

ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ

УДК 531.756.4:531.787.913

Експериментальне дослідження густини та тиску насичених парів розчинів холодоагенту R1233zd(E) у компресорному мастилі Planetelf ACD 100FY**В.П. Желєзний¹✉, В.О. Борисов², Д.О. Івченко³, В.Ф. Халак⁴**¹⁻⁴Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна 112, м. Одеса, 65039, Україна;✉ e-mail: ¹zheleznyv@gmail.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0987-1561>; ²<https://orcid.org/0000-0002-2678-3774>;³<https://orcid.org/0000-0003-4710-3827>; ⁴<https://orcid.org/0000-0003-2046-4139>

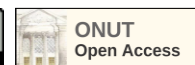
Підвищення ефективності використання низькопотенційних джерел енергії та теплових відходів низького температурного потенціалу можливе у разі використання високотемпературних теплових насосів, що входять до складу систем енергетичних установок, які реалізують органічний цикл Ренкіна. У якості робочих тіл у високотемпературних теплових насосах мають використовуватися холодоагенти, що мають порівняно високу температуру кипіння і відповідають сучасним еколого-енергетичним вимогам. Наразі холодоагент R1233zd(E) належить до числа найперспективніших робочих тіл для високотемпературних теплових насосів. Теплофізичні властивості цього холодоагенту досить добре вивчені. Однак реальним робочим тілом пароконденсуючих теплових насосів є не чистий холодоагент, а розчини цього холодоагенту в мастилах. Дані про теплофізичні властивості розчинів холодоагенту R1233zd(E) у поліефірних компресорних мастилах на цей час практично відсутні. У статті представлено результати експериментального дослідження тиску насичених парів, густини розчинів холодоагенту R1233zd(E) із синтетичним поліолефіновим мастилом Planetelf ACD 100FY у широкому діапазоні температур і концентрацій компонентів. Дослідження виконано з використанням статичних методів вимірювання густини та тиску насичених парів у діапазоні температур від 273 до 343 К і за тисків до 5 бар. Отримані дані апроксимовано малоконстантними рівняннями зручними для практичного застосування. Невизначеність отриманих даних для густини розчинів холодоагент/мастило не перевищує 0.30%. Невизначеність отриманих даних про тиск насичених парів змінюється від 0.06 бар (при тиску 0,2 бар) до 0,15 бар (при тиску 5 бар). У роботі вивчено температурну та концентраційну залежність тиску насичених парів, густини. Наведено дані про теплофізичні властивості компресорного мастила Planetelf ACD. Виконано аналіз поведінки надлишкових термодинамічних функцій рідкого розчину R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY.

Ключові слова: Експеримент; Тиск насичених парів; Густина; Холодоагент R1233zd; Компресорне мастило; Розчин холодоагент/мастило (РХМ)

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i3.2998>

© The Author(s) 2024. 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**

Протягом останніх трьох десятиліть у системах охолодження і кондиціонування повітря реалізується технологічна політика виключення холо-

доагентів, що руйнують озоновий шар і мають великий потенціал глобального потепління – GWP. Як альтернативу раніше широко застосовуваним холодоагентам R12, R22 стали широко застосовуватися гідрофторвуглеці (HFC). Однак

більшість гідрофторвуглеців мають великий потенціал глобального потепління (GWP), що визначає актуальність подальшого розроблення та впровадження в промисловість екологічно безпечних альтернативних холодоагентів. У зв'язку з цим, Європейський Союз [1] планує протягом наступних десятиліть покроково скорочувати використання HFC-холодоагентів. Кігальська поправка (UNEP, MOP 28 у Кігалі, Руанда, 10-14 жовтня 2016 р.) [2] до Монреальського протоколу встановила поетапну відмову від традиційних HFC холодоагентів через їхній високий потенціал глобального потепління. Останніми роками багато дослідників вивчають перспективу використання природних речовин, таких як аміак, діоксид вуглецю та вуглеводні (HCs), у різних системах кондиціонування та виробництва холоду. Однак застосування природних (натуральних) холодоагентів обмежене як їхньою високою займістістю, так і порівняно високим тиском насичених парів (діоксид вуглецю).

Нові синтетичні гідрофторолефіни (HFO), що з'явилися порівняно нещодавно на ринку, також розглядаються як перспективні кандидати для заміни HFC-холодоагентів завдяки низькому потенціалу глобального потепління (від 0 до 1) і близьким значенням властивостей до традиційних холодоагентів HFC і HCs. Наприклад, HFO R1233zd(E) – безпечна та незаймиста рідина з GWP, що дорівнює 1, є екологічно безпечною альтернативою традиційним холодоагентам для систем низького тиску, замінюючи собою такі речовини, як R245fa (GWP = 950), R123 (GWP = 77 та ODP = 0,06) та R134a (GWP = 1300). Тому застосування нових екологічно безпечних холодоагентів на основі гідрофторолефінів (HFO) і гідрохлорфторолефінів (HCFO) з низьким рівнем екологічного впливу на навколишнє середовище стає дедалі перспективнішим для нового покоління високотемпературних теплових насосів. Застосування в промисловості високотемпературних теплових насосів особливо цікаве для рекуперації теплоти, використання в системах термоакумуляції теплоти під час реалізації органічних циклів Ренкіна, а також використання в технологічних процесах виробництва пари, сушіння, стерилізації тощо.

