

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ХАРЧОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**БОЙЧУК АРТЕМ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 62 – 714:532.13:536.23.001

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**В'ЯЗКІСТЬ ТА ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ СУМШЕЙ ХОЛОДОАГЕНТІВ  
R32/R125, R32/R134a, R125/R134a**

05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

**Технічні науки**

**Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.**

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 А. С. Бойчук

Науковий керівник  
Вассерман Олександр Анатолійович  
доктор технічних наук, професор

Примірник дисертації ідентичний  
за змістом з іншими примірниками

Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 41.088.03  
д.т.н., професор



 В. І. Мілованов

Одеса – 2017

## АНОТАЦІЯ

**Бойчук А. С. В'язкість та теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.06 «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика». – Одеська національна академія харчових технологій МОН України, Одеса, 2017.

Дисертація присвячена комплексному розрахунковому вивченню в'язкості та теплопровідності сумішей озонобезпечних холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a, складенню рівнянь та таблиць цих властивостей. Вперше на підставі дослідних даних про в'язкість і теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів складені рівняння, які описують ці дані з точністю, що відповідає точності експерименту. Форму складених рівнянь та методику їх отримання можливо використовувати в подальшому при розрахунках транспортних властивостей для інших холодоагентів та їх сумішей. Отримані у дисертації рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності трьох сумішей озонобезпечних холодоагентів і складені таблиці дозволяють одержувати надійні довідкові дані про транспортні властивості вказаних сумішей. Такі дані необхідні для проектування холодильного обладнання. Проведено огляд методів вимірювання та розрахунку в'язкості і теплопровідності. Проаналізована точність отриманих дослідних даних різними методами. Обрано оптимальний метод розрахунку транспортних властивостей на підставі наявних експериментальних даних. Зроблено огляд існуючих експериментальних даних про в'язкість і теплопровідність холодоагентів R32, R125 і R134a, оцінені неточності цих властивостей знаходиться в межах 0,5 – 4 %. Складені рівняння для розрахунку в'язкості і теплопровідності трьох холодоагентів у широкій області параметрів, які

представлені через незалежні змінні температуру та густину. Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагентів описують експериментальні дані в інтервалах: 232 – 423 К при тиску до 9,8 МПа для R32, 230 – 423 К до 10,1 МПа для R125 і 248 – 439 К до 6,0 МПа для R134a. Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагентів описують експериментальні дані в інтервалах, що ширше необхідних для холодильних установок: 223 – 466 К при тиску до 50 МПа для R32, 228 – 513 К до 53 МПа для R125 і 248 – 533 К до 60,9 МПа для R134a. Рівняння задовольняють граничним умовам, так як їх складовою частиною являються в'язкість або теплопровідність при нормальному атмосферному тиску. У комплексі з такими рівняннями використані надійні рівняння стану для розрахунку густини. Для оперативного розрахунку в'язкості та теплопровідності для холодоагентів R32, R125 і R134a складені рівняння, які дозволяють розраховувати ці властивості газу безпосередньо в залежності від температури та тиску. Вони дозволяють розраховувати в'язкість газу безпосередньо в залежності від температури та тиску в інтервалі температури від 298 до 423 К при тиску до 5,5 МПа для R32, до 3,7 МПа для R125 і до 3,9 МПа для R134a. Та розраховувати теплопровідність газу безпосередньо в залежності від температури та тиску в інтервалах від 283 до 434 К при тиску до 5,0 МПа для R32, від 264 до 354 К при тиску до 2,8 МПа для R125 і від 293 до 515 К при тиску до 2,8 МПа для R134a. Приведено огляд експериментальних даних про в'язкість і теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a. На їх підставі складені рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності досліджуваних сумішей з використанням відповідних рівнянь для їх компонентів. Рівняння для розрахунку в'язкості сумішей холодоагентів описують експериментальні дані при докритичних значеннях густини в інтервалах параметрів: 222 – 423 К при тиску до 7,7 МПа для R32/R125, 298 – 423 К до 7,6 МПа для R32/R134a і 298 – 423 К до 6,0 МПа для R125/R134a. Рівняння для розрахунку теплопровідності сумішей холодоагентів описують експериментальні дані в інтервалах: 213 – 405 К при тиску до 30 МПа для

R32/R125, 193 – 323 К до 30 МПа при густині більше 900 кг/м<sup>3</sup> для R32/R134a і 232 – 323 К до 20 МПа при густині більше 1100 кг/м<sup>3</sup> для R125/R134a. Складені таблиці транспортних властивостей сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів.

**Ключові слова:** Холодоагент, R32, R125, R134a, транспортні властивості, бінарна суміш, R32/R125, R32/R134a, R125/R134a, в'язкість, теплопровідність, рівняння.

### Публікації за темою дисертації

1. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагентов R32, R125 и R134a / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – № 6 (146). – С. 24–28.
2. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости хладагентов R32 и R125 / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 4 (150). – С. 18–21.
3. Бойчук А. С. Уравнения для расчета теплопроводности хладагентов R32 и R125 / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 6 (152). – С. 10–13.
4. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагента R134a / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – № 2 (51). – С. 42–47.
5. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R32/R125 / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // Технические газы. – 2016. – Том 16. – No. 3. – С. 47–51.  
*Особистий внесок: збір, обробка та аналіз експериментальних даних, розробка програми для розрахунків, виконання розрахунків.*
6. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R32/R134a / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // Технические газы. – 2016. – Том 16. – No. 5. – С. 46–50.

*Особистий внесок: збір, обробка та аналіз експериментальних даних, розробка програми для розрахунків, виконання розрахунків.*

7. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R125/R134a / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2016. – № 52 (4). – С. 11–15.

*Особистий внесок: збір, обробка та аналіз експериментальних даних, розробка програми для розрахунків, виконання розрахунків, участь в оформленні публікації.*

### **Публікації апробаційного характеру**

1. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости альтернативных хладагентов R32, R125 и R134a через переменные температуру и давление / А. С. Бойчук // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – № 4. – Том 16. – С. 17–20.
2. Бойчук А. С. Уравнения для расчета теплопроводности альтернативных хладагентов R32, R125 и R134a через переменные температуру и давление / А. С. Бойчук // Сборник научных трудов SWorld. – 2014. – № 1. – Том 10. – С. 3–7.
3. Вассерман А. А. Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагентов R32, R125 и R134a / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // XIV Российская конференция (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ. Материалы конференции. – 2014. – Том 2. – С. 344–346.

*Особистий внесок: збір, обробка та аналіз експериментальних даних, розробка програми для розрахунків, вибір форми рівнянь.*

4. Бойчук А. С. О вязкости смеси хладагентов / А. С. Бойчук // Научные труды SWorld. – 2015. – № 4 (41). – Том 5. – С. 58–61.
5. Бойчук А. С. Расчёт вязкости и теплопроводности смеси хладагентов R32/R125 / А. С. Бойчук // Научные труды SWorld. – 2016. – № 3 (44). – Том 1. – С. 63–67.

## ABSTRACT

**Boychuk A. S. Viscosity and thermal conductivity of refrigerant mixtures R32/R125, R32/R134a, R125/R134a.** – Qualification research work as a manuscript.

Thesis for a Candidate of Technical Sciences degree on specialty 05.14.06 - Technical Thermophysics and Industrial Thermal Engineering. – Odessa National Academy of Food Technology, MES of Ukraine, Odessa, 2017

The thesis is devoted to the complex calculation study on the viscosity and thermal conductivity of ozone-friendly refrigerants mixtures R32/R125, R32/R134a and R125/R134a, the formulation of equations and tables of these properties. For the first time on the basis of experimental data for the viscosity and thermal conductivity of refrigerant mixtures R32/R125, R32/R134a and R125/R134a and their components compiled equations that describe the data with an accuracy corresponding to the accuracy of the experiment. The form of compiled equations and methods of their obtaining can be used later for the transport properties calculations of other refrigerants and their mixtures. Obtained in dissertation equations to calculate viscosity and thermal conductivity for three ozone-friendly refrigerants mixtures and compiled tables allow obtaining of reliable reference data on the transport properties of these mixtures. These data required for the design of refrigeration equipment. The methods of measurement and calculation of viscosity and thermal conductivity are reviewed. The accuracy of the obtained experimental data by different methods is analyzed. The optimal calculation method of transport properties is chosen on the basis of available experimental data. The review of the existing experimental data on the viscosity and thermal conductivity of R32, R125 and R134a refrigerants is made, the estimated inaccuracies of these properties are in the range of 0,5 – 4 %. Equations for calculating the viscosity and thermal conductivity of three refrigerants are compiled in a wide range of parameters, which are presented through independent variables temperature and density. Equations for calculating the viscosity of

refrigerants describe the experimental data in the ranges: 232 – 423 K at pressures up to 9,8 MPa for R32, 230 – 423 K to 10,1 MPa for R125 and 248 – 439 K to 6,0 MPa for R134a. Equations for calculating the thermal conductivity of refrigerants describe the experimental data in intervals that wider than necessary for refrigeration units: 223 – 466 K at pressures up to 50 MPa for R32, 228 – 513 K and 53 MPa for R125 and 248 – 533 K up to 60,9 MPa for R134a. The equations satisfy the limiting conditions, since their constituent parts are viscosity and thermal conductivity at atmospheric pressure. In combination with such equations, reliable equations of state for density calculation are used. For operative calculation of viscosity and thermal conductivity for refrigerants R32, R125 and R134a are compiled equations that allow these properties in the gas state to be calculated directly as a function of temperature and pressure. They are allowed to calculate gas viscosity directly depending on the temperature and pressure in the temperature range from 298 to 423 K at pressures up to 5,5 MPa for R32, up to 3,7 MPa for R125 and R134a to 3,9 MPa. And to calculate gas thermal conductivity directly depending on the temperature and pressure in the range of 283 to 434 K at pressures up to 5,0 MPa for R32, from 264 to 354 K at a pressure of 2,8 MPa to R125 and from 293 to 515 K at pressures up 2,8 MPa for R134a. The experimental data on the viscosity and thermal conductivity of the mixtures R32/R125, R32/R134a and R125/R134a are reviewed. On their basis, the equations for calculating the viscosity and thermal conductivity of the mixtures studied are compiled using the corresponding equations for their components. Equation for calculating the viscosity of the refrigerants mixtures describe the experimental data at subcritical density in the ranges: 222 – 423 K at pressures up to 7,7 MPa for R32/R125, 298 – 423 K and 7,6 MPa for R32/R134a and 298 – 423 K and 6,0 MPa for R125/R134a. Equation for calculating the thermal conductivity of the refrigerants mixtures describe the experimental data in the range 213 – 405 K at pressures up to 30 MPa for R32/R125, 193 – 323 K and 30 MPa at a density of more than 900 kg/m<sup>3</sup> for R32/R134a and 232 – 323 K to 20 MPa at a density of more than 1100 kg/m<sup>3</sup> for R125/R134a. The transport

properties tables for refrigerants mixtures R32/R125, R32/R134a and R125/R134a and their components have been compiled.

**Keywords:** Refrigerant, R32, R125, R134a, transport properties, binary mixture, R32/R125, R32/R134a, R125/R134a, viscosity, thermal conductivity, equations.

### Publications on the topic of the thesis

1. Boychuk A. S. (2013). Equations for Refrigerants R32, R125 and R134a Viscosity and Thermal Conductivity Calculation // *Holodylna Tekhnika ta Tekhnologiya*. [Refrigeration Engineering and Technology]. – № 6 (146). – P. 24–28. (Rus.).
2. Boychuk A. S. (2014). Equations for Refrigerants R32 and R125 Viscosity Calculation // *Holodylna Tekhnika ta Tekhnologiya*. [Refrigeration Engineering and Technology]. – № 4 (150). – P. 18–21. (Rus.).
3. Boychuk A. S. (2014). Equations for Refrigerants R32 and R125 Thermal Conductivity Calculation // *Holodylna Tekhnika ta Tekhnologiya*. [Refrigeration Engineering and Technology]. – № 6 (152). – C. 10–13. (Rus.).
4. Boychuk A.S. (2015). Equations for Refrigerant R134a Viscosity and Thermal Conductivity Calculation // *Holodylna Tekhnika ta Tekhnologiya*. [Refrigeration Engineering and Technology]. – № 2 (51). – P. 42–47. (Rus.).
5. Vasserman A. A., Boychuk A. S. (2016). Viscosity and Thermal Conductivity of Refrigerants Mixture R32/R125 // *Tekhnicheskie Gazy*. [Industrial Gases]. – Vol. 16. – No. 3. – P. 47–51. (Rus.).  
*Personal contribution: collection, processing and analysis of experimental data, development of program for calculations, calculations.*
6. Vasserman A. A., Boychuk A. S. (2016). Viscosity and Thermal Conductivity of Refrigerants Mixture R32/R134a // *Tekhnicheskie Gazy*. [Industrial Gases]. – Vol. 16. – No. 5. – P. 46–50. (Rus.).

*Personal contribution: collection, processing and analysis of experimental data, development of program for calculations, calculations.*

7. Vasserman A. A., Boychuk A. S. (2016). Viscosity and Thermal Conductivity of Refrigerants Mixture R125/R134a // *Holodylna Tekhnika ta Tekhnologiya*. [Refrigeration Engineering and Technology]. – № 52 (4). – С. 11–15. (Rus.).

*Personal contribution: collection, processing and analysis of experimental data, development of program for calculations, calculations, participation in the publication design.*

### **Publications of approbation nature**

1. Boychuk A. S. (2013). Equations for Viscosity of Alternative Refrigerants R32, R125 and R134a in Form from Variables Temperature and Pressure // *Sbornik Nauchnih Trudov SWorld*. [Collection of Scientific papers SWorld]. – № 4 – Vol. 16. – P. 17–20. (Rus.).
2. Boychuk A. S. (2014). Equations for Calculation of Alternative Refrigerants R32, R125 and R134a Thermal Conductivity in Form from Variables Temperature and Pressure // *Sbornik Nauchnih Trudov SWorld*. [Collection of Scientific papers SWorld]. – № 1 – Vol. 10. – P. 3–7. (Rus.).
3. Vasserman A. A., Boychuk A. S. (2014). Equations for Calculation of Viscosity and Thermal Conductivity of Refrigerants R32, R125 and R134a // XIV Russian Conference (with international participation) on Thermophysical Properties of Substances. Conference materials. – Vol. 2. – P. 344–346. (Rus.).  
*Personal contribution: collection, processing and analysis of experimental data, development of program for calculations, choice of equations form*
4. Boychuk A. S. (2015). About the Refrigerants Mixture Viscosity // *Nauchnie Trudi SWorld*. [Scientific papers SWorld]. – № 4 (41) – Vol. 5. – P. 58–61. (Rus.).
5. Boychuk A. S. (2015). Refrigerants Mixture R32/R125 Viscosity and Thermal Conductivity Calculation // *Nauchnie Trudi SWorld*. [Scientific papers SWorld]. – № 3 (44) – Vol. 1. – P. 63–67. (Rus.).

