

## ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ

УДК (621.892+621.564.2):532.733

## Експериментальне дослідження середньої молярної маси компресорних мастил та розчинності холодоагента R290 у них

С. Г. Корнієвич<sup>1</sup>✉, П. С. Нестеров<sup>2</sup>✉, Е. Д. Дмитрієв<sup>3</sup>✉, О. Я. Хлієва<sup>4</sup>✉, В. П. Желєзний<sup>5</sup><sup>1,2,3,4,5</sup>Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна✉ e-mail: <sup>1</sup>kornievichserge13@gmail.com; <sup>2</sup>pavvelnest@gmail.com; <sup>3</sup>jekandrob@gmail.com; <sup>4</sup>khliyev@ukr.netORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-6803-0041>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-3592-4989>;<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0002-0987-1561>

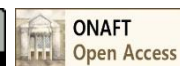
Останні роки спостерігається підвищений інтерес до застосування вуглеводневих холодоагентів у парокомпресійному холодильному обладнанні. Але в літературі практично відсутні данні з кривої розширення розчинів холодоагенту R290 в синтетичних компресорних мастилах та данні з молярної маси цих мастил. Ця інформація потрібна для моделювання теплофізичних властивостей розчинів холодоагент/мастило. У статті наведено результати дослідження середньої молярної маси поліефірного компресорного мастила ProEco® RF 22S і алкілбензольного компресорного мастила RENISO SP46, які рекомендоване для використання у холодильному обладнанні з холодоагентом R290. Розглянуто методичні проблеми, пов'язані з експериментальним вивченням молярної маси компресорних мастил. Визначення молярної маси виконано ебуліоскопічним методом. Наведено опис експериментальної установки, що реалізує ебуліоскопічний метод, методика проведення дослідження та результати проведених тарувальних експериментів. Розширена невизначеність отриманих даних не перевищує 5%. Наведено опис експериментальної установки для дослідження параметрів фазової рівноваги розчинів холодоагенту у компресорному мастилі. Наведено результати експериментального дослідження розчинності холодоагенту R290 в компресорних мастилах ProEco® RF 22S і RENISO SP46 в інтервалі температур від мінус 58 до 62 °C і широкому інтервалі концентрацій холодоагенту. Показано, що холодоагент R290 розчиняється в компресорних мастилах ProEco® RF 22S і RENISO SP46 у всьому інтервалі параметрів стану характерних для роботи холодильного обладнання, в якому застосовується холодоагент R290. З урахуванням отриманих даних компресорні мастила ProEco® RF 22S і RENISO SP46 рекомендовані для застосування в холодильному обладнанні при температурах кипіння вище мінус 30 °C.

**Ключові слова:** Експеримент; Компресорне мастило; Холодоагент R290; Молярна маса; Ебуліоскопічний метод; Розчинність; Концентрація

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1830>

© The Author(s) 2020. 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

Прогрес у вирішенні завдань теплофізичного моделювання властивостей реальних робочих тіл холодильного обладнання, під якими слід розуміти розчини холодоагент/компресорне мастило (РХМ), неможливий без інформації про молярну масу застосовуваних мастил. У свою чергу, відсутність

даних про термодинамічні властивості і коефіцієнти переносу РХМ значною мірою ускладнює вивчення процесів теплообміну в випарнику і конденсаторі холодильної машини, а також розробку і реалізацію заходів, спрямованих на підвищення ефективності холодильного обладнання.

Разом з тим, даних з молярної маси та кривої розширення розчинів промислових зразків ком-

пресорних мастил з перспективними на сьогодні холодоагентами в літературі міститься вкрай недостатньо [1-10].

Причин, що зумовили таку ситуацію декілька. По-перше, номенклатура застосовуваних в холодильній техніці компресорних мастил надзвичайно широка [4]. Як і раніше в практиці холодильного машинобудування широко застосовуються мінеральні компресорні мастила, які можуть бути отримані як при переробці нафти, так і за рахунок формування багатокомпонентних сумішей вуглеводнів, синтезованих хімічним шляхом. В сучасних холодильних компресорах, що працюють на галоїдопохідних озононеруйнівних холодоагентах, використовуються мастила на поліефірній основі (POE) або на основі поліалкіленгліколевих з'єднань (PAG). По-друге, для поліпшення окремих експлуатаційних характеристик компресорних мастил в їх складові вводять різні присадки: в'язкосні, антиокислювальні, антикорозійні, антипінні, що знижують температуру застигання, що покращують протизношувальні якості, а також багатофункціональні. По-третє, склад промислових зразків мастил завжди невідомий, оскільки він є комерційною тайною.