Традиційні HFC-холодоагенти низького тиску, що використовуються у високотемпературних теплових насосах (НТНП) та органічних циклах Ренкіна (ORC), мають високе значення GWP: від

1020 для R245fa, до 1370 для R236fe і 9810 для R236fa. Нещодавно на ринку з'явилося нове покоління холодоагентів низького тиску з дуже низьким GWP: найцікавішими з яких є R1234ze(Z) та R1233zd(E).

Складність розв'язання проблеми пошуку альтернативних холодоагентів для холодильної техніки пов'язана з тим, що реальними робочими тілами пароконденсаторних холодильних машин є не чисті холодоагенти, а розчини холодоагентів у мастилах (PXM) [3, 4]. Тому вплив домішок компресорного мастила в холодоагенті на його теплофізичні властивості та контроль за циркуляцією РГМ контуром компресорної системи слід розглядати як важливі чинники, які визначають енергетичну ефективність холодильного обладнання та інтенсивність теплообміну у випарнику і конденсаторі [3, 4]. Зазначені фактори мають не менше значення, ніж вибір самого альтернативного холодоагенту. Тому коректний аналіз можливостей підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання, що використовує нові еколого-енергетичні холодоагенти, можливий тільки за наявності інформації про теплофізичні властивості PXM. Накопичений досвід вивчення теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мастило показує, що вони є складними термодинамічними системами [4]. Методи термодинамічного моделювання розчинів холодоагент/мастило досі залишаються недостатньо розробленими. Тому, для таких складних термодинамічних систем, як розчини холодоагентів у компресорних мастилах, найнадійнішим способом отримання достовірних даних про їхні теплофізичні властивості залишається експеримент.

У цій статті автори представляють результати експериментального дослідження термодинамічних властивостей розчинів R1233zd(E) з компресорним мастилом Planetelf ACD 100FY. У процесі виконаних експериментальних досліджень було виміряно такі важливі термодинамічні властивості, як густина і тиск насичених парів за різних температур і концентрацій холодоагенту.

2. Об'єкти дослідження

У представленій статті як об'єкти дослідження використовували зразки розчинів холодоагент (R1233zd)/компресорне мастило (Planetelf ACD 100FY) різних складів. Холодоагент R1233zd(E) придбано у виробника компанії Honeywell (США).

Характеристичні параметри цього холодоагенту подано в таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристичні параметри холодоагента R1233zd(E) [5].

Параметр	R1233zd(E)
Хімічна формула	C ₃ H ₂ ClF ₃
Молекулярна маса, г/моль	130,5
Температура кипіння, К	292,15
Температура кристалізації, К	170,15
Критична температура (T _k), К	438,75
Критичний тиск (P _k), бар	36,2
Густина при 20 °С, кг/м ³	1271,61
Тиск насиченої пари, бар	1,7 (при 25 °С)
Потенціал руйнування озону (ODP)	~0,00024
Потенціал глобального потепління (GWP)	~1
Клас безпеки (ASHRAE)	A1 (негорючий, нетоксичний)

Синтетичне компресорне мастило Planetelf ACD 100FY було вироблено компанією TOTAL LUBRICANTS (США). Характеристичні параметри компресорного мастила Planetelf ACD 100FY представлені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Характеристичні параметри компресорного мастила Planetelf ACD 100FY [6]

Параметр	Planetelf ACD 100FY
Тип мастила	Синтетичне
Колір	Прозоре або світло-жовте
Густина при 15°C	960 кг/м ³
В'язкість при 40°C	100 мм ² /с
В'язкість при 100°C	20 мм ² /с
Температура застигання	-36°C
Температура спалаху	>230°C
Кислотне число	<0,1 мг КОГ/г
Вміст води	<50 ppm

Для очищення від можливих домішок води та розчинених газів компресорне мастило нагрівали до температури $T = 388$ К, а потім вакуумували протягом 60 с. Процедуру очищення повторювали кілька разів. Чистоту зразків компресорного мастила перевіряли на універсальному лабораторному

рефрактометрі ІРФ-23.

Технологія отримання зразків холодоагент/мастило передбачала багаторазову деаерацію холодоагенту R1233zd і компресорного мастила Planetelf ACD 100FY перед їх змішуванням у вимірювальній комірці.

3. Експериментальне дослідження

Експериментальне дослідження густини та тиску насичених парів розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY виконано статичними методами. Схема експериментальної установки наведена на рисунку 1. Основним елементом експериментальної установки є скляна вимірювальна комірка 12 (товстостінний скляний пікнометр). Пікнометр встановлений у скляній посудині Дьюара 13, яку використовували як термостат. Температуру в термостаті підтримували з використанням високоточного регулятора температури 7 (И-102) і холодильної машини 1. Рівномірне температурне поле в термостаті забезпечувала мішалка 11. Усередині вимірювальної комірки розташована магнітна мішалка для прискорення процесу встановлення термодинамічної рівноваги в зразку РХМ. До верхньої частини скляного пікнометра приєднано заправний вентиль V4 і перетворювач тиску 6 (WIKА-A10). Вимірювання температури виконувалося платиновим термометром опору 5 (WIKА-рт100). Показання термометра і перетворювача тиску вимірювалися мультиметром (RIGOL DM30 68) і записувалися на ноутбук 9. Візуальне спостереження за рівнем рідкої фази зразків РХМ у вимірювальній комірці (пікнометрі) здійснювалося з використанням катетометра 15 (КМ-8). Підготовка зразків досліджуваних РХМ здійснювалася безпосередньо у вимірювальній комірці. Певна кількість очищеної від неконденсованих домішок (компонентів повітря) компресорного мастила заправлялася у вимірювальну комірку. Кількість мастила, яке потрапило в комірку, визначали за зміною маси вимірювальної комірки. Потім вимірювальну комірку герметизували й охолоджували рідким азотом до температури кристалізації компресорного мастила. З метою видалення повітря після кристалізації мастила осередок вакуумували. Необхідну концентрацію розчину забезпечували заправленням із балончика 1 певної маси деаерованого зразка холодоагенту R1233zd(E). Точну кількість заправленого холодоагенту визначали за зміною маси вимірювальної комірки.

