

УДК 535.36+536.24+544.77

## Експериментальне дослідження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні нанохолодоагенту R141b/наночастинки TiO<sub>2</sub> на поверхнях з різним ступенем змочування

Т. В. Лук'янова, О. Я. Хлієва, Ю. В. Семенюк, В. П. Желєзний, С. Г. Корнієвич, Е. І. Альтман  
Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна

*Як один із перспективних і недорогих способів інтенсифікації процесів кипіння холодоагентів у випарниках холодильних машин останнім часом розглядається введення в склад робочого тіла наночастинок. Наявні в даний час експериментальні дослідження в цій області нечисленні й суперечливі. Тому дослідження впливу добавок наночастинок на процес кипіння модельного холодоагенту є актуальними.*

*В роботі наведено результати експериментального дослідження впливу добавок наночастинок TiO<sub>2</sub> (0,1 мас. %) і поверхнево-активної речовини (ПАР) Span80 (0,1 мас. %) в холодоагент R141b на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі. При проведенні експерименту густина теплового потоку варіювалася від 5 до 60 кВт·м<sup>-2</sup>, значення тиску підтримувалися рівними 0,2, 0,3 і 0,4 МПа. Експерименти проведено при кипінні об'єктів дослідження на двох поверхнях нагріву, які відрізнялися ступенем змочування холодоагентом R141b: на поверхні з нержавкої сталі та на поверхні, вкритій тонким шаром фторопласту.*

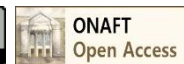
*Встановлено, що при кипінні на поверхні, вкритій фторопластом, спостерігаються значно більші значення перегріву в порівнянні з металевій поверхні, а відтак, менші значення коефіцієнту тепловіддачі. Зроблено висновок, що зниження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні на поверхні, покритій фторопластом, обумовлено переважно не зміною ступеня змочування, а меншою шорсткістю поверхні фторопластового покриття. Показано, що уведення у холодоагент наночастинок і ПАР призводить до інтенсифікації процесу тепловіддачі при кипінні в діапазонах параметрів, характерних для роботи випарників холодильних систем.*

**Ключові слова:** Холодоагент, Нанофлюїд, Кипіння у вільному об'ємі, Коефіцієнт тепловіддачі, Інтенсифікація тепловіддачі

© The Author(s) 2018. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



### 1 Вступ

В даний час активно досліджуються перспективи застосування нанофлюїдів (колоїдних розчинів наночастинок в рідинах) для підвищення інтенсивності процесу кипіння, і, як наслідок, підвищення енергетичної ефективності різноманітного холодильного обладнання. Підвищення коефіцієнта тепловіддачі при кипінні для випарників холодильних машин має істотне значення, оскільки відомо, що інтенсивність тепловіддачі в них невисока [1]. Незважаючи на великий практичний інтерес до застосування нанофлюїдів у холодильній промисловості [2–5], більшість робіт з дослідження як їхніх теплофізичних властивостей, так і процесів теплообміну, було проведено з використанням води як базової рідини при приготуванні нанофлюїдів [6–8]. Таким чином, кількість досліджень, присвячених процесу кипіння нанохолодоагентів, залишається незначним [9–15].

Крім того, ще однією проблемою при розгляді перспектив використання нанохолодоагентів є суперечливість наведеної у наукових публікаціях інформації. В роботах повідомлялося про всі можливі ефекти від присутності наночастинок у базовій рідині:

збільшення коефіцієнта тепловіддачі (КТВ) [9, 10, 12, 13, 15]; відсутність ефекту для КТВ [16–18]; зниження КТВ [11, 14, 19–24]. Крім того, є ще одне мало вивчене питання, пов'язане з дослідженням процесу кипіння нанофлюїдів, - це вплив змочування теплообмінної поверхні нанофлюїдами на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні. Як відомо [1], одним із основних шляхів інтенсифікації теплообміну при кипінні є створення найсприятливіших умов для виникнення і зростання парової фази та для збільшення числа центрів пароутворення.

На сьогодні відома низка робіт, в яких розглядається можливість покриття теплообмінних поверхонь випарників тонким шаром матеріалу, який відрізняється від базової поверхні ступенем змочування [1, 25–28]. У наведених вище дослідженнях як одне із таких покриттів застосовувався тонкий шар фторопласту (тефлону), хоча висновки про доцільність його використання для інтенсифікації тепловіддачі неоднозначні. Разом з тим, в роботі [26] відзначається, що це покриття можна рекомендувати для подальших випробувань, оскільки крім інтенсифікації тепловіддачі воно запобігає корозії стінок трубок.

З урахуванням викладеного предметом цього дослідження було обрано вплив добавок наночастинок

TiO<sub>2</sub> і неіоногенної поверхнево-активної речовини (ПАР) Span-80 на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні модельного холодоагенту R141b у вільному об'ємі на теплообмінних поверхнях з різним ступенем змочування.

## 2 Об'єкти дослідження

Базовою рідиною для приготування нанофлюїду було обрано холодоагент R141b, CAS № 1717-00-6 (виробник Zhejiang mg refrigerant co. Ltd, Китай). В якості добавки використовувалися наночастинки TiO<sub>2</sub> з розміром у порошку менш 25 нм, CAS № 1317-70-0 (Sigma-Aldrich).