Крім того, складність і багатоваріантність складу поліалкіленгліколевих, алкілбензольних, нафтових, парафінових і др. мастил, а також наявність в них технологічних присадок, ставлять під сумнів можливість розробки та використання будь-яких узагальнених кореляцій, призначених для визначення їх середньої молярної маси і розрахунку теплофізичних властивостей РХМ. Хоча спроби створення подібних кореляцій відомі. Наприклад, в роботі [1] наведено ряд рівнянь для розрахунку молярної маси поліефірних мастил, які рекомендується використовувати при припущенні, що зазначені мастила можна розглядати як гіпотетично чисті рідини. В роботі [2] для спрощення процедури термодинамічного моделювання вводиться поняття «універсального» мастила і пропонується модель для розрахунку властивостей компресорних мастил незалежно від їх типу і складу. У довіднику [3] наведена обмежена інформація про молярні маси компресорних мастил різного хімічного складу, які призначені для застосування в обладанні, що працює на хлорвмісних і хлорфторвмісних холодоагентах. Однак відомості про мастила, холодоагенти і їх розчини з мастилами, що містяться в цьому довіднику, не є повними й достатніми і потребують оновлення з урахуванням

тенденцій переходу холодильної промисловості на перспективні холодоагенти.

Правильний вибір мастила сприяє довготривалій і надійній роботі компресора. До мастил пред'являють певні вимоги залежно від умов їх роботи, виду холодоагенту, температур його кипіння та конденсації і т.д.

Взаємна розчинність мастила з холодоагентом має суттєвий вплив на характеристики та роботу холодильної машини і компресора. Охолодження, енергетичні показники, пускові характеристики компресора, теплообмін в апаратах, циркуляція мастила та надійність компресора в значній мірі визначаються теплофізичними властивостями реального робочого тіла – РХМ.

Основне протиріччя при виборі мастила для пароконденсійної холодильної машини полягає в тому, що кращі умови змащення і ущільнення компресорів досягаються при використанні мастил з низькою розчинністю, в той час як нормальна циркуляція мастила в системі забезпечується при добрій взаємній розчинності з холодоагентом. Холодоагенти з необмеженою розчинністю утворюють з мастилом гомогенні розчини в будь-якій пропорції. Холодоагенти з обмеженою розчинністю змішуються з мастилами тільки в певних інтервалах температур і концентрацій. При досягненні критичної температури розшарування, розчин розділяється на дві рідкі фази, що мають різні концентрації.

Розчинене в рідкому холодоагенті мастило знижує холодопродуктивність компресорної системи. Оскільки тиск розчину холодоагент/мастило нижче тиску чистого холодоагенту, при заданій температурі кипіння у випарнику тиск і дійсна холодопродуктивність, холодильний коефіцієнт зменшуються, а робота стиснення збільшується зі збільшенням концентрації мастила в циркулюючому робочому тілі і зі зменшенням фіктивного перегріву в випарнику.

Таким чином розчинність мастила в холодоагенті має важливе значення для нормальної циркуляції мастила та повернення його в компресор.

Актуальність проблеми вивчення розчинності холодоагентів в мастилах продиктоване вирішенням глобальних еколого-енергетичних проблем, пов'язаних із заміною галоїдопохідних холодоагентів на альтернативні, які мають нульовий потенціал озонного руйнування і низьке значення потенціалу глобального потепління. Одним з таких холодоагентів, який призначений для заміни холо-

доагенту R22 (та запропонованих для його заміни численних сумішевих холодоагентів) є пропан (R290).

На жаль в літературі практично відсутня інформація не тільки про теплофізичні властивості розчинів R290/компресорне мастило, та й дані про криву розшарування пропану з мінеральними і синтетичними мастилами.

## 2. Об'єкти дослідження

При проведенні експериментальних досліджень було використано наступні речовини:

- промисловий зразок компресорного мастила ProEco® RF 22S (поліефірне) фірми BASF виробництва Emgard®, в'язкість 22,26 мм<sup>2</sup>/с при 40 °С;
- промисловий зразок компресорного мастила RENISO SP46 (алкілбензолне) фірми FUCHS (fuchs petrolub se), в'язкість 46 мм<sup>2</sup>/с при 40 °С;
- холодоагент R290 (пропан, C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) CAS № 74-98-6, з чистотою 98 %.

В табл. 1 наведено більш детально основні характеристичні параметри двох мастил (за даними виробників).