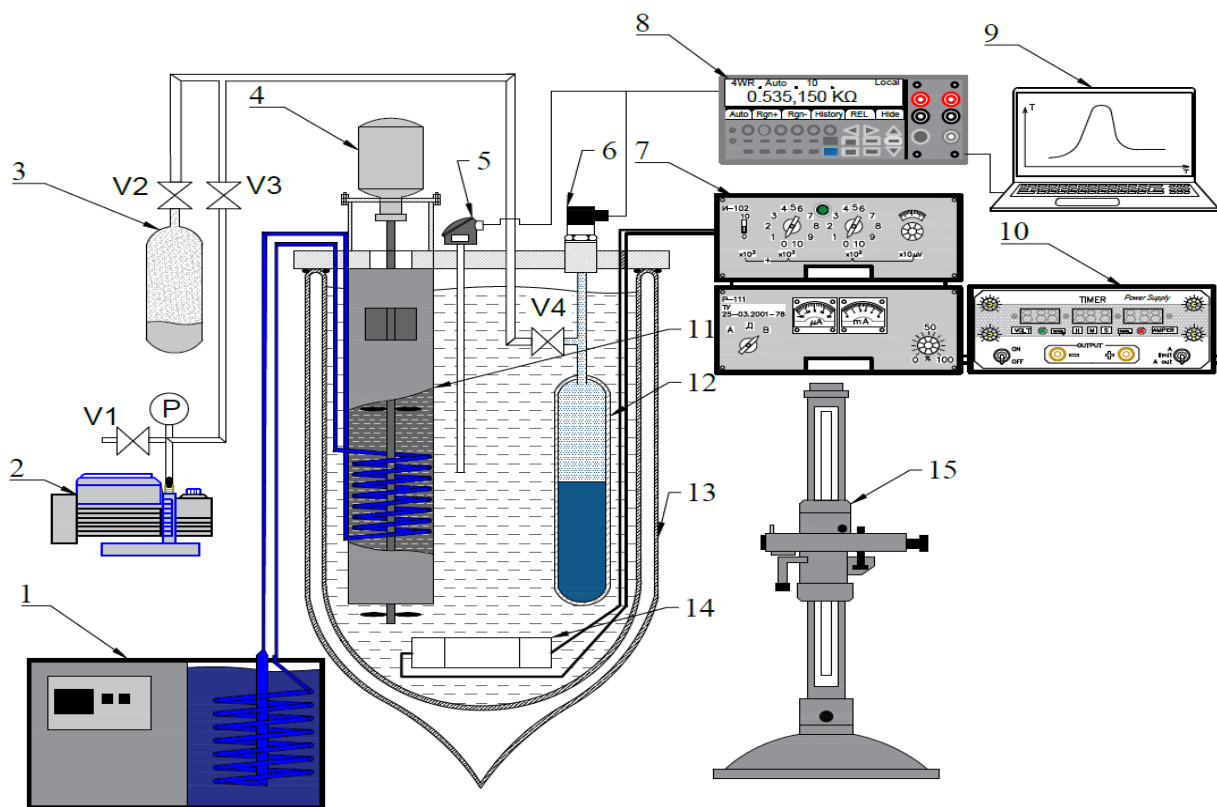


Рисунок 1 – Схема експериментальної установки для дослідження тиску насичених парів і густини РХМ: 1 – холодильна машина; 2 – вакуумний насос; 3 – заправний балончик; 4 – двигун мішалки; 5 – термометр опору; 6 – перетворювач тиску; 7 – автоматична система регулювання температури; 8 – мультиметр; 9 – ноутбук; 10 – джерело живлення; 11 – мішалка; 12 – скляна вимірювальна комірка (пікнометр); 13 – посудина Дюара; 14 – регульовальний нагрівач; 15 – катетометр

3.1 Обробка отриманих даних

Повний об'єм вимірювальної комірки та об'єм зразків за різних положень межі розділу парової та рідких фаз був попередньо визначений у тарованому експерименті з використанням даних щодо густини еталонної рідини (води). Процедура тарування вимірювальної комірки полягала у визначенні рівня рідкої фази еталонної рідини та її об'єму в пікнометрі. Маса заправленої еталонної рідини визначалася ваговим методом. Повний об'єм вимірювальної комірки (пікнометра) склав – $V_0 = 21,05 \text{ см}^3$. Залежність об'єму рідкої фази тарувальної рідини (дистильована вода) від висоти рівня меніска у вимірювальній комірці була апроксимована рівнянням:

$$V_{liq} = 0.10569 \cdot \Delta h - 0.8654 \quad (1)$$

де V_{liq} – об'єм рідкої фази тарувальної рідини, см^3 ; Δh – різниця висот меніска і мітки на пікнометрі, мм.

