

ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ

УДК 531.756.4:531.787.913

Експериментальне дослідження в'язкості та теплоємності розчинів холодоагенту R1233zd(E) у компресорному мастилі planetelf ACD 100FY

В.П. Желєзний¹✉, В.О. Борисов², Д.О. Івченко³, В.Ф. Халак⁴¹⁻⁴Одеський 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>

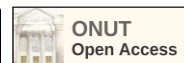
Підвищення ефективності використання низькопотенційних джерел енергії та теплових відходів можливе завдяки застосуванню теплових насосів, які є частиною систем енергетичних установок, що працюють на основі органічного циклу Ренкіна. Як робочі тіла для таких насосів доцільно використовувати холодоагенти з відносно високою температурою кипіння, які відповідають сучасним екологічним та енергетичним стандартам. Серед них одним із найперспективніших є холодоагент R1233zd(E), теплофізичні властивості якого добре вивчені. Проте в реальних умовах робочі тіла пароконпресійних теплових насосів є не чистими холодоагентами, а його розчинами в компресорних мастилах. Водночас дані щодо теплофізичних властивостей розчинів холодоагенту R1233zd(E) у поліефірних мастилах є вельми обмеженими. У статті представлено результати експериментального дослідження теплоємності мастила та в'язкості розчинів холодоагенту R1233zd(E) із синтетичним поліефіновим мастилом Planetelf ACD 100FY у широкому діапазоні температур і концентрації компонентів. Експериментальні дані щодо динамічної в'язкості розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY виміряно методом кульки, що котиться, у діапазоні температур від 10 до 70 °С. Невизначеність отриманих даних для в'язкості розчинів холодоагент/мастило не перевищує 3,9 %. З використанням експериментальної інформації про теплоємність компресорного мастила розраховано ентальпію розчинів R1233zd(E)/мастило Planetelf ACD 100FY. Отримані дані апроксимовано малокоefficientними рівняннями, зручними для практичного застосування. Досліджено вплив домішок компресорного мастила на температурні та концентраційні залежності в'язкості й ентальпії об'єктів дослідження. Наведена в статті інформація про в'язкість та ентальпію розчинів холодоагент/мастило необхідна для коректної оцінки впливу домішок компресорного мастила на показники енергетичної ефективності теплових насосів і вивчення впливу домішок компресорного мастила на інтенсивність теплообміну процесів кипіння у випарнику.

Ключові слова: Експеримент; В'язкість; Теплоємність; Ентальпія; Холодоагент R1233zd(E); Компресорне мастило; Розчин холодоагент/мастило (РХМ)

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v60i4.3054>

© 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

Наявність домішок мастила в холодоагенті значною мірою впливає на його термодинамічні властивості. Тому енергетична ефективність холо-

дильного циклу, інтенсивність теплообміну у випарнику і конденсаторі залежатиме не тільки від застосованого холодоагенту, а й від оптимального вибору компресорного мастила.

Наразі гідрофторолефіни (ГФО) розглядають-

ся як заміна гідрофторвуглеців (ГФУ) з високим потенціалом глобального потепління (GWP) у системах кондиціонування повітря і холодильних установках. Для широкого застосування ГФО у холодильному обладнанні та теплових насосах необхідно мати в своєму розпорядженні інформацію про їхні теплофізичні властивості, а також властивості цих холодоагентів із домішками компресорних мастил за різних умов експлуатації обладнання.

Слід зазначити, що холодоагенти ГФО через свої енергетичні та екологічні властивості дедалі більше привертають увагу різних учених.

Так, наприклад, у роботі [1] проведено оцінку термодинамічної ефективності та теплопередачі кількох холодоагентів, зокрема R600a, R1234ze(Z), R1336mzz(Z) та R1233zd(E), як перспективної заміни для традиційних речовин у системах теплових насосів та органічних циклів Ренкіна (ORC). Результати виконаних досліджень показують, що R1234ze(Z) і R1233zd(E) забезпечують високу ефективність, у той час як застосування холодоагенту R600a є менш ефективним.

В експериментальному дослідженні [2-3] автори розглядали застосовність холодоагентів HFO в органічному циклі Ренкіна як заміну широко використовуваному холодоагенту R245fa. У результаті проведеного дослідження автори дійшли висновку, що холодоагенти R1234ze(Z) і R1233zd(E) є перспективними альтернативами R245fa, оскільки мали надзвичайно низький потенціал глобального потепління (GWP) і потенціал руйнування озонового шару (ODP). Однак використання холодоагенту R1336mzz(E), який має невеликий тиск насичених парів, призводило до зниження показників ефективності компресорної системи. Автори порівнювали показники компресорної системи, включно з ефективністю циклу і чистою вихідною потужністю.

Дослідження [4] було проведене для оцінки застосовності двох нових робочих тіл R1233zd(E) та R1224yd(Z), у системах ORC замість холодоагенту R245fa, що має вище значення потенціалу глобального потепління. На думку авторів, нові робочі тіла можуть бути використані в системах ORC. Однак, сумісність R1233zd(E) з деякими полімерами виявилася гіршою, ніж у R245fa і R1224yd(Z). Що стосується продуктивності системи, то холодоагент R245fa забезпечує найбільшу потужність. При цьому робоче тіло R1233zd(E) має трохи вищу термодинамічну ефективність.

