підвищити теплообмінні характеристики холодоагенту, підвищити ефективність роботи теплообмінних апаратів і, в результаті, знизити споживану холодильною машиною електричну потужність.

З аналізу опублікованої в науковій літературі інформації про вплив наноматеріалів на роботу малих холодильних машин видно, що більшість робіт присвячено дослідженню теплопровідності речовин з розчиненими в них наночастинками. Дані про вплив нанодобавок на роботу конкретних теплообмінних апаратів малої холодильної машини в літературі практично відсутні. Це ускладнює пошук технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності малих холодильних машин, домашньої і торгової холодильної техніки.

Таким чином, стають актуальними роботи з подальших досліджень малих холодильних машин з нанофлюїдами в якості робочого тіла.

Зменшити споживання холодильної машиною електроенергії можливо за допомогою поліпшення ефективності теплообмінних систем. Нові теплоносії з поліпшеними тепломасообмінними характеристиками є одним з варіантів покращення теплопередачі в теплообмінних апаратах малих холодильних машин. Важливим досягненням в дослідженні теплоносіїв є застосування колоїдної суміші холодоагенту, мастила і металевих нановключень розміром 1-100 нанометрів. Перші варіанти колоїдних розчинів, такі як мікрофлюїди, приводили до утворення осаду, що викликало ерозію поверхонь тертя металевих деталей. Нанофлюїди утворюються як розчин базової рідини, наприклад суміші холодоагенту з мастилом, з наночастинками, які не утворюють хімічних сполучень з цією рідиною [1]. Їх застосування може суттєво підвищити теплопередачу в теплообмінних апаратах холодильних установок навіть коли відносний обсяг наночастинок менше, ніж 0,3% [2].

Підвищена теплопровідність є наслідком рівномірної дисперсії часток. Хоча теплопровідність є функцією основних параметрів базової рідини, таких як тиск і температура, в турбулентному потоці ефективна теплопровідність через вплив турбулентних вихорів значно підвищується. Наявність наночастинок в рідині є одним з факторів суттєвого підвищення її турбулізації [3].

Унікальними властивостями нанофлюїдів є підвищена теплопровідність, в'язкість і теплопередача. Відомо, що теплопровідність металів при кімнатній температурі вище, ніж у рідин. Тому теплопровідність рідини з частинками металу вище, ніж у звичайної рідини. Аналіз показав, що число Нусельта нанофлюїдів вище, ніж у базової рідини, при певних параметрах потоку (наприклад, при рівних числах Рейнольдса) [4]. Підвищені числа Нусельта в поєднанні з більшою теплопровідністю забезпечують більш високу конвективну теплопередачу нанофлюїду в порівнянні з базовим теплоносієм. Це повинно відобразитись на тепломасообмінних характеристиках теплообмінних апаратів холодильної машини.

Об'єкт дослідження

Об'єкт дослідження – процеси теплопередавання в конденсаторі малої холодильної машини, що працює на ізобутані чистому і з домішками наночасток оксиду титану.

Перший етап даних досліджень і методика експериментального випробування були викладені в роботі [6]. В цій роботі представлено матеріали розширеного теоретичного аналізу проблеми і завершальний етап експериментальних робіт.

Аналіз літературних даних

В сучасній науково-технічній літературі освітлюється великий обсяг теоретичних робіт по проблемі ефективної теплопровідності дво- і багатокомпонентних матеріалів, наприклад, підхід Гамільтона і Кроссерата інші. Гамільтон і Кроссер [7] ввели фактор впливу форми *n*, який визначається експериментально для різних типів матеріалів. Метою їх дослідження була розробка моделі як функції форми частинок, складу і теплопровідності обох фаз:

$$k_c = k_f \left[\frac{k_p + k_f(n-1) - (n-1)V_p(k_f - k_p)}{k_p + k_f(n-1) + V_p(k_f - k_p)} \right],$$

де n – фактор впливу форми частинок, виведений емпірично (сферичний $n = 3$) і визначається як $n = 3/\psi$;

ψ – сферичність, визначена як відношення площі поверхні сфери з об'ємом, рівним обсягу частки, до площі поверхні частки;

k_c – загальна теплопровідність;

k_f – теплопровідність рідини;

k_p – телопровідність матеріала наночасток;

V_p – об`ємна доля наночасток.