Концентрацію холодоагенту в зразках РХМ, що перебувають у вимірювальній комірці за різ-

них температур, визначали з урахуванням кількості холодоагенту, що перебуває в паровій фазі за формулою:

$$x_r = \frac{m_r - m_r^{Vap}}{m_r + m_{oil} - m_r^{Vap}} \quad (2)$$

де m_{oil} – маса заправленого в комірку компресорного мастила, кг; m_r – маса заправленого в комірку холодоагенту, кг; m_r^{Vap} – маса газоподібного холодоагенту у вимірювальній комірці, кг.

$$m_r^{Vap} = \rho_r \cdot (V_0 - V^{liq})$$

Густину рідкої фази зразків РХМ розраховували на підставі отриманої інформації про маси холодоагенту та мастила, що заправлені у вимірювальну комірку, і визначеного при температурі термостатування об'єму гомогенної рідкої фази РХМ за формулою:

$$\rho_{mix}^{liq} = \frac{m_{mix}^{liq}}{V^{liq}} = \frac{m_r + m_{oil} - m_r^{Vap}}{V^{liq}} \quad (3)$$

де m_{mix}^{liq} – маса РХМ, кг, заправленого у вимірюва-

льну комірку; V^{liq} – об'єм рідкого розчину в комірці, м³.

3.2. Результати дослідження

Вимірювання тиску насичених парів і густини зразків розчинів R1233zd(E)/PlanetelF 100FY про-

ведено в діапазонах параметрів: температур – від 273,2 до 343,22 °С, тисків – від 0,48 до 5 бар, за середніх масових концентрацій заправки – 20,87 мас.%, 37,83 мас.%, 43,73 мас. %, 77,3 мас. %, 90,76 мас. % холодоагенту в мастилі. Експериментальні дані наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Тиск насичених парів і густина розчинів R1233zd(E)/PlanetelF 100FY

T, K	w_r^* , кг/кг	w_r^{**} , кг/кг	p , bar	ρ' , кг/м ³	T, K	w_r^* , кг/кг	w_r^{**} , кг/кг	p , bar	ρ' , кг/м ³
273.2	100.00	100.00	0.481	1321.30	323.15	100.00	100.0	2.897	1199.70
273.21	90.77	90.79	0.474	1269.07	323.22	90.77	90.640	2.908	1170.26
273.56	77.30	77.32	0.459	1208.38	323.17	77.30	77.300	2.833	1128.96
273.2	43.73	43.82	0.327	1079.77	323.19	43.73	43.270	2.037	1024.93
273.6	37.83	37.91	0.297	1059.36	323.21	37.83	37.510	1.853	1009.53
273.22	20.87	20.96	0.191	1008.94	323.17	20.87	20.780	1.122	965.83
273.2	0.00	0.00	0.00	944.84	323.19	0.00	0.00	0.00	909.02
293.21	100.00	100.00	1.077	1274.80	333.2	100.00	100.0	3.846	1172.80
293.22	90.77	90.75	1.062	1231.09	333.2	90.77	90.590	3.793	1150.23
293.18	77.30	77.31	0.986	1177.16	333.19	77.30	77.300	3.662	1111.89
293.21	43.73	43.68	0.820	1057.59	333.2	43.73	43.050	2.821	1015.86
293.17	37.83	37.81	0.745	1039.24	333.21	37.83	37.350	2.565	1000.32
293.22	20.87	20.91	0.474	991.90	333.18	20.87	20.720	1.472	957.53
293.21	0.00	0.00	0.00	932.16	333.2	0.00	0.00	0.00	903.19
313.23	100.00	100.00	2.147	1225.60	343.22	100.00	100.0	4.995	1144.60
313.22	90.77	90.69	2.117	1193.56	343.23	90.77	90.520	4.965	1130.30
313.22	77.30	77.31	2.079	1146.45	343.19	77.30	77.300	4.811	1096.08
313.23	43.73	43.44	1.476	1035.27	343.22	43.73	42.780	3.609	1004.26
313.17	37.83	37.63	1.310	1017.90	343.18	37.83	37.170	3.341	989.54
313.19	20.87	20.83	0.745	974.68	343.18	20.87	20.650	1.928	948.94
313.23	0.00	0.00	0.00	917.07	343.22	0.00	0.00	0.00	897.19

* - Концентрація холодоагенту в зразках, заправлених у вимірювальну комірку (пікнометр).