**Таблиця 1** – Характеристичні параметри компресорних мастил RENISO SP46 та ProEco® RF 22 S

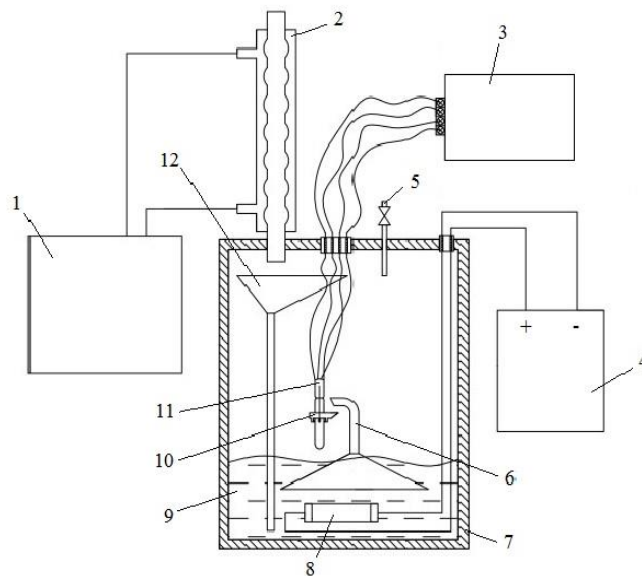
Основні параметри	RENISO SP46	ProEco® RF 22 S
В'язкість при 20 °С, мм <sup>2</sup> /с	170	-
В'язкість при 40 °С, мм <sup>2</sup> /с	46	22,26
В'язкість при 100 °С, мм <sup>2</sup> /с	5,1	4,08
Густина при 15 °С, кг/м <sup>3</sup>	872	949
Температура спалаху, °С	175	204
Температура застигання, °С	-42	-57
Число нейтралізації, мгКОН/г	0,03	0,01
Число омилення, мгКОН/г	1,1	2,7
Вміст води, мг/кг	<30	40

## 3. Дослідження середньої молярної маси мастил

### 3.1 Експериментальна установка та методика експерименту

Для визначення середньої молекулярної маси компресорних мастил була створена експериментальна установка, яка реалізує ебуліоскопічний метод [11]. Цей метод заснований на вимірюванні

різниці температур кипіння чистого розчинника і його розчину з досліджуваною речовиною в рамках припущення про те, що розчини з невеликою концентрацією розчиненої речовини можуть розглядатися як ідеальні. Принципова схема установки зображена на рисунку 1.



**Рисунок 1** – Схема експериментальної установки для дослідження середньої молярної маси компресорних мастил: 1 – термостат U-T Тур U 10; 2 – скляний конденсатор; 3 – мультиметр Time Electronics 50656 ½; 4 – джерело постійного струму Electronics PromTools powerSupply 30V 50A; 5 – заправочна магістраль; 6 – насос Компреля; 7 – скляна вимірювальна комірка; 8 – нагрівач; 9 – розчин бензол/мастило; 10 – воронка, 11 – платиновий термометр опору 50 Ом; 12 – пристрій відводу конденсату бензолу в киплячий розчин бензол/компресорне мастило

Основні елементи вимірювальної комірки встановлено в скляній комірці 7, яка з'єднана з атмосферою через конденсатор 2. Як розчинник в експериментах використовувався бензол (CAS № 71-43-2) чистотою 99,5%. Для нагріву розчинника (бензолу) до температури кипіння і підтримки необхідної температури під час проведення експерименту використовувалися нагрівач 8, розміщений всередині скляної комірки і джерело постійного струму 4 Electronics PromTools powerSupply 30V 50A.

Різниця температур кипіння чистого розчинника (бензолу) і його розчину з мастилом вимірювалася платиновим термометром опору 11. Опір термометра визначався мультиметром 3 з абсолютною похибкою 0,1 °С. Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність різниці температур

кипіння бензолу і розчинів бензол/компресорне мастило не перевищувала 2 %. Для зменшення впливу перегріву киплячої рідкої фази розчину бензол/компресорне мастило на показання термометра використовувався насос Котреля 6. Для кращого теплового контакту між термометром і киплячим розчином, що поступає з насосу Котреля, на термометрі встановлена воронка 10. Завантаження досліджуваних зразків мастил в вимірювальну комірку проводилося через заправну магістраль 5. Повернення частини розчинника, що сконденсувався, в комірку 7 забезпечувалося скляним конденсатором 2, через який прокачувалася вода з термостата 1 з постійною температурою 25 °С. Для зменшення теплообміну з навколишнім середовищем вимірювальна комірка була ізольована шаром фторкаучука марки СКФ-26.