Модель Гамільтона-Кроссера зводиться до моделі Максвелла при $\psi = 1$ і узгоджується з експериментальними даними. Модель вірна до тих пір, поки теплопровідність часток більше теплопровідності рідини принаймні в 100 разів. Незважаючи на те, що експерименти показують достатню придатність цих моделей в прогнозуванні теплопровідності, вони не враховують вплив розміру наночасток.

Для успішного практичного застосування нанофлюїдів необхідно повне розуміння процесів вимушеної конвекції в ламінарному і турбулентному потоці. Нанофлюїди по суті є багатокомпонентними рідинами. В літературі вони розглядаються або як двофазний гомогенний потік без ковзання між частинками і рідиною, які теж перебувають в стані частинок щодо базової рідини з температурною рівновагою.

Більшість потоків з вимушеною конвекцією залежать від чисел Рейнольдса і Прандтля, але в разі нанофлюїдів включаються додаткові параметри, що враховують термічні властивості всіх складових. Коефіцієнт теплопровідності нанофлюїда буде залежати від теплопровідності і теплоемності базової рідини і наноматеріалів, картини потоку, критеріїв Прандтля і Рейнольдса, температури, об’ємної долі розчинених часток, їх розмірів і форми.

Інший можливий метод формулювання, запропонований тими ж авторами, полягає в припущенні, що відношення коефіцієнтів теплопередачі нанофлюїда K_{nf} і базової рідини K_f пропорційне відношенню відповідних теплопровідностей нанофлюїда h_{nf} і базової рідини h_f, піднесених до степеня m

$$h_{nf} \approx h_f \left(\frac{K_{nf}}{K_f} \right)^m,$$

де показник залежить від режиму течії й імовірно дорівнює 2/3 для турбулентного потоку. Методи, згадані вище, розглядають нанофлюїд як однофазну рідину, на відміну від реальності, де він є сумішшю рідини і твердих часток. Розмір розчинених часток викликає деякі труднощі при аналізі їх взаємодії з рідиною в процесі передачі тепла. Багато дослідників припускають, що броунівський рух є одним з чинників поліпшення теплопровідності. Цей випадковий рух надмалих частинок надає швидкість твердим часткам відносно рідини. Також припускають вплив на теплопровідність малих відхилень (збурень) температури і швидкості внаслідок впливу броунівського руху.

Як було зазначено вище, існують два підходи до визначення коефіцієнта теплопровідності в потоці. Один з підходів – традиційний із застосуванням термічних властивостей нанофлюїда з відомими поправками для коефіцієнта теплопередачі в базовій рідини. Для нанофлюїдів застосовуються такі вирази [7]:

$$\rho_{eff} = (1-\varphi)\rho_f + \varphi\rho_n;$$

$$c_{p,eff} = (1-\varphi)c_{p.f} + \varphi c_{p,n};$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1-\varphi)(\rho c_p)_f + \varphi(\rho c_p)_n.$$

де ρ – щільність;

c – теплоємність;

φ – масова доля часток;

індекси p в цій формулі і далі відносяться до часток, f – до рідини, eff – до ефективного параметра.

В роботі [9] була запропонована відома формула Ейнштейна для розрахунку ефективної в’язкості, μ_{eff}:

$$\mu_{eff} = \mu_f(1 + 2{,}5\varphi) \text{ для } \varphi < 0{,}05.$$

Рівняння Ейнштейна згодом було розширено [8]

$$\mu_{eff} = \mu_f \frac{1}{(1-\varphi)^{2,5}}.$$

Для $\varphi < 0{,}05$ і сферичних частинок може бути використаний такий вираз [9]:

$$\mu_{eff} = \mu_f(1 + 2{,}5\varphi).$$

Ефективна теплопровідність може бути виведена з моделей теплопровідності Максвела і Гамільтона. Критерії Прандля, Рейнольдса та Нусельта розраховуються так[10]:

$$\mathrm{Pr} = \frac{\mu_{eff} c_{p,eff}}{K_{eff}}; \quad (1)$$

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho_{eff} u d}{\mu_{eff}}; \quad (2)$$

$$Nu = \frac{hd}{K_{eff}}. \quad (3)$$

де u – швидкість рідини;

d – діаметр канала,

h – довжина розрахункової ділянки.

