

УДК 544.012/971+621.564

Желєзний В.П., Корнієвич С.Г., Хлієва О.Я., Івченко Д.О.

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна 112, Одеса, 65036, Україна
e-mail: khliyev@ukr.net

Експериментальне дослідження тиску насиченої пари пропану в сумішах з компресорними мастилами в присутності домішок фулерену C₆₀

В роботі представлені результати дослідження тиску насиченої пари розчинів пропану в двох типах промислових компресорних мастил ProEco®RF22S та RENISO SP46, а також в мастилі ProEco®RF22S зі вмістом $6,837 \cdot 10^{-4}$ кг·кг⁻¹ фулерену C₆₀. Вимірювання тиску насиченої пари були виконані статичним методом в діапазоні температур (273... 333) К та масових часток пропану (0,11...0,595) кг·кг⁻¹.

Аналіз показав, що розширена невизначеність вимірювання тиску насиченої пари не перевищує $0,0419 \cdot 10^5$ Па для розчину пропан/ProEco®RF22S; $0,0716 \cdot 10^5$ Па для розчину пропан/RENISO SP46 та $0,0095 \cdot 10^5$ Па для розчину пропан/ProEco®RF22S, зі вмістом C₆₀. Проаналізовано температурні і концентраційні залежності тиску насиченої пари для об'єкта дослідження. Перевищення тиску насиченої пари для розчину пропану у мастилі ProEco®RF22S над тиском розчину пропану у мастилі RENISO SP46 досягає $1,5 \cdot 10^5$ Па при температурі 330 К та частці пропану 0,1 кг·кг⁻¹ та знижується зі зменшенням температури та збільшенням частки пропану. Показано, що добавка фулерена C₆₀ збільшує тиск насиченої пари розчину пропан/ProEco®RF22S на $0,4 \cdot 10^5$ Па при низькій температурі і низькій масовій частці пропану в розчині.

Отримані результати підтверджують доцільність впровадження в промисловість розчину компресорного мастила ProEco®RF22S зі вмістом фулерену C₆₀ в пропані в якості робочого тіла парокомпресійної холодильної системи. Здатність присадки C₆₀ в мастилі збільшувати тиск насиченої пари розглянутого робочого тіла сприятиме підвищенню енергетичної ефективності холодильних систем.

Ключові слова: пропан; промислове компресорне мастило; фулерен C₆₀; розчин; тиск насиченої пари

Вступ. В останні тридцять років в галузі холодильного машинобудування спостерігається справжня технологічна революція. Замість хлорфторвуглецевих та гідрохлорфторвуглецевих холодоагентів все ширше застосовуються речовини, екологічні властивості яких задовольняють вимогам Монреальського протоколу (регулює використання озоноруйнівних речовин) доповненого Кігалійської поправкою (регулює використання речовин з високим потенціалом глобального потепління). До числа перспективних холодоагентів насамперед відносять вуглеводні. Такі речовини як пропан (холодоагент R290) і ізобутан (холодоагент R600a) мають сприятливі термодинамічні і екологічні характеристики, низьку вартість, сумісність з конструкційними матеріалами, які використовуються у холодильному машинобудуванні.

Реальним робочим тілом парокомпресійної холодильної машини є розчин холодоагенту в компресорному мастилі, який циркулює по контуру системи [5, 19]. Домішки масла в робочому тілі сприяють зменшенню тиску насиченої пари холодоагенту, що призводить до зменшення теоретичної масової витрати холо-

доагенту, і, як наслідок, до зменшення теоретичної холодопродуктивності і холодильного коефіцієнта [5, 6, 19]. З урахуванням викладеного очевидна необхідність якісної інформації про вплив домішок різних компресорних мастил на тиск насиченої пари речовин, перспективних в якості холодоагентів.

В останні роки опубліковано чимало робіт присвячених вивченню доцільності застосування нанотехнологій при створенні та подальшому впровадженні у промисловість робочих тіл парокompресійних холодильних машин з метою збільшення їх енергетичної ефективності [12, 13]. В наявних роботах в основному розглядають перспективи добавок наночастинок оксидів металів в компресорні мастила. Істотним недоліком такого технологічного напрямку є недостатня колоїдна стійкість таких присадок в мастилах. Значно більш перспективним є застосування в якості добавок до компресорних мастил фулеренів [7, 10, 11]. Розчини фулерену C_{60} у мастилах утворюють стабільні до кластеризації та осадження системи (які фактично є молекулярними розчинами) [14, 15]. Крім того наявність домішок фулерена C_{60} у змащувальних мастилах сприяє зменшенню втрат на тертя в сполучених деталях компресора та зменшенню їх зносу [14, 16-18].

