ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 536.71 **DOI https://doi.org/10.33082/td.2026.1-28.03**

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ СКЛАДАННЯ ЄДИНОГО РІВНЯННЯ СТАНУ СУМІШІ ХОЛОДОАГЕНТІВ 3,3,3-ТРИФТОРПРОПЕН (R1243ZF) + ІЗОБУТАН (R600A) ЗА НАЯВНИМИ ЕКСПРЕРИМЕНТАЛЬНИМИ ДАНИМИ

В.П. Мальчевський[1], Н.І. Александровська[2], О.В. Єриганов[3]
[1]професор кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3117-1251
[2]доцент кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068
[3]доцент кафедри суднових енергетичних систем та комплексів
Одеський національний морський університет, Одеса, Україна
ORCID ID: 0009-0009-9051-3400

Анотація

Вступ. *Стаття присвячена вирішенню проблеми оптимального вибору холодоагенту, який має відповідати діючим експлуатаційним та екологічним вимогам. Основними критеріями в цьому виборі є: з одного боку – відсутність руйнівного впливу на озоновий шар Замлі, з іншого – низький потенціал глобального потепління, який обумовлений в першу чергу високою ефективністю холодильного обладнання.* ***Метою*** *роботи є дослідження можливості складання єдиного ріняння стану суміші холодоагентів R1243zf та R600a за наявними експреиментальними даними про термодинамічні властивості.* ***Результати.*** *Виконано аналіз наявних даних про термодинамічні властивості суміші R1243zf/R600a. На базі експериментальних даних про температуру, тиск та питомий об'єм суміші у області пари складено вихідне рівняння стану у формі, яка представляє собою розкладання безрозмірної вільної енергії Гельмгольця суміші на ідеально-газову та реально-газову складову. При цьому реально-газова складова комбінується з енергій Гельмгольця компонентів та функції взаємодії, складеної на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші. Оскільки дані про густину суміші у стані насичення відсутні, відповідні значення отримані розрахунковими методами. А саме, значення густини насиченої пари отримані шляхом розрахунку за складеним вихідним рівнянням для області пари, а відповідні значення густини насиченої рідини отримані шляхом комбінації безрозмірних значень приведеного питомого об'єму компонентів суміші. Експериментальні значення густини пари і розраховані значення густини, отримані для експериментальних значень тиску насиченої пари мають прийнятну точність опису вихідним*

© Мальчевський В.П., Александровська Н.І., Єриганов О.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

рівнянням. Дані про густину насиченої рідини, які також отримані для відповідних експериментальних значень тиску також досить точно описують самі себе, але додавання їх до рівняння стану пари призводить до різкого збільшення відхилень вихідного масиву даних. Це може бути пояснено обмеженістю даних про густину пари лише низькими та помірними значеннями тиску. Отже, поява нових експериментальних даних для досліджуваної суміші надасть можливість для складання рівняння стану для розрахунку властивостей у стані насичення як у області пари, так і у області рідини. ***Висновки.*** *Суміш холодоагентів R1243zf/R600a є перспективною робочою речовиною для використання у холодильній техніці та системах опалення, вентиляції та кондиціювання повітря. Дослідження теплофізичних властивостей цієї суміші знаходяться на початковому етапі, що обумовило обмеженість експериментальних даних по ній. Тим не менш, спроба складання єдиного рівняння стану цієї речовини у рамках даної роботи має певні успіхи. Отримане рівняння досліджуваної суміші, яке описує властивості пергрітої та насиченої пари. Через вузький діапазон вихідних експериментальних даних про температуру, тиск та густину не вдалося описати єдиним рівнянням повний набір опорних даних про густину насиченої пари та рідини. Однак, поява нових, більш розширених за діапазонами дослідних даних скоріше за все дозволить отримати єдине рівняння стану для досліджуваної суміші, яке також ураховуватиме умову фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини, яке необхідне для можливості коректного разрахунку колоричних властивостей.*

Ключові слова: *міжнародні вимоги, суміш холодоагентів R1243zf/R600a, експериментальні дані, термодинамічні властивості, єдине рівняння стану, енергія Гельмгольця, фазова рівновага.*