Вибір матеріалу наночастинок (TiO<sub>2</sub>) обумовлювався їх хімічною стабільністю, відпрацьованою технологією виробництва і низькою вартістю. Холодоагент R141b обрано з кількох причин. По-перше, цей холодоагент знаходиться в рідкому стані при температурі навколишнього середовища й атмосферному тиску, тому його зручно використовувати при приготуванні нанофлюїду і при дослідженні процесів його кипіння. По-друге, незважаючи на відмінності у фізичних властивостях холодоагенту R141b та холодоагентів, що знайшли в даний час широке застосування на практиці (наприклад, R134a, R410A та інші), всі вони належать до однієї групи галоїдозаміщених вуглеводнів. Тому закономірності, встановлені при дослідженні процесу кипіння модельної системи R141b/наночастинки, можуть поширюватися і на галоїдозаміщені холодоагенти, які широко використовуються в холодильній промисловості.

Детально методика приготування нанофлюїду на основі холодоагенту R141b та наночастинок TiO<sub>2</sub> і результати дослідження його агрегативної стійкості наведені в [29]. Було показано, що агрегативно стабільний нанофлюїд на основі R141b і наночастинок TiO<sub>2</sub> можна приготувати тільки з використанням поверхнево активної речовини (ПАР), в якості якої було підібрано ПАР Span-80 CAS № 1338-43-8 (Sigma-Aldrich).

Необхідно враховувати, що не тільки домішки наночастинок, але і домішки ПАР впливають на теплофізичні властивості базової рідини та внутрішні характеристики процесу кипіння. Тому об'єктами дослідження в даній роботі були:

- холодоагент R141b без домішок наночастинок і ПАР - *R141b*;
- розчин холодоагенту R141b з ПАР Span80 (0,1% мас.) - *R141b/ПАР*;
- нанофлюїд, що складався з холодоагенту R141b, ПАР Span80 (0,1% мас.) та наночастинок TiO<sub>2</sub> (0,1% мас.) - *R141b/ПАР/TiO<sub>2</sub>*.

## 3 Методика проведення експерименту з дослідження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі

Схему і принцип роботи експериментальної установки для дослідження процесів кипіння холодоагентів та нанохолодоагентів у вільному об'ємі

наведено в [24]. Установка реалізує метод вільної циркуляції речовини у замкнутому контурі. Кипіння рідини відбувалося в циліндричній вимірювальній камері (діаметр - 70 мм, об'єм - 1 дм<sup>3</sup>), яка має бічні плоскопаралельні кварцові вікна для візуального спостереження за процесом кипіння.

Робочими ділянками були два ідентичних змінних капіляри з нержавкої сталі з товщиною стінки 0,1 мм і діаметром 2 мм. Один з капілярів мав покриття з фторопласту товщиною 25±5 мкм (фторопластову суспензію наносили на поверхню капіляра і піддавали високотемпературній обробці). Довжина обох капілярів складала 730 мм, опір - 0,548 Ом при 20 °С.

Середня температура робочої ділянки визначалася за опором внутрішнього термометра - протягнутого через капіляр електроізолюваного платинового дроту. Опір платинового дроту визначався компенсаційним методом з використанням зразкової котушки опору марки P321 класу точності 0,01. Температура киплячої рідини вимірювалася мідним термометром опору. Температурний напір між поверхнею нагріву та температурою кипіння холодоагенту визначався як різниця показань внутрішнього термометра робочої ділянки і мідного термометра опору з використанням даних, отриманих при їх спільному градуванні.

Тиск в осередку вимірювався за допомогою п'єзоелектричного перетворювача тиску WİKA S-10.

Всі вимірювання здійснювалися цифровим мультиметром Picotest M3511A.

На кожній ізотермі дослідження починалося з максимального теплового навантаження на робочій ділянці, яке потім знижувалося з певним кроком.

Тепловий потік, підведений до робочої ділянки, визначався за формулою

$$Q = (U_{рд} \cdot U_{зко}) / R_{окс}, \quad (1)$$

де  $U_{рд}$  та  $U_{зко}$  – падіння напруги на робочій ділянці і зразковій котушці опору, відповідно;  $R_{зко}$  – опір зразкової котушки опору.

Коефіцієнт тепловіддачі розраховувався за формулою

$$h = Q / (F \cdot \Delta t), \quad (2)$$

де  $F$  - площа робочої ділянки;  $\Delta t$  – температурний напір (різниця температур робочої ділянки і киплячої рідини).

Експериментальне дослідження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні проводилося при трьох значеннях температури - 77,9; 67,1 та 52,9 °С, що відповідали значенням абсолютного тиску насичення чистого R141b [30] - 0,20; 0,30 та 0,40 МПа, відповідно. Значення густини теплового потоку варіювалися в інтервалі від 5 до 60 кВт·м<sup>-2</sup>.