Незважаючи на практичне застосування пропану в якості холодоагенту в холодильному обладнанні, теплофізичні властивості розчинів пропану в мастилах вивчені недостатньо. Є лише кілька публікацій присвячених дослідженню тиску насиченої пари розчинів пропану у різних технічних мастилах [20-24]. У даний час недостатньо виконаних досліджень, щоб зробити висновки впливу застосування різних марок мастила на тиск насиченої пари пропану, хоча вплив типу мастила на параметри ефективності холодильного обладнання з пропаном в якості холодоагенту притягує увагу дослідників [6, 7, 9]. Питання доцільності застосування фулерену C_{60} в якості домішок до компресорного мастила і впливу їх присутності в мастилах на тиск насиченої пари розчинів мастила з пропаном залишаються не вивченими.

З урахуванням викладеного, метою виконаної роботи є експериментальне дослідження температурної залежності тиску насиченої пари розчинів пропану в різних за хімічним складом компресорних мастилах, а також вивчення впливу домішок фулерену C_{60} у мастилі на тиск насиченої пари цих розчинів.

1.1 Об'єкти дослідження. При проведенні експериментальних досліджень було використано наступні речовини:

- пропан (C_3H_8 , холодоагент R290) CAS № 74-98-6, з чистотою 98 %;
- промисловий зразок компресорного масла ProEco®RF22S фірми BASF виробництва Emgard®;
- промисловий зразок компресорного масла RENISO SP46 фірми FUCHS (fuchspetrolubSE);
- фуллерен C_{60} (SigmaAldrich, CAS № 99685-96-8, чистота 99,5мас. %)

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

Таблиця 1. Характеристичні параметри компресорних мастил ProEco®RF22S та RENISO SP46

Основні параметри	ProEco®RF22S	RENISOSP46
Тип мастила	поліефірне	алкілбензольне
В'язкість при 20°C, мм ² ·с ⁻¹	-	170
В'язкість при 40°C, мм ² ·с ⁻¹	22,26	46
В'язкість при 100°C, мм ² ·с ⁻¹	4,08	5,1
Густина при 15°C, кг·м ⁻³	949	872
Температура спалаху, °C	204	175
Температура застигання, °C	-57	-42
Число нейтралізації, мгКОН/г	0,01	0,03
Число омилення, мгКОН·г ⁻¹	2,7	1,1
Вміст води, мг·кг ⁻¹	40	<30
Молярна маса*, кг·кмоль ⁻¹	453	777
Розчинність у пропані**	Повна розчинність при температурах (-56...58)°C та концентрацій мастила до 0,71 кг·кг ⁻¹	Повна розчинність при температурах (-58...62)°C та концентрацій мастила до 0,78 кг·кг ⁻¹

* визначено авторами [4] за допомогою ебуліоскопічного метода с розширеною невизначеністю 2%,

** визначено авторами [4].

Попередньо проведені дослідження показали, що фулерен C₆₀ має кращу розчинність в компресорному мастилі ProEco®RF22S. Концентрація насичення дорівнює $0,223 \cdot 10^{-4}$ кг·кг⁻¹ фулерену C₆₀ для мастила **RENISO SP46** та $6,837 \cdot 10^{-4}$ кг·кг⁻¹ C₆₀ для мастила **ProEco®RF22S** при температурі 20 °C [7]. При приготуванні розчинів фулерену C₆₀ в мастилі ProEco®RF22S застосовувалася обробка зразків ультразвуком протягом 2 годин у ванні Codison CD 4800 (частота 42 кГц, потужність 0,07 кВт) з подальшою витримкою мастила 3 доби.

Для оцінки стійкості до кластеризації та осідання фулерену у зразку мастила використовувалася здатність фулерену C₆₀ поглинати світло певної довжини хвилі пропорційно його концентрації в розчині. Вимірювання коефіцієнта поглинання світла з довжиною хвилі 397 нм зразком масла ProEco®RF22S зі вмістом $6,837 \cdot 10^{-4}$ кг·кг⁻¹ C₆₀ проводилося з використанням спектрофотометра Shimadzu UV-120-02 в плоскопаралельних кюветах з довжиною оптичного шляху 1,1 мм. Довжина хвилі була обрана відповідно до рекомендацій [8] для розчинів фулерену C₆₀ в промислових мастилах. Результати спостережень протягом 6 місяців показали відсутність зміни показника поглинання, що говорить про відмінну стабільність до кластеризації та осадження фулерену C₆₀ в мастилі.