Слід зазначити, що наразі опубліковано дуже мало досліджень, присвячених темі розчинності мастил із холодоагентом R1233zd(E). У науковій і технічній літературі рідко зустрічаються роботи, які детально вивчають цю тему. Це особливо дивно з огляду на зростаючу популярність R1233zd(E) як екологічно безпечного замітника традиційних холодоагентів у системах охолодження і кондиціонування повітря. Більшість доступної інформації щодо змішуваності мастил із цим холодоагентом або фрагментарні, або засновані на експериментальних даних у вузькому інтервалі параметрів. Наприклад, у таких статтях часто розглядаються тільки окремі типи мастил (наприклад, поліефірні мастила) і специфічні умови роботи, що не дає повної картини щодо поведінки холодоагенту R1233zd(E) з різними видами мастил.

У роботі [5] для уточнення даних щодо розчинності та ентальпії R1233zd(E) з поліоловими ефірами (POE) і поліалкіленгліколевыми мастилами (PAG), а також для вивчення впливу домішок мастила на роботу випарника в холодильній системі на основі R1233zd(E) було проведено дослідження розчинності R1233zd(E) з мастилами POE75, POE85 і PAG68 з використанням ізохоридичного методу при температурі 298 К.

У статті [6] наводять результати експериментального дослідження розчинності поліолефінових (POE) і полівінілефірних (PVE) мастил із холодоагентом R1234zd(E). У результаті проведених досліджень показано, що мастила POE68 і PVE68 повністю змішуються з холодоагентом R1234ze(E) за масової частки мастила менше ніж 20 і 10%, відповідно, за всіх розглянутих діапазонів температур. Однак, за певних масових часток мастила та температурних діапазонів автори спостерігали фазовий поділ холодоагенту та мастила, що вказує на їхню незмішуваність. Тиски насичених парів холодоагенту R1234ze(E) і сумішей з поліолефіновими та полівінілефірними мастилами зменшуються зі збільшенням масової частки мастила. На підставі отриманих результатів можна зробити висновок, що POE68 є більш підходящим мастилом для холодоагенту R1234ze(E) порівняно з PVE68.

Авторами статті [7] для розширення бази даних щодо властивостей R1233zd(E) у суміші з мастильними матеріалами, проведено вимірювання фазової рівноваги пара-рідина в трьох ефірах поліолів (PEC4, PEC6 і PEC8) у різних температурних умовах. Результати показують, що

розчинність R1233zd(E) збільшується з підвищенням тиску і зменшується з підвищенням температури. Спостерігалася відсутність розшарування фаз між рідинами та паром. Також зазначається, що розчинність R1233zd(E) в мастилах PEC збільшується від PEC4 до PEC8.

З метою розширення наявної бази даних щодо теплофізичних властивостей розчинів гідрофторолефінів у компресорних мастилах, у цій статті наведені результати експериментального дослідження динамічної в'язкості, теплоємності та ентальпії розчинів різної концентрації холодоагенту R1234ze(Z) у синтетичному поліефірному мастилі Planetelf ACD ACD 100FY.

2. Об'єкти дослідження

У представленій статті як об'єкти дослідження використовували зразки розчинів холодоагент (R1233zd(E)/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	$C_3H_2ClF_3$
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 293,15 К, кг/м ³	1271,61
Тиск насиченої пари при 298,15 К, бар	1,7
Потенціал руйнування озону (ODP)	~0,00024
Потенціал глобального потепління (GWP)	~1
Клас безпеки (ASHRAE)	A1 (негорючий, нетоксичний)

Синтетичне поліефірне 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 вологи	<50 ppm

Для очищення від можливих домішок води та розчинених газів компресорне мастило нагрівали до температури $T = 388$ К, а потім вакуумували протягом 60 секунд. Процедуру очищення повторювали кілька разів. Чистоту зразків компресорного мастила перевіряли на універсальному лабораторному рефрактометрі ІРФ-23. Технологія отримання зразків холодоагенту/мастила передбачала багаторазову деаерацію холодоагенту R1233zd(E) та компресорного мастила ACD 100FY перед їх змішуванням у вимірювальній комірці.

3. Вимірювання в'язкості розчинів R1233zd(E)/синтетичне компресорне мастило

Експериментальне дослідження динамічної в'язкості η розчинів холодоагент/мастило виконано методом кульки, що котиться, на віскозиметрі Гепплера. Схему експериментальної установки представлено на рисунку 1.

Основним елементом установки є трубка 1 з кулькою 4, заповнена досліджуванним зразком розчину. Підготовка досліджуваного зразка РХМ проводилася в заправному балоні. З метою видалення розчинених газів об'єкти дослідження піддавалися багаторазовому вакуумуванню після їх охолодження до температури кристалізації. Точну кількість заправлених компонентів розчинів холодоагент (R1233zd(E)/компресорне мастило (Planetelf ACD 100FY) визначали за зміною маси заправного балона. При цьому використовувалися аналітичні ваги марки GR-300 з невизначеністю визначення маси $3 \dots 10^{-4}$ г. Потім у попередньо відвакуумовану трубку 1 з кулькою 4 здійснювали заправку компонентів зразка РХМ із заправного

балона через вентиль 5. Трубка віскозиметра була герметично закрита кришкою 6 із заправним вентилем 5.