## 4 Оцінка невизначеностей експериментальних даних

Аналіз невизначеності виміряних значень густини теплового потоку, перегріву поверхні відносно температури кипіння та коефіцієнта тепловіддачі проводився згідно з методикою, викладеною у [31]. Були розглянуті обидва компоненти невизначеності:

типу А - "випадкова складова" та типу В - "систематична складова". Комбінована стандартна невизначеність результатів вимірювань для обох компонентів невизначеності може бути розрахована як

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left( \frac{df}{dx_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (3)$$

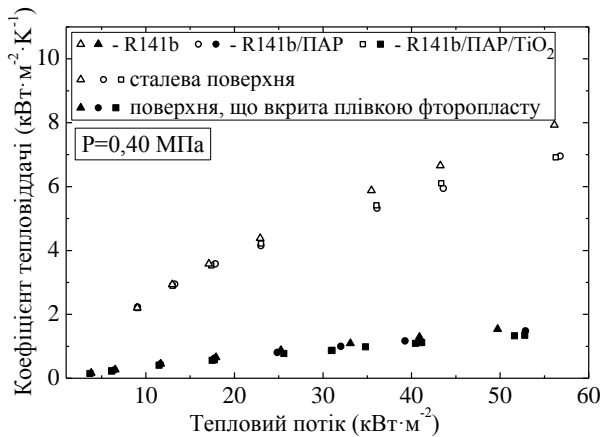
де  $\frac{df}{dx_i}$  - коефіцієнт чутливості;  $u(x_i)$  - стандартна невизначеність, пов'язана з оцінкою вхідних даних  $x_i$ . Вхідні дані для рівняння (3) наведені в таблиці 1. Враховуючи високу ступінь відтворюваності отриманих експериментальних результатів для КТВ та досягнення стаціонарного режиму при кипінні чистих рідин та нанофлюїдів, було встановлено, що розширену невизначеність  $U = ku_c(y)$  для КТВ можна оцінити за коефіцієнтом охоплення  $k=2$  для рівня довіри 0,95. Розширена невизначеність вимірювання густини теплового потоку складала (0,029...0,327) кВт, ступеня перегріву поверхні відносно температури кипіння – (0,16...0,70) °К; коефіцієнта тепловіддачі – (0,050...0,770) кВт·м<sup>-2</sup>·К<sup>-1</sup>.

Таблиця 1 – Вхідні параметри для рівняння (3)

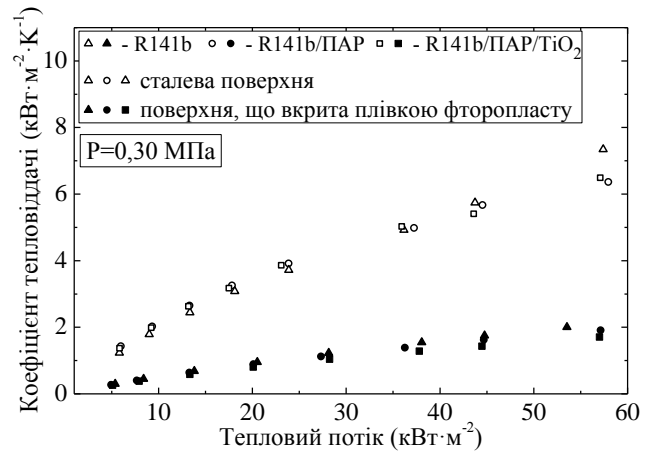
Параметр	Невизначеність	Одиниці виміру
Діаметр капіляра	0,005	мм
Довжина капіляра	0,5	мм
Опір термометру опору	0,046	Ом
Опір котушки опору (RC1)	1·10 <sup>-3</sup>	Ом
Опір котушки опору (RC2)	1·10 <sup>-7</sup>	Ом
Напруга (0-100 мВ)	7	мкВ
Напруга (0-100 В)	2,5	мВ

### 5 Результати дослідження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі

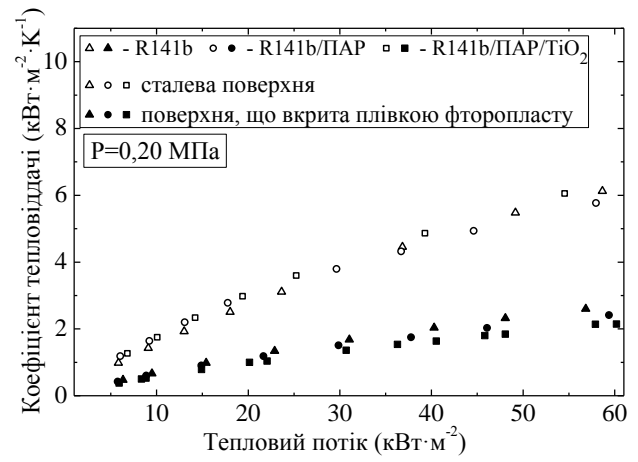
Результати дослідження залежності коефіцієнта тепловіддачі від густини теплового потоку для різних значень тиску насичення наведено на рис. 1.а - 1.в.