Вимірювання тиску насиченої пари зразків розчинів пропану з мастилами були виконані при наступних концентраціях пропану:

- розчин пропан/мастило ProEco®RF22S -0.5102; 0.2970; 0.1800 та 0.1103 кг·кг⁻¹ (далі на рисунках та в тексті позначений як Розчин 1);
- розчин пропан/мастило RENISOSP46 -0.5188; 0.3957; 0.3004 та 0.1504 кг·кг⁻¹ (далі на рисунках та в тексті позначений як Розчин 2);
- розчин пропан/мастило ProEco®RF22S / фулерен C₆₀ (6.837·10⁻⁴ кг·кг⁻¹ C₆₀ кг·кг⁻¹ мастила) -0.5943; 0.5032; 0.3274 та 0.1801 кг·кг⁻¹ (далі на рисунках та в тексті позначений як Розчин 1+C₆₀).

1.2 Методика проведення експериментального дослідження. Дослідження тиску насиченої пари об'єктів дослідження виконано статичним методом на установці, докладний опис якої наведено в роботах [1, 2].

Об'єм вимірювальної комірки дорівнював 70.1 см³. З метою зменшення впливу маси парової фази пропану на величину невизначеності концентрації компонентів зразків об'єм рідкої фази в вимірювальній комірці перевищував 75%. Вимірювальна комірка була занурена в термостат, оснащений системою автоматичного регулювання температури. Коливання температури в термостаті не перевищували 0,02 К. Вимірювання тиску здійснювалося за допомогою перетворювача тиску WİKA A-10, який був розташований в термостаті в герметичному кармані для його захисту від рідини, що термостатує. Вихідний сигнал перетворювача тиску - сила струму (від 4 до 20 мА) - вимірювався мультиметром Picotest M3511A 6½ Digits з невизначеністю вимірювання вихідного сигналу у діапазоні до 20 мА не більш ніж 0.016 %.

Для перетворювача тиску WİKA A-10 було виконане індивідуальне градування з використанням даних про тиск насичених парів чистого пропану [3] – рис. 1. За результатами виконаного градування було отримане наступне рівняння

$$P = -6.53297 + 1.59035 \cdot I, \quad (1)$$

де P – тиск, 10⁵ Па; I – сила струму, мА.

По закінченню досліджень тиску насичених парів об'єктів дослідження була проведена повторна градування перетворювача тисків, яка показала незмінність отриманої градувальної залежності.

Атмосферний тиск вимірювався інспекторським сифон-чашковим ртутним барометром з невизначеністю вимірювання 7 Па.

Вимірювання температури рідини в термостаті здійснювалося платиновим термометром опору WİKA марки TR10-A. Для даного термометра була отримана індивідуальна градувальна залежність з використанням платинового термометру опору ПТС 10 (невизначеність вимірювання температури 0.02 К). Термометр підключався до мультиметру за чотирихдротовою схемою. Невизначеність вимірюваних значень опору в діапазоні до 200 Ом для мультиметра Picotest M3511A 6½ Digits не перевищувала 0.022 %. Виконаний аналіз показує, що розширена невизначеність вимірювання температури не перевищувала 0.05 К.

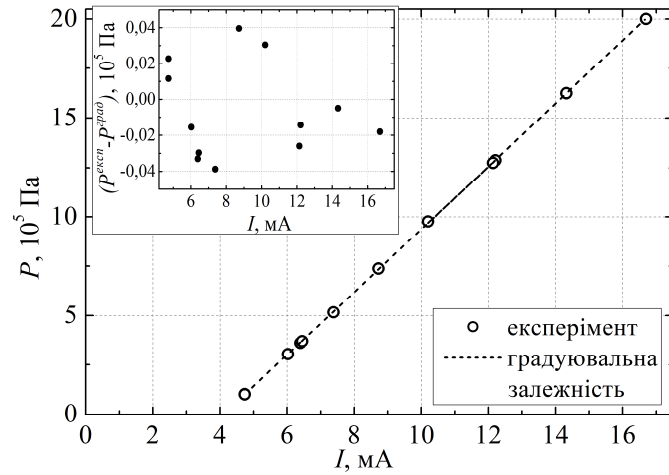


Рис. 1. Градувальна залежність перетворювача тиску і відхилення виміряного перетворювачем значення тиску і розрахованого по рівнянню (1)