Наприклад, для повністю розвиненого ламінарного потоку при граничних умовах постійної температури стінки

$$Nu_T = \frac{hd}{K_{eff}} = 3,657. \qquad (4)$$

Для турбулентного потоку існує поправка Пєтухова-Кирилова [11]

$$Nu = \frac{hd}{K_{eff}} = \frac{(f/8)\,\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}}{1,07 + 12,7\sqrt{(f/8)}(\mathrm{Pr}^{2/3}-1)} \cdot \left(\frac{\mu_b}{\mu_w}\right)^n, \qquad (5)$$

де n = 0,11 для $T_{ст} > T_ж$, n = 0,25 для $T_{ст} < T_ж$;

$$f = (1,82\lg\mathrm{Re} - 1,64)^{-2}.$$

Поправка може використовуватися для розрахунку коефіцієнтів теплопередачі при течії в каналі для ламінарного і турбулентного потоків з використанням відомих властивостей нанофлюїдів. Результати можуть бути порівнянні з експериментальними за таких же умов.

При другому підході необхідно знайти рішення основних рівнянь при певних граничних умовах. У цих випадках рівняння збереження маси, моменту і енергії, добре відомі для однофазного потоку,можуть бути розширені для нанофлюїдів. Якщо мікроконвекцією і мікродифузією розчинених частинок (гідродинамічна дисперсія) знехтувати, то ці два підходи в результаті дадуть менші коефіцієнти теплопередачі, ніж експеримент.

Основні рівняння можна вирішити, зробивши припущення, що нанофлюїд стискається без тертя між частинками і рідиною, але вони знаходяться в термодинамічній рівновазі [10].

Рівняння збереження маси

$$d\nu(\rho\overline{V}) = 0.$$

Рівняння збереження моменту

$$d\nu(\rho\overline{V}^2) = -gradP + \mu\nabla^2\overline{V}.$$

Рівняння збереження енергії

$$d\nu(\rho\overline{V}c_pT) = d\nu(KgradT).$$

Ці рівняння можуть бути спрощені в залежності від вигляду необхідного рішення.

Для повністю розвиненого ламінарного потоку профіль епюри швидкостей параболічний

$$\frac{u}{\overline{u}} = 2\left(1 - \frac{r^2}{r_0^2}\right),$$

де $\overline{u}$ – середня швидкість в осьовому напрямку. Якщо знехтувати теплопровідністю в осьовому напрямку, то рівняння можна записати так:

$$u\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[\overline{D}r\frac{\partial T}{\partial r}\right].$$

Рівняння енергії в будь-якій формі має вирішуватися з встановленими граничними умовами постійної температури стінки або постійного теплового потоку з постійною температурою входу.

Останнім часом багато опублікованих робіт зосереджено на вимірі і визначенні властивостей нанорідин, особлива увага приділяється теплопровідності і коефіцієнту теплопередачі.

Класичне рішення Граца для рівняння при ідеальному потоці, u = const, для граничних умов постійної температури стінки [11]:

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K} = \frac{\sum_{m=1}^{\infty} e^{-4\lambda_m^2 (x/d)/Pe}}{\sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{\lambda_m^2} e^{-4\lambda_m^2 (x/d)/Pe}}; \qquad (6)$$

$$Pe = \frac{U_m d}{\alpha_{eff}^*}. \qquad (7)$$

де α – температуропровідність.

Класичне рівняння Граца може бути розширене для граничних умов постійного теплового потоку, постійної температури стінки і лінійної температури стінки з параболічним профілем швидкостей. Використовуючи параболічний профіль швидкостей, визначають локальні числа Нусельта [12]:

- постійна температура стінки

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} A_n e^{-\lambda_n^2 \xi}}{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{A_n}{\lambda_n^2} e^{-\lambda_n^2 \zeta}};$$

- постійний тепловий потік

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \left[\frac{11}{48} - \frac{1}{2}\sum_{n=1}^{\infty} \frac{e^{-\beta_n^2 \zeta}}{A_n \beta_n^4}\right]^{-1};$$

- лінійна температура стінки

$$Nu_x = \frac{h_x d}{K_{eff}} = \frac{\frac{1}{2} + 4\sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{2} \cdot \frac{R_n^{'}(1)}{\lambda_n^4} e^{-\lambda_n^2 \zeta}}{\frac{11}{96} + 8\sum_{n=1}^{\infty} \frac{C_n}{2} \cdot \frac{R_n^{'}(1)}{\lambda_n^4} e^{-\lambda_n^2 \zeta}},$$

де $\zeta = \frac{x / r_0}{Pe}$, $Pe = \frac{u_m d}{\alpha_{eff}}$;

x – довжина труби;

r_0 – радіус труби.