а



б

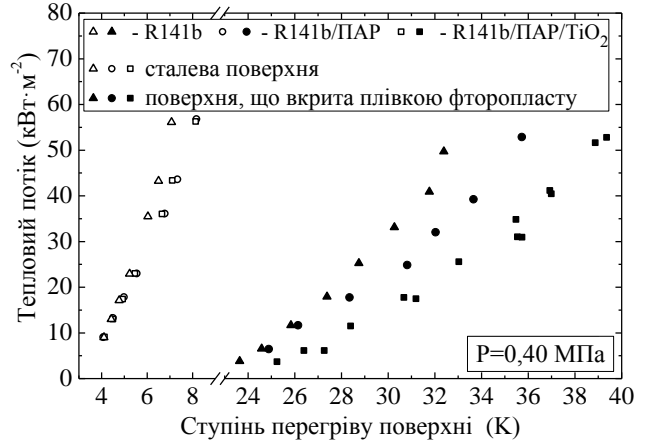


в

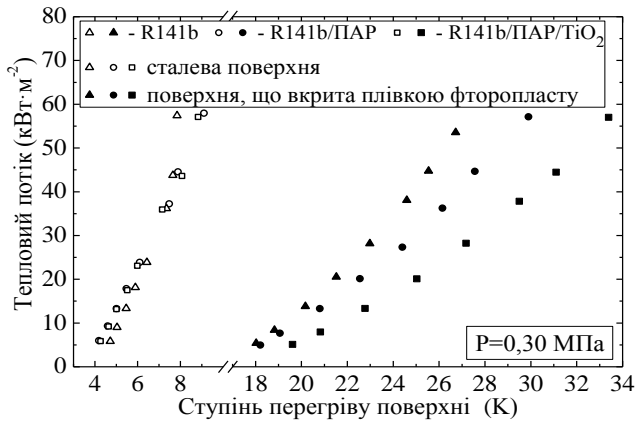
Рисунок 1 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від густини теплового потоку

Результати дослідження залежності густини теплового потоку від ступеня перегріву поверхні нагріву відносно температури кипіння для різних значень тиску насичення наведено на 2.а – 2.в.

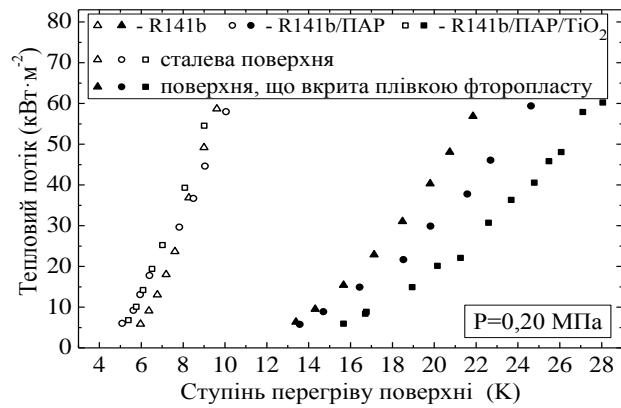
Після аппроксимації отриманих експериментальних даних залежністю виду  $\alpha=A \cdot q^B$  було розраховано значення відносного коефіцієнта тепловіддачі для R141b/ПАР та R141b/ПАР/TiO<sub>2</sub> (рис. 3.а–3.г).



а

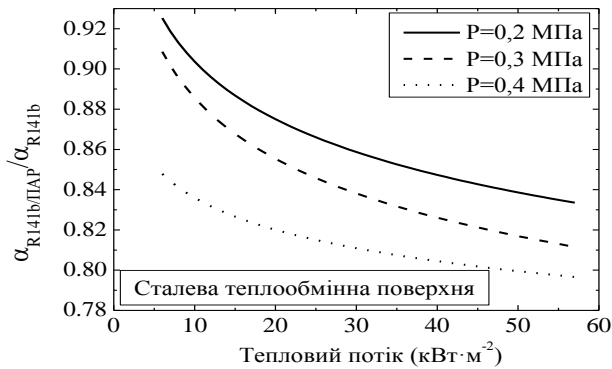


б

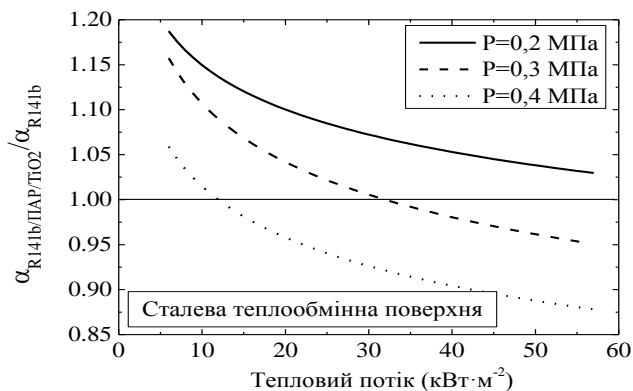


в

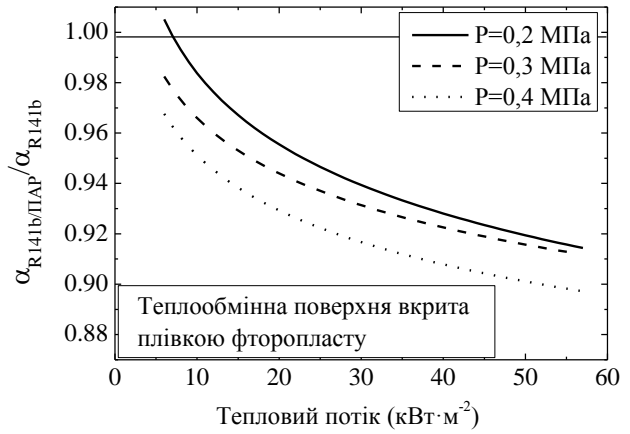
Рисунок 2. – Залежність густини теплового потоку від ступеня перегріву теплообмінної поверхні



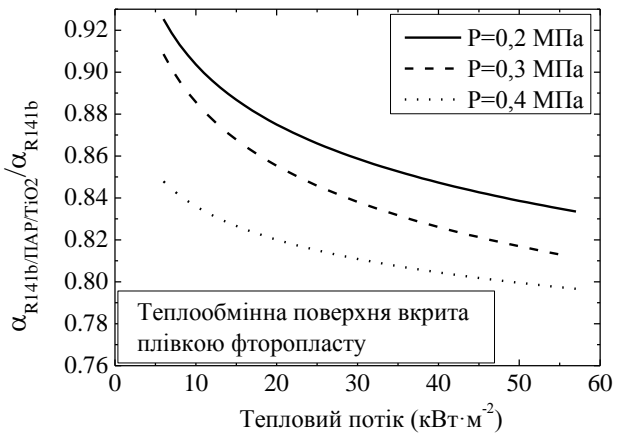
а



б



в



г

Рисунок 3 - Залежність відносного коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha_{R141b/PAP}/\alpha_{R141b}$  або  $\alpha_{R141b/PAP/TiO2}/\alpha_{R141b}$ ) від густини теплового потоку