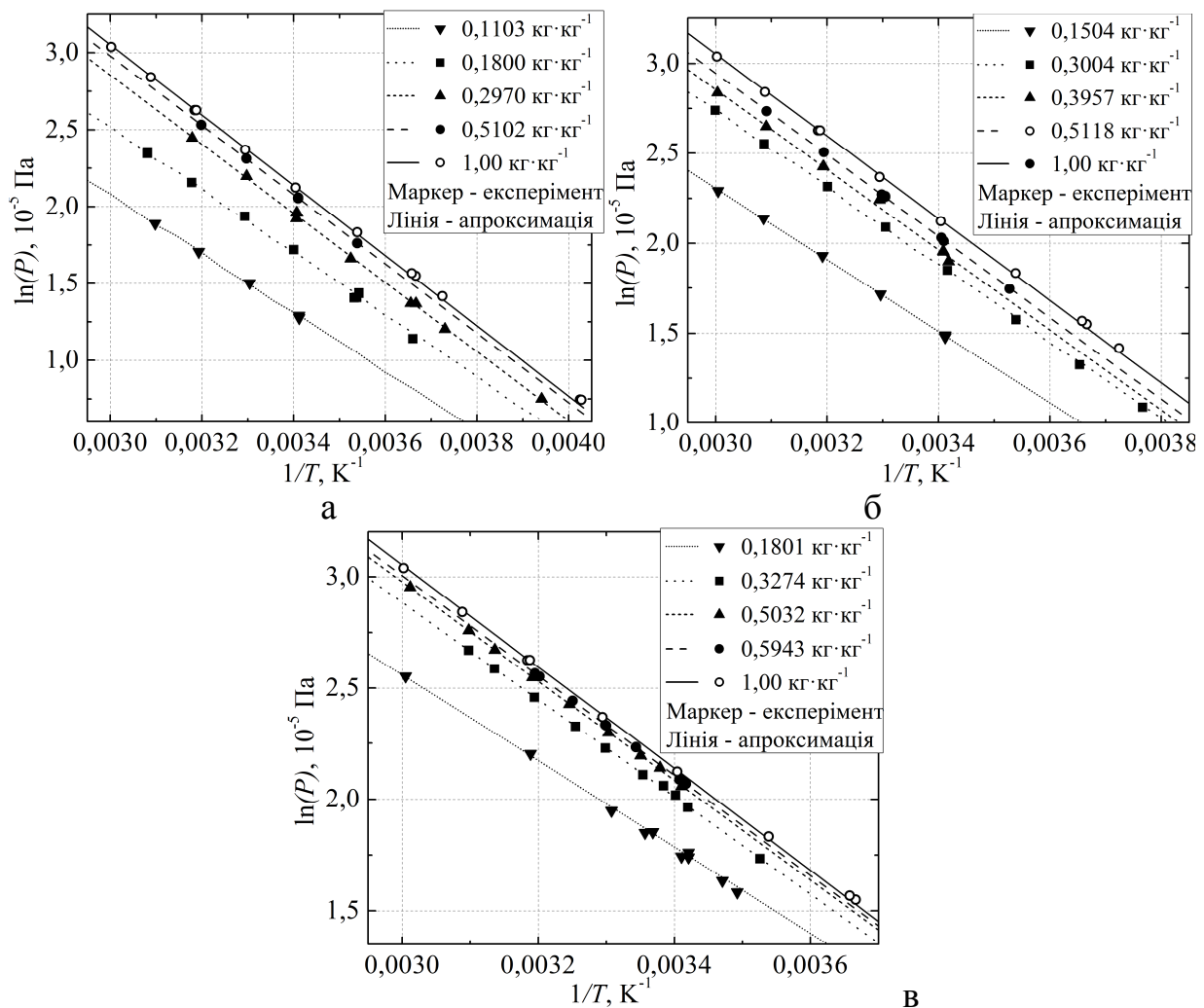


Рис. 2. Температурна залежність тиску насиченої пари об'єктів дослідження: а – розчин 1; б – розчин 2; в – розчин 1+C₆₀

Таблиця 2. Коефіцієнти апроксимаційного рівняння (3)

Коефіцієнти рівняння (3)	A		B	
	a	b	a	b
Розчин 1	9.92763	0.107921	-2294.01	-19.5033
Розчин 2	9.897022	0.133699	-2284.99	-24.1729
Розчин 1+C ₆₀	9.910103	0.160447	-2285.94	-36.3049

При приготуванні об'єктів дослідження необхідна кількість компонентів зважувалася за допомогою електронних ваг GR 300 з інструментальною похибкою 0.5 мг. Виконаний аналіз показав, що невизначеність визначення концентрації пропану в розчині з компресорним мастилом не перевищувала 0.3%, а невизначеності концентрації фулерену C₆₀ не перевищували 1.0%.

3. Результати експериментального дослідження. Отримані експериментальні дані про тиск насиченої пари об'єктів дослідження наведено на рис. 2.