INVESTIGATION OF THE POSSIBILITY OF COMPILING A UNIFIED EQUATION OF STATE FOR A MIXTURE OF 3,3,3-TRIFLUORO-PROPENE (R1243ZF) + ISOBUTANE (R600A) BASED ON AVAILABLE EXPERIMENTAL DATA

V.P. Malchevsky[1], N.I. Aleksandrovska[2], O.V. Yeryganov[3]
[1]professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3117-1251
[2]assistant professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6591-2068
3assistant professor of the Department of Ships Energetic Systems and Plants
Odessa National Maritime University, Odesa, Ukraine
ORCID ID: 0009-0009-9051-3400

Summary

Introduction. *The article is devoted to solving the problem of the optimal choice of refrigerant, which must satisfy current operational and environmental requirements. The main criteria for this choice are: on the one hand, the absence of a destructive impact on the Earth's ozone layer, and on the other hand, low global warming potential,*

which is primarily due to the high efficiency of refrigeration equipment. ***The purpose of the work*** *is to investigate the possibility of compiling a unified equation of state for the mixture of refrigerants R1243zf and R600a based on available experimental data on thermodynamic properties.* ***The results.*** *An analysis of available data on the thermodynamic properties of the R1243zf/R600a mixture was performed. On the basis of experimental data on the temperature, pressure and specific volume of the mixture in the vapour region, an initial equation of state was compiled in the form of a decomposition of the dimensionless Helmholtz free energy of the mixture into ideal gas and real gas components. In this case, the real gas component is combined with the Helmholtz energies of the components and the interaction function compiled on the basis of experimental data on the thermodynamic properties of the mixture. Since there is no data on the density of the mixture in the saturated state, the corresponding values were obtained by calculation methods. Namely, the values of saturated vapour density are obtained by calculation using the derived equation for the vapour region, and the corresponding values of saturated liquid density are obtained by combining the dimensionless values of the reduced specific volume of the mixture components. The experimental values of vapour density and the calculated values of density obtained for the experimental values of saturated vapour pressure have an acceptable accuracy of description by the initial equation. The data on the density of saturated liquid, which were also obtained for the corresponding experimental pressure values, also describe themselves quite accurately, but adding them to the vapour equation of state leads to a sharp increase in the deviations of the initial data array. This can be explained by the limitation of the data on vapour density to low and moderate pressure values only. Therefore, the appearance of new experimental data for the investigated mixture will provide an opportunity to compile an equation of state for calculating properties in the saturated state in both the vapour and liquid regions.* ***Conclusions.*** *The R1243zf/R600a refrigerant mixture is a promising working substance for use in refrigeration technology and heating, ventilation and air conditioning (HVAC) systems. Research of the thermophysical properties of this mixture is at an early stage, which has led to limited experimental data on it. Nevertheless, an attempt to compile a single equation of state for this substance within the framework of this work has been somewhat successful. The resulting equation for the investigated mixture describes the properties of preheated and saturated vapour. Due to the narrow range of initial experimental data on temperature, pressure and density, it was not possible to describe the complete set of reference data on the density of saturated vapour and liquid with a unified equation. However, the appearance of new experimental data with more expanded ranges will most likely allow us to obtain a unified equation of state for the investigated mixture, which will also take into account the condition of phase equilibrium of pressure and density in the saturated state for the same values of steam and liquid composition, which is necessary for the correct calculation of calorific properties.*

Key words: *international regulations, R1243zf/R600a refrigerant mixture, experimental data, thermodynamic properties, unified equation of state, Helmholtz energy, phase equilibrium.*

 ISSN 2616-7360

Вступ. Підписаний у 1987 році Монреальський протокол «про речовини, що руйнують озоновий шар» [1] та Кіотський протокол [2], який зафіксував список парникових газів значно обмежили перелік можливих холодоагентів. Остання, Кігалійська поправка до Монреальського протоколу [3] та новий Регламент Європейського союзу щодо фторвмісних газів [4] накладають у майбутньому обмеження на речовини з потенціалом глобального потепління (ПГП) більшим, ніж 150.