## 6 Обговорення результатів

Виконаний аналіз отриманих експериментальних даних показує, що додавання до холодоагенту R141b як ПАВ Span-80 (0,1 мас. %), так і наночастинок  $TiO_2$  (0,1 мас. %) з ПАВ Span-80 (0,1 мас. %) в R141b призводить до зростання КТВ при кипінні на сталевій поверхні при низьких густинах теплового потоку й при низьких тисках – рис. 3.а и 3.б. Напроти, при зростанні теплового потоку спостерігається зменшення КТВ при введенні ПАВ і наночастинок  $TiO_2$  у R141b. Ефект зростання КТВ при кипінні за рахунок уведення наночастинок  $TiO_2$  й ПАВ спостерігається тільки при кипінні на сталевій поверхні. На поверхні нагрівача, вкритій фторопластом, при будь-яких параметрах проведення експерименту спостерігається зниження КТВ для систем R141b/ПАВ й R141b/ПАВ/ $TiO_2$  у порівнянні з КТВ при кипінні чистого R141b на такій же поверхні - рис. 3.в й 3.г. Причому тенденція зниження КТВ при додаванні наночастинок  $TiO_2$  й ПАВ зі збільшенням теплового потоку зберігається.

У цілому можна констатувати, що вплив наночастинок і ПАВ на інтенсивність процесу кипіння не є однозначним та суттєво залежить від параметрів проведення експерименту.

Слід зазначити, що саме низькі значення тиску насиченої пари і низькі значення густини теплового потоку характерні для випарників парокомпресійних холодильних машин і теплових насосів. Тому при реальних параметрах роботи холодильного встаткування вплив добавок як ПАР Span-80, так і наночастинок на КТВ при кипінні буде істотним.

Зниження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні таких систем як R141b/ПАР і R141b/ПАР/TiO<sub>2</sub> при зростанні густини теплового потоку в порівнянні з процесом кипіння R141b можна пояснити насамперед зміною внутрішніх характеристик процесу кипіння. Як випливає із результатів нещодавно проведеного дослідження [24, 29], кількість активних центрів пароутворення, очевидно, справляє визначальний вплив на інтенсивність теплообміну при бульбашковому кипінні нанофлюїдів.

Імовірно, осідання на нагрівальній поверхні наночастинок і сорбування ПАР (високомолекулярних сполук) призводить до заповнення нерівностей, які виконували роль центрів пароутворення, і сприяє зменшенню їх кількості. Таке зниження кількості центрів пароутворення надає більший вплив на КТВ при кипінні, ніж зміна теплофізичних властивостей систем R141b/ПАР і R141b/ПАР/TiO<sub>2</sub> у порівнянні з базовою речовиною.

Як відомо [1], при малих густинах теплового потоку (до 10 кВт·м<sup>-2</sup>) для холодоагентів вплив шорсткості поверхні на КТВ дуже малий. Тому збільшення КТВ при малих густинах теплового потоку для систем R141b/ПАР і R141b/ПАР/TiO<sub>2</sub> може бути пов'язане зі зміною їх теплофізичних властивостей у порівнянні з базовою речовиною.

Впливом саме цих факторів значною мірою можна пояснити появу досить суперечливих результатів при вивченні КТВ при кипінні нанофлюїдів.

Як показали виконані експериментальні дослідження, значення КТВ при кипінні всіх розглянутих в роботі об'єктів дослідження на поверхні, вкритій плівкою фторопласту, значно нижчі, ніж на сталевій поверхні – рис. 1.а – 1.г. Як відомо [1, 26], суцільне покриття з фторопласту на теплообмінній поверхні при його малій товщині сприяє інтенсифікації процесів кипіння як води, так і галоїдозаміщених холодоагентів. Але в той же час у [1, 26] відзначається й зворотній ефект при збільшенні товщини плівки фторопласту. При кипінні об'єктів дослідження на поверхнях, вкритих плівкою фторопласту, мають місце три ефекти: зміна крайового кута бульбашки (у порівнянні з крайовим кутом бульбашки на сталевій поверхні); теплоізоляція сталевій поверхні плівкою фторопласту; зміна шорсткості поверхні. Стосовно до результатів власного експерименту, можна констатувати, що отримані ефекти зниження КТВ при кипінні на вкритій фторопластом поверхні для всіх об'єктів дослідження пояснюється в основному зміною шорсткості поверхні.

Даний висновок підтверджується високими значеннями перегріву стінки відносно температури кипіння об'єктів дослідження для поверхні, вкритої плівкою фторопласту – рис. 2.а – 2.г. Як відомо [1], при малих шорсткостях поверхні нагріву процес кипіння виникає при значно більш високих ступенях перегріву

поверхні. Тоді як внесок термічного опору плівки фторопласту товщиною 0,025 мм незначний та складає лише 0,0015 К при густині теплового потоку 60 кВт·м<sup>-2</sup>.