Експериментальні дані з тиску насичених парів об'єктів дослідження в прийнятому для експерименту діапазоні температур і концентрацій були апроксимовані рівнянням (2). Слід звернути увагу, що при проведенні експерименту з ростом температури зразків в вимірювальній комірці збільшувалася маса парової фази. Тому виникла методична похибка, яка обумовлена зміною концентрації пропану в рідкій фазі при високих температурах. Тому при апроксимації експериментальних даних більша статистична вага надавалася даними, отриманим при низьких температурах інтервалу експериментальних досліджень.

$$\ln(P) = A + \frac{B}{T}, \quad (2)$$

де P – тиск насиченої парів об'єктів дослідження, 10⁵ Па; T – температура, К; A та B – апроксимаційні коефіцієнти, значення яких залежать від концентрації компресорного масла в об'єктах дослідження.

Концентраційна залежність коефіцієнтів A та B апроксимаційного рівняння (2) для об'єктів дослідження була описана рівнянням (3), де коефіцієнти a і b наведені в табл. 2. Інтервал концентрацій пропану у розчинах, для якого отримане рівняння (3) – (0.1...0.8) кг·кг⁻¹

$$A(B) = a + b \frac{\ln(T)}{T}. \quad (3)$$

Відхилення отриманих експериментальних даних з тиску насиченої пари від розрахованих за рівняннями (2) і (3) демонструє рис. 3.

Проведений аналіз показав, що розширена невизначеність вимірювання тиску не перевищувала 0,0419·10⁵ Па для розчину пропану у мастилі ProEco®RF22S; 0,0716·10⁵ Па для розчину пропану у мастилі RENISOSP46S та 0,0095·10⁵ Па для розчину пропану у мастилі ProEco®RF22S зі вмістом 6,837·10⁻⁴ кг·кг⁻¹ фулерену C₆₀.

4 Аналіз отриманих результатів. Температурна та концентраційна залежність тиску насиченої пари об'єктів дослідження, яка отримана з використанням рівнянь (2) та (3) наведена на рис. 4.

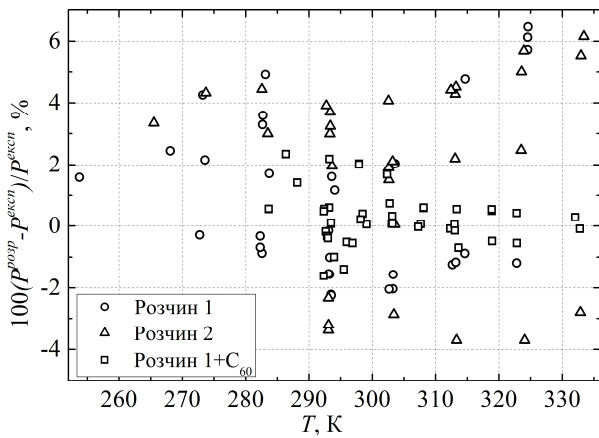


Рис. 3. Відносні відхилення експериментальних даних з тиску насиченої пари від розрахованих за рівняннями (2) та (3)

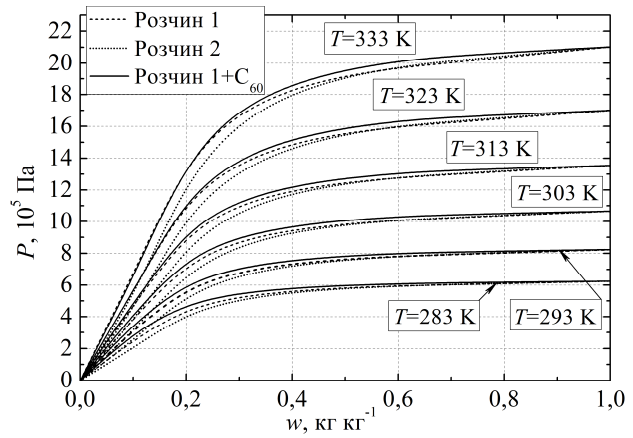


Рис. 4. Температурна та концентраційна залежність тиску насиченої пари об'єктів дослідження (w – частка пропану у розчині)

З інформації наведеної на рис. 2 і 4 випливає, що домішки компресорного мастила істотно впливають на тиск насиченої пари пропану. Ефект впливу домішок масла найбільш сильно проявляється при високих температурах в діапазоні концентрацій пропану у розчинах до $0,5 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$. Вибір марки компресорного мастила також впливає на тиск насичених парів пропану, що, як наслідок, може істотно впливати на густину пару пропану (як холодоагенту) в картері компресора, масову витрату робочого тіла і холодопродуктивність холодильної компресорної системи.

Вплив домішок фулерену C_{60} на зміну тиску насиченої пари розчину пропану в компресорному мастилi ProEco®RF22S додатково демонструє рис. 5.