Таким чином, пошук ефективних робочих речовин холодильних установок та систем опалення, вентиляції та кондиціювання повітря має базуватися на компромісі між відсутностю руйнівного впливу на озоновий шар Землі – з одного боку та забезпеченням високої ефективності у роботі обладнання – з іншого. Робота з низькою ефективністю призводить до збільшення вартості отримання холоду, а також призводить до значного збільшення ПГП, що робить таку речовину небезпечним парниковим газом.

У процесі пошуку оптимальних холодоагентів з моменту підписання Монреальського протоколу утворилося чотири генерації холодоагентів [5]. До останьої, четвертої генерації разом із природними речовинами відносяться гідрофторолефіни (HFO) та гідрохлорфторолефіни (HCFO), які не руйнують озоновий шар Планети та мають надзвичайно низький ПГП. Однак, у [5] зазначено, що є певні сумніви щодо сумісності HFO (HCFO) з навколишнім середовищем, оскільки їх розкладання у атмосфері може утворювати такі з'єднання, як: трифтороцтова кислота, фторид водню та фторид карбоніду.

Однак, не зважаючи на те, що використання гідрофторолефінів (гідрохлорфторолефінів) пов'зане із певними труднощами, вони мають перспективу на використання через відсутність руйнівного впливу на озоновий шар та практично нульовий ПГП. Зменшення негативних особливостей цих речовин може бути досягнуте шляхом змішування з іншими холодоагентами, зокрема, із природними речовинами.

З тією ж метою було створено суміш R1243zf/R600a (та ряд інших, подібних до неї). Так, 3,3,3-трифторпропен (R1243zf) – горючий холодоагент, має клас A2 за стандартом ASHRAE [6] та подібний за термодинамічними властивостями до R134a. Ізобутан R600a відомий своєю високою ефективністю, тому суміш R1243zf/R600a повинна бути не менш ефективна, ніж R134a, але мати значно менший ПГП. Наявність експериментально отриманих термодинамічних властивостей дає можливість складання рівняння стану.

Постановка проблеми. До 90-х років минулого століття як холодоагенти використовувалися галоїдопохідні метанового та етанового ряду (хлорфторвуглеці – ХФВ та гідрофторхлорвуглеці – ГХФВ). Вони безпечні для використання та енергоефективні. Однак, відповідно до Монреальського [1] та Кіотського [2] протоколів, на них почали діяти суворі обмеження через руйнівну дію на озоновий шар Землі. Згодом, значні обмеження [3] торкнулися і більшості речовин (здебільшого, гідрофторвуглецїв – ГФУ), запропонованих як альтернатива забороненим озоноруйнівним холодоагентам через високі значення потенціалу глобального потепління (ПГП).

Аналіз найбільш популярних робочих речовин [7] показав, що жодна з них не забезпечує ефективність холодильного обладнання, яка мала місце при

використанні заборонених хлорвмісних холодоагентів. Тому актуальною проблемою, порушенною у статті, є вибір оптимальної робочої речовини для холодильного та теплопостачального обладнання. Як зазначено у [8] компроміс при виборі робочих речовин для холодильників та теплових насосів повинен знаходитися між безпекою та термодинамічними властивостями.

У процесі наукового пошуку максимально безпечних та ефективних речовин, який продовжує відбуватися і тепер було розроблено чотири генерації холодоагентів [5]. До останьої відносяться природні речовини, гідрофторолефіни (ГФО), гідрохлорфторолефіни (ГХФО) та гідрофторетери (ГФЕ). Особливістю ГФО та ГХФО є наявність в їх молекулярній структурі принаймі одного подвійного зв'язку «вуглець – вуглець», що обумовлює низьке значення ПГП. У [5] зазначено, що атоми фтору (хлору) у молекулах ГФО (ГХФО) можуть бути причиною горючості та викликати складнощі при тривалому знаходженні у атмосфері. Останні можливі через те, що їх розкладання у атмосфері може утворювати такі з'єднання, як: трифтороцтова кислота, фторид водню та фторид карбоніду.