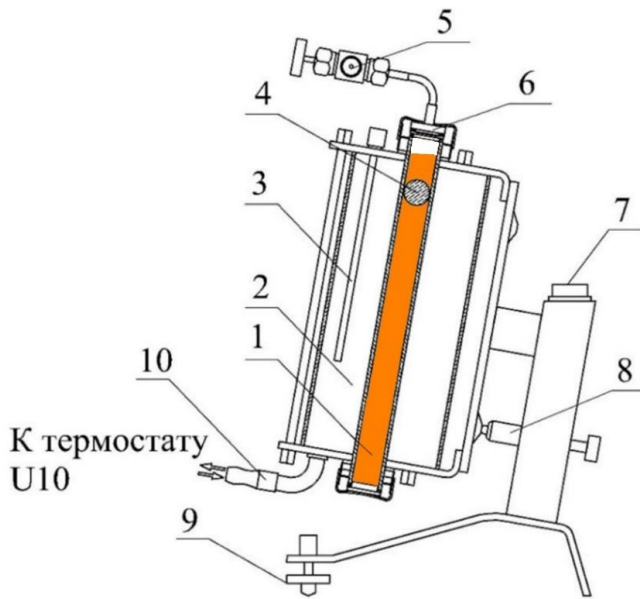


Рисунок 1 – Експериментальна установка для дослідження динамічної в'язкості РХМ методом кулі, що котиться: 1 – трубка з досліджуваною речовиною (РХМ); 2 – об'єм, що термостатується; 3 – платиновий термометр опору ТЕРА 500Pt; 4 – куля; 5 – заправний вентиль; 6 – кришка; 7 – рівень; 8 – фіксуєчий шток; 9 – гвинт для встановлення рівня; 10 – патрубков для з'єднання з термостатом

Термостатування трубки віскозиметра з об'єктом дослідження здійснюється за допомогою термостата з U10, з якого через патрубки 9 до термостата 2 надходить термостатувальна рідина. Температура вимірюється платиновим термометром опору (ТЕРА 500Pt) 3 з невизначеністю 0,3 К.

Для визначення постійної приладу проводилося градування з використанням рідини з відомою в'язкістю. Для можливості вимірювання в'язкості РХМ у широкому інтервалі параметрів градування проводили на двох кульках різного діаметру і густини. Як градувальну рідину було обрано компресорне мастило Planetelf ACD 100FY, яке використовувалося в експериментах. Її кінематична в'язкість була попередньо виміряна на капілярному віскозиметрі ВПЖ-2 з розширеною невизначеністю не більше 0,5 %.

3.1 Обробка отриманих даних

Постійна віскозиметра K визначалася в результаті тарувальних експериментів за формулою:

$$K = \frac{v_{oil} \cdot \rho_{oil}}{(\rho_{ш} - \rho_{oil}) \cdot \tau} \quad (1)$$

де K – постійна приладу, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ρ_{oil} – густина компресорного мастила Planetelf ACD 100FY, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\rho_{ш}$ – густина кульки, $\text{кг}/\text{м}^3$; τ – час переміщення кульки на робочій ділянці трубки віскозиметра, с; v_{oil} – кінематична в'язкість мастила Planetelf ACD 100FY, виміряна віскозиметром ВПЖ-2, $\text{мм}^2/\text{с}$.

Вимірювання часу кочення кульки здійснювалося багаторазово з метою зменшення випадкової складової невизначеності. У результаті виконаного градування було отримано постійні K віскозиметра Геплера для кількох кульок: $K_1 = 2,16504 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}^2$; $K_2 = 7,5462 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Розрахунок динамічної в'язкості РХМ проводився за такою формулою:

$$\eta_{РХМ} = K \cdot (\rho_{ш} - \rho_{РХМ}) \cdot \tau \quad (2)$$

де K – постійна приладу, $\text{м}^2/\text{с}^2$; $\eta_{РХМ}$ – динамічна в'язкість РХМ R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY, $\text{мПа} \cdot \text{с}$; $\rho_{РХМ}$ – густина РХМ R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Вимірювання динамічної в'язкості зразків розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY проведено в діапазонах параметрів: температур – від 10 до 60 °С; тисків – від 0,25 до 4,6 бар; за масових концентрацій холодоагенту – 17,09, 45,87, 63,7 мас. % холодоагенту в мастилі. Оскільки дані з кінематичної в'язкості часто використовуються в гідравлічних розрахунках і теплообміні, у таблиці 3, крім виміряної динамічної в'язкості, наведено дані з кінематичної в'язкості. Дані про густину РХМ були раніше представлені в статті [9].