** - Концентрація холодоагенту в рідкій фазі РХМ з урахуванням його кількості в паровій фазі.

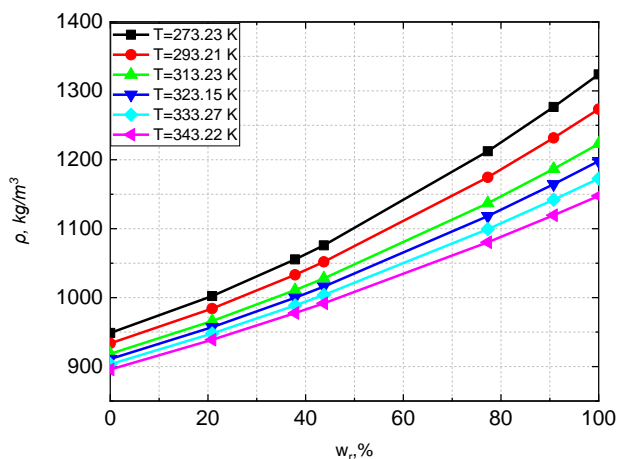


Рисунок 2 – Концентраційна залежність густини РХМ за різних температур

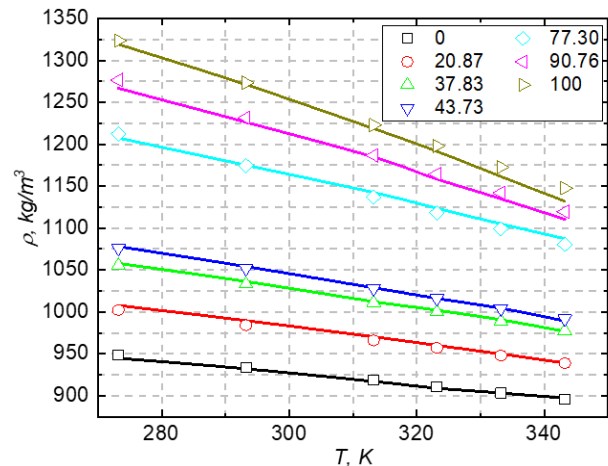


Рисунок 3 – Температурна залежність густини РХМ за різних концентрацій

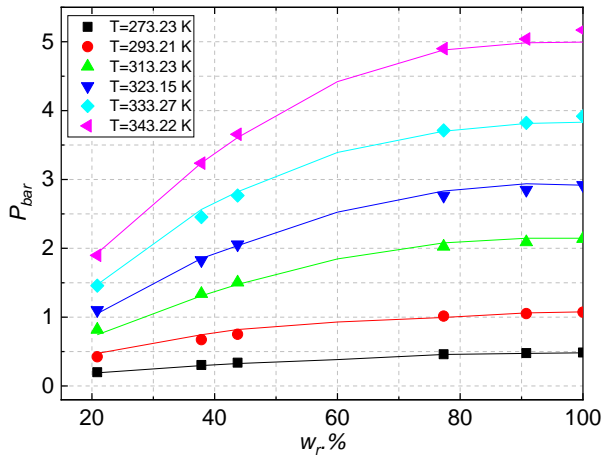


Рисунок 4 – Концентраційна залежність тиску насичених парів РХМ за різних температур

Температурні та концентраційні залежності густини і тиску насичених парів демонструють рисунки 2-5.

Отримані експериментальні дані щодо густини розчинів R1233zd(E)/Planetel 100FY у діапазоні температур від 273,2 до 344,22 К апроксимовані рівняннями (4)-(6):

$$\rho = A(w_r) + B(w_r) \cdot T \quad (4)$$

$$A(w_r) = a + b \cdot w_r + c \cdot (w_r)^2 \quad (5)$$

$$B(w_r) = a + b \cdot w_r + c \cdot (w_r)^2 \quad (6)$$

Запропоновані для апроксимації експериментальних даних кореляції (5), (6) містять невелику кількість коефіцієнтів

Таблиця 4 – Коефіцієнти апроксимаційних рівнянь (7)-(9)

Коефіцієнти	A(w _r) (5)	B(w _r) (6)
a	1155.746	-0.75745
b	3.436	-0.004344
c	0.0511	-0.0001324936

Невизначеність отриманих експериментальних даних для щільності від апроксимаційних рівнянь наведено на рис. 6

Отримані експериментальні дані щодо тиску насичених парів розчинів R1233zd(E)/Planetel 100FY у діапазоні температур від 273.23 К до 344,22 К апроксимовані рівняннями (7)-(8):

$$\lg(P) = A(w_r) + \frac{B(w_r)}{T} \quad (7)$$

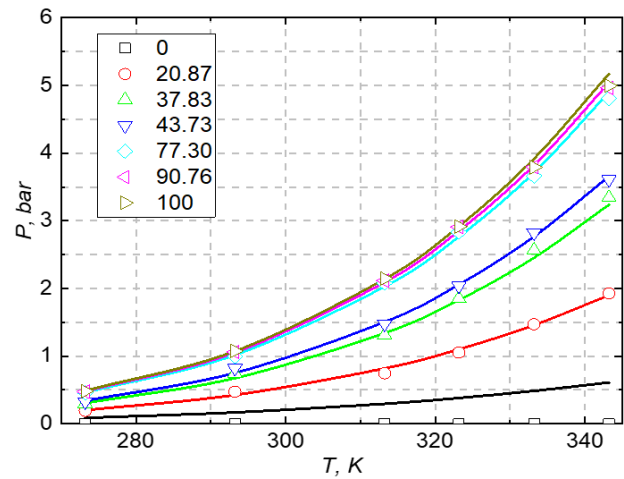


Рисунок 5 – Температурна залежність тиску насичених парів РХМ при різних концентраціях

$$A(w_r) = a + b \cdot w_r + c \cdot w_r^2 + d \cdot w_r^3 \quad (8)$$

$$B(w_r) = a + b \cdot w_r + c \cdot w_r^2 + d \cdot w_r^3 \quad (9)$$

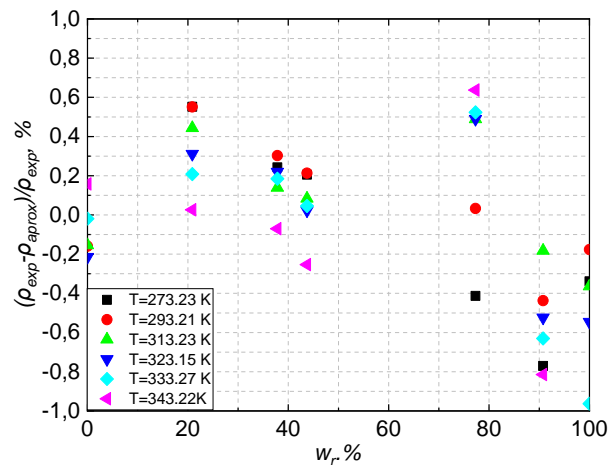


Рисунок 6 – Невизначеності отриманих експериментальних даних за густиною від розрахованих за апроксимаційною моделлю (4)-(6)