## 7 Висновок

Виконано експериментальні дослідження впливу добавок наночастинок TiO<sub>2</sub> (0,1 мас.%) і поверхнево-активної речовини Span-80 (0,1 мас.%) в холодоагент R141b на коефіцієнт тепловіддачі при кипінні у вільному об'ємі. Дослідження проведено на двох теплообмінних поверхнях, які відрізняються ступенем змочування холодоагентом R141b: на поверхні з нержавкої сталі і на аналогічній поверхні, вкритій тонким шаром фторопласту. При проведенні експерименту варіювалися значення густини теплового потоку від 5 до 60 кВт·м<sup>-2</sup>. Значення тиску в експериментальній установці підтримувалися рівними 0,2, 0,3 і 0,4 МПа.

Показано, що при кипінні на поверхні, вкритій фторопластом, для всіх об'єктів дослідження спостерігалися значно більші значення перегріву поверхні у порівнянні з кипінням на сталевій поверхні, а, відтак, менші значення коефіцієнта тепловіддачі. Зроблено висновок, що зниження коефіцієнта тепловіддачі при кипінні на поверхні, покритій фторопластом, обумовлено переважно не зміною ступеня змочування, а меншою шорсткістю поверхні фторопластового покриття.

Показано, що уведення у холодоагент наночастинок і ПАР призводить до інтенсифікації процесу тепловіддачі при кипінні в діапазонах параметрів, характерних для роботи випарників холодильних систем.

За результатами виконаних досліджень можна констатувати необхідність подальшого експериментального вивчення теплообміну у процесі кипіння перспективних нанохолодоагентів при параметрах роботи випарників холодильних систем. Доцільним є аналіз можливостей застосування різноманітних модифікацій теплообмінних поверхонь з метою інтенсифікації теплообміну у процесі кипіння.

## Література

1. Гоголин А.А., Данилова Г.Н., Азарсков, В. М., Медникова Н. М. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин. – М: Легкая и пищевая промышленность. 1982. 224 с.
2. Celen A. et al. A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and applications // International Journal of Refrigeration. 2014. Vol. 44. P. 125–140. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.05.009.
3. Alawi O.A., Sidik N.A.C. Influence of particle concentration and temperature on the thermophysical properties of CuO/R134a nanorefrigerant // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2014. Vol. 58. P. 79–84. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.038.
4. Azmi W.H. et al. Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 69. P. 415–428.
5. Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P. Improving the

- performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 82. No 3. P. 3656–3669. doi: 10.1016/j.rser.2017.10.097.
6. Solangi K.H. et al. A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids // *Energy*. 2015. Vol. 89. P. 1065–1086.
7. Kakaç S., Pramuanjaroenkij A. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids—A state-of-the-art review // *International journal of thermal sciences*. 2016. Vol. 100. P. 75–97.
8. Fang X. et al. Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: a comprehensive review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. P. 924–940. doi: 10.1016/j.rser.2016.05.047.
9. Peng H. et al. Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube // *International Journal of Refrigeration*. 2009. Vol. 32. No 6. P. 1259–1270. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.01.025.
10. Peng H., Ding G., Hu H. Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid // *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2011. Vol. 35. No 6. P. 960–970. doi: 10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2011.01.016.
11. Trisaksri V., Wongwises S. Nucleate pool boiling heat transfer of TiO<sub>2</sub>-R141b nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. No 5–6. P. 1582–1588. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.041.
12. Tazarv S. et al. Experimental investigation of saturated flow boiling heat transfer to TiO<sub>2</sub>/R141b nanorefrigerant // *Experimental Heat Transfer*. 2016. Vol. 29. No 2. P. 188–204. doi: 10.1080/08916152.2014.973976.
13. Eid E.I. et al. An experimental investigation of the effect of the addition of nano Aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134A // *Heat and Mass Transfer*. 2017. Vol. 53. No 8. P. 2597–2607. doi: j.ijheatmasstransfer.2018.03.046.
14. Chang T.-B., Wang Z.-L. Experimental investigation into effects of ultrasonic vibration on pool boiling heat transfer performance of horizontal low-finned U-tube in TiO<sub>2</sub>/R141b nanofluid // *Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 52. No 11. P. 2381–2390. doi: 10.1007/s0023.
15. Diao Y.H. et al. Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015. Vol. 89. P. 110–115. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.043.
16. You S.M., Kim J.H., Kim K.H. Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer // *Applied physics letters*. 2003. Vol. 83. No 16. P. 3374–3376. doi: 10.1063/1.1619206.
17. Vassallo P., Kumar R., D'Amico S. Pool boiling heat transfer experiments in silica-water nano-fluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2004. Vol. 47, 2, 407–411. doi: 10.1016/S0017-9310(03)00361-2.
18. Kwark S.M. et al. Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010. Vol. 53. No 5–6. P. 972–981. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.018.
19. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling characteristics of nano-fluids // *International journal of heat and mass transfer*. 2003. Vol. 46. No 5. P. 851–862. doi: 10.1016/S0017-9310(02)00348-4.
20. Das S.K., Putra N., Roetzel W. Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes // *International Journal of Multiphase Flow*. 2003. Vol. 29. No 8. P. 1237–1247. doi: 10.1016/S0301-9322(03)00105-8.
21. Bang I.C., Chang S.H. Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-water nano-fluids from a plain surface in a pool // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. No 12. P. 2407–2419. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047.
22. Kim S.J. et al. Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50. No 19–20. P. 4105–4116. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002.
23. Liu Z., Liao L. Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. No 9–10. P. 2593–2602. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.050.
24. Nikulin A. et al. Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 118. P. 746–757. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.008.
25. Attinger D. et al. Surface engineering for phase change heat transfer: A review // *MRS Energy & Sustainability*. 2014. Vol. 1.
26. Гогонин И. И. Влияние краевого угла смачивания на теплоотдачу при кипении // *Теплофизика и аэромеханика*. 2010. Т. 17. № 2. С. 261–267.
27. Takata Y. et al. Effect of surface wettability on boiling and evaporation // *Energy*. 2005. Vol. 30. No 2–4. P. 209–220.
28. Deendarlianto T.Y., Hidaka S., Kohno M. The effect of contact angle on evaporation of water droplet on a heated solid surface // *Fifth international conference on transport phenomena in multiphase systems*. Bialystok, Poland., 2008. P. 59–64.
29. Khliyeva O. et al. An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 4. No 8(94). P. 59–66. doi: 10.15587/1729-4061.2018.139418.
30. Lemmon E.W., Huber M.L., McLinden M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 8.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2007.
31. Taylor B.N., Kuyatt C. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results 1994 Edition, 1994.