Експериментальні дані про динамічну в'язкість, густину та кінематичну в'язкість досліджуваних зразків РХМ R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY наведено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Дані щодо динамічної в'язкості, густини та кінематичної в'язкості зразків РХМ R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY

w_R , мас%	t , °С	η , мПа·с	ρ , $\text{кг}/\text{м}^3$	ν , $\text{мм}^2/\text{с}$
0	30,59	153,927	925,7	166,2858
	40,43	86,2054	918,2	93,8828
	50,33	52,3446	910,7	57,4758
	60,21	34,5149	903,2	38,2122

Продовження таблиці 3

17,09	20,54	70,6822	973,8	72,5814
	30,59	42,6669	965,1	44,2105
	40,43	27,8018	956,5	29,0656
	50,33	19,2706	947,9	20,3298
	60,21	14,3390	939,3	15,2656
	69,96	10,6430	930,8	11,4341
45,87	10,08	9,7030	1071,2	9,0582
	20,08	7,1578	1058,8	6,7601
	40,18	4,3370	1034,0	4,1944
	49,96	3,4975	1021,9	3,4225
	59,92	2,9332	1009,6	2,9053
63,70	20,54	1,9924	1121,9	1,7759
	30,59	1,6866	1106,0	1,5248
	40,43	1,4683	1090,5	1,3464
	50,33	1,3148	1074,9	1,2232
	60,21	1,1908	1059,3	1,1242
100	10,00	0,3340	1299,3	0,2571
	20,00	0,2991	1272,2	0,2351
	30,00	0,2707	1246,9	0,2171
	40,00	0,2461	1222,2	0,2014
	50,00	0,2239	1197,3	0,1870
	60,00	0,2038	1172,4	0,1738
	70,00	0,1856	1147,9	0,1617

Отримані експериментальні дані щодо в'язкості розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY у діапазоні температур від 283,15 до 343,15 К апроксимовані рівняннями (3)-(4):

$$\eta = A(w_R) + B(w_R) \cdot t + C(w_R) \cdot t^2 \quad (3)$$

де t – температура, °C; A, B, C – концентраційні коефіцієнти, які описані рівняннями виду:

$$f(w_R) = a + b \cdot w_R + c \cdot w_R^2 \quad (4)$$

де w_R – масова концентрація холодоагенту, мас%.

Значення коефіцієнтів апроксимаційної моделі (3) - (4) наведено в таблиці 4.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів рівнянь (3)-(4)

Коефіцієнти	A(w)	B(w)	C(w)
a	3.194	-0.037874	0.00017622
b	-0.051696	0.0006112	-2.7655e ⁻⁰⁶
c	0.00015394	-2.7586e ⁻⁰⁶	1.0214e ⁻⁰⁸

Температурну і концентраційну залежність в'язкості PXM R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY представлено на рисунках 2 і 3.

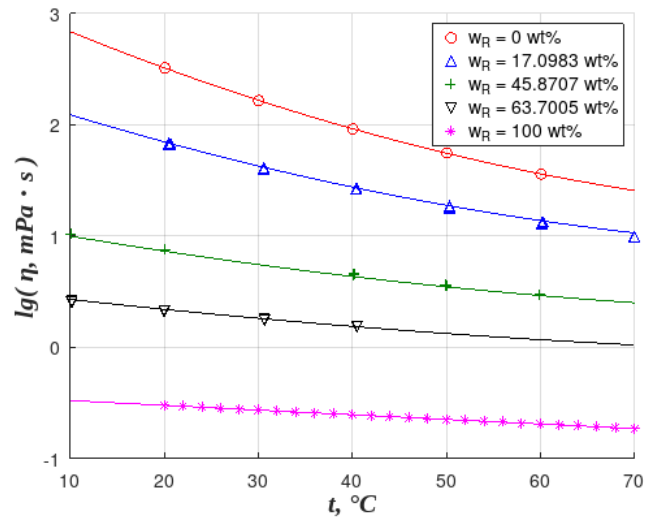


Рисунок 2 – Температурні залежності динамічної в'язкості досліджених зразків PXM у півлогарифмічних координатах

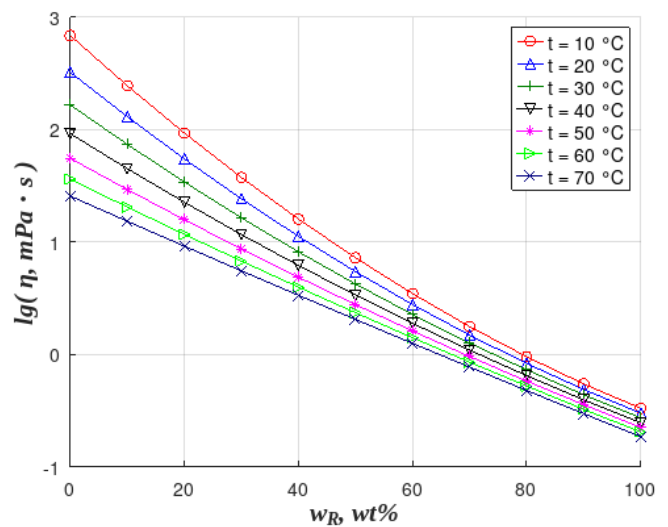


Рисунок 3 – Концентраційні залежності динамічної в'язкості досліджуваних зразків PXM у півлогарифмічних координатах

Інформація, наведена на рисунках 2 і 3, наочно показує, що домішки компресорного мастила Planetelf ACD 100FY за низьких температур можуть на кілька порядків змінювати в'язкість холодоагенту R1233zd(E). Настільки значний вплив компресорного мастила суттєво впливатиме на гідравлічний опір руху потоку робочого тіла у випарнику та збільшуватиме термічний опір між робочим тілом і стінками теплообмінних апаратів [10, 11].

Абсолютні та відносні відхилення отриманих експериментальних даних щодо в'язкості розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY від розрахованих за апроксимаційною моделлю (3)-(4) наведені на рисунках 4 і 5.