## ЗМІСТ

	стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	12
ВСТУП.....	13
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ.....	18
1.1 Методи вимірювання в'язкості.....	18
1.2 Методи розрахунку в'язкості.....	24
1.3 Методи вимірювання теплопровідності.....	34
1.4 Методи розрахунку теплопровідності.....	39
1.5 Висновки.....	47
2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ПРО В'ЯЗКІСТЬ І ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ КОМПОНЕНТІВ СУМІШЕЙ R32/R125, R32/R134a І R125/R134a.....	48
2.1 Огляд експериментальних даних про в'язкість холодоагентів R32, R125 і R134a.....	48
2.2 Огляд експериментальних даних про теплопровідність холодоагентів R32, R125 і R134a.....	57
2.3 Висновки.....	67
3 РІВНЯННЯ ДЛЯ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОНЕНТІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ СУМІШЕЙ.....	68
3.1 Рівняння для розрахунку в'язкості R32, R125 і R134a.....	68
3.2 Рівняння для розрахунку теплопровідності R32, R125 і R134a..	84
3.3 Висновки.....	98
4 РІВНЯННЯ ДЛЯ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ СУМІШЕЙ R32/R125, R32/R134a І R125/R134a.....	100
4.1 Огляд експериментальних даних про в'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.....	100
4.2 Огляд експериментальних даних про теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.....	104

4.3 Рівняння для розрахунку в'язкості сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.....	107
4.4 Рівняння для розрахунку теплопровідності сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.....	117
4.5 Висновки.....	125
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	129
ДОДАТКИ.....	145
Додаток А. В'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів.....	146
Додаток Б. Теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів.....	171
Додаток В. Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи..	194

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ**

$p$	тиск, МПа;
$\eta$	динамічна в'язкість, Па·с;
$\lambda$	теплопровідність, Вт/(м·К);
$\rho$	густина, кг/м <sup>3</sup> ;
$v$	питомий об'єм, м <sup>3</sup> /моль;
$t$	температура, °С;
$\tau$	зведена температура ( $\tau = T/T_{кр}$ );
$T$	абсолютна температура, К;
$C_v$	ізохорна теплоємність, Дж/(моль·К);
$C_p$	ізобарна теплоємність, Дж/(моль·К);
$R$	універсальна газова стала, Дж/(моль·К);
$M, m$	молекулярна маса, кг/кмоль;
$x_i$	мольна доля $i$ -го компоненту суміші;
$\delta$	відносне відхилення;
$a, b, c$	коефіцієнти рівнянь;
$i, j$	індекси коефіцієнтів;
$mix$	властивості суміші.

## ВСТУП

За останні двадцять років суттєво розширилося коло робочих речовин холодильних установок. У значній мірі це обумовлено прийняттям міжнародних угод, які передбачають заміну альтернативними холодоагентами традиційних, що руйнують озоновий шар Землі. Гідрофторвуглеці, природні речовини, а також їх бінарні і потрійні суміші є альтернативними холодоагентами для заміни заборонених хлорфторвуглеців і гідрохлорфторвуглеців. У відповідності з Монреальським Протоколом [1] та більш жорсткою його редакцією, прийнятою в 1992 році у Копенгагені, припинено виробництво холодоагентів R11, R12, R502 на початку 1996 р. Використання R22 та інших холодоагентів з низькою озоноруйнуючою здібністю буде скорочено на 99,5 % до 2020 р., а до 2030 р. – на 100 %.

Вибір альтернативних робочих речовин для холодильних установок – складна задача. При оцінюванні перспективності холодоагенту треба приймати до уваги еколого-енергетичну ефективність холодильного обладнання. Природні холодоагенти (зокрема, аміак, пропан та ізобутан) успішно використовуються у холодильній техніці, мають нульовий потенціал руйнування озонового шару та незначний потенціал глобального потепління. На жаль, недоліками більшості з них є вибухонебезпечність і горючість. Вуглеводні, які містять фтор у своєму складі, не мають вказаних недоліків, але мають високий потенціал глобального потепління. Тому на ці речовини було накладено обмеження у їх використанні після підписання у 1997 році багатьма країнами світу у Кіото протоколу [2], який встановлює межі викидів парникових газів до атмосфери. Суміші альтернативних холодоагентів мають більш низький потенціал глобального потепління, ніж чисті гідрофторвуглеці.

Для ефективного використання альтернативних холодоагентів та їх сумішей необхідно мати надійні дані про їх термодинамічні та транспортні властивості. Раціональним способом швидкого отримання таких даних при різних значеннях температури та тиску є їх розрахунок за допомогою рівнянь, які достатньо точно відображають експериментальні дані про ці властивості.

Дослідження транспортних властивостей сумішей озонобезпечних холодоагентів почалося у останні роки. Серед цих сумішей на даний момент найбільш вивчені три: R32/R125, R32/R134a, R125/R134a. Вони об'єднують у собі позитивні властивості кожного з компонентів і тому є перспективними робочими речовинами холодильних установок.

На даний час рівняння для розрахунку транспортних властивостей вказаних сумішей і відповідні таблиці не складені. Отримання таких рівнянь, а також розрахунків на їх основі таблиць в'язкості і теплопровідності в області параметрів, яка характерна для роботи холодильних установок, є **актуальними**.

У дослідження транспортних властивостей сумішей холодоагентів та їх компонентів внесли великий вклад: Багінський А. В., Геллер В. З., Кисельов С. Б., Клетський А. В., Лавренченко Г. К., Цветков О. Б., Ассаель М. (Assael, M.), Авеліно Х. (Avelino, H.), Вейкхем В. (Wakeham, W.), Гао К. (Gao, X.), Даймонд Д. (Dymond, J.), Джонг С. (Jeong, S.), Діллер Д. (Diller, D.), Лассек А. (Laesecke, A.), Ле Неїндре Б. (Le Neindre, B.), Міллат Д. (Millat, J.), Набізаде Х. (Nabizadeh, H.), Олівейра Ч. (Oliveira, C.), Ріпл Д. (Ripple, D.), Ро С. (Ro, S.), Такахаші М. (Takahashi, M.), Танака Я. (Tanaka, Y.), Йокояма Ч. (Yokooyama, C.). Накопичені експериментальні дані про транспортні властивості дозволяють вирішити актуальну задачу їх аналітичного опису.

Дисертаційна робота виконувалася у **відповідності до**: Постанов Кабінету Міністрів України № 624 від 16.05.2002 р. «Про посилення державного регулювання ввозу і вивозу з України озоноруйнівних речовин» і № 256 від 04.03.2004 р. «Про затвердження Програми припинення в Україні виробництва та використання озоноруйнівних речовин на 2004 – 2030 роки», а також плану науково-дослідних робіт кафедри «СЕУ та ТЕ» Одеського національного морського університету на 2015 – 2017 рр. за розділом: «В'язкість і теплопровідність суміші альтернативних холодоагентів R32/R125».

**Метою** дисертаційного дослідження є складання на підставі експериментальних даних рівнянь для розрахунку в'язкості і теплопровідності сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та складення на їх основі відповідних таблиць.

**Об'єктом** дослідження є суміші озонобезпечних холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a.

**Предметом** дослідження є в'язкість і теплопровідність вказаних сумішей та методи розрахунку цих властивостей.

**Методом** дослідження є складання рівнянь, що описують дослідні дані про транспортні властивості R32, R125 і R134a та їх бінарних сумішей з точністю, яка відповідає точності експерименту.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані та вирішені наступні **основні задачі**:

- зроблено аналіз стану експериментальних досліджень транспортних властивостей сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів;
- проаналізовані методи розрахунку в'язкості і теплопровідності чистих речовин та їх сумішей та вибрані з цих методів оптимальні;
- на базі наявних експериментальних даних складені рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a та їх бінарних сумішей;
- розраховані таблиці в'язкості і теплопровідності трьох сумішей в області параметрів, що представляє інтерес для холодильної техніки.

**Наукова новизна** одержаних результатів виражена у наступному:

- вперше на підставі дослідних даних про в'язкість і теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів складені рівняння, які описують ці дані з точністю, що відповідає точності експерименту;
- форму складених рівнянь та методику їх отримання можливо використовувати в подальшому при розрахунках транспортних властивостей для інших холодоагентів та їх сумішей.

**Обґрунтованість і достовірність** результатів проведених у роботі досліджень підтверджується використанням надійних методів розрахунку в'язкості та теплопровідності сумішей та їх компонентів і сучасних методів статистичної обробки значень транспортних властивостей, а також ретельним зіставленням розрахованих за складеними рівняннями даних з експериментальними.

**Наукове значення** мають наступні результати дослідження:

- рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a;
- рівняння для розрахунку транспортних властивостей бінарних сумішей вказаних холодоагентів.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає в тому, що отримані у дисертації рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності трьох сумішей ознобезпечних холодоагентів і складені таблиці дозволяють одержувати надійні довідкові дані про транспортні властивості вказаних сумішей. Такі дані необхідні для проектування холодильного обладнання.

Рівняння в'язкості та теплопровідності трьох досліджуваних сумішей і таблиці цих властивостей впроваджені в Східноєвропейській асоціації виробників технічних газів «СІГМА» та Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова для використання у наукових дослідженнях. Документи, що підтверджують впровадження результатів дослідження, наведені у додатку В до дисертації.

При виконанні дисертаційного дослідження використані ідеї та рекомендації наукового керівника з проблеми складання рівнянь для транспортних властивостей сумішей холодоагентів та їх компонентів.

**Особисто здобувачем виконані:**

- збір та аналіз експериментальних даних для сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів;
- розробка комп'ютерної програми і складання на її основі рівнянь для розрахунку в'язкості та теплопровідності сумішей та їх компонентів;

- зіставлення розрахованих значень транспортних властивостей з дослідними даними;
- складення за допомогою отриманих рівнянь таблиць значень в'язкості та теплопровідності трьох сумішей.

**Основні результати доповідалися та обговорювалися** на: міжнародній науковій конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2013» (17–26 грудня 2013 р.); міжнародній науковій конференції «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2014» (18–30 березня 2014 р.); XIV Российской конференции (с международным участием) по теплофизическим свойствам веществ (РКТС-14) (м. Казань, 15–17 жовтня 2014 р.); міжнародній науковій конференції «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте '2015» (15–27 грудня 2015 р.); міжнародній науковій конференції «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития '2016» (11–18 жовтня 2016 р.).

**Публікації.** Основний зміст дисертації представлено у 7 публікаціях в наукових журналах, які відповідають вимогам ВАК України, а також у 5 доповідях у збірниках праць міжнародних конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків, у яких наведені таблиці транспортних властивостей сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів і акти про впровадження результатів роботи. Обсяг роботи 144 сторінки, включаючи 18 рисунків, 44 таблиці і 141 найменування джерел. Обсяг додатків – 52 сторінки.

Автор вдячний науковому керівнику і викладачам кафедри “Суднові енергетичні установки і технічна експлуатація” Одеського національного морського університету за увагу до даної роботи при її виконанні.

## **1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ ТА РОЗРАХУНКУ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ**

У промисловості часто зустрічаються системи, в яких робочими речовинами є суміші двох або більшої кількості компонентів. Для проектування та ефективної експлуатації таких систем необхідні точні дані про в'язкість і теплопровідність сумішей різних складів та інтервалів параметрів. Найбільш раціональним способом визначення таких властивостей сумішей являється їх розрахунок за допомогою надійних рівнянь. Такі рівняння можна скласти із залученням експериментальних даних про транспортні властивості суміші. Для отримання експериментальних даних використовують різні методи вимірювання.

### **1.1 Методи вимірювання в'язкості**

Визначення в'язкості реальних газів та їх сумішей представляє собою актуальну задачу. Надійні дані про в'язкість відіграють важливу роль при розв'язанні деяких прикладних питань та дозволяють глибше вникнути у процеси молекулярного переносу у газах.

Огляд експериментальних даних показує, що для вимірювання в'язкості використовуються шість найбільш відомих методів: 1) капіляра; 2) кульки, що котиться; 3) струни, що коливається; 4) диску, що коливається; 5) обертання циліндрів; 6) падаючого вантажу. Ці методи можна розділити на дві групи, в першій з яких рухається середовище, що досліджується (1-й метод), а у другій – переміщується якесь тіло у досліджуваному середовищі (2-й – 6-й методи).

Так як надійність дослідних даних у значній мірі визначається конструкцією експериментальної установки, то необхідно охарактеризувати основні принципи, що закладені у кожному із методів.

**Методом капіляра** називають спосіб визначення в'язкості речовини по характеру протікання її крізь трубки малого діаметру. Цей метод являється абсолютним і має суворе теоретичне обґрунтування, що спирається на використанні рівняння Гагена-Пуазейля:

$$v = \frac{\pi(p_1 - p_2)r_1^4}{8\eta L}, \quad (1.1)$$

де  $r_1$  та  $L$  – відповідно радіус та довжина капіляра;  $p_1$  та  $p_2$  – тиск на кінцях капіляра;  $v$  – об'єм газу, що протікає за 1 секунду крізь капіляр.

Достатньо детально це рівняння виведено у монографії І. Ф. Голубєва [3], де також наводиться описання методу. Слід мати на увазі, що при практичному використанні рівняння враховують ряд поправок: на ковзання газу, на зміну питомого об'єму газу при протіканні, на кінетичну енергію (поправка Гагенбаха). Похибки експериментального визначення в'язкості методом капіляра не перевищують 3 – 5 %.

При врахуванні поправки на ковзання права частина рівняння (1.1) множиться на вираз  $(1+4\xi/r_1)$ , в якому  $\xi$  – коефіцієнт ковзання. Молекулярно-кінетичний аналіз коефіцієнта ковзання показує, що ця величина одного порядку з середньою довжиною вільного пробігу молекули. Тому ковзання стає помітним і відчутним тільки тоді, коли ця величина за порядком значення сумірна з радіусом капіляра. Цей висновок справедливий при дуже низьких тисках, коли довжина вільного пробігу молекули обернено пропорційна тиску. Коефіцієнт ковзання також обернено пропорційний до тиску. Експериментальні результати це підтверджують. Тому іноді член  $4\xi/r_1$  замінюють членом  $a/p$ , де  $a$  – емпірична константа.

При врахуванні поправки на зміну питомого об'єму газу при протіканні, тобто поправки на його стисливість, виходять із того, що швидкість руху стисливої речовини по капіляру є величиною змінною при постійній масовій витраті (закон збереження маси). Ця поправка може бути істотною для газів та рідин поблизу критичної точки.

При врахуванні поправки на кінетичну енергію потоку вираз для обчислення в'язкості приймає наступний вигляд:

$$\eta = \frac{\pi(p_1 - p_2)r_1^4}{8\nu L} - \frac{\rho\nu}{8\pi L}. \quad (1.2)$$

У ньому першим членом є формула Гагена-Пуазейля, а другим – поправка на кінетичну енергію. За рахунок різниці тисків у обох посудинах відбувається не тільки подолання сил внутрішнього тертя часток рідини, що протікає через капіляр, але і на придбання нею кінетичної енергії, коли вона входить у капіляр. Вийшовши з капіляра, рідина втрачає свою швидкість. За законом Бернуллі зменшення швидкості потоку рідини має супроводжуватися підвищенням тиску в приймальній посудині, однак через завихрення і тертя часток одна об одну частина кінетичної енергії рідини переходить в теплову.

Окрім розглянутих вище основних поправок є й інші не менш важливі поправки, які вводяться при обробці експериментальних даних, отриманих з використанням капілярних віскозиметрів. Слід зазначити, що ці поправки обумовлені як змінами фізичних умов проведення експерименту, так і конструктивною недосконалістю капілярів.

До фізичних поправок можна віднести: дію поверхневих сил або змочування рідиною капіляра; зміну маси речовини за рахунок прилипання її до поверхні вимірювального осередку; зміну параметрів експерименту в часі; зміну тиску в процесі експерименту, яка буває необхідною для деяких віскозиметрів.

Конструктивні поправки враховують зміну геометричних параметрів капіляра в поперечній площині, його конусність та викривлення.

**Метод кульки, що котиться,** являється відносним і не має суворого обґрунтування [3]. Однак він зручний при вимірюваннях в області високих тисків, відрізняється простотою конструкції експериментальної установки та нескладною методикою вимірювання. Тому цей метод знайшов застосування, незважаючи на меншу точність даних, що отримуються. В установках

калібрована кулька котиться під дією сили тяжіння всередині нахиленої циліндричної трубки, що заповнена досліджуваною речовиною. Діаметри кульки та трубки відрізняються незначно. У процесі досліду вимірюють час, що необхідний для проходження кулькою визначеної відстані.

При використанні цього методу виходять з емпіричної залежності:

$$\eta = k\tau(\rho_{\text{ш}} - \rho), \quad (1.3)$$

де  $k$  – постійна приладу;  $\tau$  – час, необхідний для скочування кульки;  $\rho_{\text{ш}}$  – густина кульки;  $\rho$  – густина досліджуваного середовища.