Аналіз інформації наведеної на рис. 4 та 5 можна зробити висновок, що домішки фулерену C_{60} в розчинах пропану в маслі ProEco®RF22S сприяють збільшенню тиску насичених парів. Позитивний ефект збільшення тиску насичених парів в найбільшій мірі проявляється при параметрах даного розчину в

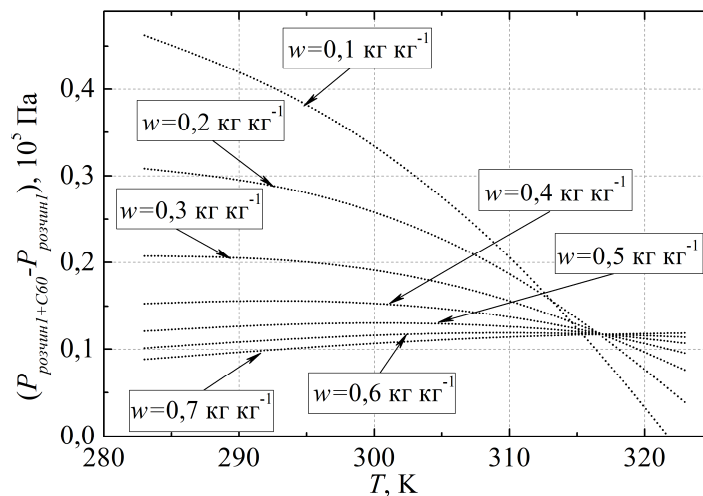


Рис. 5. Температурна залежність абсолютних відхилень значень тиску насиченої пари для об'єктів дослідження Розчин 1 та Розчин 1+ C_{60} при різному вмісті пропану w

картері компресора холодильної машини (при великій концентрації компресорного масла в розчині).

Висновки. В роботі виконано експериментальне дослідження температурної та концентраційної залежності тиску насиченої пари розчинів пропану в трьох мастилах для парокомпресійного холодильного обладнання: ProEco®RF22S, RENISOSP46 та ProEco®RF22S зі вмістом $6,837 \cdot 10^{-4}$ кг·кг⁻¹ фулерену C₆₀.

Показано, що при вирішенні задач підвищення енергетичної ефективності парокомпресійного холодильного обладнання вибір компресорного мастила має істотне значення. Фізико-хімічні характеристики компресорного мастила в значній мірі впливає на тиск насиченої пари розчинів пропан/мастило (реальних робочих тіл холодильних машин) у всьому інтервалі робочих параметрів. Перевищення тиску насиченої пари для розчину пропану у мастилі ProEco®RF22S (у порівнянні з розчином у RENISOSP46) досягає $1.5 \cdot 10^5$ Па при температурі 330 К та частці пропану 0.1 кг·кг⁻¹ та знижується зі зменшенням температури та збільшенням частки пропану.

Результати дослідження доцільності використання нанотехнологій при створенні реальних робочих тіл парокомпресійного холодильного обладнання показують, що використання домішок фулерена C₆₀ в компресорному мастилі ProEco®RF22S сприяють збільшенню тиску насиченої пари розчинів пропан/мастило (близько $0,4 \cdot 10^5$ Па при великій долі мастила у розчині та у інтервалі температур (280...310) К). Такий ефект буде сприяти покращенню параметрів ефективності парокомпресійної холодильної машини.

Список використаних джерел:

1. Zhelezny V., Motovoy I., Khanchych K., Sechenyh V., HlekYa. Temperature and concentration dependencies of the saturated vapor pressure for the solutions of nanoparticles AL₂O₃ in isopropanol and fullerenes C₆₀ in o-xylene // Journal of Molecular Liquids. – 2020. – Vol. 319. – P. 114362. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2020.114362>
2. Zhelezny V. P., Lukianov N. N., Khliyeva O. Y., Nikulina, A. S., Melnyk A. V. A complex investigation of the nanofluids R600a-mineral oil-AL₂O₃ and R600a-mineral oil-TiO₂. Thermophysical properties // International journal of refrigeration. – 2017. – Vol. 74. – P. 488-504. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.11.008>
3. 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 Standard and Technology, 2007.
4. Корнієвич С. Г., Нестеров П. С., Дмитрієв Е. Д., Хлієва О. Я., Желєзний В. П. Експериментальне дослідження середньої молярної маси компресорних мастил та розчинності холодоагента R290 у них // Холодильна техніка та технологія. – 2020. – Т. 56, №. 1-2. – С. 60-68. <https://doi.org/10.15673/ret.v56i1-2.1830>
5. ASHRAE. Handbook of Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineering, Inc. Atlanta: ASHRAE. 2017.