Таким чином, останнім часом було вивчено, проаналізовано та узагальнено значний обсяг сучасних теоретичних та розрахункових засобів розрахунку характеристик теплообмінних апаратів, працюючих на нанофлюїдах.Крім того, калориметричний стенд для експериментальних досліджень малих холодильних машин [6] було суттєво вдосконалено з забезпеченням високої плавності регулювання робочих параметрів випробуваної холодильної машини та підвищенням точності засобів вимірювання показників її елементів.

Тому виникла задача провести розрахунково-експериментальне дослідження рооботи конденсатора типу «труба в трубі»у складі малої холодильної машини, працюючої на нанофлюїді, з урахуванням нових теоретичних положень та використанням модернізованого калориметричного стенду.

Мета і завдання дослідження

Метою роботи є розрахунок і експериментальне дослідження теплообмінних характеристик конденсатора типу «труба в трубі», який працюєускладі малої холодильної машини як на чистому ізобутані, так і на ізобутані з нанодомішками.

Для досягнення поставленої мети було необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести на базі узагальнення сучасних теоретичних досліджень розрахунок теплообмінних характеристик конденсатора типу «труба в трубі», який працює ускладі малої холодильної машини на ізобутані як без нанодомішок, так і з нанодомішками.

2. Виконати на вдосконаленому калориметричному стенді експериментальне дослідження конденсаторатипу «труба в трубі», який працюєу складі малої холодильної машини в тих же умовах.

3. Провести обробку і аналіз результатів теоретичного та експериментального досліджень конденсатора малої холодильної машинитипу «труба в трубі» для визначення його теплотехнічних показників та перспектив використання у складі холодильних машин, які працюють на нанофлюїдах.

Основний зміст досліджень

Для проведення дослідження було взято конденсатор з водяним охолодженням малої холодильної машини, що працює на ізобутані. Конденсатор є мідною трубкою діаметром 10 мм, розміщеною в іншій трубі, по якій протікає вода, яка відбирає теплоту, що виділяється при конденсації холодоагенту в трубці меншого діаметра. Розрахунки і випробування проводилися при режимах роботи холодильної машини з температурами кипіння –20, –10, –5, 0 ºС і температурою конденсації 40 ºС. Під час розрахунків приймалося, що течія охолоджуючої води –ламінарна. В якості нанодобавок до холодоагенту були використані наночастинки оксиду титануTiO_2..

Для проведення експерименту було вибрано мастило Reniso ONF46 з додаванням 2,54 % наночастинок TiO_2. Для руйнування кластерів наночастинок зразок суміші гомогенізували з використанням ультразвукового диспергатора при кімнатній температурі протягом 30 хвилин. Для видалення осаду кластерів наночастинок зразок центрифугували протягом 45 хвилин.

З компресора, призначеного для випробувань, була видалена заводська заправка мастила в кількості 350 мл і замінена на чисте мастило Reniso ONF46. Після цього були проведені експериментальні роботи по визначенню параметрів холодильної установки і її елементів в різних режимах роботи. Після завершення експериментів чисте мастило було видалено з системи і замінено наномастилом з масовою концентрацією часток TiO_2 2,54 %, після чого досліди з визначення робочих параметрів об'єкта випробувань були повторені. При цьому враховувалось, що теплове навантаження конденсатора

$$Q_{кд} = G_{вд} c_{вд} (t_{вд2} - t_{вд1}),$$

де $G_{вд}$ – витрата води;

$c_{вд}$ – теплоємність води;

$t_{вд1}$, $t_{вд2}$ – температура води до і після конденсатора.

Результати досліджень

Експериментальне дослідження проводилося на вдосконаленому калориметричному стенді, схема якого наведена в роботі [6].

В ході проведення розрахунків та експерименту в конденсаторі, який працює у складі холодильної машині на ізобутані з наночастинками, було зафіксовано зниження різниці температур між холодоагентом та охолоджуючою водою в порівнянні з роботою холодильної машини на чистому холодоагенті при всіх режимах її роботи. Це дало підставу зробити висновок про позитивний вплив нанодобавок на теплообмінні характеристики апарату.