Таблиця 5 – Коефіцієнти апроксимаційних рівнянь (7)-(9)

Коефіцієнти	A(w _r) (8)	B(w _r) (9)
a	8.078	-1130.535
b	0.06478	-11.8734
c	-0.000850	0.17486
d	3.6684e-06	-0.00080520

Наявність інформації про значення середньої молярної маси компресорного мастила [7] дає змогу розглянути поведінку надлишкових термодинамічних функцій для мольного об'єму і тиску насичених парів РХМ

Надлишковий молярний об'єм досліджува-

ного РХМ розраховували за отриманими експериментальними даними (рис. 2):

$$\Delta V = V_{\text{exp}} - V_{\text{add}} = V_{\text{exp}} - [V_r \cdot x_r + V_{\text{oil}}(1 - x_r)] \quad (10)$$

де V_{exp} – молярний об'єм РХМ, визначений під час експерименту:

$$V_{\text{exp}} = \frac{M_r \cdot x_r + M_{\text{oil}} \cdot (1 - x_r)}{\rho_{\text{exp}}} \quad (11)$$

де V_{add} – молярний об'єм, розрахований з умов адитивності, $\text{см}^3/\text{моль}$; V_r – молярний об'єм холодоагенту, $\text{см}^3/\text{моль}$; x_r – мольна частка холодоагенту, моль/моль; V_{oil} – молярний об'єм РХМ при температурі вимірювання, $\text{см}^3/\text{моль}$; M_r, M_{oil} – молярні маси компонентів, $\text{г}/\text{моль}$ [5, 7]; ρ_{exp} – виміряна густина РХМ, $\text{г}/\text{см}^3$.

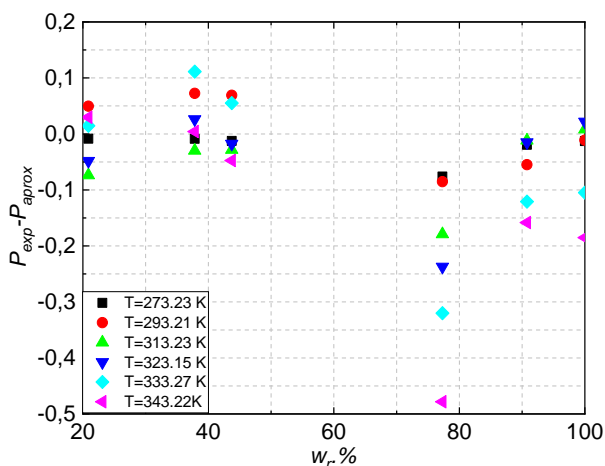


Рисунок 7 – Невизначеності отриманих експериментальних даних щодо тиску від розрахованих за апроксимаційною моделлю (7)–(9)

З наведеної на рисунках 6 і 7 інформації випливає, що запропоновані рівняння адекватно описують отриману експериментальну інформацію щодо густини і тиску насичених парів РХМ. Слід зазначити, що перетворювач тиску частково перебуває в навколишньому середовищі. Тому збільшення випадкової складової невизначеності вимірювання тиску насичених парів за низьких концентрацій холодоагенту визначається незначним переохолодженням перетворювача поділу порівняно з температурою РХМ у вимірювальній комірці. Цей ефект призводить до локального порушення термодинамічної рівноваги у вимірювальній комірці. Незначна кількість переохолодженого

конденсату періодично стікатиме у вимірювальну комірчку і спричинятиме порушення термодинамічної рівноваги в досліджуваній термодинамічній системі.

Оцінювання невизначеності вимірювань величин, що входять до формул для розрахунку, концентрації холодоагенту в РХМ, густини і тиску насичених парів РХМ було виконано відповідно до методики, викладеної в рекомендаціях [8]. Під час визначення невизначеності було враховано обидві її складові: типу А «випадковий» і тип В «систематичний». Невизначеність визначення температури в проведених дослідженнях не перевищує 0,25 К, невизначеність вимірювання тиску перетворювачем тиску не перевищує 1% від вимірюваного значення, невизначеність визначення маси компонентів на електронних аналітичних вагах GR-300 складає $6 \cdot 10^{-4}$ г. Виконаний аналіз показує, що розширена абсолютна невизначеність визначення концентрації холодоагенту не перевищує 0.02 мас%, невизначеність визначення густини не перевищувала $5 \text{ кг}/\text{м}^3$ (0,4%), а невизначеність вимірювання тиску насичених парів змінюється від 0.007 бар (при тиску 0,2 бар) до 0,06 бар (при тиску 5 бар).

4. Обговорення отриманих результатів

Розчини холодоагентів у мастилах є складними термодинамічними системами, що зумовлено характером міжмолекулярних взаємодій між компонентами [3, 4, 9, 10]. Проведене дослідження показує, що присутність мастила в холодоагенті призводить до утворення сумішей із сильно вираженою зетропною поведінкою (див. рис. 4). Тому термодинамічні властивості РХМ не можуть бути розраховані в рамках адитивних моделей. Крім того, потрібно враховувати, що концентрація поверхневого шару рідкої фази РХМ відрізняється від концентрації компонентів в об'ємній фазі [3,9,10], що створює системну методичну проблему в моделюванні фазових рівноваг.