Тим не менш дослідження ГФО (ГХФО) тривають і є підстави вважати, що їх змішування з іншими речовинами дозволить зменшити небажані особливості суміші у порівнянні з чистими речовинами. Так вчені [8,9,10] запропонували дослідити за хімічними та теплофізичними характеристиками, впливом на довкілля та безпекою при використанні суміш R1243zf/R600a, як потенційний замінник відповідних чистих компонентів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Найбільш систематичний аналіз холодоагентів (серед яких є ГФО та ГХФО) виконаний авторами [7], які вибрали шістдесят дві найбільш привабливі речовини. У цій роботі зазначено, що серед інших ГФО 3,3,3-трифторпропен (R1243zf) крім низького ПГП (приблизно 0,29) також має термодинамічні властивості, схожі з R134a (з ПГП відповідно – 1430). До того ж у роботі [11] відмічено, що він значно дешевший за R1234yf, який визнано найбільш дослідженим замінником R134a.

У свою чергу, ізобутан R600a (його ізомер н-бутан R600 має аналогічну з R600a хімічну формулу, але відрізняється будовою молекул і використовується здебільшого у побутових газових балонах та як паливо для автомобілів) є відомим природним холодоагентом, який попри свої горючі властивості має високу ефективність і тому широко використовується у побутових холодильниках та кондиціонерах. Таким чином, суміш R1243zf/R600a має бути не менш ефективною, ніж R134a, але мати значно менший ПГП.

Обидва компоненти суміші є добре дослідженими з термодинамічної точки зору. Для R1243zf у роботі використовується фундаментальне рівняння стану [12], яке є третім, найбільш удосконаленим рівнянням цих авторів (перше було представлене у 2016 році). Воно ураховує наявні дослідні дані з термічних і калоричних властивостей у інтервалі температур від потрійної точки до 430 К для значень тиску до 35 МПа. Для R600a обрано фундаментальне рівняння [13], яке також дозволяє розраховувати з високою точністю повний набір термодинамічних властивостей речовини при температурах від кривої плавління до 340 К для значень тиску до 69 МПа.

 ISSN 2616-7360

Для суміші R1243zf/R600a у однофазній області наявні лише дані про температуру, тиск та густину пергрітої пари [9], отримані для чотирьох ізохор (0,0944; 0,1614; 0,2306 та 0,6145 м^3/кг) при температурах від 303 до 383 К для значень мольної долі компоненту R600a від 0,225 до 0,898.

У стані насичення експериментальні дані обмежені лише значеннями температури та тиску [8,10], отримані за допомогою апарату для рециркуляції пари у поєднанні з газохроматографічним аналізом для значень мольних долей насичених пари та рідини компоненту R1243zf у інтервалі від 0 до 1. У роботі [8] значення тиску отримані на п'яти ізотермах у інтервалі від 283,15 до 323,15 К. Відповідно, дослідні значення насиченого тиску [10] охоплюють інтервал температур від 253,15 до 293,15 також на п'яти ізотермах. Експериментальні значення густини у насиченні на даний момент відсутні і тому були отримані у роботі розрахунковим шляхом.

Формулювання цілей статті. Метою статті є спроба складання єдиного рівняння стану суміші холодоагентів R1243zf/R600a у формі безрозмірної вільної енергії Гельмгольця на базі наявних експериментальних даних з використанням рівнянь стану компонентів суміші.

Виклад основного матеріалу. На базі експериментальних даних [9] складене вихідне рівняння стану, яке дозволяє розраховувати властивості перегрітої пари в інтервалі температур від 303 до 384 К при значеннях тиску до 0,37 МПа. Для складання рівняння стану суміші використана методика [14], у відповідності до якої рівняння має вигляд:

$$A = A^{id} + A^{E}, \tag{1}$$

де A та A^{id} – вільні енергії Гельмгольця реальної та ідеальної суміші, A^{E} – добавка до енергії Гельмгольця від змішування. Величини A^{id} та A^{E} для бінарної суміші можуть бути розраховані за виразами:

$$A^{id} = \sum_{k=1}^{2} x_k \left[A_k^0(\omega,\tau) + A_k^r(\omega,\tau) + RT\ln x_k \right], \tag{2}$$

$$\frac{A^E}{RT} = \alpha^E(\omega,\varsigma,x) = x_1 x_2 \left[\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=0}^{r} a_{ij}\omega^i\tau^{-j} + \exp(-\omega^2)\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{s} b_{ij}\omega^i\tau^{-j} \right] \tag{3}$$