На рис. 1 показані температура конденсації і середня логарифмічна температура води, що охолоджує конденсатор. При відомих значеннях переданої теплоти через конденсатор Q (визначено по тепловому балансу конденсатора), відомої площі поверхні теплообмінного апарату Fі відомому температурному напорі Δt з основного рівняння теплопередачі $Q = kF\Delta t$ можна визначити значення коефіцієнта теплопередачі k.

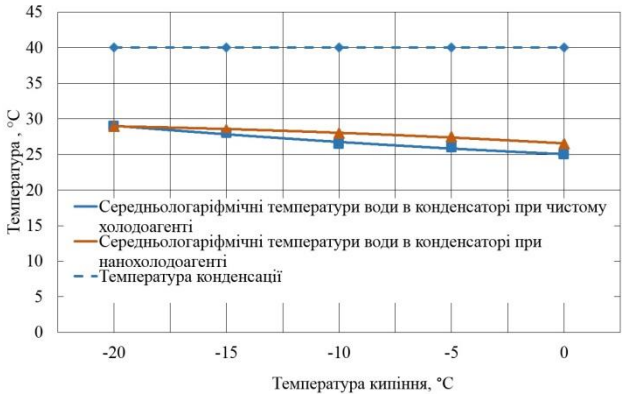

Рисунок 1 – Температури в конденсаторі

На рис. 2 представлені значення коефіцієнта теплопередачі в конденсаторі, визначені за допомогою розрахунку і експериментально. У переважній більшості випадків спостерігається збільшення коефіцієнта теплопередачі при використанні нанохолодагента.

В ході експерименту було встановлено, що різниці температур води на вході і виході в конденсаторі були меншими при використанні холодоагенту з добавкою наночастинок. При рівних теплових навантаженнях та незмінних конструктивних параметрах конденсатора з цього можна зробити висновок, що при застосуванні нанохолодоагенту відбувається підвищення коефіцієнта теплопередачі. Це забезпечує передачу більшої кількості теплоти через ту ж теплообмінну поверхню.

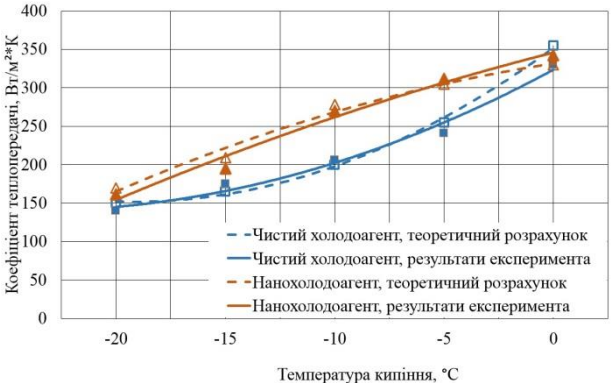

Рисунок 2 – Коефіцієнти теплопередачі в конденсаторі

Відхилення результатів експерименту від теоретичного розрахунку згідно зі співвідношеннями (1)-(7) не перевищує 5 %, що показує достатню точність розрахунку коефіцієнта теплопередачі k

$$k = \left(\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 d_2} \right)^{-1},$$

де α_1–коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту;

α_2 –коефіцієнт тепловіддачі з боку води;

d_1 – діаметр внутрішньої стінки труби;

d_2 – діаметр зовнішньої стінки труби.

З рівняння теплопередачі через стінку можна вивести коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту. Кількість переданого тепла і коефіцієнт тепловіддачі з боку води відомі. Термічний опір стінки труби не змінювався. Результати розрахунку коефіцієнта тепловіддачі з боку холодоагенту представлені на рис. 3.