Наявність інформації про значення середньої молярної маси компресорного мастила Planetelf 100FY [7] дає змогу розглянути поведінку надлишкових термодинамічних функцій для мольного об'єму та тиску насичених парів розчинів R1233zd(E)/Planetelf 100FY.

Концентраційну залежність надлишкових термодинамічних функцій демонструє рис. 8. З наведеної на ньому інформації щодо величини та ха-

рактору зміни надлишкових функції впливає, що зазначені термодинамічні властивості не можуть бути розраховані в рамках використання адитивних моделей. Надлишкові функції для густини можуть набувати як додатних, так і від'ємних значень та суттєво залежать від значення температури, що вказує на складний характер міжмолекулярної взаємодії між компонентами розчинів. Раніше аналогічний результат було отримано в роботі [9]. Концентраційну залежність абсолютних значень ΔV показано на рис. 8.

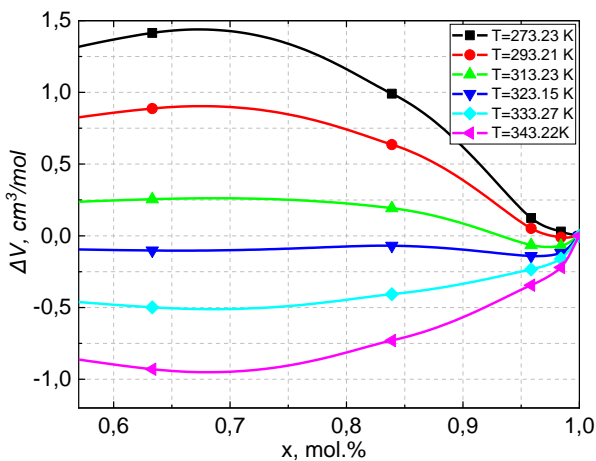


Рисунок 8 – Концентраційна залежність надлишкового молярного об'єму

Отримані результати дають змогу дійти висновку, що під час термодинамічного моделювання фазових рівноваг РХМ необхідно враховувати, що величина надлишкових термодинамічних функцій істотно перевищує величину розширених невизначеностей вимірювання густини (молярного об'єму) R1233zd(E)/Planetelf 100FY.

5. Висновки

Представлено нові експериментальні дані щодо тиску насичених парів, густини, капілярної постійної для розчинів холодоагенту R1233zd(E) з поліетерним мастилом Planetelf ACD 100FY. Вперше отримано інформацію щодо густини та тиску насичених парів РХМ у широкому інтервалі параметрів стану. Експериментальні дані щодо тиску насичених парів, густини апроксимовані мало-константними рівняннями в діапазоні концентрацій холодоагенту від 0 до 100%. Невизначеність вимірюваних даних від розрахованих за запропонованими рівняннями співмірна з невизначеністю вимірювання термодинамічних функцій.

Отримані в результаті експериментального дослідження термодинамічні функції РХМ мають бути віднесені до концентрацій рідкої фази розчину, що змінюються при збільшенні температури.

Виконаний аналіз надлишкових термодинамічних функцій показує, що адитивні моделі розрахунку густини і тиску насичених парів не рекомендується використовувати для прогнозування властивостей розчинів холодоагент/мастило.

Наведена в статті інформація щодо тиску насичених парів, густини РХМ R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY може бути використана під час проєктування випарників, компресорів, теплообмінників з метою підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Особистий внесок авторів CRediT

Желєзний В.П.: адміністрування, концептуалізація ідеї, методологія, аналіз даних. **Івченко Д.О.:** математична обробка результатів, участь в проведенні розрахунків, програмне забезпечення. **Борисов В.О.:** проведення експерименту, інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків, аналіз та узагальнення даних. **Халак В.Ф.:** інформаційний пошук, участь в проведенні розрахунків.

Література

1. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of April 16, 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006, Off. J. Union, 2014.
2. UNEP 38 th 2016 Proceedings of the 38th Meeting of the Open-ended Working Group (OEWG 38) of the Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer and 28th Meeting of the Parties to the Montreal Protocol (MOP 28). – Kigali, 2016. – P. 10-14.
3. **Мельцер Л.З.** Змашування фреонових холодильних машин. – М.: Харчова промисловість, 1969. – 132 с.
4. **Желєзний В.П., Семенюк Ю.В.** Теплофізичні властивості розчинів холодоагентів у компресорних мастилах – Одеса: Фенікс, 2013. – 418 с.
5. Honeywell. (n.d.). Solstice® zd (R-1233zd). Режим доступу URL: <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-zd/> (дата звернення 18.08.24).
6. TotalEnergies. (n.d.). Planetelf ACD 100 FY. Режим доступу URL: <https://lubmarine.totalenergies.com/products/planetelf-acd-100-fy> (дата звернення

18.08.24).

7. **Yuriy V. Semenyuk, Vitaliy V. Sechenyukh, Vitaly P. Zhelezny, Pavel V. Skripov.** Thermophysical properties of compressor oils for refrigeration plants // Journal of Synthetic Lubrication. – 2008. – Vol. 25, Is. 2. – P. 57-73. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsl.50>.