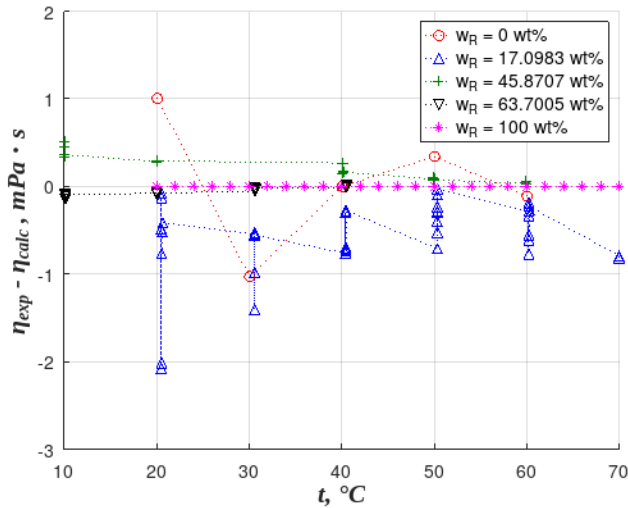


Рисунок 4 – Абсолютні відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівнями (3) і (4)

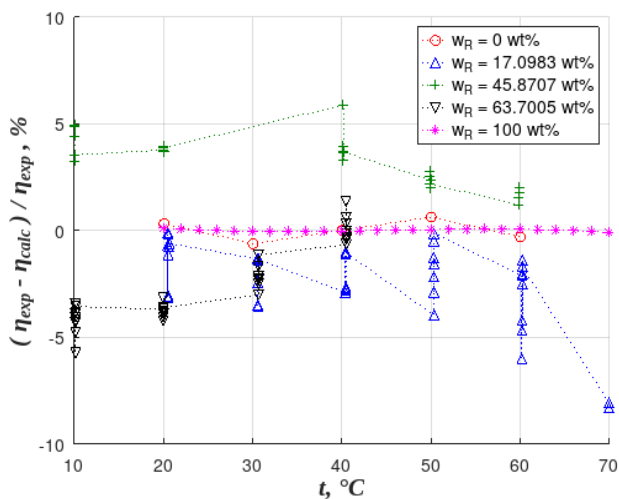


Рисунок 5 – Відносні відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівнями (3) і (4)

Виконаний аналіз показує, що середньо-квадратичні відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівнями (3)-(4) не перевищують 0,27 мПа·с. При цьому розширена невизначеність отриманих експериментальних даних не перевищує 2,8%.

4. Експериментальне дослідження теплоємності

Дані про теплоємність компресорного мастила Planetelf ACD 100FY залежно від темпе-

ратури було отримано з використанням диференціального скануючого мікро-калориметра SETARAM DSC-111. Чутливість калориметра становила $3 \dots 10^{-5}$ Вт. Отримані експериментальні дані про теплоємність мастила Planetelf ACD 100FY представлено на таблиці 4.

Таблиця 5 – Експериментальні дані щодо ізобарної теплоємності C_p мастила Planetelf ACD 100FY

t , °C	C_p , кДж/кг·К	t , °C	C_p , кДж/кг·К
23,9	1,858	71,0	1,997
27,8	1,875	74,9	1,996
35,7	1,893	78,9	2,018
39,6	1,902	82,8	2,027
43,5	1,907	90,7	2,056
47,4	1,922	94,6	2,065
51,4	1,931	98,5	2,075
55,3	1,944	102,4	2,092
59,2	1,957	106,4	2,104
63,2	1,962	110,3	2,117

Експериментальні дані щодо теплоємності Planetelf ACD 100FY, були апроксимовані рівнянням [12].

$$C_{p,oil} = 1.303 + 1.08 \cdot 10^{-4} \cdot (t + 273.15)^{1.5} \quad (5)$$

де $C_{p,oil}$ – питома теплоємність компресорного мастила Planetelf ACD 100FY, кДж/кг·К.

Відхилення отриманих експериментальних даних від розрахованих за апроксимаційним рівнянням (5) наведено на рисунку 6

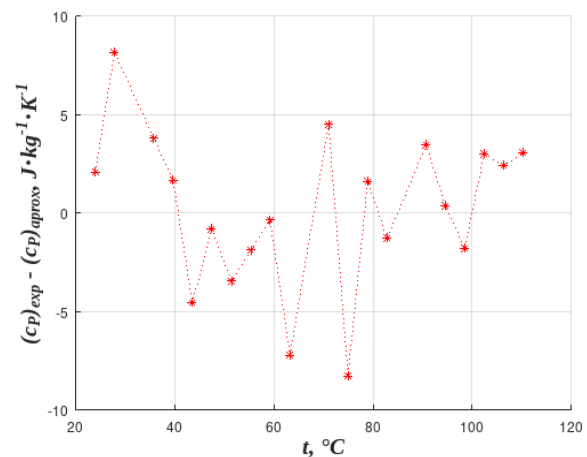


Рисунок 6 – Відхилення отриманих експериментальних даних про теплоємність мастила Planetelf ACD 100FY від розрахованих за рівнянням (5)

Виконаний аналіз показує, що середньоквадратичне відхилення експериментальних даних щодо теплоємності мастила Planetelf ACD 100FY від розрахованих за ураненням (5) не перевищує 0,86 Дж/кг·К. При цьому розширена невизначеність отриманих експериментальних даних за теплоємністю мастила Planetelf ACD 100FY не перевищує 1,3%.