## Experimental study of the heat transfer coefficient at boiling of the nano-refrigerant of R141b/TiO<sub>2</sub> nanoparticles on the surfaces with different wettability

T. V. Lukianova, O. Ya. Khlieva, Yu. V. Semenyuk, V. P. Zhelezny, S. G. Kornievich, E. I. Altman  
Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odessa, 65039, Ukraine

The adding of the nanoparticles into the refrigerants is one of the promising and low-expensive ways to intensify the boiling processes in the evaporators of the refrigerators. The experimental studies in this area available currently are not numerous and contradictory. Therefore, the study of the effect of nanoparticles additives on the boiling process of the model refrigerant is currently important. The results of an experimental study of the influence of the additives of the TiO<sub>2</sub> nanoparticles (0.1% by weight) and the surfactant Span80 (0.1% by weight) in the refrigerant R141b on the pool boiling heat transfer coefficient are presented in the paper. The heat flux values were varied during the experiment from 5 to 60 kW·m<sup>-2</sup>. The pressure values in the experimental setup were maintained at 0.2, 0.3 and 0.4 MPa. The experimental investigation of the boiling the objects of study were carried out on two heaters surfaces with different wettability by the refrigerant R141b: the stainless steel surface and the similar surface, covered with a thin layer of Teflon. It was shown the superheating of the surface covered with Teflon during the boiling of the objects of the study was significantly higher in comparison with theirs boiling on the stainless steel surface. Consequently the lower values of heat transfer coefficient at boiling on Teflon surface have been observed. It was concluded the reduction of the roughness of the surface coated the Teflon layer in comparison with this characteristic for the stainless steel surface, not the change in the surfaces wettability, was the main cause of the decrease in the heat transfer coefficient. The enhancement of the heat transfer coefficient at low heat fluxes and low values of pressure during the boiling of the solution the surfactant Span-80 in the R141b and of the nanofluid of R141b/TiO<sub>2</sub> nanoparticles/surfactant Span-80 in comparison with the heat transfer coefficient of the pure refrigerant R141b has been observed. It should be noted the heat transfer enhancement with adding the nanoparticles and surfactant was observed at the operating parameters typical for the evaporators of refrigeration systems.

**Keywords:** Nanofluids; Refrigerant, Pool boiling, Heat transfer coefficient, Heat transfer intensification.

### References

- Gogolin, A.A., Danilova, G.N., Azarskov, V.M. Mednikova, N.M. (1982). Heat Transfer Enhancement in Refrigeration Machines Evaporators. Moscow: food industry (in Russian).
- Celen, A., Çebi, A., Aktas, M., Mahian, O., Dalkilic, A. S., Wongwises, S. (2014). A review of nanorefrigerants: Flow characteristics and applications. *International Journal of Refrigeration*, 44, 125–140. doi:10.1016/j.ijrefrig.2014.05.009
- Alawi, O. A., Sidik, N. A. C. (2014). Influence of particle concentration and temperature on the thermophysical properties of CuO/R134a nanorefrigerant. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 58, 79–84. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.08.038
- Azmi, W. H., Sharif, M. Z., Yusof, T. M., Mamat, R. Redhwan, A. A. M. (2017). Potential of nanorefrigerant and nanolubricant on energy saving in refrigeration system—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 415–428.
- Bhattad, A., Sarkar, J., Ghosh, P. (2018). Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82 (3), 3656–3669. doi:10.1016/j.rser.2017.10.097
- Solangi, K. H., Kazi, S. N., Luhur, M. R., Badarudin, A., Amiri, A., Sadri, R., ... Teng, K. H. (2015). A comprehensive review of thermo-physical properties and convective heat transfer to nanofluids. *Energy*, 89, 1065–1086.
- Kakaç, S., Pramuanjaroenkij, A. (2016). Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids—A state-of-the-art review. *International journal of thermal sciences*, 100, 75–97.
- Fang, X., Chen, Y., Zhang, H., Chen, W., Dong, A., Wang, R. (2016). Heat transfer and critical heat flux of nanofluid boiling: a comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 924–940. doi:10.1016/j.rser.2016.05.047
- Peng, H., Ding, G., Jiang, W., Hu, H., Gao, Y. (2009). Heat transfer characteristics of refrigerant-based nanofluid flow boiling inside a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*, 32(6), 1259–1270. doi:10.1016/j.ijrefrig.2009.01.025
- Peng, H., Ding, G., Hu, H. (2011). Effect of surfactant additives on nucleate pool boiling heat transfer of refrigerant-based nanofluid. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(6), 960–970. doi:10.1016/J.EXPTHERMFLUSCI.2011.01.016
- Trisaksri, V., Wongwises, S. (2009). Nucleate pool boiling heat transfer of TiO<sub>2</sub>-R141b nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(5–6), 1582–1588. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.07.041
- Tazarv, S., Saffar-Avval, M., Khalvati, F., Mirzaee, E., Mansoori, Z. (2016). Experimental investigation of saturated flow boiling heat transfer to TiO<sub>2</sub>/R141b nanorefrigerant. *Experimental Heat Transfer*, 29(2), 188–204. doi:10.1080/08916152.2014.973976
- Eid, E. I., Khalaf-Allah, R. A., Taher, S. H., Al-Nagdy, A. A. (2017). An experimental investigation of the effect of the addition of nano Aluminum oxide on pool boiling of refrigerant 134A. *Heat and Mass Transfer*, 53(8), 2597–2607. doi:j.ijheatmasstransfer.2018.03.046
- Chang, T.-B., Wang, Z.-L. (2016). Experimental investigation into effects of ultrasonic vibration on pool