8. **B. N. Taylor, C. E. Quyyatt.** Guide to Estimating and Expressing Uncertainty in NIST Measurement Results, U.S. – Department of Commerce, Office of Technology, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1994. – 25 p.

9. **V.P. Zhelezny, Y.V. Semenyuk, S.N. Ancherbak, A.Y. Grebenkov, O.V. Belyaeva.** An experimental investigation and modelling of the solubility, density

and surface tension of 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (R-245fa)/synthetic polyolester compressor oil solutions // Journal of Fluorine Chemistry. – 2007. – Vol. 28, Is. 9. – P. 1029-1038. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluchem.2007.05.011>.

10. **Petr V. Zhelezny, Vitaly P. Zhelezny, Denis A. Protsenko, Sergey N. Ancherbak.** An experimental investigation and modelling of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions: Some aspects of experimental methodology // International Journal of Refrigeration. – 2007– Vol. 30, Is. 3. – P. 433-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.09.007>

Отримана в редакції 18.08.2024, прийнята до друку 16.09.2024

Experimental study of flexibility and pressure of solid vapors of R1233zd(E) cooling varieties in Planetelf ACD 100FY compressor oil

Vitalii Zhelezny^{1✉}, Volodymyr Borisov², Dmytro Ivchenko³, Viacheslav Khalak⁴

¹⁻⁴Odesa National University of Technology, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: ¹zheleznyv@gmail.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0987-1561>; ²<https://orcid.org/0000-0002-2678-3774>;

³<https://orcid.org/0000-0003-4710-3827>; ⁴<https://orcid.org/0000-0003-2046-4139>

Increasing the efficiency of low-potential energy sources and heat waste of low temperature potential is possible with the use of high-temperature heat pumps, which are part of the system of energy plants realizing the organic Rankine cycle. As working bodies in high-temperature heat pumps should be used refrigerants having relatively high boiling point and meeting modern environmental and energy requirements. At present refrigerant R1233zd(E) is among the most perspective working bodies for high-temperature heat pumps. Thermophysical properties of this refrigerant are well enough studied. However, the real working body of vapor-compression heat pumps is not pure refrigerant, but solutions of this refrigerant in oils. Data on thermophysical properties of solutions of R1233zd(E) refrigerant in polyester compressor oils are practically absent at present. The article presents the results of experimental study of saturated vapor pressure, density of solutions of refrigerant R1233zd(E) with synthetic polyester oil Planetelf ACD 100FY in a wide range of temperatures and concentrations of components. The studies were carried out using static methods of density and saturated vapor pressure measurements in the temperature range from 273 to 343 K and at pressures up to 5 bar. The obtained data are approximated by low-constant equations convenient for practical application. The uncertainty of the obtained data for the density of refrigerant/oil solutions does not exceed 0.30%. The uncertainty of the obtained data on saturated vapor pressure varies from 0.06 bar (at a pressure of 0.2 bar) to 0.15 bar (at a pressure of 5 bar). Temperature and concentration dependence of saturated vapor pressure and density are studied in the work. The data on thermophysical properties of Planetelf ACD compressor oil are given. The behavior of excess thermodynamic functions of liquid solution R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY is analyzed.

Keywords: Experiment; Saturated vapor pressure; Density; Refrigerant R1233zd(E); Compressor oil; Refrigerant/oil solution.

References

1. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of April 16, 2014 on

fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006, Off. J. Union, 2014.

2. UNEP 38 th 2016 Proceedings of the 38th Meeting of the Open-ended Working Group (OEWG 38) of the

Parties to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer and 28th Meeting of the Parties to the Montreal Protocol (MOP 28). Kigali, 10-14.

3. **Meltser, L.Z.** (1969) Lubrication of Freon Refrigerating Machines. *M.: Food Industry*, 132.

4. **Zhelezny, V.P., Semenyuk, Y.V.** (2013) Thermophysical properties of refrigerant solutions in compressor oils. *Odessa: Fenix*, 418.

5. Honeywell. (n.d.). Solstice® zd (R-1233zd). Retrived 18 August, 2024 from <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-zd/>

6. TotalEnergies. (n.d.). Planetelf ACD 100 FY. Retrived 18 August, 2024 from <https://lubmarine.totalenergies.com/products/planetelf-acd-100-fy>.

7. **Semenyuk, Y., Sechenyukh, V., Zhelezny, V., Skripov, P.** (2008) Thermophysical properties of compressor oils for refrigeration plants. *Journal of Synthetic Lubrication*, 25, 2, 57-73.

8. **Taylor, B. N., Quayatt, C. E.** (1994) Guide to Esti-

ating and Expressing Uncertainty in NIST Measurement Results, U.S. *Department of Commerce, Office of Technology, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD*, 25.

9. **Zhelezny, V.P., Semenyuk, Y.V., Ancherbak, S.N., Grebenkov, A.Y., Belyaeva, O.V.** (2007) An experimental investigation and modelling of the solubility, density and surface tension of 1,1,1,3,3-pentafluoropropane (R-245fa)/synthetic polyolester compressor oil solutions. *Journal of Fluorine Chemistry*, 28, 9, 1029-1038.

10. **Zhelezny, P., Zhelezny, V., Protsenko, D., Ancherbak, S.** (2007) An experimental investigation and modelling of the thermodynamic properties of isobutane-compressor oil solutions: Some aspects of experimental methodology. *International Journal of Refrigeration*, 30, 3, 433-445.

Received 18 August 2024

Approved 16 September 2024

Available in Internet 30 September 2024