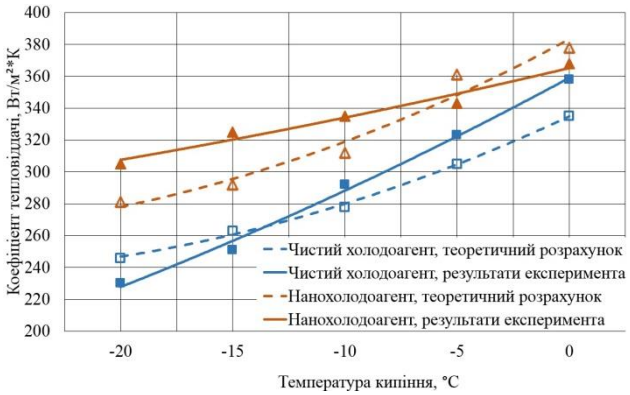

Рисунок 3 – Коефіцієнти тепловіддачі в конденсаторі

У табл. 1 представлені зміни у відсотках коефіцієнта тепловіддачі з боку холодоагенту і коефіцієнта теплопередачі в трубі конденсатора при холодоагенті з нанодомішками відносно його роботи на чистому холодоагенті. Підвищення коефіцієнта тепловіддачі відбувається у всіх режимах, крім режимів з високою температурою кипіння. З цього можна зробити висновок, що застосування добавок наночасток може підвищити теплообмінні характеристики апаратів холодильних машин, не вимагаючи при цьому конструкційних змін елементів холодильної машини.

Аналіз результатів досліджень

Таким чином, використання нанофлюїдів дозволяє істотно покращити характеристики теплообмінних апаратів малої холодильної машини, зменшити температурні перепади на їх

поверхнях і, в результаті, знизити відношення тисків конденсації і кипіння, а отже і споживану холодильною машиною електричну потужність.

Таблиця 1 – Зміна коефіцієнтів тепловіддачі і теплопередачі в конденсаторі при переводі холодильної машини на нанохолодоагент

Параметр	Температура кипіння , ºС			
	–20	–10	–5	0
Зміна коефіцієнта тепловіддачі,%	24,8	12,9	7,2	–5,6
Зміна коефіцієнта теплопередачі,%	16,1	8	4,5	–3,5

Дисперсія наночастинок в рідини призводить до підвищеної в'язкості, на що впливає середній діаметр частинок, їх концентрація і температура. Підвищена в'язкість зменшує число Рейнольдса в порівнянні з базовою рідиною при тій же швидкості. Ці фактори повинні бути враховані при оцінці теплообмінних показників апаратів малої холодильної машини і можливостей застосовності нанофлюїдів в якості холодоагенту.

Застосування нанодобавок виглядає перспективним в домашніх холодильниках, торговому і іншому холодильному обладнанні з ціллю підвищення його енергетичних показників. Однак, ця проблема вимагає подальшого вивчення, аналізу, і досліджень.

Використання таких наночастинок, як фулерени або вуглецеві нанотрубки, здатне ще більше підвищити теплофізичні характеристики холодоагентів, а також знизити потужність тертя в компресорі, в порівнянні з наночастинками оксиду титану, які розглянуто в даній роботі.

Висновки

Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Теоретично-експериментальне дослідження конденсатора малої холодильної машини типу «труба в трубі» показало, що застосування нанохолодоагенту як робочого тіла холодильної машини дозволяє підвищити теплообмінні характеристики апаратів холодильної машини без їх конструктивної зміни.

2. Використання холодоагенту з масовою концентрацією нанодобавок TiO_2 2,54 % дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі з боку холодоагенту на 7-25 %, а коефіцієнт теплопередачі в конденсаторі на 4,5-16 %.

3. Розбіжність результатів теоретичного і експериментального досліджень становить не більше 5 %, що свідчить про достовірність результатів досліджень, а також перспективи подальшого проведення таких робіт.

4. Дослідження показало високу перспективність застосування в малих холодильних машинах конденсаторів типу «труба в трубі» і можливості суттєвого підвищення їх теплообмінних характеристик шляхом застосування нанофлюїдів в якості холодоагенту малої холодильної машини.

5. Що стосується холодильних машин середньої і великої холодопродуктивності, то застосування в них нанофлюїдів в якості холодоагента теж може виявитись доцільним. Але така доцільність потребує значних по обсягу і собівартості експерементальних перевірок, які можна планувати лише після повного закінчення відповідних робіт по малим холодильним машинам.

Список використаних джерел

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [Electronicresource]. Conference: *1995 International mechanical engineering congress and exhibition*, San Francisco, CA (United States), pp. 12-17 Nov. 1995. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/196525.

2. Strandberg R., Das D. K. Finned Tube Performance Evaluation with Nanofluids and Conventional Heat Transfer Fluids. *International Journal of Thermal Sciences.* Vol. 49, № 3. pp. 580-588. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.08.008.