Це рівняння може бути використано при ламінарній течії речовини у серпоподібному зазорі між кулькою та трубкою. Однак у багатьох випадках швидкість речовини у цьому зазорі зростає до такої міри, що потік набуває турбулентного характеру. У результаті отримують збільшення значення в'язкості, що не підтверджується за допомогою віскозиметрів абсолютного типу. Неточності методу знаходяться на рівні 5 – 8 %.

**Метод струни, що коливається,** докладно описаний у роботі [4]. Він заснований на вимірюванні коливань натягнутої струни у досліджуваному середовищі. Під час експерименту забезпечують синусоїдальні коливання струни шляхом магнітоелектричного збудження. Для цього подають електричний імпульс, який відводить струну із положення рівноваги розподіленою по довжині поперечною силою, при цьому струна набуває форму половини хвилі синусоїди. Коливання, що виникли після зняття імпульсу, призводять до індукування у струні змінної електрорушійної сили, амплітуда якої пропорційна амплітуді коливань струни. Зв'язок коефіцієнта в'язкості з параметрами коливань струни знаходиться з рівнянь руху і безперервності в'язкого середовища.

Розглянутий метод потребує жорсткого закріплення кінців струни, малий радіус струни у порівнянні з її довжиною і малі амплітуди коливань. Також важливим є використання добре вивчених речовин для калібрування віскозиметра. Неточності визначення в'язкості цим методом менше 2 %.

Вимірювання в'язкості за допомогою **методу диску, що коливається**, засновано на використанні формули, яку запропонував Максвелл:

$$\eta = \frac{\lambda - k}{\tau c}, \quad (1.4)$$

де  $\lambda$  – логарифмічний декрімент затухання коливань;  $k$  – постійна дроту, на якому підвішений диск (характеризує затрати енергії у дроті та місці підвісу; визначається при вакуумованому апараті);  $\tau$  – період коливань диска;  $c$  – постійна приладу (визначається при калібруванні газом з відомою в'язкістю).

У приладах такого типу визначають затухання коливань тонкого диску, що підвішений у досліджуваному газі. Так як амплітуди коливань убувають по закону геометричної прогресії, то для розрахунку в'язкості визначають період коливань та логарифмічний декрімент – логарифм відношення двох послідовних амплітуд.

Більшість дослідників при обчисленні коефіцієнтів в'язкості використовували формулу Максвелла. Однак більш точні формули були запропоновані Д. Маквудом [5], який розглядає два можливих випадки; докладно вони описані у монографії І. Ф. Голубєва та М. Є. Гнездилова [6].

Перевагами даного методу являються простота та можливість проведення досліду при постійному тиску, а також при низьких та високих температурах (так як температуру експерименту повинна мати лише нижня частина приладу). Разом із тим метод являється відносним і його теорія ще не повністю розроблена. До недоліків методу можна віднести залежність пружності дроту від нагріву (що особливо актуально при великих температурах) та громіздкість, якої набуває конструкція апарату із диском при високих тисках. Похибки експериментального визначення в'язкості становлять 0,5 – 1,0 %.

При дослідженні в'язкості **методом обертання циліндрів** внутрішній циліндр підвішений на пружному дроті із дзеркальцем, а зовнішній – обертається з постійною кутовою швидкістю. Досліджувана рідина передає

внутрішньому циліндру постійний крутний момент. Рівний та протилежний момент виникає у дроті. Докладно метод описаний у роботі [3]. В'язкість визначається за наступною формулою:

$$\eta = \frac{f\alpha(R_1^2 - R_2^2)}{4\pi\omega_2 R_1^2 R_2^2}, \quad (1.5)$$

де  $R_1$  і  $R_2$  – відповідно радіуси внутрішнього та зовнішнього циліндрів;  $\omega$  – кутова швидкість зовнішнього циліндру;  $\alpha$  – кут закручування, що визначається за допомогою дзеркальця;  $f$  – величина, обумовлена модулем кручення матеріалу дроту та його розмірами.

Перевагою методу являється те, що до розрахункової формули не входить густина досліджуваної речовини, яка може бути невідома для всього необхідного діапазону параметрів. Метод можливо використовувати як абсолютний. Недоліками являються складність конструкції установки, необхідність ретельного дотримання коаксіальності циліндрів та точності діаметрів. Через ці недоліки, а також ряд складнощів, що виникають при проведенні дослідів в області підвищених тиску і температури, метод використовували відносно рідко. Похибки вимірювань становлять 2 – 3 %.

**Метод падаючого вантажу** аналогічний методу кульки, що котиться, по конструкції установок та розрахунковим виразам для визначення в'язкості, досить докладно він описаний в [6]. Досліджувана речовина також проходить по вузькому кільцевому зазору між падаючим вантажем та циліндричною стінкою вертикальної труби. При дослідженні рідини метод дає більш точні результати, ніж при дослідженні газу. Обумовлено це тим, що у рідині вантаж падає повільніше і механічні втрати через торкання ним стінок трубки менше.

При використанні цього методу виходять з емпіричної залежності:

$$\eta = k\tau(\rho_{\text{вант}} - \rho), \quad (1.6)$$

де  $k = (a - b)^3 / 3bs$  – постійна приладу;  $a$  і  $b$  – радіуси трубки і падаючого вантажу;  $s$  – відстань, яку проходить вантаж;  $\tau$  – час, що необхідний для падіння вантажу;  $\rho_{\text{вант}}$  – густина вантажу;  $\rho$  – густина досліджуваного середовища.

Перевагами методу являються простота конструкції установки та можливість спостереження за падінням вантажу. Метод може бути використаний як абсолютний, але частіше його використовують як відносний, так як важко забезпечити точність виготовлення деталей, розміри яких входять у формулу для визначення в'язкості. Похибки даного методу становлять 2 – 4 %; більші значення мають місце при дослідженні газів.

## 1.2 Методи розрахунку в'язкості

По своїй фізичній суті коефіцієнти переносу складніше термодинамічних властивостей і як експериментально, так і теоретично досліджуються важче. Тому особливого значення набувають методи, що дозволяють на основі обмежених дослідних даних достатньо надійно розрахувати в'язкість у широкому інтервалі температури та тиску, що представляє інтерес для техніки.

Приймаючи відому модель Леннарда-Джонса 6-12 та розв'язуючи рівняння переносу Енскога, Д. Гіршфельдер, Ч. Кертісс та Р. Берд [7] для в'язкості неполярних газів отримали наступне рівняння:

$$[\eta]_k \cdot 10^7 = 266,93 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}(T^*)} f_\eta, \quad (1.7)$$

де  $T^* = kT/\varepsilon$  – приведена температура;  $\sigma$  – діаметр зіткнення в Å;  $\varepsilon/k$  – параметр потенціальної функції міжмолекулярної взаємодії, К;  $\Omega^{(2,2)*}$  – приведений інтеграл зіткнення;  $f_\eta$  – функція від  $T^*$ , величина якої для інтервалу приведеної температури від 1 до 400 складає від 1 до 1,008. Розмірність  $\eta$  – г/(см·с).

Для розрахунку в'язкості за допомогою рівняння (1.7) необхідні значення  $\varepsilon/k$  і  $\sigma$ , які зазвичай визначаються по експериментальним даним про в'язкість. Також необхідні значення  $\Omega^{(2,2)*}$ , що для різних приведених температур  $T^*$  визначаються таким же чином.

Для полярних газів використовують відомий потенціал Штокмаєра. Формула для в'язкості полярних газів має вигляд:

$$\eta = 266,93 \frac{\sqrt{MT}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*} T^* \delta^*}, \quad (1.8)$$

де  $\delta^* = \mu^2/2\varepsilon\sigma^3$ ;  $\mu$  – дипольний момент.

Вищезгадані положення відносяться до чистих газів, але можуть бути використані і для їх сумішей. Однак тоді слід розглядати не тільки взаємодію молекул одного типу, а також взаємодію різноманітних молекул.

П. М. Кессельман і А. С. Літвінов [8] вказують, що рівняння (1.7) з постійними значеннями  $\varepsilon$  і  $\sigma$  справедливе лише для обмежених інтервалів температури. Тому автори запропонували представити міжмолекулярну взаємодію функцією, у якій параметри  $\varepsilon$  і  $\sigma$  потенціалу Леннарда-Джонса залежать від температури. Таке доповнення, хоча і носить емпіричний характер, розширює температурні межі використання методу Гіршфельдера, Кертісса та Берда, однак при цьому ускладнюється обчислення, особливо для сумішей.

За допомогою молекулярно-кінетичної теорії для коефіцієнту в'язкості газу виведене рівняння, описане у монографії І. Ф. Голубєва [3]:

$$\eta = knm\bar{c}l = k\rho\bar{c}l, \quad (1.9)$$

де  $\bar{c} = 1,6\sqrt{RT/M}$  та  $l = 1/(\sqrt{2}\pi d^2 n)$  – відповідно середня швидкість і середня довжина вільного пробігу молекул;  $d$  – діаметр молекули;  $n$  – число молекул в одиниці об'єму.

Підставивши значення  $l$  у (1.9), отримаємо робоче рівняння для в'язкості:

$$\eta = \frac{km\bar{c}}{\sqrt{2\pi}d^2} \cdot \quad (1.10)$$

Кількість руху в газовій суміші переноситься молекулами усіх її компонентів. Загальна кількість руху, яка переноситься від шару до шару, дорівнює сумі кількостей руху, що переносяться кожним компонентом:

$$\eta = kn_1m_1\bar{c}_1l_1 + kn_2m_2\bar{c}_2l_2, \quad (1.11)$$

де  $n_1$  і  $n_2$  – числа молекул компонентів на одиницю об'єму;  $l_1$  і  $l_2$  – середні довжини їх вільного пробігу;  $\bar{c}_1$  і  $\bar{c}_2$  – середні арифметичні швидкості молекул.

Для газової суміші, що складається з двох компонентів,  $l_1$  і  $l_2$  визначаються наступними рівняннями:

- для першого компоненту

$$l_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_1^2n_1 + \pi S^2n_2} \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_2}}; \quad (1.12)$$

- для другого компоненту

$$l_2 = \frac{1}{\sqrt{2\pi}d_2^2n_2 + \pi S^2n_1} \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{M_1}}. \quad (1.13)$$

Якщо виконати перетворення, що детально описані в [6], отримаємо вираз для в'язкості бінарної суміші:

$$\eta_{1,2} = \frac{\eta_1}{1 + \frac{n_2}{n_1} \left(\frac{S}{d_1}\right)^2 \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{2M_1}}} + \frac{\eta_2}{1 + \frac{n_1}{n_2} \left(\frac{S}{d_2}\right)^2 \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{2M_2}}}, \quad (1.14)$$

де  $S = (d_1 + d_2)/2$ .

Коли об'єднати всі постійні  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $M$ ,  $S$  для кожного члену в одну постійну  $A$ , рівняння (1.14) прийме вигляд:

$$\eta_{1,2} = \frac{\eta_1}{1 + \frac{n_2}{n_1} A_1} + \frac{\eta_2}{1 + \frac{n_2}{n_1} A_2}. \quad (1.15)$$

У такій формі рівняння вперше було виведене В. Сюзерлендом [9] та пізніше незалежно від нього також М. Тізенном [10]. Різноманітні видозміни формули (1.15) були запропоновані багатьма дослідниками.

Д. Максвелл [11] вивів формулу, яку можливо привести до наступного вигляду:

$$\eta_{1,2} = \frac{\eta_1}{1 + \frac{n_2}{n_1} A_1} + \frac{\eta_2}{1 + \frac{n_2}{n_1} A_2} + \frac{D}{\left(1 + \frac{n_2}{n_1} A_1\right) \left(1 + \frac{n_1}{n_2} A_2\right)}. \quad (1.16)$$

Д. Енског [12] приводить як точну формулу вираз:

$$\eta_{1,2} = \frac{\eta_1 \left(1 + \frac{n_1}{n_2} A_2\right) + \eta_2 \left(1 + \frac{n_2}{n_1} A_1\right) + D}{\left(1 + \frac{n_1}{n_2} A_2\right) \left(1 + \frac{n_2}{n_1} A_1\right) - \frac{D}{4\eta_1\eta_2}}. \quad (1.17)$$

З емпіричних рівнянь необхідно відмітити формулу С. А. Улибіна [13] для залежності в'язкості газових сумішей від температури:

$$\eta_{tm} = \eta_{t_0m} \sum_{i=1}^{i=n} N_i \left( \frac{\eta_{ti}}{\eta_{t_0i}} \right) \dots, \quad (1.18)$$

де  $\eta_{tm}$  – в'язкість суміші при температурі  $t$ ;  $\eta_{t_0m}$  – в'язкість суміші при температурі  $t_0$ ;  $\eta_{ti}$ ,  $\eta_{t_0i}$  – відповідно в'язкості суміші для  $i$ -го компоненту;  $N_i$  – мольна доля  $i$ -го компоненту.

Для розрахунку в'язкості газової суміші даного складу за формулою Улибіна потрібно знати в'язкість чистих компонентів та в'язкість суміші даного складу при якійсь одній температурі  $\eta_{tom}$ . Так як експериментальні значення  $\eta_{tom}$  часто відсутні, то цю величину необхідно обчислювати, що дещо знижує практичну цінність формули (1.18).

У відповідності до формули (1.18) відносна в'язкість газової суміші дорівнює сумі відносних в'язкостей компонентів при однакових температурах, помножених на їх мольну долю:

$$\frac{\eta_{tm}}{\eta_{t_0m}} = N_1 \frac{\eta_{t1}}{\eta_{t_01}} + N_2 \frac{\eta_{t2}}{\eta_{t_02}} + \dots \quad (1.19)$$

Розрахунки, виконані Улибіним для деяких газових сумішей, показали, що середня розбіжність між обчисленими та дослідними значеннями в'язкості не перевищувала 1,5 %.

Е. Мезон і Л. Мончік [14] запропонували інший вираз для в'язкості газових сумішей, які включають полярні компоненти:

$$[\eta_m] = \left[ \frac{N_1^2}{H_{11}} + \frac{N_2^2}{H_{22}} + \frac{2N_1N_2}{H_{11}H_{22}} \right] \left[ 1 - \frac{H_{12}}{H_{11}H_{22}} \right]^{-1} \quad (1.20)$$

У цьому виразі:

$$H_{11} = \frac{N_1^2}{[\eta_1]_l} + \frac{2N_1N_2}{M_1 + M_2} \frac{RT}{p[D_{12}]_l} \left[ 1 + \frac{3M_1}{5M_2} \cdot \frac{\Omega^{(2,2)*}}{\Omega^{(1,1)*}} \right];$$

$$H_{22} = \frac{N_2^2}{[\eta_2]_l} + \frac{2N_1N_2}{M_1 + M_2} \frac{RT}{p[D_{12}]_l} \left[ 1 + \frac{3M_1}{5M_2} \cdot \frac{\Omega^{(2,2)*}}{\Omega^{(1,1)*}} \right];$$

$$H_{12} = -\frac{2N_1N_2}{M_1 + M_2} \frac{RT}{p[D_{12}]_l} \left[ 1 - \frac{3}{5} \cdot \frac{\Omega^{(2,2)*}}{\Omega^{(1,1)*}} \right],$$

де  $[\eta]_1$  і  $[\eta]_2$  – в'язкості чистих компонентів;  $[D_{12}]_1$  – коефіцієнт дифузії бінарної суміші;

$$[D_{12}] = \frac{0,002628T^{\frac{3}{2}} \sqrt{\frac{M_1 + M_2}{2M_1M_2}}}{p\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(1,1)*}(T_{12}^*)}.$$

В останньому рівнянні:  $\sigma_{12}$  – параметр потенціальної функції взаємодії між молекулами;  $\Omega_{12}^{(1,1)*}$  – приведений інтеграл зіткнення;  $T_{12}^*$  – приведена температура для газової суміші.

Автори використали даний метод для розрахунку в'язкості ряду бінарних сумішей, що мали у своєму складі один полярний компонент та отримали добре узгодження розрахункових та дослідних значень.