В рамках застосованого методу дослідження [11] молярна маса зразків компресорних мастил розраховувалася за формулою

$$M = \frac{K_{\text{еб}}}{(\Delta T/C)_{C \rightarrow 0}} \quad (1)$$

де  $\Delta T$  – різниця температур кипіння розчину й чистого розчинника, К;  $C = m_{\text{мастило}}/m_{\text{бенз}}$  – відношення маси мастила, що міститься у розчині, до маси бензолу;  $K_{\text{еб}}$  – ебуліоскопічна константа розчинника, яка може бути розрахована за формулою

$$K_{\text{еб}} = \frac{RT_{\text{кип}}^2 M_{\text{бенз}}}{l_{\text{бенз}}} \quad (2)$$

де  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(К·моль);  $T_{\text{кип}}$  – температура кипіння бензолу, К;  $M_{\text{бенз}}$  – молярна маса бензолу, кг/моль;  $l_{\text{бенз}}$  – питома теплота паро-утворення бензолу, Дж/моль.

### 3.2 Опис експерименту та результати

Вимірювання різниці температур кипіння розчину і чистого розчинника проводилися при різних складах розчину з метою отримання залежності комплексу  $\Delta T/C$  від концентрації  $w$ .

Оскільки ебуліоскопічна константа сильно залежить від чистоти розчинника, при розрахунках молярної маси використовувалося значення  $K_{\text{еб}}$ , яке було отримано за результатами тарувального експерименту. В якості еталонної речовини з відомою величиною молярної маси був застосований н-нонан (CAS № 111-84-2) с чистотою 99,9

мас. %. За результатами проведеного дослідження отримано значення ебуліоскопічної константи бензолу  $K_{\text{еб}} = 2,60$ . Це значення відрізняється на 1,5 % від розрахованого за формулою (2) з використанням інформації про властивості бензолу [12].

З метою підтвердження достовірності отриманої інформації про молярні маси компресорних мастил був проведений тарувальний експеримент по знаходженню молярної маси зразкової речовини – тетраліну (CAS № 119-64-2) с чистотою 99,9 мас. %. Отримане в тарувальному експерименті значення молярної маси тетраліну склало 124,9 г/моль, що відрізняється від довідникових даних (132,2 г/моль) на 5,6 %. З урахуванням чистоти використовуваних речовин (бензолу і тетраліну) наведені відхилення експериментальних і довідникових даних можна вважати прийнятними.

Оскільки властивості реальних розчинів відхиляються від законів ідеальних розчинів, молярну масу розраховували з використанням значення комплексу  $\Delta T/C$ , отриманого шляхом екстраполяції залежності  $\Delta T/C = f(w)$  на значення  $w=0$ . Залежність комплексу  $\Delta T/C$  від концентрації  $w$  для вивчених мастил представлена на рисунку 2. Отримані значення середньої молярної маси мастил наведені в табл. 2.