3. Xuan Y., Li Q. Investigationon Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer*. 2003. Vol. 125, № 1. pp. 151-155. DOI: 10.1115/1.1532008.

4. Saidur R., Leong K. Y., Mohammad H. A. A Review on Applications and Challenges of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* 2011. Vol. 15, № 3. pp. 1646-1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.

5. Балашов Д.О., Мілованов В.І. Вплив включень наночасток до робочого тіла холодильної машини на якість її роботи. *Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості*. 2019. Вип. 1(14). С. 27-33. DOI: https://doi.org/10.32684/2412-5288-2019-1-14-27-32.

6. Milowanov V., Balashov D. Improvement of Thermotechnical Properties of Refrigerator's Evaporator Using Nanoparticles. *Technology audit and production reserves.* Vol. 2 No. 1(46) (2019): Industrial and Technology Systems. pp. 9-14.

7. Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals.* 1962. Vol. 1, № 3. P. 187-191. DOI: 10.1021/i160003a005.

8. Xuan Y., Roetzel W. Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2000. Vol. 43, # 19. pp. 3701-3707. DOI: 10.1016/s0017-9310(99)00369-5.

9. Brinkman H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics.* 1952. Vol. 20, № 4. pp. 571-581. DOI: 10.1063/1.1700493.

10. Drew D. A., Passman S. L. Theory of Multicomponent Fluids. *Applied Mathematical Sciences.* NewYork : Springer, 1999. 310 p.

11.Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2000. Vol. 21, № 1. pp. 58-64. DOI: 10.1016/s0142-727x(99)00067-3.

12. Kakac S., Yener Y. Convective Heat Transfer. Ed. 3. CRC Press, 2013. 622 p.

References

1. Choi S.U.S., Eastman J.A. Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles [Electronicresource]. Conference: *1995 International mechanical engineering congress and exhibition*, San Francisco, CA (United States), pp. 12-17 Nov. 1995. URL: http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/196525

2. Strandberg R., Das D. K. Finned Tube Performance Evaluation with Nanofluids and Conventional Heat Transfer Fluids. *International Journal of Thermal Sciences.* 2010. Vol. 49, № 3. pp. 580-588. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2009.08.008.

3. Xuan Y., Li Q. Investigationon Convective Heat Transfer and Flow Features of Nanofluids. *Journal of Heat Transfer.* 2003. Vol. 125, № 1. pp. 151-155. DOI: 10.1115/1.1532008.

4. Saidur R., Leong K. Y., Mohammad H. A. A Review on Applications and Challenges of Nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15, № 3. pp. 1646-1668. DOI: 10.1016/j.rser.2010.11.035.

5. Balashov D. O., Milovanov V. I. Vplyv vkliuchen nanochastok do robochoho tila kholodylnoi mashyny na yakist yii roboty. *Zbìrnik naukovih prac' Odes'koï deržavnoï akademìï tehnìčnogo regulûvannâ ta âkostì.* 2019. Вип. 1 14). С. 27-33. DOI: https://doi.org/10.32684/2412-5288-2019-1-14-27-32.

6. Milowanov V., Balashov D. Improvement of Thermotechnical Properties of Refrigerator’s Evaporator Using Nanoparticles. *Technology audit and production reserves.*Vol. 2 No. 1(46) (2019): Industrial and Technology Systems. pp. 9-14.

7. Hamilton R. L., Crosser O. K. Thermal Conductivity of Heterogeneous Two-Component Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals.* 1962. Vol. 1, № 3. P. 187-191. DOI: 10.1021/i160003a005.

8. Xuan Y., Roetzel W. Conceptions for Heat Transfer Correlation of Nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2000. Vol. 43, # 19. pp. 3701-3707. DOI: 10.1016/s0017-9310(99)00369-5.

9. Brinkman H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. *The Journal of Chemical Physics.* 1952. Vol. 20, № 4. pp. 571-581. DOI: 10.1063/1.1700493.

10. Drew D. A., Passman S. L. Theory of Multicomponent Fluids. *Applied Mathematical Sciences.* NewYork : Springer, 1999. 310 p.

11. Xuan Y., Li Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow.* 2000. Vol. 21, № 1. pp. 58-64. DOI: 10.1016/s0142-727x(99)00067-3.

12. Kakac S., Yener Y. Convective Heat Transfer. Ed. 3. CRC Press, 2013. 622 p.

Надійшла до редакції 06.09.2021