Для визначення в'язкості багатокомпонентних сумішей неполярних газів М. Струнк і Д. Фензенфельд [15] запропонували наступне рівняння:

$$\eta_m = \frac{276,27 \cdot 10^{-7} \sqrt{TM_m}}{\sigma_m^2 \Omega_m^{(2,2)*}}, \quad (1.21)$$

де  $M_m = \sum_{i=1}^n N_i M_i$  – молекулярна маса суміші.

Відхилення розрахованих за рівнянням (1.21) значень в'язкості від дослідних складала від +3 до -3 %.

Через недостатність знань законів міжмолекулярної взаємодії у розрахункові рівняння суворої молекулярно-кінетичної теорії вводяться емпіричні залежності, що призводять дані рівняння до емпіричних формул, які достатньо громіздкі у математичному вираженні та складні у розрахунковому плані. У той же час точність рівнянь суворої молекулярно-кінетичної теорії порівняно з експериментальними даними невелика. Для газів при підвищеному та високому тиску, коли на їх властивості суттєво

впливають сили міжмолекулярної взаємодії та геометричні розміри молекул, теоретичний розрахунок в'язкості постає складним завданням.

Враховуючи проблематичність використання теоретичних шляхів, слід приділити увагу методам розрахунку та рівнянням емпіричного характеру, які забезпечують можливість більш швидких і достатньо надійних розрахунків. При розгляді газової суміші як деякого індивідуального газу мають на увазі, що її в'язкість підпорядковується тим же законам, що й в'язкість індивідуальних газів.

Д. Енског [12] для в'язкості дає рівняння:

$$\frac{\eta}{\rho} = \frac{1}{2,545} \left( \frac{\eta}{\rho} \right)_{\min} \left( \frac{1}{b\rho\chi} + 0,800 + 0,7614b\rho\chi \right). \quad (1.22)$$

Комплекс  $b\rho\chi$  визначається із запропонованого ним же рівняння стану:

$$p_t = T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{RT}{M} \rho (1 + b\rho\chi), \quad (1.23)$$

де  $p_t$  – термічний тиск;  $b$  – об'єм молекули;  $\chi$  – коефіцієнт, що характеризує ймовірність знаходження однієї молекули біля іншої:

$$\chi = 1 + 0,645b\rho + 0,287b^2\rho^2 + \dots \quad (1.24)$$

Виходячи з молекулярно-кінетичних уявлень про реальні гази, що враховують розміри молекул та сили міжмолекулярної взаємодії, І. Ф. Голубєв [3] вивів рівняння для в'язкості стиснених газів:

$$\eta_{p,T} = \eta_T + a \frac{p_t}{T}, \quad (1.25)$$

де  $\eta_{p,T}$  – в'язкість газу при тиску  $p$  та температурі  $T$ ;  $\eta_T$  – в'язкість газу при атмосферному тиску та такій же температурі;  $a$  – постійна для кожного газу.

Обробка багаточисленних даних авторами [6] показала, що дослідним даним у більшій мірі відповідає рівняння:

$$\eta_{p,T} = \eta_T + a \left( \frac{p_t}{T} \right)^n, \quad (1.26)$$

де значення постійної  $n$  знаходиться у межах від 1,10 до 1,12.

Надлишкова в'язкість у даному випадку залежить від температури та густини, так як термічний тиск являється функцією цих змінних. Така залежність надлишкової в'язкості від двох змінних дозволяє надійно описати дослідні дані у широкому діапазоні параметрів.

Н. Б. Варгафтік [16] запропонував рівняння, що засноване на аналізі дослідних даних по в'язкості газів у обмеженому діапазоні зміни тисків:

$$\eta_{p,T} = \eta_T + B\rho^m, \quad (1.27)$$

де  $B$  та  $m$  – постійні.

Рівняння (1.27) виражає в'язкість стисненого газу як суму двох функцій, одна з яких залежить від температури, інша – від густини. Однак простота рівняння досягнена внаслідок обмеженого інтервалу його дії.

О. А. Вассерман, Я. З. Казавчинський і В. А. Рабінович [17] наводять для розрахунку в'язкості повітря та його основних компонентів дещо змінену форму рівняння (1.27). У ній надлишкова в'язкість описується частіше всього поліномом четвертої степені від густини. Пізніше у роботі [18] О. А. Вассерман і В. А. Рабінович використали рівняння такого ж вигляду для рідкого стану вказаних вище речовин. При розрахунку в'язкості одноатомних газів [19] для надлишкової в'язкості враховувалася також температурна залежність.

Д. Кестін та співавтори [20] представили рівняння для розрахунку в'язкості інертних газів та їх сумішей. Рівняння описують увесь діапазон

складів та охоплюють широкі інтервали температур. В'язкість чистих речовин та сумішей розраховувалася за відповідними рівняннями:

$$\eta = \frac{5}{16} (mkT/\pi)^{1/2} \frac{f_\eta}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)*}}; \quad (1.28)$$

$$\eta_{12} = \frac{5}{16} \left( \frac{2m_1 m_2 kT}{\pi(m_1 + m_2)} \right)^{1/2} \frac{1}{\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(2,2)*} (T_{12}^*)}. \quad (1.29)$$

Пізніше М. Ассаель і співавтори [21] використали рівняння (1.29) для розрахунку в'язкості сумішей рідин.

Використовуючи теорію Енскога, В. Шенг і співавтори [22] запропонували для розрахунку в'язкості газів і рідин модифіковане рівняння:

$$\eta = \eta_0(b\rho) \left( \frac{1}{(b\rho\chi)} + A + 0,7614(b\rho\chi) \right), \quad (1.30)$$

де  $A$  – постійна для відповідної речовини.

Д. Міллат і співавтори [23] на підставі методу Чепмена-Коулінга [24] отримали для розрахунку в'язкості наступне рівняння:

$$\eta = k_B T b_{00}, \quad (1.31)$$

де  $k_B$  – постійна Больцмана;  $b_{00}$  – коефіцієнт, який враховує середню внутрішню енергію.

Також автори [23] наводять закономірності для в'язкості у критичній області, де поведінка речовин значно відрізняється. Розрахунок ускладнюється непередбачуваністю руху молекул та взаємодією між ними.

В монографії В. А. Рабіновича та І. М. Абдулагатова [25] докладно описані дослідження в'язкості у критичній області і наведена складна методика розрахунку аномального зростання цієї властивості поблизу критичної точки. Дослідження термодинамічних і транспортних властивостей в критичній області являється самостійною складною задачею,

якій присвячені багато робіт. Але в рамках даної дисертаційної роботи ця специфічна проблема не розглядається, оскільки в звичайних холодильних установках процес конденсації пари холодоагенту протікає при докритичних значеннях тиску.

А. Лассек та Р. Хафер [26] для в'язкості пропану у рідкому стані використовували модель пружних твердих куль, відповідно до якої рівняння для розрахунку приведеної в'язкості  $\eta^* = \eta \sigma^2 / \sqrt{m\varepsilon}$  має вигляд:

$$\eta^* = 6,0349 \cdot 10^8 \frac{\eta}{\rho^{2/3} \sqrt{MRT}}, \quad (1.32)$$

де розмірність  $\eta$  – Па·с.

Аналогічним чином М. Ассаель та співавтори [27] і А. Тея зі співавторами [28] проводили розрахунки для холодоагентів у рідкому стані.

С. Б. Кисельов та співавтори [29] для в'язкості бінарних сумішей наводять рівняння наступного вигляду:

$$\eta(T, \rho, x) = \left[ \frac{\eta_1 T_{c1}^{1/6} Z_{c1}^{2/3}}{\sqrt{M_1} P_{c1}^{2/3}} (1-x) + x \frac{\eta_2 T_{c2}^{1/6} Z_{c2}^{2/3}}{\sqrt{M_2} P_{c2}^{2/3}} \right] \frac{\sqrt{M_{mix}} P_{cx}^{2/3}}{T_{cx}^{1/6} Z_{cx}^{2/3}}, \quad (1.33)$$

де  $M_{mix}$  – мольна маса суміші;  $T_{cx}$  та  $P_{cx}$  – критичні температура і тиск суміші;  $Z_{cx} = P_{cx}/R\rho_{cx}T_{cx}$  – критичний фактор стисливості;  $x$  – мольна доля другого компоненту.

Розрахунок в'язкості холодоагентів та їх сумішей проводили К. Нагаока і співавтори [30] за допомогою наступного рівняння:

$$\eta\xi = (0,5124 \cdot T_r - 0,0517)^{0,82} Z_c^{-0,81}, \quad (1.34)$$

де  $\xi = T_c^{1/6} M^{-1/2} P_c^{-2/3}$  – параметр в'язкості;  $T_r$  – приведена температура в інтервалі від 0,6 до 1,8;  $Z_c$  – фактор стисливості від 0,253 до 0,282. Похибки цього рівняння за оцінкою авторів не перевищували 1,6 %.

Е. Леммон і Р. Якобсен [31] представили надлишкову в'язкість газів наступним рівнянням:

$$\eta(\tau, \delta) = \sum_{i=1}^n N_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{l_i}), \quad (1.35)$$

де  $\tau = T_c/T$  та  $\delta = \rho/\rho_c$ ;  $N_i, t_i, d_i, l_i$  – коефіцієнти для відповідної речовини.

На основі даних методів були складені багато рівнянь різними авторами, що також враховують залежність в'язкості від температури та густини. Деякі рівняння представлені через незалежні змінні температуру та тиск, щоб забезпечити більш спрощене використання при розрахунках.

### 1.3 Методи вимірювання теплопровідності

В останні роки все більше уваги приділяється дослідженню теплопровідності різних газів і рідин. Підвищений інтерес до вивчення теплопровідності деяких речовин обумовлений необхідністю проектування апаратів холодильної техніки, де у якості робочих речовин і теплоносіїв використовуються різноманітні речовини, а також їх суміші. При визначенні теплопровідності основну роль відігравали експериментальні методи.

При експериментальному визначенні теплопровідності використовують декілька методів: 1) нагрітого дроту; 2) коаксіальних циліндрів; 3) регулярного режиму; 4) плоского горизонтального шару; 5) дилатометричний. Ці методи можуть бути використані як в абсолютному, так і у відносному варіантах. Використання їх у якості відносних потребує надійні дані про теплопровідність речовини для калібрування приладу.

При визначенні теплопровідності слід враховувати поправки та проводити облік похибок, характерними джерелами яких являються: витоки теплоти по підведених до вимірювального осередку дротах (торцеві ефекти); теплота, що переноситься випромінюванням у шарі досліджуваної речовини; конвективний теплообмін у шарі досліджуваної речовини; ексцентриситет

між осями внутрішнього і зовнішнього циліндра (нитки) у вимірювальному осередку; наявність різниці температур між поверхнею (температуру якої потрібно виміряти) і місцем розташування спаю термопари.

Вплив витоків теплоти (кінцеві втрати теплоти) на роботу установки з дослідження теплопровідності полягає в тому, що розміри установки є обмеженими, в результаті чого на межі вимірювальної ділянки частина теплоти втрачається. Паралельні лінії ізотерм матимуть місце тільки в необмеженій пластині, а біля країв обмеженої пластини ізотермічні поверхні згинаються. У результаті отримуємо похибку, обумовлену, з одного боку, похибкою вимірювання кількості теплоти, яка переноситься теплопровідністю, а з іншого – неоднорідністю температурного поля у кінцевих ділянках вимірювального осередку.

Вплив променистого теплообміну відчутно проявляється при високих температурах (більше 400 – 500 °С). Поправка на випромінювання вводиться при дослідженні теплопровідності газів, а при дослідженні теплопровідності рідин її зазвичай не враховують, оскільки рівень температур, при якому існує рідка фаза, як правило, не перевищує 300 °С. Теоретичний розв'язок цієї задачі показав, що вклад променистої складової залежить від інтегрального коефіцієнта поглинання середовища, ступеня чорноти робочих поверхонь вимірювального осередку і величини робочого зазору. Оцінка цього вкладу свідчить, що впливом променистого теплообміну на результати вимірів можна нехтувати при товщині шару досліджуваної речовини менше 0,7 мм.

Конвективну складову теплообміну по можливості виключають конструктивними особливостями вимірювального осередку приладу. Для контролю за появою конвекції проводять досліджень при різних перепадах температур у шарі досліджуваної речовини.

Для газових сумішей, якщо компоненти сильно відрізняються за молекулярною масою, на теплопровідність також впливає термодифузія. Градієнт температури в суміші газів викликає відносний рух компонентів, який обумовлює виникнення градієнта відносної концентрації (важчі

молекули накопичуються біля гарячої пластини, легші – біля холодної). Одночасно з термодифузією виникає звичайна, концентраційна, дифузія, ефект якої протилежний до ефекту термодифузії. Виконані дослідження показують, що виникнення термодифузії істотно залежить від співвідношення об'ємів «нагрітої» і «холодної» зон у вимірювальному осередку. Відносна зміна концентрації компонентів суміші буде меншою там, де об'єм більший. Тому, щоб виключити вплив термодифузійного ефекту поділу суміші на вимірювану величину теплопровідності, об'єм нагрітої частини вимірювального осередку повинен перевищувати об'єм холодної частини приблизно в 10 разів (при температурі близько 700 К). При такому співвідношенні об'ємів ефект від зміни концентрацій компонентів суміші у вимірювальному осередку зазвичай не перевищує похибки виміру теплопровідності. Для контролю теоретичних результатів щодо впливу термодифузії на експериментальне визначення теплопровідності газових сумішей слід проводити експерименти на двох установках з різними співвідношеннями об'ємів вимірювальних осередків.

**Метод нагрітого дроту** використовується як стаціонарний і нестаціонарний. Установку методу схематично можна представити у вигляді циліндричної трубки, що наповнена досліджуваною речовиною. По осі трубки протягнутий тонкий дріт, який нагрівається електричним струмом. Тепло від дроту, проходячи крізь досліджувану речовину, відводиться до стінок трубки, на які намотаний термометр опору. Дріт виконує функції нагрівача і термометра.

При стаціонарному режимі вимірювань [32] трубку поміщають у термостат і теплопровідність  $\lambda$  визначають за законом Фур'є для циліндричної стінки:

$$Q = \frac{2\pi\lambda l}{\ln(d_2 / d_1)} (t_1 - t_2), \quad (1.36)$$

де  $Q = I^2 \cdot R$  – теплота;  $I$  – сила струму у дроті;  $R$  – опір;  $l$  і  $d_1$  – довжина і діаметр дроту;  $d_2$  – діаметр трубки;  $t_1$  і  $t_2$  – відповідно температура дроту та зовнішньої поверхні речовини у трубці.

Для запобігання завищених значень теплопровідності внаслідок конвекції досліджуваної речовини використовують трубки можливо меншого діаметру. Поправка на випромінювання складає 0,3 – 0,5 % по відношенню до всього виділеного дротом тепла, тому її часто не враховують.

Нестационарний режим нагрітого дроту [33] дозволяє забезпечити короткочасність досліду і визначити початок природної конвекції. Для запобігання кінцевим ефектам в установках використовують два дроти однакового діаметру і різної довжини. В результаті дії джерела теплоти у досліджуваному середовищі виникає нестационарне температурне поле, і тоді теплопровідність визначається рівнянням:

$$\lambda = \frac{Q}{4\pi} \frac{\Delta(\ln \tau)}{\Delta T}, \quad (1.37)$$

де  $\Delta(\ln \tau)$  і  $\Delta T$  – градієнти логарифму часу і зміни температури.

Похибки експериментального визначення теплопровідності методом нагрітого дроту складають 0,5 – 3 %.

**Метод коаксіальних циліндрів** принципово заснований на відомій розрахунковій формулі (1.36) та докладно описаний у [32]. Досліджувана речовина в даному разі заповнює проміжок між двома вертикальними коаксіально розташованими циліндрами. Радіальний тепловий потік проходить від внутрішнього циліндра з нагрівачем через шар речовини до зовнішнього циліндра. При настанні стаціонарного стану теплопровідність визначається за перепадом температури. Кільцевий зазор для уникнення конвекції повинен бути можливо меншим, порядку 0,2 – 0,4 мм; необхідно ретельне дотримання коаксіальності. Щоб запобігти відводу теплоти з торців відносно коротких циліндрів, з обох боків встановлюють спеціальні нагрівачі. Неточності методу знаходяться у межах 2 – 3 %.