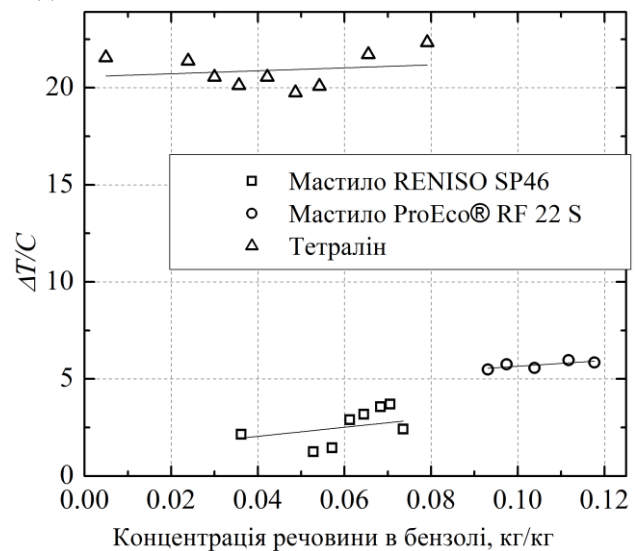


Рисунок 2 – Залежність комплексу  $\Delta T/C$  від концентрації  $w$

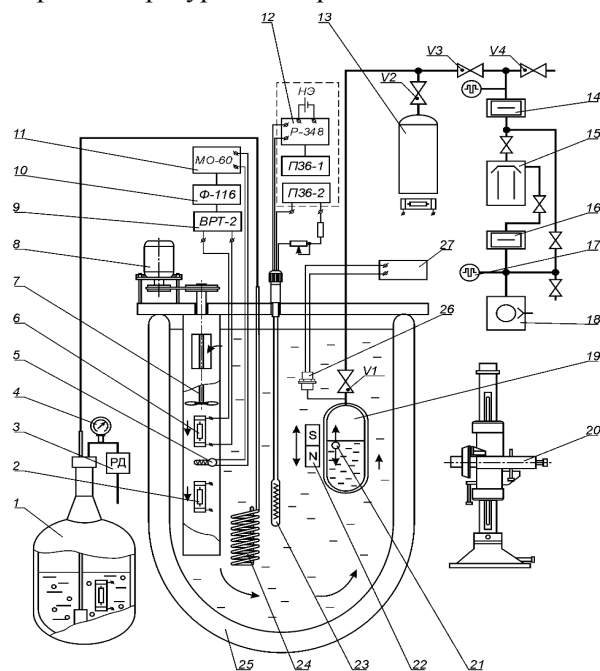
Таблиця 2 – Середня молярна маса промислових зразків компресорних мастил

Тип мастила	Мастило	$M_{\text{мастила}}$ Г/МОЛЬ
Алкілбенольне	RENISO SP46	777
Полефірне	ProEco® RF 22 S	453

## 4. Дослідження розчинності холодоагенту R290 в мастилах

### 4.1 Експериментальна установка та методика експерименту

Принципова схема установки для дослідження кривої розшарування розчинів холодоагент/мастило зображена на рис. 3. Установка реалізує статичний метод вимірювання фазових рівноваг рідина-рідина. Вимірювальною коміркою 19 є скляна ампула з коваровим штуцером, до якого від'єднувався запірний «гарячий» вентиль V1. Ампула встановлювалася в рідинному термостаті (скляній посудині Дюара) 25. Термостат забезпечений мішалкою 7 і електричними нагрівачами 2, 6. Термостатувальною рідиною був пентан і уайт-спірит. Охолодження термостата здійснювалося парами азоту, що надходили в теплообмінник 24 з посудини Дюара 1, в якому за допомогою регулятора 3 підтримувався певний рівень тиску, що забезпечувало сталість витрати азоту через теплообмінник. Постійна температура (з коливаннями не більше 0,02 К) в термостаті підтримувалася за допомогою автоматичної системи регулювання, що складалася з датчика температури 4 (технічного платиновий термометр опору), моста постійного струму 5, підсилювача 10, високоточного регулятора температури 9 і нагрівача 6.



**Рисунок 3** – Принципова схема установки для вимірювання густини і параметрів фазової рівноваги РХМ: 1 – посудина Дюара з рідким азотом; 2 – розгінний нагрівач; 3 – регулятор тиску;

4 – зразковий манометр; 5 – датчик системи регулювання температури (термометр опору); 6 – регульований нагрівач; 7 – мішалка; 8 – електропривід мішалки; 9 – автоматичний регулятор температури ДРТ-2; 10 – фотопідсилювач Ф-116; 11 – міст постійного струму МО-60; 12 – потенціометр постійного струму Р-348; 13 – заправний балончик; 14, 16 – криогенна вакуумна пастка; 15 – дифузний вакуумний насос моделі ЦВЛ-100; 17 – термопарний манометричний перетворювач; 18 – форвакуумний насос моделі ВН-461М; 19 – вимірювальна комірка; 20 – катетометри КМ-8; 21 – магнітна мішалка; 22 – магнітний привід мішалки; 23 – платиновий термометр опору ПТС-10; 24 – теплообмінник; 25 – скляна посудина Дюара; 26 – датчик тиску; 27 – мультиметр; V1, V2, V3, V4 – вентилі

Температура в термостаті вимірювалася компенсаційним методом за допомогою зразкового термометра опору 23 ПТС-10, потенціометра Р348 класу точності 0,002 і зразкової котушки Р-321 класу точності 0,01. У схемі вимірювання використовувалися стабілізовані джерела живлення типу ПЗ6-1 і ПЗ6-2. Похибка вимірювання температури не перевищувала 0,02 К.

Перед заправкою в вимірювальну комірку мастило очищалося від домішок води і розчинених газів. Ця процедура здійснювалася при вакуумуванні зразка, нагрітого до температури 388 К. Холодоагент піддавався очищенню від газів, методом багаторазової кристалізації під вакуумом. Вакуумна система, що складалася з форвакуумного насоса 18, дифузійного вакуумного насоса 15 і криогенних вакуумних пасток 14, 16, забезпечувала тиск не вище 0,1 Па.