- boiling heat transfer performance of horizontal low-finned U-tube in TiO<sub>2</sub>/R141b nanofluid. *Heat and Mass Transfer*, 52(11), 2381–2390. doi:10.1007/s0023
15. Diao, Y. H., Li, C. Z., Zhao, Y. H., Liu, Y. et Wang, S. (2015). Experimental investigation on the pool boiling characteristics and critical heat flux of Cu-R141b nanorefrigerant under atmospheric pressure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 89, 110–115. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.05.043
16. You, S. M., Kim, J. H., Kim, K. H. (2003). Effect of nanoparticles on critical heat flux of water in pool boiling heat transfer. *Applied physics letters*, 83(16), 3374–3376. doi:10.1063/1.1619206
17. Vassallo, P., Kumar, R., D'Amico, S. (2004). Pool boiling heat transfer experiments in silica–water nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 47(2), 407–411. doi:10.1016/S0017-9310(03)00361-2
18. Kwark, S. M., Kumar, R., Moreno, G., Yoo, J., You, S. M. (2010). Pool boiling characteristics of low concentration nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(5–6), 972–981. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.11.018
19. Das, S. K., Putra, N., Roetzel, W. (2003a). Pool boiling characteristics of nano-fluids. *International journal of heat and mass transfer*, 46(5), 851–862. doi:10.1016/S0017-9310(02)00348-4
20. Das, S. K., Putra, N., Roetzel, W. (2003b). Pool boiling of nano-fluids on horizontal narrow tubes. *International Journal of Multiphase Flow*, 29(8), 1237–1247. doi:10.1016/S0301-9322(03)00105-8
21. Bang, I. C., Chang, S. H. (2005). Boiling heat transfer performance and phenomena of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–water nano-fluids from a plain surface in a pool. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48(12), 2407–2419. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.047
22. Kim, S. J., Bang, I. C., Buongiorno, J., Hu, L. W. (2007). Surface wettability change during pool boiling of nanofluids and its effect on critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 50(19–20), 4105–4116. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.02.002
23. Liu, Z., Liao, L. (2008). Sorption and agglutination phenomenon of nanofluids on a plain heating surface during pool boiling. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 51(9–10), 2593–2602. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.050
24. Nikulin, A., Khliyeva, O., Lukianov, N., Zhelezny, V., Semenyuk, Y. (2018). Study of pool boiling process for the refrigerant R11, isopropanol and isopropanol/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 118, 746–757. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.11.008
25. Attinger, D., Frankiewicz, C., Betz, A. R., Schutzius, T. M., Ganguly, R., Das, A., ... Megaridis, C. M. (2014). Surface engineering for phase change heat transfer: A review. *MRS Energy & Sustainability*, 1.
26. Gogonin, I.I. (2010). Influence of contact angle of wetting on heat transfer at boiling. *Thermophysics and Aeromechanics*, 17 (2), 261–267 (in Russian).
27. Takata, Y., Hidaka, S., Cao, J. M., Nakamura, T., Yamamoto, H., Masuda, M., Ito, T. (2005). Effect of surface wettability on boiling and evaporation. *Energy*, 30(2–4), 209–220.
28. Deendarlianto, T. Y., Hidaka, S., Kohno, M. (2008). The effect of contact angle on evaporation of water droplet on a heated solid surface. *Fifth international conference on transport phenomena in multiphase systems. Bialystok, Poland*. 59–64.
29. Khliyeva, O., Lukianova, T., Semenyuk, Y., Zhelezny, V., Nikulin, A. (2018). An experimental study of the effect of nanoparticle additives to the refrigerant R141b on the pool boiling process. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 4 (8/94), 59–66. doi:10.15587/1729-4061.2018.139418
30. Lemmon, E. W., Huber, M. L., McLinden, M. O. (2007). NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 8.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg.
31. Taylor, B. N., Kuyatt, C. (1994). *Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results 1994 Edition*.

Received 01 March 2018

Approved 24 April 2018

Available in Internet 30 June 2018