**Метод регулярного режиму** являється нестационарним; вимірювання виконують при мимовільному охолодженні досліджуваної речовини, коли кількість переданої теплоти безперервно змінюється. Описання методу та відповідні формули представлені в [34]. Розподілення температури визначається фізичними властивостями речовини і умовами охолодження на її межі. Довгий час цей метод використовували для дослідження твердих тіл, а відносно недавно й для визначення теплопровідності рідин і газів.

Перевагами даного методу являються короткочасність проведення досліду і відносна простота конструкції експериментальної установки. Використання його ускладнюється при високих температурах через необхідність точного забезпечення умов охолодження. Неточності визначення теплопровідності методом регулярного режиму становлять 2,5 %.

**Метод плоского горизонтального шару** [35] ґрунтується на використанні закону Фур'є для плоскої стінки. Недоліками даного методу являються можливість виникнення конвекційного теплообміну і необхідність ретельного урахування теплових втрат по межах досліджуваного шару речовини. Прилади такого типу відрізняються громіздкістю і незручні при встановленні у термостат. Для запобігання конвекції зазор між пластинами встановлюють можливо меншим; тепловій потік напрямляють згори вниз. Для компенсації крайових втрат передбачаються кільця з підігрівачами.

Незважаючи на те, що успішна реалізація даного методу пов'язана з труднощами, він відноситься до числа надійних. Особливо цінний даний метод при дослідах поблизу критичної точки, оскільки в тонкому шарі не спостерігається помітна зміна густини досліджуваної речовини в залежності від її висоти. Похибки методу не перевищують 3 %.

**Дилатометричний метод** [36] являється модифікацією методу коаксіальних циліндрів та призначений для дослідження парів речовин при температурі до 1500 °С. Різниця температур вимірюється шляхом визначення розширення одного циліндра по відношенню до іншого, що фіксується за допомогою оптичного вимірювача довжини.

Перевагою являється той факт, що кінцеві ефекти, які дуже важко врахувати, виключаються автоматично. Недоліком методу є значний розмір експериментальної установки, через що велика кількість тепла ( $\approx 83\%$ ) передається випромінюванням і лише частина ( $\approx 17\%$ ) теплопровідністю. Досить докладно така установка описана М. В. Цедербергом [32]. Похибки визначення теплопровідності дилатометричним методом складають  $6 - 8\%$ .

#### 1.4 Методи розрахунку теплопровідності

Отримані дослідні дані в багатьох випадках охоплюють вузькі інтервали параметрів стану. Для розширення цих інтервалів використовують методи розрахунку, які на основі обмеженої кількості даних дозволяють достатньо надійно визначити теплопровідність у широких інтервалах температури і тиску, які представляють інтерес для техніки.

Д. Гіршфельдер, Ч. Кертісс та Р. Берд [7] для коефіцієнту теплопровідності чистого газу у першому приближенні отримали рівняння:

$$[\lambda]_{\text{I}} \cdot 10^7 = 1989,1 \frac{\sqrt{T/M}}{\sigma^2 \Omega^{(2,2)^*}(T^*)} = \frac{15}{4} \frac{R}{M} [\eta]_{\text{I}} \cdot 10^7, \quad (1.38)$$

де розмірності  $\lambda$  – кал/(см·сек·К) і  $\eta$  – г/(см·сек).

Таким чином у першому приближенні коефіцієнт теплопровідності пропорційний коефіцієнту в'язкості.

Вищі приближення коефіцієнту теплопровідності можливо розрахувати за формулою:

$$[\lambda]_k = [\lambda]_{\text{I}} f_{\lambda}^{(k)} = \frac{15}{4} \frac{[\eta]_{\text{I}} R}{M} \frac{f_{\lambda}^{(k)}}{f_{\eta}^{(k)}}, \quad (1.39)$$

де функції  $f_{\lambda}^{(k)}$  і  $f_{\eta}^{(k)}$  мало відрізняються від 1 і повільно змінюються із  $T^*$ .

Для багатоатомних молекул рівняння (1.38) замінюють відношенням, у якому наближено враховується передача енергії між поступальними і внутрішніми степенями вільності молекул:

$$[\lambda]_k^{Eйкен} = \frac{15}{4} \frac{R}{M} [\eta]_l \left( \frac{4}{15} \frac{\bar{C}_v}{R} + \frac{3}{5} \right). \quad (1.40)$$

Для бінарних сумішей існує наступний вираз для теплопровідності:

$$[\lambda_{12}]_l \cdot 10^7 = 1989,1 \frac{\sqrt{T(M_1 + M_2) / 2M_1M_2}}{\sigma_{12}^2 \Omega_{12}^{(2,2)*}(T_{12}^*)}, \quad (1.41)$$

де розмірність  $\lambda$  – кал/(см·сек·К), як і в (1.37).

С. Чепмен [37] розробив загальну теорію переносу, з якої він отримав аналітичний вираз для коефіцієнтів дифузії, в'язкості та теплопровідності одноатомних газів та їх сумішей. Теплопровідність чистих газів дорівнює:

$$\lambda = \frac{5}{2} \eta C_v, \quad (1.42)$$

а теплопровідність суміші двох газів визначається за виразом:

$$\lambda_{1,2} = \frac{5(l_1 \rho_1 C_{v1} + l_2 \rho_2 C_{v2})(El_1^2 + El_1 l_2 + Gl_2^2)}{2(l_1 + l_2)(E \frac{\rho_1}{\eta_1} l_1^2 + Hl_1 l_2 + G \frac{\rho_2}{\eta_2} l_2^2)}, \quad (1.43)$$

де  $l_1$  і  $l_2$  – відстані між асимптотами шляху молекул кожного газу у суміші;  $E$ ,  $H$ ,  $G$  – складні функції, що залежать від коефіцієнтів дифузії, густини, маси і швидкості руху молекул.

Чепмен стверджував, що коефіцієнт  $5/2$ , який входить до складу формул (1.42) і (1.43), є постійним для усіх одноатомних газів. У теорії Чепмена не висвітлюється механізм теплопровідності, однак наведені вище формули дають можливість більш точно відобразити температурну залежність

теплопровідності і в'язкості газів. У згаданій теорії розглядаються лише парні зіткнення, тому використовувати її можливо лише для одноатомних газів. Але вона не придатна для цих газів при великих значеннях густини, коли значну роль відіграють потрійні зіткнення.

Ф. Піддук [38] виходив з моделі газу, молекули якого є твердими, пружними шариками, що вільно обертаються. При цьому відносна швидкість віддалення шариків після зіткнення рівна та обернена швидкості перед зіткненням. Піддук вивів наступну формулу для теплопровідності:

$$\lambda = \frac{9}{19D^2} \left( \frac{R^3 T}{\pi M} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{(1+b)^2 (50b^2 + 151b + 37)}{102b^3 + 101b^2 + 75b + 12}, \quad (1.44)$$

де коефіцієнт  $b = R^2/a^2$ ,  $a$  – радіус шарика,  $D$  – його діаметр,  $M$  – маса,  $R$  – радіус обертання.

А. К. Абас-Заде [39] показав, що у випадку залежності радіусу обертання від температури на основі формули (1.44) отримаємо степінь температури більше 1/2; це наближає температурну залежність до експериментальної.

Д. Енског [40] намагався отримати теоретичні рівняння для розрахунку теплопровідності стиснених газів. При цьому він виходив із моделі Ван-дер-Ваальсівського газу, що складається з жорстких сферичних молекул, які можуть притягуватися одна до одної. Для врахування багаторазових зіткнень між молекулами він вивів числовий фактор  $\chi$ . Для розрахунку теплопровідності стисненого газу Енског отримав рівняння:

$$\lambda = \lambda_0 b \rho \left( \frac{1}{b \rho \chi} + 1,2 + 0,7574 b \rho \chi \right), \quad (1.45)$$

де  $\lambda$  – теплопровідність стисненого газу;  $\lambda_0$  – теплопровідність газу при атмосферному тиску;  $b = 2\pi\sigma^3/3m$  – постійна Ван-дер-Ваальса.

Для визначення комплексу  $b\rho\chi$  Енског запропонував рівняння стану типу Ван-дер-Ваальса:

$$p + ap^2 = \frac{RT}{M} \rho(1 + b\rho\chi). \quad (1.46)$$

Рівняння (1.46) використовується у випадку, коли  $a$  являється функцією сил притягнення між молекулами і не залежить від температури.

Є. С. Боровик [41], досліджуючи теплопровідність азоту під тиском, запропонував для розрахунку теплопровідності стиснених газів формулу:

$$\lambda = \left( \bar{C}_v + \frac{9}{4} \bar{R} \right) \frac{\eta}{M}. \quad (1.47)$$

Дана формула отримана Боровиком з формули теплопровідності газів при атмосферному тиску, запропонованої Ейкеном.

О. С. Предводителев [42] розглядав систему диференціальних рівнянь, які описують властивості речовини. Використовуючи цей метод, він надав формулу, що пов'язує теплопровідність і в'язкість рідин:

$$\lambda = B\eta C_p \left( 1 - \frac{b}{v} \right), \quad (1.48)$$

де  $B$  – постійний множник;  $C_p$  – ізобарна теплоємність;  $b$  – постійна Ван-дер-Ваальса;  $v$  – питомий об'єм.

Н. Б. Варгафтік [43] для описання теплопровідності отримав рівняння:

$$\lambda = \lambda_0 + B\rho^n, \quad (1.49)$$

де постійні  $B$  і  $n$  визначаються на підставі експериментальних даних.

Рівняння (1.49) добре описує теплопровідність газів при значеннях  $\rho < 1,5\rho_{кр}$ .

Дане рівняння широко використовували Н. Б. Варгафтік, А. К. Абас-Заде, М. В. Цедерберг.

Є. О. Столяров і співавтори [44, 45] виконали обробку отриманих ними експериментальних даних по теплопровідності водню, азоту, повітря, метану і діоксиду вуглецю в інтервалі тиску від 1 до 500 атм при температурі від 15 до 300 °С і запропонували наступне рівняння:

$$\lambda = \lambda_0(1 + \delta). \quad (1.50)$$

У цьому рівнянні  $\delta = a/\tau^b$ ,  $\tau = T/T_{кр}$ ,  $a = 4,5(\pi - 0,8)^{0,145}$ ,  $b = k\pi^{-n} + d$ ,  $\pi = p/p_{кр}$ , а значення коефіцієнтів  $k$ ,  $n$ ,  $d$  різні для кожного газу.

Рівняння (1.50) не описує теплопровідність речовин при переході від газоподібного стану у рідкий.

Е. Франк [46] запропонував наближене рівняння для розрахунку теплопровідності двоатомних та багатоатомних газів:

$$\lambda \approx \lambda_0 \left[ \left( 1 - \frac{v_{кр}}{3v} \right)^{-1} + a \cdot \Delta C_p \right], \quad (1.51)$$

де  $a = 0,071$  для двоатомних газів і  $0,035$  для багатоатомних;  $v_{кр}$  – питомий об'єм у критичні точці;  $\Delta C_p$  – приріст ізобарної теплоємності при підвищенні тиску від 1 кг/см<sup>2</sup> до даного значення.

У зв'язку зі значними розходженнями розрахованих за рівнянням (1.51) даних з експериментальними його використання не рекомендується.

О. А. Вассерман, Я. З. Казавчинський і В. А. Рабінович [17] наводять для розрахунку теплопровідності повітря та його основних компонентів дещо змінену форму рівняння (1.49), у якому надлишкова теплопровідність описується поліномами четвертої або п'ятої степені від густини. Пізніше у роботі [18] О. А. Вассерман і В. А. Рабінович використали рівняння такого ж вигляду для рідкого стану вказаних вище речовин. Критичну область вони не описували. При розрахунку теплопровідності одноатомних газів [19] використовувалося одне рівняння для чотирьох речовин у приведених координатах. Надлишкова теплопровідність описувалася поліномом

четвертої степені від густини, у якому останній коефіцієнт був функцією від температури. В роботах [17 – 19] для визначення густини використовувалися точні рівняння стану.

В. Шенг і співавтори [22] запропонували для розрахунку теплопровідності газів і рідин модифіковане рівняння Енскога:

$$\lambda = \lambda_0 \left[ 1 + \frac{1.200(b\rho\chi)}{4\lambda_0/15k\eta_0} + \frac{0.755(b\rho\chi)^2}{4\lambda_0/15k\eta_0} \right]. \quad (1.52)$$

Д. Міллат і співавтори [23] на підставі методу Чепмена-Коулінга [24] склали для розрахунку теплопровідності рівняння:

$$\lambda = \frac{2k_B^2 T}{m} \left[ -\left(\frac{5}{2}\right)^{1/2} a_{10} + \left(\frac{5}{2}\right)^{1/2} r a_{01} \right], \quad (1.53)$$

де  $k_B$  – постійна Больцмана;  $a_{10}$  і  $a_{01}$  – коефіцієнти, які враховують внутрішню енергію;  $r^2 = 2C_{\text{int}}/(5k_B)$ ;  $C_{\text{int}}$  – ізохорна теплоємність ідеального газу.

Для представлення залежності теплопровідності у критичній області від параметрів стану автори [23] рекомендували рівняння:

$$\lambda_c = \frac{R_D k_B T}{6\pi\eta\xi} \rho C_p, \quad (1.54)$$

де  $R_D = 1,02 \pm 0,004$  – універсальна амплітуда,  $\xi$  – радіус молекули.

У критичній області теплопровідність прагне до нескінченності, тому описати таку поведінку досить складно. У згаданій раніше монографії [25] наведено докладний аналіз поведінки теплопровідності в критичній області і формули для її розрахунку.

М. Ассаель та співавтори [27] і А. Тея зі співавторами [28] на підставі моделі пружних твердих куль запропонували наступне рівняння для розрахунку приведеної теплопровідності холодоагентів  $\lambda^* = \lambda \sigma^2 m / (\sqrt{m\varepsilon} \cdot k)$ :

$$\lambda^* = 1,936 \cdot 10^7 \frac{\lambda}{\rho^{2/3}} \sqrt{\frac{M}{RT}}, \quad (1.55)$$

де розмірність  $\lambda$  – Вт/(м·К).

С. Б. Кисельов і співавтори [29] для надлишкової теплопровідності бінарних сумішей наводять рівняння:

$$\lambda = \left[ \frac{\lambda_1 T_{c1}^{1/6} Z_{c1}^5 \sqrt{M_1}}{P_{c1}^{2/3}} (1-x) + \frac{\lambda_2 T_{c2}^{1/6} Z_{c2}^5 \sqrt{M_2}}{P_{c2}^{2/3}} x \right] \frac{P_{cx}^{2/3}}{T_{cx}^{1/6} Z_{cx}^5 \sqrt{M_{mix}}}, \quad (1.56)$$

де  $M_{mix}$  – мольна маса суміші;  $T_{cx}$  та  $P_{cx}$  – критичні температура і тиск суміші;  $Z_{cx} = P_{cx}/R\rho_{cx}T_{cx}$  – критичний фактор стисливості;  $x$  – мольна частка другого компоненту.

Е. Леммон і Р. Якобсен [31] представили надлишкову теплопровідність газів наступним рівнянням:

$$\lambda = \sum_{i=4}^n N_i \tau^{t_i} \delta^{d_i} \exp(-\gamma_i \delta^{l_i}), \quad (1.57)$$

де  $\tau = T_c/T$  та  $\delta = \rho/\rho_c$ ;  $N_i$ ,  $t_i$ ,  $d_i$ ,  $l_i$  – коефіцієнти для відповідної речовини.