Заправка вимірювальної комірки досліджуванним мастилом здійснювалася зі шприца, а заправка холодоагентом – з балончика 13. Після заправки вимірювальна комірка охолоджувалася рідким азотом і вакуумувалася. Для визначення маси заправлених речовин шприц і балончик зважувалися до і після заправки на лабораторних аналітичних вагах з похибкою одиничного зважування  $5 \cdot 10^{-7}$  кг.

У процесі дослідження кривої розшарування періодично проводилося слабке перемішування розчину мішалкою 21.

Методика дослідження параметрів фазової рівноваги рідина-рідина полягає у візуальному спостереженні за станом рідкої фази розчину. На початковій стадії досліду розчин приводився в гомо-

генний стан. Потім з певним кроком температура в термостаті змінюється (напрямок зміни температури залежав від положення критичної точки на кривій розшарування) до тих пір, поки в розчині не відбувалося помутніння (опалесценція). Описана процедура повторюється кілька разів зі зменшенням кроку зміни температури до 0,05 К.

Остаточно температура на лінії рівноваги рідина-рідина приймається рівною значенню, при якому спостерігається помутніння розчину. Зазвичай при цій температурі з часом відбувалося розшарування розчину на дві рідкі фази з утворенням чіткої границі розділу між ними.

Вочевидь, що похибка визначення температури розшарування залежить, в першу чергу, від кро-

ку, з яким змінюється температура термостата, і від часу підтримки її постійною. Попередні дослідження показують, що температури, відповідні гомогенному стану розчину і початку помутніння, в більшості випадків відрізняються на 0,1-0,2 К. Слід зазначити, що підвищенню ступеня відтворюваності результатів дослідження кривої розшарування РХМ сприяє перемішування розчину за допомогою мішалки 21.

## 4.2 Експериментальні результати

У табл. 3 наведені результати проведених досліджень параметрів кривих розшарування РХМ різного складу.

**Таблиця 3** – Результати дослідження розчинності мастил при різній концентрації та температурах

Поліефірне мастило ProEco® RF 22S			Алкілбензолне мастило RENISO SP46		
Температура, °С	Концентрація мастила, кг/кг	Розшарування	Температура, °С	Концентрація мастила, кг/кг	Розшарування
-56	0,4433	Не спостерігалось	-58	0,780%	Не спостерігалось
-49	0,710	-/-	-41	0,780	-/-
-48	0,4600	-/-	-29	0,3355	-/-
-44	0,3440	-/-	-21	0,780	-/-
-41	0,710	-/-	-12	0,3873	-/-
-36	0,2780	-/-	-6	0,4931	-/-
-32	0,4600	-/-	0	0,1080	-/-
-2	0,4600	-/-	1	0,780	-/-
3	0,4600	-/-	1	0,5700	-/-
7	0,3742	-/-	10	0,3868	-/-
8	0,3742	-/-	11	0,2198	-/-
10	0,2633	-/-	15	0,2198	-/-
10	0,2633	-/-	17	0,2198	-/-
15	0,3742	-/-	22	0,3868	-/-
18	0,3742	-/-	23	0,2198	-/-
19	0,2633	-/-	26	0,3868	-/-
23	0,3742	-/-	28	0,2198	-/-
25	0,2633	-/-	37	0,2198	-/-
31	0,3742	-/-	37	0,3868	-/-
43	0,3742	-/-	43	0,3868	-/-
47	0,3742	-/-	45	0,2198	-/-
47	0,2633	-/-	48	0,3868	-/-
50	0,3742	-/-	51	0,2198	-/-
54	0,3742	-/-	53	0,2198	-/-

## Продовження таблиці 3

Поліефірне мастило ProEco® RF 22S			Алкілбензольне мастило RENISO SP46		
Температура, °C	Концентрація мастила, кг/кг	Розшарування	Температура, °C	Концентрація мастила, кг/кг	Розшарування
58	0,2633	-//-	55	0,3868	-//-
			60	0,2198	-//-
			62	0,3868	-//-

Проведені дослідження показують, що в діапазоні досліджених параметрів спостерігається повна розчинність холодоагенту R290 в компресорних мастилах ProEco® RF 22S і RENISO SP46. За отриманими результатами можна зробити висновок про те, що поліефірне мастило ProEco® RF 22S і алкілбензольне RENISO SP46 мають дуже добру розчинність в пропані (R290) в діапазоні температур від мінус 55 °C до плюс 62 °C.