При розрахунку впливу домішок мастила на показники ефективності компресорних систем та теплообміну при кипінні робочого тіла у випарнику необхідно володіти інформацією про ентальпію R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY. Розрахунок ентальпії розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY проводили за методикою, використаною в роботах [5,7].

Молярна ентальпія компресорного мастила розраховувалася за рівнянням

$$h_{oil,m} = \left(h_{R,0} + \int_{t_0}^t C_{p,oil} dt \right) \cdot \mu_{oil} \quad (6)$$

де $t_0 = 0^\circ\text{C}$ – прийнята в цій роботі температура нижньої межі інтегрування; $h_{R,0}$ – питома масова ентальпія холодоагенту R1233zd(E) при t_0 , кДж/кг; μ_{oil} – молярна маса холодоагенту і компресорного мастила, відповідно, кг/кмоль; $h_{oil,m}$ – молярна ентальпія компресорного мастила Planetelf ACD 100FY, кДж/кмоль.

На відміну від методики розрахунку ентальпії РХМ, застосованої в статтях [5,7], де використовувалася масова концентрація компонентів і питома теплоємність, автори цієї роботи використовували молярні величини концентрації та теплоємності. З термодинамічної точки зору такий підхід є більш обґрунтованим. Тим більше, що величини надлишкової молярної теплоємності, як показано в роботі [13], порівняно невеликі. З урахуванням цього зауваження формули для розрахунку ентальпії матимуть вигляд:

$$h_{mix,m} = h_{R,m} \cdot x_R + h_{oil,m} \cdot (1 - x_R) \quad (7)$$

де $h_{R,m}$, $h_{mix,m}$ – молярні ентальпії холодоагента і РХМ, відповідно, кДж/кмоль; x_R – мольна концентрація холодоагента, моль/моль.

Температурні та концентраційні залежності питомої ентальпії розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY представлено на рисунках 7 і 8.

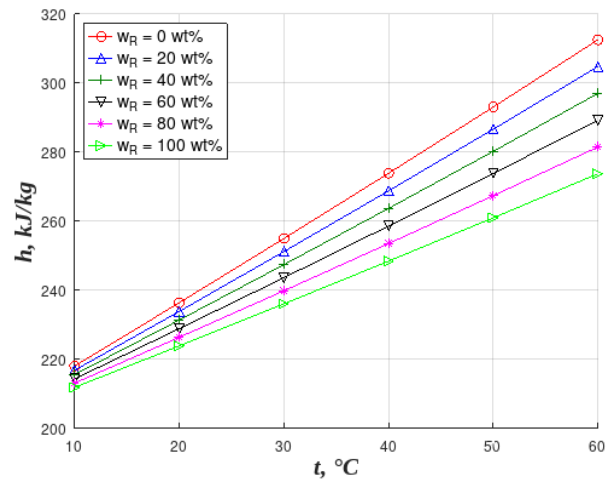


Рисунок 7 – Температурні залежності ентальпії розчинів R1233zd(E)/ Planetelf ACD 100FY

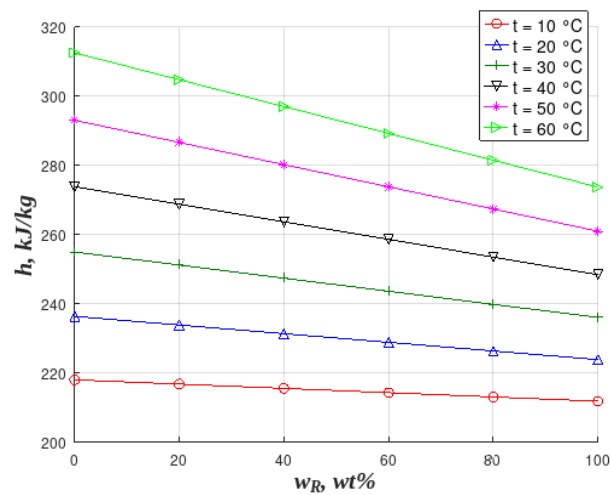


Рисунок 8 – Концентраційні залежності ентальпії розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY

Результати розрахунку питомої ентальпії розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY подано в таблиці 6

Таблиця 6 – Питома та молярна ентальпія розчинів R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY

w_R , мас%	t , °C	$h_{mix,m}$, кДж/кмоль	μ_{mix} , кг/кмоль	h_{mix} , кДж/кг
0	10	194930	894	218,04
0	20	211300	894	236,35
0	30	227920	894	254,94
0	40	244790	894	273,82
0	50	261920	894	292,97
0	60	279310	894	312,42
20	10	89314	412	216,80
20	20	96339	412	233,86
20	30	103470	412	251,16