Теоретичне визначення теплопровідності газових сумішей є більш складним завданням, ніж для чистих газів. Теплопровідність газової суміші не завжди може бути отримана розрахунком по правилу адитивності із значень теплопровідності газів, які входять до суміші, оскільки теплопровідність пропорційна довжині вільного пробігу молекул. При

змішуванні газів довжина вільного пробігу молекул кожного газу змінюється внаслідок присутності у суміші молекул інших газів.

А. Васильєва [47] експериментально досліджувала теплопровідність сумішей водню з киснем і, виходячи з кінетичної теорії, вивела рівняння для теплопровідності суміші:

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{1 + A_{12} \frac{x_2}{x_1}} + \frac{\lambda_2}{1 + A_{21} \frac{x_1}{x_2}}. \quad (1.58)$$

У цьому рівнянні:

$$A_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \right)^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_2}};$$

$$A_{21} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \frac{d_1 + d_2}{2d_2} \right)^2 \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{m_1}},$$

де  $d_1$  і  $d_2$  – діаметри молекул кожного з компонентів;  $m_1$  і  $m_2$  – їх маси.

Е. Кеннард [48] рекомендував для розрахунку теплопровідності суміші газів наступне рівняння:

$$\lambda = \lambda_1 x_1^2 + K(x_1 x_2) + \lambda_2 x_2^2, \quad (1.59)$$

де  $K$  – постійна, що встановлюється за експериментальними даними.

Розраховані за рівнянням (1.59) значення теплопровідності суттєво відрізняються від експериментальних.

Вибір для розрахунку того чи іншого рівняння залежить від повноти і точності експериментального дослідження речовини та інтервалів параметрів охоплених дослідними даними. Розрахунки теплопровідності сумішей складніше ніж цієї властивості для чистих речовин.

## 1.5 Висновки

1. Серед методів вимірювання в'язкості слід відзначити два найбільш поширених: метод капіляра та метод струни, що коливається. Перевагами даних методів є простота конструкцій дослідних установок та невеликі похибки вимірювань.

2. Вимірювання теплопровідності проводиться в основному методами нагрітого дроту та коаксіальних циліндрів, що засновані на одному принципі та можуть використовуватися у стаціонарному і нестаціонарному режимах. Вони відрізняються простотою та задовільною точністю.

3. Існує велика кількість методів розрахунку в'язкості і теплопровідності чистих речовин та їх сумішей, отриманих різними авторами. Широкого використання набули методи розрахунку вказаних властивостей в залежності від густини та температури. Для визначення густини необхідно використовувати надійні рівняння стану.

4. Поведінка сумішей суттєво відрізняється від поведінки чистих речовин. Тому для розрахунку в'язкості і теплопровідності сумішей необхідно використовувати більш складні методи, які враховують міжмолекулярну взаємодію різних речовин.

## **2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ ПРО В'ЯЗКІСТЬ І ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ КОМПОНЕНТІВ СУМІШЕЙ R32/R125, R32/R134a І R125/R134a**

У даному розділі приведено огляд наявних експериментальних даних про в'язкість і теплопровідність компонентів досліджуваних сумішей. Для різних груп даних коротко описується експериментальна установка, яка використана для їх отримання, та наводиться точність вимірювання значень транспортних властивостей.

### **2.1 Огляд експериментальних даних про в'язкість холодоагентів R32, R125 і R134a**

Альтернативні холодоагенти R32, R125 і R134a використовуються в холодильній промисловості як у чистому вигляді, так і у складі бінарних та потрійних сумішей. Вони відповідають базовим вимогам для робочих речовин та розглядаються як замітники холодоагентів R12 і R22. Використання альтернативних холодоагентів дозволяє підвищити економічні та експлуатаційні показники роботи холодильних установок. В останнє десятиріччя попит на такі холодоагенти різко зріс, що сприяло більш глибокому дослідженню їх термодинамічних і транспортних властивостей.

Для проектування та ефективної експлуатації холодильних установок необхідно мати надійні дані про в'язкість холодоагентів. Дану властивість зручно розраховувати за допомогою рівнянь, що складені на підставі експериментальних даних.

Для компонентів сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a різними авторами отримані експериментальні дані про транспортні властивості у різноманітних фазових станах та інтервалах параметрів. Огляд дослідних даних про в'язкість трьох холодоагентів зроблений нижче.

Перелік наявних експериментальних даних про в'язкість R32, R125 і R134a приводиться у таблицях 2.1 – 2.3. Для спрощення таблиць у другому стовпчику вказаний тільки перший з авторів публікації.

Таблиця 2.1 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R32

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T, K$	$p, MPa$	
1970	Філліпс [49]	10	200,30 – 287,30	0,01 – 2,00	рідина
1993	Олівейра [50]	19	231,80 – 343,14	0,21 – 5,11	насичена рідина
1993	Олівейра [50]	14	223,17 – 343,23	0,14 – 4,85	насичена пара
1993	Ріпл [51]	10	250,90 – 293,20	0,37 – 1,48	насичена рідина
1994	Ассаель [52]	26	273,15 – 313,15	1,60 – 15,55	рідина
1994	Данлоп [53]	1	298,15	0,10	газ
1995	Такахаші [54]	114	298,15 – 423,15	0,10 – 10,02	газ
1996	Геллер [55]	51	253,15 – 363,15	0,10 – 5,43	рідина
1996	Сун [56]	21	233,15 – 333,15	0,18 – 3,93	насичена рідина
1999	Лассек [57]	60	250,24 – 315,06	0,36 – 2,60	насичена рідина
1999	Олівейра [58]	13	223,17 – 343,23	0,14 – 4,85	насичена пара
2000	Фрьоба [59]	12	233,15 – 343,15	0,18 – 4,88	насичена пара

Дані Т. Філліпса та К. Мерфі [49] одержані за допомогою віскозиметру капілярного типу, що забезпечував простоту досліджень. Неточність вимірювання температури була в межах 0,01 °С. Склад речовини визначався за допомогою хроматографічного аналізу, чистота зразків була 99,90 %. На жаль, автори [49] не вказали точність вимірювання в'язкості. При порівнянні

з результатами інших авторів спостерігаються значні розбіжності, тому вказані дані не використовувалися при складенні рівняння для в'язкості.

Ч. Олівейра та В. Вейкхем [50] отримали значення в'язкості поблизу лінії насичення. Вимірювання проводилися віскозиметрами вібраційного типу з різними характеристиками для рідини і пари. По даним авторів неточність вимірювання в'язкості була в межах 0,5 – 1 %.

Д. Ріпл і О. Матар [51] використовували віскозиметр капілярного типу. Чистота зразків була на рівні 99,98 %, що було перевірено газовим хроматографом. Неточність експериментального визначення температури була до 0,05 К, похибки значень в'язкості – до 5 %.

М. Ассаель та співавтори [52] проводили вимірювання відкаліброваним віскозиметром вібраційного типу з похибкою значень в'язкості 0,5 %.

П. Данлоп [53] використовував віскозиметр капілярного типу і отримав лише одне значення в'язкості з похибкою 0,3 %.

М. Такахаші та співавтори [54] використовували віскозиметр Максвеллівського типу з диском, що коливається. За допомогою даного пристрою також була виміряна густина. Постійна прилада визначалася за допомогою в'язкості азоту. Чистота досліджуваної речовини була 99,972 %. Неточність вимірювань температури та тиску була 0,01 К і 0,5 КПа. Похибки у вимірюваннях густини та в'язкості склали 0,12 % та 0,3 % відповідно.

В. З. Геллер та співавтори [55] проводили вимірювання модифікованою капілярною трубкою, через яку за допомогою невеликого перепаду тиску забезпечувався потік речовини. Для створення перепаду тиску використовувався скляний ртутний насос. Чистота зразків холодоагенту була краща ніж 99,98 %. Для визначення температури та тиску використовувалися ртутні термометри та цифровий датчик тиску; похибки вимірювання дорівнювали 0,01 К і 1 КПа. Неточності вимірювання в'язкості не перевищували 1,2 %.

Л. Сун та співавтори [56] використовували калібрований віскозиметр капілярного типу. Для видалення систематичних помилок та для покращення

процедури калібрування три віскозиметра були відкалібровані за допомогою трьох різних рідин та двох різних калібрувальних об'ємів рідини. Такий підхід дав змогу зменшити неточності вимірювання в'язкості до 3 %. Неточність вимірювань температури була в межах 10 мК.

А. Лассек та співавтори [57] використовували гравітаційний віскозиметр з прямим капіляром та ущільнюючим клапаном на верхньому резервуарі. У якості калібрувальної речовини виступав спеціально підготовлений толуол. Температура вимірювалася каліброваним платиновим термометром опору з похибкою до 0,01 К. Неточності вимірювань в'язкості становили 2,4 %.

У роботі [58] Ч. Олівейра та В. Вейкхем наводять ті ж самі експериментальні значення в'язкості насиченої пари R32, що й представлені ними раніше у [50], але для розрахунку густини вони використали більш надійне рівняння стану. Похибки вимірювань зазначалися на рівні 2 %.

А. Фрьоба та співавтори [59] представили експериментальні дані про кінематичну в'язкість R32. Вимірювання проводилися методом динамічного розсіювання світла. Максимальні похибки даних складали 2 – 4 %.

Загалом експериментальні дані про в'язкість R32 охоплюють інтервал температури від 200 до 423 К при тиску до 15,55 МПа.

Таблиця 2.2 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R125

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	
1992	Вільсон [60]	6	216,48 – 333,15	2,80 – 3,40	рідина
1992	Вільсон [60]	5	310,93 – 422,04	0,09	газ
1993	Олівейра [50]	13	251,95 – 333,19	0,37 – 3,96	насичена рідина
1993	Олівейра [50]	13	223,99 – 331,99	0,11 – 2,91	насичена пара
1993	Діллер [61]	32	176 – 330	0,10 – 2,96	насичена рідина

## Продовження таблиці 2.2

1993	Діллер [61]	105	200 – 420	3,31 – 53,07	рідина
1993	Ріпл [51]	15	250,05 – 301,95	0,30 – 1,52	насичена рідина
1994	Ассаель [62]	22	273,15 – 313,15	2,45 – 14,45	рідина
1994	Данлоп [53]	1	298,15	0,10	газ
1996	Сун [56]	20	233,15 – 328,15	0,15 – 3,01	насичена рідина
1997	Ассаель [63]	24	273,15 – 313,15	0,13 – 1,29	газ
1997	Ріпл [64]	8	255,95 – 303,07	0,37 – 1,57	насичена рідина
1999	Такахаші [65]	131	298,15 – 423,15	0,10 – 8,40	газ
1999	Олівейра [58]	13	223,99 – 331,99	0,11 – 2,91	насичена пара
2000	Фрьоба [59]	11	233,15 – 333,15	0,15 – 3,17	насичена пара
2006	Авеліно [66]	116	253,99 – 293,13	1,43 – 10,08	рідина

Експериментальні дані Л. Вільсона та співавторів [60] про в'язкість холодоагенту R125 визначалася методом капіляру. Діаметр капіляру був визначений калібруванням водою. Перепад тиску вимірювався відкаліброваним датчиком тиску для рідини та ртутним манометром для пари. Неточність вимірювання в'язкості складала 2 %.

Ч. Олівейра та В. Вейкхем [50] проводили вимірювання віскозиметрами вібраційного типу з різними характеристиками для рідини і пари. Чистота зразків холодоагенту була перевірена хроматографічним аналізом і дорівнювала 99,9 %. Неточність вимірювання в'язкості складала 0,5 – 1 %. Ті ж самі дані щодо насиченої пари були представлені авторами у роботі [58] з використанням більш нового рівняння стану.

А. Фрьоба та співавтори [59] представили експериментальні дані про кінематичну в'язкість R125. Використовувався метод динамічного

розсіювання світла. За оцінкою авторів похибки вимірювань не перевищували 4 %.

Д. Діллер і С. Петерсон [61] проводили вимірювання віскозиметром з кристалом, що обертається. Для температури до 320 К був використаний кристал довжиною 5 см і діаметром 0,5 см, для температури вище 320 К – кристал довжиною 5 см і діаметром 0,3 см. Чистота зразків перевірялася хроматографом методом. Неточність вимірювання в'язкості складала 3 %.

Дані Д. Ріпла та співавторів [51, 64] отримані віскозиметром капілярного типу. Чистота зразків досліджуваної речовини була перевірена хроматографом і складала 99,8 %. Неточність експериментального визначення температури була до 0,05 К, похибки значень в'язкості – до 5 %.

М. Ассаель та С. Поліматідоу [62, 63] проводили вимірювання віскозиметром вібраційного типу. Зразки мали чистоту краще ніж 99,95 %. Похибка отриманих значень в'язкості складала 0,5 – 1 %.

П. Данлоп [53] для вимірювання в'язкості R125 використовував віскозиметр капілярного типу. Він отримав тільки одне значення в'язкості з похибкою 0,3 %.

Л. Сун та співавтори [56] проводили вимірювання вздовж лінії насичення віскозиметром капілярного типу. Неточність отриманих результатів була менше 3 %.

М. Такахаші та співавтори [65] вимірювали в'язкість віскозиметром з диском, що коливається. За допомогою даного пристрою також були отримані значення густини. Чистота зразків холодоагенту була 99,9 %. Неточності значень температури, тиску і густини були 0,01 К, 0,5 КПа і 0,03 кг/м<sup>3</sup>. Похибка вимірювань в'язкості складала 0,3 %.

Х. Авеліно та співавтори [66] використовували віскозиметр вібраційного типу. Неточності вимірювання температури та тиску були 0,01 К і 0,05 МПа, а значень в'язкості 1 %.

Загалом в'язкість холодоагенту R125 досліджена експериментально в інтервалі температури від 176 до 423 К при тиску до 53,07 МПа.

Таблиця 2.3 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R134a

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T, K$	$p, MPa$	
1990	Набізаде [67]	41	302,87 – 424,45	0,10 – 6,44	газ
1991	Кумагаї [68]	8	273,15 – 343,15	0,29 – 2,11	насичена рідина
1992	Лавренченко [69]	34	257,58 – 404,59	0,32 – 6,44	рідина
1993	Доудел [70]	6	308,15 – 403,15	0,10	газ
1993	Олівейра [71]	17	237,74 – 343,15	0,09 – 2,30	насичена рідина
1993	Олівейра [71]	43	293,35 – 343,15	0,66 – 51,01	рідина
1993	Діллер [72]	30	175 – 320	0,1 – 1,22	насичена рідина
1993	Діллер [72]	63	200 – 300	0,62 – 33,70	рідина
1993	Ріпл [51]	14	250,05 – 306,05	0,10 – 0,81	насичена рідина
1994	Ассаель [52]	32	273,15 – 333,15	0,95 – 14,60	рідина
1995	Хан [73]	21	233,15 – 333,15	0,1 – 1,68	насичена рідина
1996	Падуа [74]	37	248,20 – 298,11	0,73 – 100,10	рідина
1996	Вільгельм [75]	71	297,27 – 438,48	0,10 – 0,32	газ
1996	Падуа [76]	5	198,11 – 298,11	0,10 – 0,66	рідина
1997	Ассаель [63]	22	273,15 – 333,15	0,14 – 1,47	газ
1998	Шібасакі [77]	126	298,15 – 423,15	0,10 – 5,63	газ
1999	Лассек [57]	91	240,85 – 350,10	0,10 – 2,46	насичена рідина
1999	Олівейра [58]	14	242,96 – 342,77	0,08 – 2,07	насичена пара
2000	Фрьоба [59]	13	243,15 – 363,15	0,10 – 3,23	насичена пара
2003	Комунас [78]	70	293,15 – 373,15	10 – 140	рідина
2011	Лассек [79]	59	293,15 – 438,15	10 – 400	рідина

Х. Набізаде і Ф. Маїнгер [67] для вимірювання в'язкості R134a використовували віскозиметр із диском, що коливається. Похибка представлених ними даних складала 0,5 %.

А. Кумагаї та С. Такахаші [68] вимірювали в'язкість віскозиметром капілярного типу. Чистота зразків холодоагенту була перевірена хроматографом і становила 99,8 %. Температура контролювалася у межах 0,03 К. Неточність даних про в'язкість була менше ніж 0,5 %.