## 5. Висновки

На установці, що реалізує ебуліоскопічний метод дослідження, отримані експериментальні дані по середній молекулярній масі компресорних мастил ProEco® RF 22S – 453 г/моль та RENISO SP46 – 777 г/моль. Отримана інформація рекомендується для використання при моделюванні теплофізичних властивостей компресорних мастил і їх розчинів з холодоагентом R290. Як показує проведене дослідження, холодоагент R290 має хорошу розчинність в мастилах ProEco® RF 22S та RENISO SP46 в діапазоні температур від мінус 55 °C до плюс 62 °C, що гарантує хороше повернення робочого тіла з випарника в картер компресора.

Інформація про теплофізичні властивості розчинів R290/ProEco® RF22S і R290/RENISO SP46 та про параметри ефективності холодильної парокompресійної системи, в яких застосовуються вказані робочі тіла, планується бути наведеною у наступних роботах авторів.

## Література

- Huber M. L., Lemmon E. W., Friend D. G. Modelling bubble points of mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants and polyolester lubricants // *Fluid Phase Equilibria*. – 2002. – No 194. – P. 511–519.
- Yokozeki A. Solubility of refrigerants in various lubricants // *International Journal of Thermophysics*. – 2001. – Vol. 22. – No 4. – P. 1057-1070.
- ASHRAE Handbook: Refrigeration. – American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, Incorporated, 2010.
- Marsh K. N., Kandil M. E. Review of thermodynamic properties of refrigerants + lubricant oils // *Fluid Phase Equilibria*. – 2002. – No 199. – P. 319-334.
- Wu J., Chen Z., Lin J., Li J. Experimental analysis on R290 solubility and R290/oil mixture viscosity in oil sump of the rotary compressor // *International Journal of Refrigeration*. – 2018. – Vol. 94. – P. 24-32.
- Takigawa K., Sandler S. I., Yokozeki A. Solubility and viscosity of refrigerant/lubricant mixtures: hydrofluorocarbon/alkylbenzene systems // *International Journal of Refrigeration*. – 2002. – Vol. 25. – P. 1014-1024.
- Monsalvo M. A., Baylaucq A., Reghem P., Quiñones-Cisneros S. E., Boned C. Viscosity measurements and correlations of binary mixtures: 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane (HFC-134a) + tetraethylene glycol dimethylether (TEGDME) // *Fluid Phase Equilibria*. – 2005. – No 233. – P. 1–8.
- Teodorescu M., Lugo L., Fernández J. Modeling of gas solubility data for HFCs-lubricant oil binary systems by means of the srk equation of state // *International Journal of Thermophysics*. – 2003. – Vol. 24. – No 4. – P. 1043–1060.
- Рувинський Г. Я., Лавренченко Г. К., Канаєв В. В. Розробка кубічних єдиних рівнянь стану для опису термодинамічних властивостей маловивчених речовин і систем компресорне мастило-фреон // *Теплофізичні властивості речовин і матеріалів*. – ГСССД, 1989. – Вип 28. – С. 140-150.
- Fleming J. S., Yan Y. The prediction of vapour-liquid equilibrium behaviour of HFC blend-oil mixtures from commonly available data // *International Journal of Refrigeration*. – 2003. – Vol. 26. – P. 226-274.
- Рафіков С. Г., Павлова С. А., Твердохлєбова І. І. Методи визначення молекулярних ваг і полідисперсності високомолекулярних сполук. – М.: Видво академії наук СРСР, 1963. – 335 с.
- REFPROP: Reference fluid thermodynamic and

transport properties, NIST standard reference database 23, Version 8.0 / E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden. – Gaithersburg: National Institute of Stan-

dard and Technology, 2007.

Отримана в редакції 27.01.2020, прийнята до друку 03.03.2020

## Experimental study of the compressor oils average molar mass and the refrigerant R290 solubility in their

S. Kornievich<sup>1</sup>, P. Nesterov<sup>2</sup>, E. Dmitriev<sup>3</sup>, O. Khlieva<sup>4</sup>, V. Zhelezny<sup>5</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>Odessa National Academy of Food Technologies, 112 Kanatna str., Odesa, 65039, Ukraine

✉ e-mail: <sup>1</sup>kornievichserge13@gmail.com; <sup>2</sup>pavvelnest@gmail.com; <sup>3</sup>jekandrob@gmail.com; <sup>4</sup>khliyev@ukr.net

ORCID: <sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0002-6803-0041>; <sup>4</sup><https://orcid.org/0000-0002-3592-4989>;