де у виразі (2) $A_к^{\,0}$ и $A_к^{\,r}$ – ідеально-газова і реально-газова частини вільної енергії Гельмгольця компоненту k, x_k – мольні долі компонентів суміші. У виразі (3) a_{ij} і b_{ij} – коефіцієнти функції взаємодії, які визначаються на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші, $\omega = V_c/V$ і $\tau = T/T_c$ – приведені густина та температура суміші. Величини V_c і T_c – це псевдокритичні значення питомого об'єму і температури суміші, розраховані на базі так званої лінійної моделі за допомогою виразів:

$$V_c = x_1 V_{c1} + x_2 V_{c2}, \tag{4}$$

$$T_c = x_1 T_{c1} + x_2 T_{c2}, \tag{5}$$

де V_{c1}, V_{c2} і T_{c1}, T_{c2} – критичні значення питомого об'єму і температури компонентів.

Експериментальні дані про густину насиченої пари для досліджуваної суміші відсутні, тому відповідні значення були розраховані за допомогою складеного

вихідного рівняння з використанням дослідних значень тиску насиченої пари. У наявності є 44 значення тиску [8] при температурах від 283,15 до 323,15 К та, відповідно, 40 значень p [10] для температур 253,15 – 293,15 К. Але через обмежену область дії вихідного рівняння отримати вдалося лише 17 значень густини насиченої пари для значень тиску [8] при температурах 283,15 та 293,15 К та, відповідно, 32 значення густини за даними по тиску [10] для інтервалу температур від 253,15 до 283,15 К.

Експериментальні дані про густину насиченої рідини суміші також відсутні, тому були зіставлені відповідні дані для компонентів у приведених координатах $\varphi' = v'/v_{кр}$ і $\tau = T/T_{кр}$ та встановлено, що значення φ' при однакових τ для R1243zf та R600a в інтервалі приведених температур, охопленому експериментом по суміші, відрізняються не більше, ніж на 3,2 % (при найбільш низьких температурах). Тому 40 значень φ' суміші були розраховані як адитивні величини за даними для компонентів з урахуванням складу суміші.

У якості ваг експериментальних значень коефіцієнту стиснення суміші $Z = p/\rho RT$, який залежить не тільки від параметрів стану p,ρ,T, а також від мольної концентрації компонентів x и $1 - x$, у роботі прийнята величина $1/\sigma_z^2$, где σ_z^2 – дисперсія величини Z. Через те, що в експериментах температура і тиск вимірюються досить точно (очікувана погрішність складає 0,01 – 0,03 К для термометрів опору типу Hart Scientific 5680-7-1036 та 1 кПа для перетворювачів тиску типу Ruska 7000), величини відносних погрішностей δp і δT при розрахунку ваг можна прийняти рівними нулю. У цьому випадку дисперсія коефіцієнту стиснення може бути розрахована за формулою:

$$\sigma_Z^2 = \left(\frac{Z_{експ.}}{\rho} + \frac{\partial Z_{розр.}}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\rho \cdot \delta\rho}{2} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z_{розр.}}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{x \cdot \delta x}{2} \right)^2, \qquad (6)$$

де $\delta\rho$ і δx – максимальні значення відносних погрішностей за густиною та складом.

Значення похідних $\partial Z_{розр.}/\partial\rho$ і $\partial Z_{розр.}/\partial x$ у виразі (6) розраховувалися за наближеним рівнянням стану, отриманому лінійною комбінацією реально-газових частин вільної енергії Гельмгольця компонентів суміші.

Значення середнього квадратичного відхилення експериментальних даних про густину [9] і розрахованих за вихідним рівнянням стану суміші (складеним на базі даних [9]) склало 0,07 % для 50 експериментальних точок. Автори [9] також виконали апроксимацію свої даних за допомогою рівняння Пенга та Робінсона та досягли значення середнього квадратичного відхилення по питомому об'єму для 66 точок 0,099 %.

Дані про густину насиченої пари, які отримані розрахунковим шляхом для експериментальних значень тиску [8,10] також непогано описуються рівнянням, складеним лише на їх базі (середнє квадратичне відхилення по густині для 49 точок склало 0,17 %). Але спроби скласти рівняння стану на базі повного масиву даних [8, 9, 10] приводили до різкого погіршення точності опису через взаємний вплив.