Продовження таблиці 6

20	40	110710	412	268,73
20	50	118050	412	286,57
20	60	125510	412	304,67
40	10	57696	267,7	215,57
40	20	61922	267,7	231,36
40	30	66211	267,7	247,38
40	40	70564	267,7	263,65
40	50	74983	267,7	280,16
40	60	79470	267,7	296,92
60	10	42482	198,2	214,33
60	20	45363	198,2	228,86
60	30	48285	198,2	243,6
60	40	51250	198,2	258,56
60	50	54260	198,2	273,75
60	60	57317	198,2	289,17
80	10	33537	157,4	213,09
80	20	35626	157,4	226,36
80	30	37744	157,4	239,82
80	40	39892	157,4	253,48
80	50	42074	157,4	267,34
80	60	44290	157,4	281,42
100	10	27647	130,5	211,86
100	20	29215	130,5	223,87
100	30	30803	130,5	236,04
100	40	32415	130,5	248,39
100	50	34051	130,5	260,93
100	60	35714	130,5	273,67

З наведеної на рисунках 7 і 8 інформації випливає, що домішки компресорного мастила Planetelf ACD 100FY істотно впливають на значення ентальпії холодоагенту R1233zd(E). Тому, як раніше було показано в роботах [10, 11, 14], при дослідженні коефіцієнтів тепловіддачі під час кипіння реальних робочих тіл у випарнику та розрахунку показників ефективності компресорних систем необхідно враховувати наявність домішок компресорних мастил у холодоагенті R1233zd(E).

5. Висновки

Представлено нові експериментальні дані щодо в'язкості та ентальпії для розчинів холодоагенту R1233zd(E) з поліефірним мастилом Planetelf ACD 100FY. Вперше отримано інформацію про в'язкість та ентальпію PXM у широкому інтервалі параметрів стану. Отримані експериментальні дані апроксимовано малоконстантними рівнян-

нями в діапазоні концентрацій холодоагенту від 0 до 100% і в діапазоні температур від 10 до 70°C Розширена невизначеність отриманих експериментальних даних не перевищує для в'язкості – 2,8% і теплоємності – 1,3%.

Аналіз отриманих експериментальних даних вказує на необхідність врахування впливу домішок компресорного мастила на теплофізичні властивості холодоагенту R1233zd(E) під час вивчення процесів кипіння розчинів PXM R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY у випарнику високотемпературних теплових насосів і вивчення впливу домішок мастила в холодоагенті на показники ефективності компресорної системи.

Наведена в статті інформація про в'язкість та ентальпію PXM R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY може бути використана при проектуванні випарників, компресорів, теплообмінників з метою підвищення енергетичної ефективності холодильного обладнання.

Особистий внесок авторів CRediТ

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. **B. Longo et al.** Assessment of the low-GWP refrigerants R600a, R1234ze (Z) and R1233zd (E) for heat pump and organic Rankine cycle applications // Applied Thermal Engineering. – 2020. – Vol. 167. – P. 114804.
2. **F. Dawo et al.** R1224yd (Z), R1233zd (E) and R1336mzz (Z) as replacements for R245fa: Experimental performance, interaction with lubricants and environmental impact // Applied Energy. – 2021. – Vol. 288. – P.116661.
3. **J. Yang et al.** Simultaneous experimental comparison of low-GWP refrigerants as drop-in replacements to R245fa for Organic Rankine cycle application: R1234ze (Z), R1233zd (E), and R1336mzz (E) // Energy. – 2019. – Vol. 173. – P. 721-731.
4. **S. Eyerer et al.** Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd (Z) and R1233zd

- (E) as replacements for R245fa // *Applied Energy*. – 2019. – Vol. 240. – P. 946-963.
5. **Y. Sun et al.** Solubilities of R-1233zd (E) in Three Lubricating Oils and Impact of Oil Retention on the Evaporator Performance // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2024. – Vol. 69.5. – P. 1832-1841.
6. **B.-M. Lee, J.-W. Kwon, M.-H. Kim.** Miscibility of POE and PVE oils with low-GWP refrigerant R-1234ze (E) // *Science and Technology for the Built Environment*. – 2016. – Vol. 22.8. – P. 1263-1269.
7. **Y. Sun et al.** Measurement of Phase Equilibrium for R-1233zd (E) with Three Pure Esters between 298.15 and 343.15 K // *Journal of Chemical & Engineering Data*. – 2023. – Vol. 69.1. – P. 194-203.
8. National Institute of Standards and Technology (NIST). REFPROP: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database, Version 10.0. – Boulder, CO: NIST, 2018.
9. **Желєзний В. П. та ін.** Експериментальне дослідження густини та тиску насичених парів розчинів холодоагенту R1233zd (E) у компресорному мастилі Planetelf ACD 100FY // *Холодильна техніка та технологія*. – 2024. – Т. 60. – № 3. – С. 233-242
10. **G.M. Chen, V.P. Zhelezny, A.V. Melnyk, K.O. Shestopalov.** An experimental investigation and modelling of flow boiling heat transfer of isobutane-compressor oil solution in a horizontal smooth tube // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – Vol. 58. – P. 137-145
11. **G. Chen, V. Zhelezny, K. Shestopalov, N. Lukianov, M. Polyuganich.** An experimental and theoretical investigation of the compressor oil and nanoparticles admixtures influence on the performance of the compressor systems // *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration 2015*, August 16-22. – Yokohama, Japan, 2015. – ID:318.
12. **Y. Semenyuk, V. Sechenyukh, V. Zhelezny, P. 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>.
13. **V.P. Zhelezny et al.** 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>.
14. **V.P. Zhelezny, S.V. Nichenko, Y.V. Semenyuk, B.V. Kosoy, R. Kumar.** Influence of compressor oil admixtures on theoretical efficiency of a compressor system // *International journal of refrigeration*. – 2009. – Vol. 32 (7). – P. 1526-1535.