Г. К. Лавренченко та співавтори [69] вимірювали в'язкість методом капіляра. Температура вимірювалася платиновим термометром опору, а тиск – манометром з навантаженим поршнем. Неточність вимірювань в'язкості знаходилася в межах 1,5 %.

Експериментальні дані Д. Доудела та Д. Метьюса [70] отримані віскозиметром капілярного типу. Чистота холодоагенту зазначалася на рівні 99,95 %. Похибка отриманих значень в'язкості складала 0,4 %.

Ч. Олівейра та В. Вейкхем [58, 71] вимірювали в'язкість R134a вздовж лінії насичення та при високому тиску віскозиметром вібраційного типу. Калібрування приладу здійснювалося за допомогою азоту та гелію. Чистота зразків була 99,9 %. Температура вимірювалася з похибкою 0,1 К. Неточність дослідних даних про в'язкість складала 0,6 – 2 %.

Д. Діллер та співавтори [72] використовували віскозиметр з кристалом, що обертається. Неточність даних про в'язкість була 2 %.

Дані Д. Ріпла та О. Матара [51] отримані віскозиметром капілярного типу. Чистота зразків досліджуваної речовини була перевірена хроматографом і складала 99,98 %. Неточність вимірювання температури була 0,05 К, а значень в'язкості – до 5 %.

М. Ассаель та співавтори [52, 63] використовували віскозиметр вібраційного типу. Неточність даних про в'язкість R134a становила 0,5 – 1 %.

У роботі [73] Л. Хан та співавтори використовували віскозиметр капілярного типу, що витримував тиск до 6 МПа. Калібрування апарату

проводилося за допомогою води та ацетону. Чистота зразків холодоагенту складала 99,95 %. Неточність вимірювання в'язкості була 1 %.

А. Падуа та співавтори [74, 76] використовували віскозиметр вібраційного типу. Неточність вимірювання температури була 0,01 К. В інтервалі до 35 МПа тиск визначався з похибкою 0,03 МПа, а в інтервалі до 138 МПа – 0,07 МПа. Неточність значень в'язкості була в межах 0,6 – 2 %.

Д. Вільгельм і Є. Вогель [75] проводили вимірювання віскозиметром з диском, що коливається. Неточність отриманих даних становила 0,3 %.

Н. Шібасакі та співавтори [77] використовували віскозиметр Максвеллівського типу з диском, що коливається. За допомогою даного пристрою також були отримані експериментальні значення густини. Чистота зразків R134a становила 99,9 %. Неточність значень температури, тиску та густини складала 0,01 К, 0,5 КПа та 0,03 кг/м<sup>3</sup>. Похибка вимірювань в'язкості дорівнювала 0,3 %.

А. Лассек та співавтори [57] проводили вимірювання капілярним віскозиметром. Температура вимірювалася платиновим термометром опору з похибкою до 0,01 К. Неточність вимірювання в'язкості становила 2,4 %.

А. Фрьоба та співавтори [59] представили експериментальні дані про кінематичну в'язкість R134a. Вони використовували методом динамічного розсіювання світла. Похибки вимірювань в'язкості становили 2 – 4 %.

Експериментальні дані М. Комунаса та співавторів [78] отримані методом падаючого вантажу. Чистота зразків холодоагенту була 99,94 %. Неточності визначення температури та тиску були 0,5 К і 0,1 МПа. Похибка вимірювань в'язкості була 2 %.

А. Лассек і С. Беір [79] також використовували метод падаючого вантажу. Неточність вимірювання температури та тиску становила 0,4 К і 0,5 %. Похибки вимірювань в'язкості складали 3,5 %.

Таким чином в'язкість холодоагенту R134a досліджена експериментально в інтервалі температури від 175 до 438 К при тиску до

400 МПа. Вказане значення тиску суттєво перевищує ті значення, які характерні для роботи сучасних холодильних установок.

## 2.2 Огляд експериментальних даних про теплопровідність холодоагентів R32, R125 і R134a

Для досліджуваних холодоагентів різними авторами одержані експериментальні дані про теплопровідність у різних фазових станах та інтервалах параметрів. Перелік експериментальних даних про теплопровідність R32, R125 і R134a приводиться у таблицях 2.4 – 2.6. Для спрощення таблиць у другому стовпчику вказаний тільки перший з авторів публікації.

Таблиця 2.4 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність R32

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	
1993	Пападакі [80]	10	205,42 – 302,56	0,10 – 1,90	насичена рідина
1995	Танака [81]	53	283,15 – 333,15	0,10 – 3,93	газ
1995	Ассаель [82]	27	252,60 – 312,83	0,63 – 17,63	рідина
1995	Ро [83]	24	223,15 – 323,15	2 – 20	рідина
1996	Ята [84]	27	253,16 – 324,33	1,90 – 30	рідина
1996	Гросс [85]	37	233,45 – 333,75	0,20 – 6,20	рідина
1996	Гросс [85]	43	265,05 – 344,95	0,10 – 3,99	газ
1997	Ро [86]	24	232,55 – 322,95	2 – 20	рідина
1997	Сун [87]	20	254,51 – 341,76	0,22 – 3,93	газ
1998	Гао [88]	13	120 – 135	1,48	тверда речовина
2001	Ле Неїндре [89]	613	298,65 – 465,61	0,10 – 50	рідина

М. Пападакі та В. Вейкхем [80] вимірювали теплопровідність R32 методом нагрітого дроту. Чистота зразків холодоагенту була 99,9 %. Під час вимірювань тиск перевищував тиск насичення на 0,1 – 0,5 МПа. Вплив такого підвищення тиску на значення теплопровідності був 0,2 – 0,5 % (більші значення відповідають більшим температурам). Неточність отриманих даних про теплопровідність була 1 %.

Дані Я. Танаки та співавторів [81] були отримані апаратом з нагрітим дротом. У якості нагрівних елементів, що компенсували кінцеві ефекти, виступали два платинові дроти діаметром 5 мкм та 50 і 25 мм довжиною. Чистота зразків речовини була 99,99 %. Неточність експериментальних даних становила 1 %.

М. Ассаель та Л. Карагіаннідіс [82] проводили вимірювання методом нагрітого дроту. Для перевірки дослідної установки використовувалися толуол та вода. Чистота холодоагенту дорівнювала 99,98 %. Неточність отриманих значень теплопровідності складала 0,5 %.

С. Ро та співавтори [83] також проводили вимірювання методом нагрітого дроту. Використовувався платиновий дріт довжиною та діаметром 135,26 мм і 25 мкм. Холодоагент мав чистоту 99,9 %. Неточність отриманих даних про теплопровідність не перевищувала 2 %.

Д. Ята та співавтори [84] використовували апарат з нагрітим дротом. Компенсація кінцевих ефектів забезпечувалася двома дротами діаметром 20 мкм і довжиною 60 мм. Чистота холодоагенту була 99,5 %. Температура підтримувалася з похибкою 0,02 К. Неточність результатів дослідів була 1 %.

Експериментальні дані Ю. Гросса та Я. Сонга [85], як і попередніх дослідників, отримані методом нагрітого дроту. Використовувався платиновий дріт діаметром 8,5 мкм. Чистота зразків холодоагенту становила 99,8 %. Неточність отриманих даних про теплопровідність знаходилася в межах 1,6 % для рідини та 2,0 % для пари.

С. Ро та співавтори [86] проводили вимірювання за допомогою нагрітого платинового дроту протягом короткого часу, щоб запобігти помилкам

внаслідок природньої конвекції у апараті. Чистота холодоагенту була 99,9 %. Тиск вимірювався з похибкою 0,4 %, температура контролювалася у межах 0,02 °С. Неточність вимірювань теплопровідності складала 2 %.

Л. Сун та співавтори [87] використовували апарат з двома анодованими танталовими дротами у якості нагрівних елементів. Чистота зразків холодоагенту становила 99,95 %. Неточність вимірювання температури була 10 мК. Неточність даних про теплопровідність була менша ніж 3 %.

К. Гао та співавтори [88] отримали експериментальні дані про теплопровідність R32 у твердому стані. Вимірювання проводилися апаратом з платиновим дротом діаметром 15 мкм. У точці плавлення холодоагенту спостерігалось значне підвищення теплопровідності при переході від твердого до рідкого стану. Чистота зразків речовини була 99,98 %. Неточність отриманих значень теплопровідності складала 2 %.

Б. Ле Неїндре та Я. Гаррабос [89] використовували апарат з коаксіальними циліндрами, що працював у сталому режимі. Були охоплені стани рідини та газу, віддалені від критичної області. Чистота зразків холодоагенту була 99,9 %. Неточність вимірювання теплопровідності знаходилася на рівні 1,5 %.

Загалом теплопровідність R32 досліджена експериментально в інтервалі температури від 120 до 465 К при тиску до 50 МПа.

Таблиця 2.5 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність R125

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	
1992	Вільсон [60]	4	216,48 – 333,15	0,10 – 3,17	насичена рідина
1992	Вільсон [60]	3	238,71 – 333,15	0,10	газ
1993	Пападакі [80]	7	225,47 – 306,03	0,10 – 1,74	насичена рідина
1994	Цветков [90]	16	172,74 – 290,02	0,10 – 1,11	насичена рідина

## Продовження таблиці 2.5

1995	Танака [81]	51	283,15 – 333,15	0,10 – 2,01	газ
1995	Цветков [91]	11	187,43 – 227,79	3,32 – 6,04	рідина
1995	Цветков [91]	19	236,51 – 419,38	0,10 – 1,45	газ
1995	Ассаель [82]	20	253,04 – 313,46	1,24 – 16,03	рідина
1996	Ята [84]	24	257,05 – 304,70	1,10 – 30,90	рідина
1996	Гао [92]	32	193,50 – 333,90	2 – 30	рідина
1996	Гросс [85]	39	253,45 – 333,55	0,33 – 7,03	рідина
1996	Гросс [85]	63	254,72 – 354,35	0,10 – 3,65	газ
1997	Ассаель [93]	17	272,90 – 313,11	0,16 – 1,13	газ
1997	Ро [86]	24	231,25 – 324,05	2 – 20	рідина
1997	Сун [87]	17	251,21 – 333,70	0,19 – 2,84	газ
1998	Гао [88]	13	140 – 169	1,29	тверда речовина
1999	Ле Неїндре [94]	640	297,27 – 513,21	0,10 – 53	рідина
1999	Джонг [95]	24	231,25 – 324,05	2 – 20	рідина

Експериментальні дані Л. Вільсона та співавторів [60] про теплопровідність R125 отримані методом нагрітого дроту. Неточність вимірювання теплопровідності складала 2 %.

М. Пападакі та В. Вейкхем [80] використовували метод нагрітого дроту. Чистота зразків холодоагенту була 99,9 %. Під час вимірювань тиск рідини перевищував тиск насичення на 0,1 – 0,5 МПа, це впливало на значення теплопровідності в межах 0,2 – 0,5 %. Неточність отриманих даних про теплопровідність була на рівні 1 %.

О. Б. Цветков та співавтори [90] отримали дані про теплопровідність R125 поблизу лінії насичення методом коаксіальних циліндрів. Для

калібрування апарату використовувалися толуол, аргон, гелій та R22. Чистота зразків досліджуваного холодоагенту перевірялася хроматографом і складала 99,83 %. Неточність визначення теплопровідності була 2 – 3 %.

Пізніше О. Б. Цветков та співавтори [91] виміряли теплопровідність R125 в станах рідини та газу апаратом з коаксіальними циліндрами, який працював у перехідному та сталому режимах. Чистота зразків холодоагенту визначалася хроматографом і була 99,85 %. Неточність результатів дослідження становила 2 – 3 %.

Дані Я. Танаки та співавторів [81] були отримані методом нагрітого дроту. Для компенсації кінцевих ефектів використовувалися два платинові дроти діаметром 5 мкм та довжиною 50 і 25 мм. Чистота зразків речовини була 99,8 %. Неточність отриманих дослідних даних становила 1 %.

М. Ассаель та Л. Карагіаннідіс [82] проводили вимірювання методом нагрітого дроту. Чистота холодоагенту була 99,95 %. Неточність отриманих значень теплопровідності знаходилася на рівні 0,5 %.

Д. Ята та співавтори [84] також використовували метод нагрітого дроту. Чистота холодоагенту дорівнювала 99,5 %. Похибки отриманих результатів склали 1 %.

У роботі К. Гао та співавторів [92] вимірялася теплопровідність R125 методом нагрітого дроту. Чистота зразків була краще ніж 99,6 %. Температура визначалася термометром опору з похибкою 0,1 К. Тиск вимірювався цифровим манометром з похибкою 0,07 МПа. Неточність отриманих значень теплопровідності складала 0,5 %.

Ю. Гросс та Я. Сонг [85] проводили дослідження також методом нагрітого дроту. Чистота зразків холодоагенту становила 99,8 %. Неточність даних про теплопровідність становила 1,6 % для рідини та 2,0 % для газу.

М. Ассаель та співавтори [93] користувалися інструментом з двома танталовими дротами діаметром 15,11 мкм. Щоб переконатися у правильній роботі приладу, визначалася теплопровідність аргону щоразу до та після вимірювань для холодоагенту. Чистота зразків досліджуваної речовини була

99,95 %, що було підтверджено хроматографічним аналізом. Неточність отриманих авторами даних про теплопровідність R125 складала менше 1 %.

С. Ро та співавтори [86] проводили вимірювання методом нагрітого дроту в апараті з платиновим дротом протягом короткого періоду часу для запобігання можливим помилкам внаслідок конвекції. Чистота холодоагенту була краща ніж 99,8 %. Тиск і температура визначалися з похибками 0,4 % і 0,02 °С. Неточність вимірювань теплопровідності становила 2 %.

Л. Сун та співавтори [87] одержали експериментальні дані про теплопровідність R125 поблизу лінії насичення. Використовувався апарат з двома анодованими танталовими дротами. Чистота зразків холодоагенту становила 99,95 %. Неточність вимірювання температури була 10 мК. Неточність отриманих даних про теплопровідність менше ніж 3 %.

К. Гао та співавтори [88] представили експериментальні дані про теплопровідність R125 у твердому стані. Вимірювання проводилися апаратом з платиновим дротом діаметром 15 мкм. Теплопровідність R125 у твердому стані показувала позитивну залежність від температури. У точці плавлення холодоагенту спостерігалось значне підвищення теплопровідності при переході від твердого до рідкого стану. Чистота зразків речовини була краща ніж 99,6 %. Неточність значень теплопровідності становила менше ніж 2 %.

Б. Ле Неїндре та Я. Гаррабос [94] отримали велику кількість експериментальних даних методом коаксіальних циліндрів, що працювали у сталому режимі. Чистота досліджуваної речовини була 99,8 %. Неточність визначення теплопровідності складала 1,5 %.

С. Джонг та співавтори [95] використовували платиновий дріт діаметром 25 мкм та довжиною 128,4 мм. Чистота досліджуваного холодоагенту була краща ніж 99,8 %. Неточності вимірювання температури та тиску були 0,05 К та 0,5 %. Неточність отриманих значень теплопровідності складала 2 %.

Загалом експериментальні дані про теплопровідність R125 охоплюють інтервал температури від 140 до 513 К при тиску до 53 МПа.