Дослідним шляхом було отримане рівняння стану на базі 30 опорних значень густини насиченої пари (з 49 наявних) та 50 дослідних значень густини перегрітої пари [9]. Відповідні значення середніх квадратичних відхилень по густині для

 ISSN 2616-7360

30 точок насиченої, 50 точок перегрітої пари та для повного масиву з 80 точок склали: 0,09 та 0,355 та 0,23 %.

Опорні значення густини насиченої рідини також мають високу точність опису рівнянням, складеним на базі цих значень (середнє квадратичне відхилення склало 0,011 % для 40 точок), але підібрати прийнятний варіант рівняння, яке б одночасно ураховувало дані про густину насичених пари та рідини, на жаль, не вдалося через різке зменшення точності опису всіх груп даних. З тієї ж причини не є можливим урахувати умову фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини, яке необхідне для можливості разрахунку колоричних властивостей.

Значення коефіцієнтів a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (3) рівняння стану суміші R1243zf/R600a, яке ураховує 80 точок [8,9,10] були визначені на базі покрокового регресійного аналізу з використанням алгоритму, запропонованому у роботі [14]. Значення коефіцієнтів рівняння представлені у таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти a_{ij} і b_{ij} функції взаємодії (3) суміші R1243zf/R600a

i	*j*	a_{ij}	*i*	*j*	a_{ij}
1	0	$-8{,}26917430\cdot10^{2}$	6	6	$-3{,}58873231\cdot10^{11}$
1	1	$-7{,}77028012\cdot10^{2}$	7	6	$8{,}37865500\cdot10^{12}$
1	4	$-7{,}64854482\cdot10^{6}$	8	1	$-2{,}25027338\cdot10^{12}$
2	0	$1{,}23353267\cdot10^{5}$	8	6	$-8{,}00163600\cdot10^{13}$
2	2	$6{,}63316258\cdot10^{4}$	9	5	$5{,}83282335\cdot10^{14}$
2	6	$-5{,}67979523\cdot10^{4}$	10	0	$1{,}86711081\cdot10^{15}$
3	6	$3{,}32224755\cdot10^{4}$			b_{ij}
4	0	$-4{,}62477007\cdot10^{6}$	1	4	$7{,}64785460\cdot10^{6}$
4	3	$2{,}19123450\cdot10^{8}$	2	5	$1{,}54104043\cdot10^{5}$
4	5	$-2{,}53601162\cdot10^{7}$	3	1	$-5{,}64982517\cdot10^{6}$
5	6	$6{,}37206558\cdot10^{9}$	8	4	$-2{,}92090451\cdot10^{13}$

Треба відмітити, що отримані результати для суміші R1243zf/R600a мають здебільшого проміжний характер. Але ця робота буде продовжена з появою нових експериментальних даних для досліджуваної суміші у областях пари та рідини.

Висновки. Виконано аналіз та поповнення даних про термодинамічні властивості перспективної суміші озонобезпечного гідрофторолефіну (ГФО) 3,3,3-трифторпропену (R1243zf) із практично нульовим потенціалом глобального потепління (ПГП) та відомого ефективного природного холодоагенту ізобутану (R600a). Суміш на даний момент є досліджуваною, тому кільність наявних експериментальних даних по ній є невеликою.

У роботі була виконана спроба складання єдиного рівняння стану для пари та рідини на базі масиву експериментальних і додатково отриманих опорних даних, однак вдалося отримати тільки рівняння стану для перегрітої та насиченої пари. Частину даних, серед яких опорні значення густини насиченої рідини та значення густини пари при високих тисках, підключити до процесу складання рівняння стану не вдалося через значне погіршення точності опису вихідного масиву даних.

Таким чином, отримане рівняння стану має проміжний характер, оскільки через відсутність урахування умови фазової рівноваги тиску та густини у стані насичення для однакових значень складу пари та рідини не можливо коректно розрахувати калоричні властивості суміші.