6. *Martínez-Galván I., González-Maciá J., Corberán J. M., Royo-Pastor R.* Oil type influence on the optimal charge and performance of a propane chiller // International journal of refrigeration. – 2011. – Vol. 34, №. 4. – P. 1000-1007. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.01.012>
7. *Korniievych S., Zhelezny V., Khliyeva O., Shymchuk M., Volgusheva, N.* A Study of the Influence of the Fullerene C 60 Additives in Compressor Oils of Various Viscosities on the Refrigerator Performance Parameters //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2020. – Vol. 5, №. 8. – P. 107. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.213968>
8. *Hwang Y., Lee J., Lee C., Jung Y., Cheong S., Lee C., Ku B., Jang S.* Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids // Thermochim. Acta. – 2007. – Vol. 455. P. 70–74. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2006.11.036>
9. *Chen R., Wu J., Duan J.* Performance and refrigerant mass distribution of a R290 split air conditioner with different lubricating oils //Appl. Therm. Eng. - 2019. – Vol. 162. – P. 114225. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114225>
10. *Xing M., Wang R., Yu J.* Application of fullerene C₆₀nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors // Int. J. Refrig. - 2014. - Vol. 40. – P.398-403. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.12.004>
11. *Zhelezny V., Chen G., Khliyeva O., Lukianov M., Shestopalov K., Korniiievich S.* An experimental investigation of the influence of fullerene C₆₀ additives in compressor oil on the coefficient of performance of the refrigeration system //Proc. 25th IIR International Congress of Refrigeration. Montreal, Canada, 2019, August 24-30. <https://doi.org/10.18462/iir.icr.2019.682>
12. *Bhattad A., Sarkar J., Ghosh P.* Improving the performance of refrigeration systems by using nanofluids: a comprehensive review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2018. – Vol. 82. – P. 3656-3669. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.097>
13. *Sidik N. A. C., Halim N. F. C.* Nanorefrigerants: A Review on Thermophysical Properties and Their Heat Transfer Performance //Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology. – 2020. – Vol. 20, Iss. 1. – P. 42-50. <https://doi.org/10.37934/araset.20.1.4250>
14. *Zhelezny V., Khliyeva O., Lukianov M., Motovoy I., Ivchenko D., Faik A., Grosu Y., Nikulin A., Moreira A.L.* Thermodynamic properties of isobutane/mineral compressor oil and isobutane/mineral compressor oil/fullerenes C60 solutions // Int. J. Refrig. –2019. - Vol. 106. - P. 153-162. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.06.011>
15. *Ku B.C., Han Y.C., Lee J.E., Lee J.K., Park S.H.* Tribological effects of fullerene (C60) nanoparticles added in mineral lubricants according to its viscosity // Int. J. Precis. Eng. Man. – 2010. - Vol. 11. – P. 607-611. <https://doi.org/10.1007/s12541-010-0070-8>
16. *Ginzburg B. M., Shibaev L. A., Kireenko O. F., Shepelevskii A. A., Baidakova M. V., Sitnikova A. A.* Antiwear effect of fullerene C60 additives to lubricating oils // Russ. J. Appl. Chem., - 2002. - Vol. 75, Iss. 8. – P. 1330-1335. <https://doi.org/10.1023/A:1020929515246>

17. *Zhai W., Srikanth N., Kong L. B., Zhou K.* Carbon nanomaterials in tribology // Carbon. – 2017. – Vol.119. – P. 150-171.
<https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.04.027>
18. *Gulzar M., Masjuki H. H., Kalam M. A., Varman M., Zulkifli N. W. M. Mufti R. A., Zahid R.* Tribological performance of nanoparticles as lubricating oil additives // J. Nanopart. Res. – 2016.– Vol. 8, Iss.223. <https://doi.org/10.1007/s11051-016-3537-4>
19. *Youbi-Idrissi M., Bonjour J., Marvillet C., Meunier F.* Impact of refrigerant-oil solubility on an evaporator performances working with R-407C // Int. J. Refrigeration. - 2003. Vol.- 26 (3). – P. 284-292.[https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00129-9](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00129-9)
20. *Gao Y. He, G., Chen, P., Zhao X., Cai D.* Energy and exergy analysis of an air-cooled waste heat-driven absorption refrigeration cycle using R290/oil as working fluid //Energy. – 2019. – T. 173. – С. 820-832.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.117>
21. *Czubinski F. F., Sanchez C. J. N., da Silva A. K., Neto M. A. M., Barbosa Jr J. R.* Phase equilibrium and liquid viscosity data for R-290/POE ISO 22 mixtures between 283 and 353 K // International Journal of Refrigeration. – 2020. – Vol. 114. – P. 79-87. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.02.029>
22. *Wang X., Jia X., Wang D.* Experimental investigation on the solubility of R290 in two mineral oils //International Journal of Refrigeration. – 2021. – Vol. 124. – P. 13-19. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.12.021>
23. *Fernando W., Han H., Palm B., Granryd E., Lundqvist P.* The solubility of propane (R290) with commonly used compressor lubrication oils //International Conference on Compressors and Their Systems. London, England, Sep. 07-10, 2003. – Vol. 4. – P. 157-166.
24. *Fukuta M., Yanagisawa T., Iwata H., Tada K.* Performance of compression/absorption hybrid refrigeration cycle with propane/mineral oil combination //International journal of refrigeration. – 2002. – Vol. 25, Iss. 7. – P. 907-915. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00102-5](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00102-5)

Железный В.П., Корниевич С.Г., Хлиева О.Я., Ивченко Д.А.