<sup>5</sup><https://orcid.org/0000-0002-0987-1561>

*The increased interest in the hydrocarbon refrigerants application in vapor compression refrigeration systems has been observed last years. But there are absence data both on the phase-separation curve of refrigerant R290 solutions in synthetic compressor oils and on the molar mass of these oils in the literature. This information is necessary for refrigerant/oil solutions thermophysical properties predicting. The results of the study of the average molar mass of ProEco® RF 22S polyester compressor oil and RENISO SP46 alkylbenzene compressor oil, which are recommended for use in refrigerating equipment with R290 are presented in the paper. Methodological problems associated with experimental investigation of the compressor oils molar mass are considered. The measurement of the molar mass was performed by the ebullioscopy method. The description of the experimental setup that implements the ebullioscopy method, also as the experimental technique and the results of the calibration experiments are presented. The obtained data expanded uncertainty does not exceed 5 %. The description of the experimental setup for the investigation of the phase equilibrium parameters for the refrigerant/oil solution is presented. The results of experimental study of the R290 solubility in ProEco® RF 22S and RENISO SP46 compressor oils in the temperature range from minus 58 to 62 °C and a wide range of refrigerant concentrations are presented. It was shown that the R290 refrigerant is fully soluble in ProEco® RF 22S and RENISO SP46 compressor oils in the range of state parameters typical for the refrigerating equipment with the R290 refrigerant. Based on the data obtained, ProEco® RF 22S and RENISO SP46 oils are recommended for use in refrigerating equipment at evaporating temperatures above minus 30 °C.*

**Keywords:** Experiment; Compressor oil; Refrigerant R290; Molar mass; Ebullioscopic method; Solubility; Concentration.

### References

- Huber, M. L., Lemmon, E. W., Friend, D. G. (2002) Modelling bubble points of mixtures of hydrofluorocarbon refrigerants and polyolester lubricants. *Fluid Phase Equilibria*, 194, 511-519. doi.org/10.1016/S0378-3812(01)00655-0.
- Yokozeki, A. (2001) Solubility of refrigerants in various lubricants. *International Journal of Thermophysics*, 22/4, 1057-1070. doi.org/10.1023/A:1010695705260.
- ASHRAE Handbook: Refrigeration. American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers. (2010) *Incorporated*.
- Marsh, K. N., Kandil, M. E. (2002) Review of thermodynamic properties of refrigerants + lubricant oils. *Fluid Phase Equilibria*, 199, 319-334. doi.org/10.1016/S0378-3812(02)00025-0.
- Wu, J., Chen, Z., Lin, J., Li, J. (2018) Experimental analysis on R290 solubility and R290/oil mixture viscosity in oil sump of the rotary compressor. *International Journal of Refrigeration*, 94, 24-32. doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.07.021.
- Takigawa, K., Sandler, S.I., Yokozeki, A. (2002) Solubility and viscosity of refrigerant/lubricant mixtures: hydrofluorocarbon/alkylbenzene systems. *International Journal of Refrigeration*, 25, 1014-1024. doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00025-7.
- Monsalvo, M. A., Baylaucq, A., Reghem, P., Quiñones-Cisneros, S. E., Boned, C. (2005) Viscosi-

ty measurements and correlations of binary mixtures: 1, 1, 1, 2-tetrafluoroethane (HFC-134a)+tetraethylene glycol dimethylether (TEGDME). *Fluid Phase Equilibria*, 233, 1-8. doi.org/10.1016/j.fluid.2005.03.030.

8. **Teodorescu, M., Lugo, L., Fernández, J.** (2003) Modeling of gas solubility data for HFCs-lubricant oil binary systems by means of the srk equation of state. *International Journal of Thermophysics*, 24/4, 1043-1060. doi.org/10.1023/A:1025005018310.

9. **Ruvinsky, G. Ya., Lavrenchenko, G. K., Kanev, V. V.** (1989) Development of the cubic unified equation of state for description of the thermodynamic properties of poorly-studied substances and systems compressor oil-freon. *Thermophysical properties of substances and matters. GSSSD*, 28, 140-150.

10. **Fleming, J. S., Yan, Y.** (2003) The prediction of

vapour-liquid equilibrium behaviour of HFC blend-oil mixtures from commonly available data. *International Journal of Refrigeration*, 26, 266-274.

doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00130-5.

11. **Rafikov, S. G., Pavlov, S. A., Tverdokhlebova, I. I.** (1963) The methods of determination of the molar mass and polydispersity of the high-molecular compounds. *M.: izdatelstvo akademii nauk SSSR*, 335.

12. REFPROP: Reference fluid thermodynamic and transport properties, NIST standard reference database 23, Version 8.0 (2007) E. W. Lemmon, M. L. Huber, M. O. McLinden. *Gaithersburg: National Institute of Standard and Technology*.

---

Received 27 January 2020

Approved 03 March 2020

Available in Internet 04 July 2020