Однак, планується продовжити дану роботу із складання єдиного рівняння стану суміші R1243zf/R600a при появі нових експериментальних даних, які поширять область дії рівняння. Це є цілком очікуваним, оскільки суміш має великі перспективи для подальшого використання.

ЛІТЕРАТУРА

1. UNEP. Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer. Final Act: date – 11 September 1987. 6 p.
2. Breidenich C, Magraw D, Rowley A, Rubin JW, 1998. The Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. *American Journal of International Law*, V. 92 (2). P. 315–331. http://dx.doi.org/doi:10.2307/2998044.
3. United Nations Environmental Programme, 2016. United nations environment programme. The Kigali Amendment to the Montreal Protocol: HFC Phase-down. URL: https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/26589
4. European Commission, 2014. European Commission. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance. URL https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj
5. Fedele L., Castelli S.T, Ielpo P., Zilio C., Bobbo S., 2023. The environmental impact of HFOs from TEWI to PFAS. A review. http://dx.doi.org/10.18462/iir.icr.2023.0442
6. ASHRAE, 2019. Standard 34-2019 designation and safety classification of refrigerants. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.: Atlanta, GA, USA.
7. Mark O. McLinden, Andrei F. Kazakov, J. Steven Brown, Piotr A. Domanski, 2014. A thermodynamic analysis of refrigerants: Possibilities and tradeoffs for Low-GWP refrigerants, *International Journal of Refrigeration*, V. 38. P. 80–92. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.032.
8. Davide Menegazzo, Giulia Lombardo, Laura Fedele, Sergio Bobbo, Min Soo Kim, Yeonwoo Jeong, Sangwook Lee, 2024. Isothermal (vapor + liquid) equilibrium measurements and correlation of the binary mixture 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf) + isobutane (R600a) at temperatures from 283.15 to 323.15 K, *International Journal of Refrigeration*, V. 161. P. 62–70. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.032.
9. Sebastiano Tomassetti, Mariano Pierantozzi, Giovanni Di Nicola, Fabio Polonara, and J. Steven Brown, 2019. Vapor-Phase PvTx Measurements of Binary Blends of cis-1,2,3,3,3-Pentafluoroprop-1-ene + Isobutane and 3,3,3-Trifluoropropene + Isobutane, *Journal of Chemical & Engineering Data*, V. 64 (2). P. 688–695. https://doi.org/10.1021/acs.jced.8b00921

 ISSN 2616-7360

10. Zhanfeng Deng, Guizhi Xu, Sainan Sun, Yanxing Zhao, Xueqiang Dong, Maoqiong Gong, 2020. Isothermal (vapour-liquid) equilibrium for the binary {isobutane (R600a) + 3,3,3-trifluoropropene (R1243zf)}cc system at temperatures from 253.150 to 293.150 K, *Journal of Chemical Thermodynamics*, V. 150. https://doi.org/10.1016/j.jct.2020.106177
11. Xiaoyu Yao, Li Ding, Xueqiang Dong, Yanxing Zhao, Xian Wang, Jun Shen, Maoqiong Gong, 2020. Experimental measurement of vapor-liquid equilibrium for 3,3,3-trifluoropropene(R1243zf) + 1,1,1,2-tetrafluoroethane(R134a) at temperatures from 243.150 to 293.150 K, *International Journal of Refrigeration*, V. 120. P. 97–103. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.09.008
12. Akasaka, R., Lemmon, E.W., 2025. A Helmholtz Energy Equation of State for 3,3,3-Trifluoroprop-1-ene (R-1243zf). *Int J Thermophys*, V. 46 (23). https://doi.org/10.1007/s10765-024-03481-6
13. D. Bücker; W. Wagner, 2006. Reference Equations of State for the Thermodynamic Properties of Fluid Phase n-Butane and Isobutane. *J. Phys. Chem. Ref. Data*, V. 35. P. 929–1019. https://doi.org/10.1063/1.1901687
14. K. M. de Reuck and B. Armstrong, 1979. A method of correlation using a search procedure, based on a step-wise least-squares technique, and its application to an equation of state for propylene. *Cryogenigs,* V. 19 (9). P. 505–512. https://doi.org/10.1016/0011-2275 (79)90002-X.

Дата першого надходження статті до видання: 26.01.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 04.03.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 30.04.2026