Отримана в редакції 26.10.2024, прийнята до друку 28.11.2024

Experimental study of viscosity and heat capacity of R1233zd(E) refrigerant solutions in Planetelf ACD 100FY compressor oil

Vitalii Zhelezny¹✉, 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 using low-potential energy sources and heat waste is possible through the use of heat pumps, which are part of power plant systems based on the organic Rankine cycle. As working fluids for such pumps, it is advisable to use refrigerants with a relatively high boiling point that meet modern environmental and energy standards. Among them, one of the most promising is R1233zd(E) refrigerant, whose thermal properties are well studied. However, in real conditions, the working fluids of vapor-compression heat pumps are not pure refrigerants, but its solutions in compressor oils. At the same time, the data on the thermophysical properties of R1233zd(E) refrigerant solutions in polyester oils are very limited. The article presents the results of an experimental study of the heat capacity of the lubricant and the viscosity of solutions of the refrigerant R1233zd(E) with the synthetic polyolefin oil Planetelf ACD 100FY in a wide range of temperatures and concentrations of components. The experimental data on the dynamic viscosity of R1233zd(E)/Planetelf ACD 100FY solutions were measured by the rolling ball method in the temperature range from 10 to 70 °C. The uncertainty of the data obtained for the viscosity of refrigerant/lubricant solutions does not exceed 3.9 %. Using the experimental information on the

heat capacity of compressor oil, the enthalpy of R1233zd(E)/Planetel ACD 100FY solutions was calculated. The obtained data were approximated by low-constant equations convenient for practical application. The influence of compressor oil impurities on the temperature and concentration dependences of the viscosity and enthalpy of the objects of study was investigated. The information on the viscosity and enthalpy of refrigerant/lube oil solutions provided in the article is necessary for a correct assessment of the effect of compressor oil impurities on the energy efficiency of heat pumps and the study of the effect of compressor oil impurities on the intensity of heat transfer of boiling processes in the evaporator.

Keywords: Experiment; Viscosity; Heat capacity; Enthalpy; R1233zd(E) refrigerant; Compressor oil; Refrigerant/oil solution.

References

1. **Longo, B. et al.** (2020) Assessment of the low-GWP refrigerants R600a, R1234ze (Z) and R1233zd (E) for heat pump and organic Rankine cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114804.
2. **Dawo, F. et al.** (2021) R1224yd (Z), R1233zd (E) and R1336mzz (Z) as replacements for R245fa: Experimental performance, interaction with lubricants and environmental impact. *Applied Energy*, 288, 116661.
3. **Yang, J. et al.** (2019) Simultaneous experimental comparison of low-GWP refrigerants as drop-in replacements to R245fa for Organic Rankine cycle application: R1234ze (Z), R1233zd (E), and R1336mzz (E). *Energy*, 173, 721-731.
4. **Eyerer, S. et al.** (2019) Experimental investigation of modern ORC working fluids R1224yd (Z) and R1233zd (E) as replacements for R245fa. *Applied Energy*, 240, 946-963.
5. **Sun, Y. et al.** (2024) Solubilities of R-1233zd (E) in Three Lubricating Oils and Impact of Oil Retention on the Evaporator Performance. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 69.5, 1832-1841.
6. **Lee, B.-M., Kwon, J.-W., Kim, M.-H.** (2016) Miscibility of POE and PVE oils with low-GWP refrigerant R-1234ze (E). *Science and Technology for the Built Environment*, 22.8, 1263-1269.
7. **Sun, Y. et al.** (2023) Measurement of Phase Equilibrium for R-1233zd (E) with Three Pure Esters between 298.15 and 343.15 K. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 69.1, 194-203.
8. (2018) National Institute of Standards and Technology (NIST). REFPROP: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database, Version 10.0. Boulder, CO: NIST.
9. **Zhelezny, V. et al.** (2024) Experimental study of flexibility and pressure of solid vapors of R1233zd(E) cooling varieties in Planetel ACD 100FY compressor oil. *Refrigeration Engineering and Technology*, 60(3), 233-242.
10. **Chen, G.M., Zhelezny, V.P., Melnyk, A.V., Shestopalov, K.O.** (2015) An experimental investigation and modelling of flow boiling heat transfer of isobutane-compressor oil solution in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*, 58, 137-145
11. **Chen, G., Zhelezny, V., Shestopalov, K., Lukianov, N., Polyuganich, M.** (2015) An experimental and theoretical investigation of the compressor oil and nanoparticles admixtures influence on the performance of the compressor systems. *Proceedings of the 24th IIR International Congress of Refrigeration 2015, August 16-22. Yokohama, Japan*, 318.
12. **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.
13. **Zhelezny, V.P. et al.** (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.
14. **Zhelezny, V.P., Nichenko, S.V., Semenyuk, Y.V., Kosoy, B.V., Kumar, R.** (2009) Influence of compressor oil admixtures on theoretical efficiency of a compressor system. *International journal of refrigeration*, 32 (7), 1526-1535.

Received 26 October 2024

Approved 28 November 2024

Available in Internet 30 December 2024