Экспериментальное исследование давления насыщенного пара пропана в смеси с компрессорными маслами в присутствии примесей фуллерена C₆₀

АННОТАЦИЯ

В работе представлены результаты исследования давления насыщенного пара растворов пропана в двух типах промышленных компрессорных масел ProEco®RF22S и RENISO SP46, а также в масле ProEco®RF22S содержащем $6.837 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ фуллерена C₆₀. Измерения давления насыщенного пара были выполнены статическим методом в диапазоне температур (273... 333) К и массовых долей пропана (0.11...0.595) кг·кг⁻¹.

Анализ показал, что расширенная неопределенность измерения давления насыщенного пара не превышает $0.0419 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для раствора пропан/ProEco®RF22S; $0.0716 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для раствора пропан/RENISO SP46 и $0.0095 \cdot 10^5 \text{ Па}$ для раствора пропан/ProEco®RF22S, содержащего C₆₀. Проанализированы температурные и концен-

традиционные зависимости давления насыщенного пара для объекта исследования. Превышение давления насыщенного пара для раствора пропана в масле ProEco®RF22S над давлением раствора пропана в масле RENISO SP46 достигает $1.5 \cdot 10^5$ Па при температуре 330 К и содержании пропана $0.1 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ и снижается с уменьшением температуры и увеличением содержания пропана. Показано, что добавка фуллерена C_{60} увеличивает давление насыщенного пара раствора пропан/ProEco®RF22S на $0.4 \cdot 10^5$ Па при низкой температуре и низкой массовой доле пропана в растворе.

Полученные результаты подтверждают целесообразность внедрения в промышленность раствора компрессорного масла ProEco®RF22S содержащего фуллерен C_{60} в пропане в качестве рабочего тела парокомпрессионной холодильной системы. Способность присадки C_{60} в масле увеличивать давление насыщенного пара рассматриваемого рабочего тела будет способствовать повышению энергетической эффективности холодильных систем.

Ключевые слова: пропан; промышленное компрессорное масло; фуллерен C_{60} ; раствор; давление насыщенного пара

Zhelezny V., Korniiyevych S., Khliyeva O., Ivchenko D.O.

An experimental investigation of the saturated vapor pressure of solutions propane in compressor oils in the presence of fullerene C_{60} in oil

Summary

An investigation of the saturated vapor pressure for the solutions of propane in the two type of industrial compressor oils ProEco®RF22S and RENISO SP46, also as in oil ProEco®RF22S containing fullerene C_{60} $6.837 \cdot 10^{-4} \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$ is presented in this paper. The measurement of the saturated vapor pressure was conducted using a static method in a temperature range (273...333) K and the propane mass fraction (0.11...0.595) $\text{кг} \cdot \text{кг}^{-1}$.

An analysis revealed that the expanded uncertainties of the measured saturated vapor pressure do not exceed $0.0419 \cdot 10^5$ Pa for solution propane/ProEco®RF22S, $0.0716 \cdot 10^5$ Pa for solution propane /RENISO SP46, and $0.0095 \cdot 10^5$ Pa for solution propane/ProEco®RF22S containing C_{60} . The temperature and concentration dependences of the saturated vapor pressure for the object of study have been discussed. The excess of saturated vapor pressure for the solution of propane in oil ProEco®RF22S over the pressure of the solution of propane in oil RENISO SP46 reaches $1.5 \cdot 10^5$ Pa at a temperature of 330 K and propane fraction of $0.1 \text{ кг} \cdot \text{кг}^{-1}$. This effect decreases with temperature decreasing and propane fraction increasing. It was proven that the additive of the fullerene C_{60} increase the saturated vapor pressure of the solution propane/ProEco® RF22S up to $0.4 \cdot 10^5$ Pa at low temperature and low propane mass fraction in solution.

The results obtained proved the expediency of the introduction in the industry the solution of propane/compressor oil ProEco® RF22S containing the fullerene C_{60} as working fluid of vapor compression refrigeration system. The ability of C_{60} additive in oil to increase the saturated vapor pressure of considered working fluid will contribute to increasing the energy efficiency of refrigeration systems.

Keywords: propane; industrial compressor oil; fullerene C_{60} ; solution; saturated vapor pressure