Таблиця 2.6 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність R134a

Рік	Автор і джерело	Кількість точок	Інтервали параметрів		Стан
			$T, K$	$p, MPa$	
1989	Річард [96]	5	303,15 – 343,15	0,76 – 1,56	газ
1990	Феллоус [97]	5	303,15 – 343,15	0,77 – 2,12	газ
1990	Феллоус [97]	8	312,19 – 342,15	0,99 – 2,07	рідина
1991	Танака [98]	33	293,15 – 353,15	0,10 – 2,54	газ
1992	Лассек [99]	215	203 – 393	0,05 – 68,20	газ
1992	Гросс [100]	46	253,25 – 363,15	1,35 – 60,97	рідина
1992	Гросс [100]	42	273,75 – 354,15	0,96 – 25,85	газ
1992	Перкінс [101]	76	202,83 – 303,28	0,69 – 5,18	рідина
1992	Лавренченко [69]	44	253,09 – 400,47	0,10 – 8,94	рідина
1993	Ассаель [102]	36	252,97 – 333,30	0,64 – 22,43	рідина
1993	Пападакі [103]	9	240,40 – 306,80	0,10 – 0,85	насичена рідина
1993	Ямамото [104]	38	273,15 – 363,15	0,10 – 3,05	газ
1994	Цветков [90]	19	169,87 – 290,06	0,10 – 0,52	насичена рідина
1995	Цветков [105]	21	235,33 – 439,51	0,05 – 0,25	газ
1995	Хаммершмідт [106]	5	303 – 463	0,10	газ
1995	Ро [83]	24	223,15 – 323,15	2 – 20	рідина
1997	Ассаель [93]	19	273,15 – 333,15	0,13 – 1,30	газ
1997	Гурова [107]	53	213,01 – 292,88	0,38 – 21,34	рідина
1998	Гао [88]	16	130 – 166,5	0,61	тверда речовина
1999	Ле Неїндре [108]	543	299,18 – 533,02	0,10 – 50	рідина

Продовження таблиці 2.6

1999	Джонг [95]	25	232,75 – 323,25	2 – 20	рідина
2009	Ле Неїндре [109]	37	299,29 – 515,97	0,10 – 0,76	газ
2009	Ле Неїндре [109]	696	374,18 – 407,01	0,15 – 21,01	рідина
2009	Багінський [110]	116	295,85 – 354,95	0,68 – 4,15	рідина

Р. Річард та І. Шанкланд [96] першими отримали експериментальні дані про теплопровідності R134a методом нагрітого дроту. Значення теплопровідності були екстрапольовані до нульової густини. Похибка вимірювань складала 2 %.

У роботі Б. Феллоуса та співавторів [97] проводилися вимірювання вздовж лінії насичення апаратом з нагрітим дротом. Похибка отриманих значень теплопровідності складала 1 %.

Я. Танака та співавтори [98] використовували апарат з коаксіальним циліндрами, що працював у сталому режимі. Калібрування проводилося за допомогою гелію, неону, аргону, криптону, азоту та метану. Чистота зразків досліджуваного холодоагенту була краща ніж 99,9 %. Неточність експериментальних даних не перевищувала 2 %.

А. Лассек та співавтори [99] проводили вимірювання теплопровідності двома інструментами з нагрітими платиновими дротами діаметром 12,7 мкм, що виступали як джерела теплоти та термометри опору. Неточність отриманих результатів становила 3,8 %.

Ю. Гросс та співавтори [100] користувалися методом нагрітого дроту. Чистота зразків холодоагенту становила 99,9 %. Похибки вимірювання теплопровідності рідини та газу не перевищували 1,6 та 2,0 %.

Р. Перкінс та співавтори [101] використовували два інструменти з нагрітими дротами. Неточність значень теплопровідності складала 1 %.

Г. К. Лавренченко та співавтори [69] отримали дані про теплопровідність R134a методом нагрітого дроту у стаціонарному режимі.

Температура вимірювалася платиновим термометром опору, а тиск – манометром з навантаженим поршнем. Неточність отриманих даних про теплопровідність не перевищувала 1,5 %.

У роботах М. Ассаеля та співавторів [93, 102] використовувався інструмент з двома нагрітими танталовими дротами діаметром 25 мкм у [102] і 15,11 мкм у [93]. Чистота зразків холодоагенту була краща ніж 99,9 %. Неточність отриманих значень теплопровідності складала 0,5 – 1 %.

М. Пападакі та співавтори [103] вимірювали теплопровідність R134a методом нагрітого дроту (з ізольованими танталовими дротами). Холодоагент мав чистоту 99,9 %. Неточність результатів дослідження була 1 %.

Р. Ямамото та співавтори [104] використовували апарат з двома платиновими дротами. Мінімізація впливу теплоємності дротів на вимірювання була досягнута використанням тонких дротів діаметром 5 мкм. Холодоагент мав чистоту 99,9 %. Неточність дослідних даних складала 1 %.

Експериментальні дані О. Б. Цветкова та співавторів [90, 105] отримані апаратом з коаксіальними циліндрами. Правильність роботи апарату була перевірена вимірюваннями теплопровідності аргону, толуолу та R22. Досліджуваний холодоагент мав чистоту 99,83 %, що було перевірено хроматографічним аналізом. Неточність визначення теплопровідності складала 2 – 3 %.

Експериментальні дані Ю. Хаммершмідта [106] отримані методом плоского горизонтального шару за допомогою апарату з огороженими нагрітими пластинами. Надійність апарату підтверджена вимірюваннями для криптону, аргону та R22. Чистота зразків досліджуваного холодоагенту складала 99,99 %. Неточність вимірювань теплопровідності становила 2 %.

С. Ро та співавтори [83] використовували платиновий дріт діаметром 25 мкм і довжиною 135,26 мм. Холодоагент мав чистоту 99,8 %. Неточність отриманих даних про теплопровідність не перевищувала 2 %.

А. Гурова та співавтори [107] виміряли теплопровідність R134a поблизу лінії насичення методом нагрітого дроту. Температура визначалася

платиновим термометром опору з похибкою 0,01 К. Тиск створювався одностороннім повітряним компресором діафрагмового типу та вимірювався з похибкою до 20 кПа. Зразки холодоагенту мали чистоту 99,9 %. Неточність вимірювання теплопровідності дорівнювала 0,5 %.

К. Гао та співавтори [88] одержали дані про теплопровідність R134a у твердому стані апаратом з платиновим дротом діаметром 15 мкм. Для R134a у точці плавлення теплопровідність у твердому та рідкому станах майже безперервна. Чистота зразків речовини була краща ніж 99,9 %. Неточність даних про теплопровідності складала 2 %.

Б. Ле Неїндре та співавтори [108, 109] отримали дані про теплопровідність за допомогою апарату з вертикальними циліндрами, який працював у сталому режимі. Чистота зразків досліджуваної речовини була 99,9 %. Неточність отриманих даних складала 1,5 – 3 %. Основна частина помилки була викликана вимірюваннями різниці температури між циліндрами.

С. Джонг та співавтори [95] вимірювали теплопровідність за допомогою платинового дроту діаметром 25 мкм та довжиною 128,4 мм. Чистота досліджуваного холодоагенту була краща ніж 99,8 %. Неточності вимірювань температури та тиску дорівнювали 0,05 К та 0,5 %. Похибки отриманих значень теплопровідності склали менше 2 %.

А. В. Багінський та А. С. Шипіцина [110] провели вимірювання теплопровідності R134a за допомогою зонду, що працював по методу високочастотних термічних хвиль (до 200 Гц). Зонд складався з платинового дроту діаметром 10 мкм та був калібрований як термометр опору. Тиск створювався термокомпресором та вимірювався кварцовими трансформаторами. Контрольні вимірювання проводилися для толуолу та н-гептану. Неточності визначення температури, тиску та теплопровідності склали 0,1 К, 3 кПа та 1,5 %.

Експериментальні дані про теплопровідність холодоагенту R134a охоплюють інтервал температури від 130 до 533 К при тиску до 68,2 МПа.

### 2.3 Висновки

1. Транспортні властивості холодоагентів R32, R125 і R134a досліджені у досить широких областях параметрів. Ці області інколи навіть ширше характерних для роботи сучасних холодильних установок.

2. В'язкість вказаних холодоагентів частіше всього визначалася методами капіляра і струни, що коливається. Їх теплопровідність вимірювалася в основному методами нагрітого дроту і коаксіальних циліндрів.

3. Неточність отриманих значень в'язкості і теплопровідності знаходиться в межах 0,5 – 4 %. Похибки дослідних даних суттєво відрізняються у різних авторів, що викликано використанням різноманітних установок та особливостями проведення експерименту.

4. Накопичені численні експериментальні дані про в'язкість і теплопровідність холодоагентів доцільно описати аналітично з точністю, що відповідає точності експерименту.

### 3 РІВНЯННЯ ДЛЯ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ КОМПОНЕНТІВ ДОСЛІДЖУВАНИХ СУМІШЕЙ

У даному розділі описується методика складання рівнянь для транспортних властивостей компонентів трьох бінарних сумішей. Складені рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a на підставі дослідних даних для широкої області параметрів через незалежні змінні температуру та густину. Також складені рівняння для розрахунку цих властивостей в області газу через змінні температуру та тиск.

#### 3.1 Рівняння для розрахунку в'язкості R32, R125 і R134a

Аналіз численних рівнянь для розрахунку в'язкості газів і рідин наведений у роботах [3, 6, 111 – 114]. Рівняння для транспортних властивостей можна розділити на дві групи: локальні для опису властивостей газу або рідини у обмеженій області параметрів та єдині, які описують ці властивості у рідкому та газоподібному станах. Локальні рівняння характеризуються простотою та мають малу кількість коефіцієнтів. Недоліками таких рівнянь є неузгодженість функцій на кордонах їх дії. Прикладом локального рівняння є складене М. Такахаші та співавторами [54] для газоподібного R32.

Більший інтерес представляють єдині рівняння для розрахунку властивостей газу та рідини в широкій області параметрів. При їх використанні спрощується розрахунок таблиць властивостей, оскільки виключається неузгодженість функцій, яка є на кордонах дії локальних рівнянь. Недоліками єдиних рівнянь являються дещо більша кількість коефіцієнтів та інколи менша точність у порівнянні з локальними. Єдині рівняння найчастіше представлені через незалежні змінні температуру  $T$  та густину  $\rho$ . У комплексі з ними необхідно використовувати рівняння стану

для розрахунку густини при заданих значеннях  $T$  і  $p$ . Прикладом єдиного рівняння для в'язкості є рівняння Д. Діллера та С. Петерсона [61] для R125.

Враховуючи переваги та недоліки кожного типу рівнянь складання єдиних рівнянь для транспортних властивостей холодоагентів є більш доцільним. Це можливо завдяки наявності експериментальних даних для газоподібної та рідкої фаз і лінії насичення. Методи статистичної обробки дослідних даних дозволяють складати єдині рівняння високої точності, близької до точності експерименту, визначаючи їх коефіцієнти за допомогою методу найменших квадратів.

В процесі аналітичного опису дослідних даних методом найменших квадратів слід враховувати вагу даних [115], яку визначають за формулою:

$$w = 1 / \sigma^2, \quad (3.1)$$

де  $\sigma$  – дисперсія похибки даних.

Основний вклад у величину  $\sigma$  вносить похибка експериментального визначення даних, тобто  $\sigma = \delta\eta \cdot \eta/2$ , де  $\delta\eta$  – відносна похибка експерименту.

При складанні рівнянь для в'язкості та теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a у даній роботі була використана методика вибору у рівнянні статистично найбільш значущих коефіцієнтів, запропонована О. А. Вассерманом і А. Я. Крейзеровою [116] для рівнянь стану. Ця методика передбачає визначення ваг  $w_{ij}$  усіх коефіцієнтів  $b_{ij}$  і розрахунок їх похибок  $\sigma_{ij}$ :

$$\sigma_{ij} = \sqrt{D / w_{ij}}, \quad (3.2)$$

де  $D$  – значення зваженої дисперсії, розраховане за формулою:

$$D = \frac{1}{N - n} \sum_{k=1}^m w_k (x_{k,e} - x_{k,p})^2. \quad (3.3)$$

У рівнянні (3.3)  $N$  і  $n$  – кількість дослідних даних і коефіцієнтів рівняння,  $w_k$  – вага даних,  $x_{k,e}$  і  $x_{k,p}$  – експериментальне і розрахункове значення властивості.

Вага коефіцієнта  $w_{ij}$  знаходиться з тієї ж матриці, за допомогою якої розраховувалися коефіцієнти. Згодом розраховується похибка  $\sigma_{ij}$ , а далі визначається коефіцієнт з мінімальним критерієм Ст'юдента  $t_{ij}$ , тобто для якого відношення  $t_{ij} = |b_{ij}|/\sigma_{ij}$  має мінімальне значення.

Викладений прийом заснований на гіпотезі про рівність нулю коефіцієнта, який виключається. Таким чином, слід виключати тільки коефіцієнти, для яких відношення  $t_{ij}$  менше вибраного значення критерію Ст'юдента. Для компенсації можливого зростання відхилень дослідних значень властивостей від розрахункових складається нове рівняння, що не містить виключеного коефіцієнта. Надалі знову визначаються похибки  $\sigma_{ij}$  і виключається коефіцієнт, якому відповідає мінімальне для нового рівняння значення  $t_{ij}$ . У процесі розрахунків за методикою [116] одержуємо серію рівнянь майже однакової точності, з яких обирається оптимальне.

Для складання рівнянь, що описують транспортні властивості, створена програма на основі методики [116]. Спочатку формується масив дослідних даних, до якого включаються  $T, p, \rho$ -дані та експериментальне значення в'язкості або теплопровідності. Далі на підставі обраної форми рівняння з вихідних даних формується матриця для процедури визначення коефіцієнтів, яка включає  $T, \rho$ -дані або  $T, p$ -дані (для локальних рівнянь) та надлишкове значення транспортної властивості. За допомогою сформованої матриці розв'язується система лінійних рівнянь, визначаються коефіцієнти та обираються найбільш значущі за описаною вище методикою.

**3.1.1 Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту R32**  
складалися різними авторами у різних формах на підставі своїх дослідних даних [50, 52, 54 – 56] та діяли в обмежених інтервалах температури та тиску, тобто були локальними. У цій роботі одержано єдине рівняння для в'язкості R32 [117], яке надійно описує дослідні дані в інтервалі температури від 232 до 423 К при тиску до 9,8 МПа. В таблиці 3.1 перелічені  $T, p, \eta$ -дані, використані при складанні згаданого рівняння, похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів і відхилення експериментальних даних від розрахованих.

Таблиця 3.1 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості R32, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta$ , %	$\delta\eta_{\text{макс}}$ , %	$\delta\eta_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Олівейра [50]	27	231,80 – 333,60	0,21 – 4,07	1,0	1,6	1,0
Ріпл [51]	4	250,90 – 281,37	0,37 – 1,05	5,0	3,1	2,9
Такахаші [54]	87	298,15 – 423,15	0,10 – 9,76	0,3	–3,6	1,2
Геллер [55]	25	253,15 – 363,15	0,10 – 5,43	1,2	–3,1	1,8
Сун [56]	21	233,15 – 333,15	0,18 – 3,93	3,0	2,3	0,8
Лассек [57]	49	250,24 – 315,06	0,36 – 2,60	2,4	–1,6	0,8
Олівейра [58]	8	251,88 – 313,25	0,42 – 2,49	2,0	–1,7	1,3
Фрьоба [59]	7	253,15 – 313,15	0,41 – 2,48	4,0	–1,9	1,4
Весь масив	228	231,80 – 423,15	0,10 – 9,76	–	–3,6	1,2

Області параметрів, що охоплені використаними даними, показані на рисунку 3.1. На цьому рисунку дані Ч. Олівейри та В. Вейкхема [50] представляють в'язкість поблизу лінії насичення. Дані [51, 56 – 59] не були показані окремо, оскільки вони охоплені областю даних [50].

Рівняння для розрахунку в'язкості R32 складено у наступній формі:

$$\eta - \eta_0 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{a_{i1}}{T} + a_{i2} + a_{i3} \cdot T \right) (\rho - \rho_0)^i, \quad (3.4)$$

де індексом «0» позначені властивості при атмосферному тиску; розмірність в'язкості – мкПа·с, густини – кг/м<sup>3</sup>, температури – К.

Рівняння (3.4) задовольняє граничній умові, так як при атмосферному тиску обидві його частини дорівнюють нулю. При використанні такого

рівняння необхідно мати значення густини при відомих значеннях тиску та температури. Для розрахунку густини R32 використовувалося рівняння стану, складене О. А. Вассерманом та Д. В. Фомінським [118].

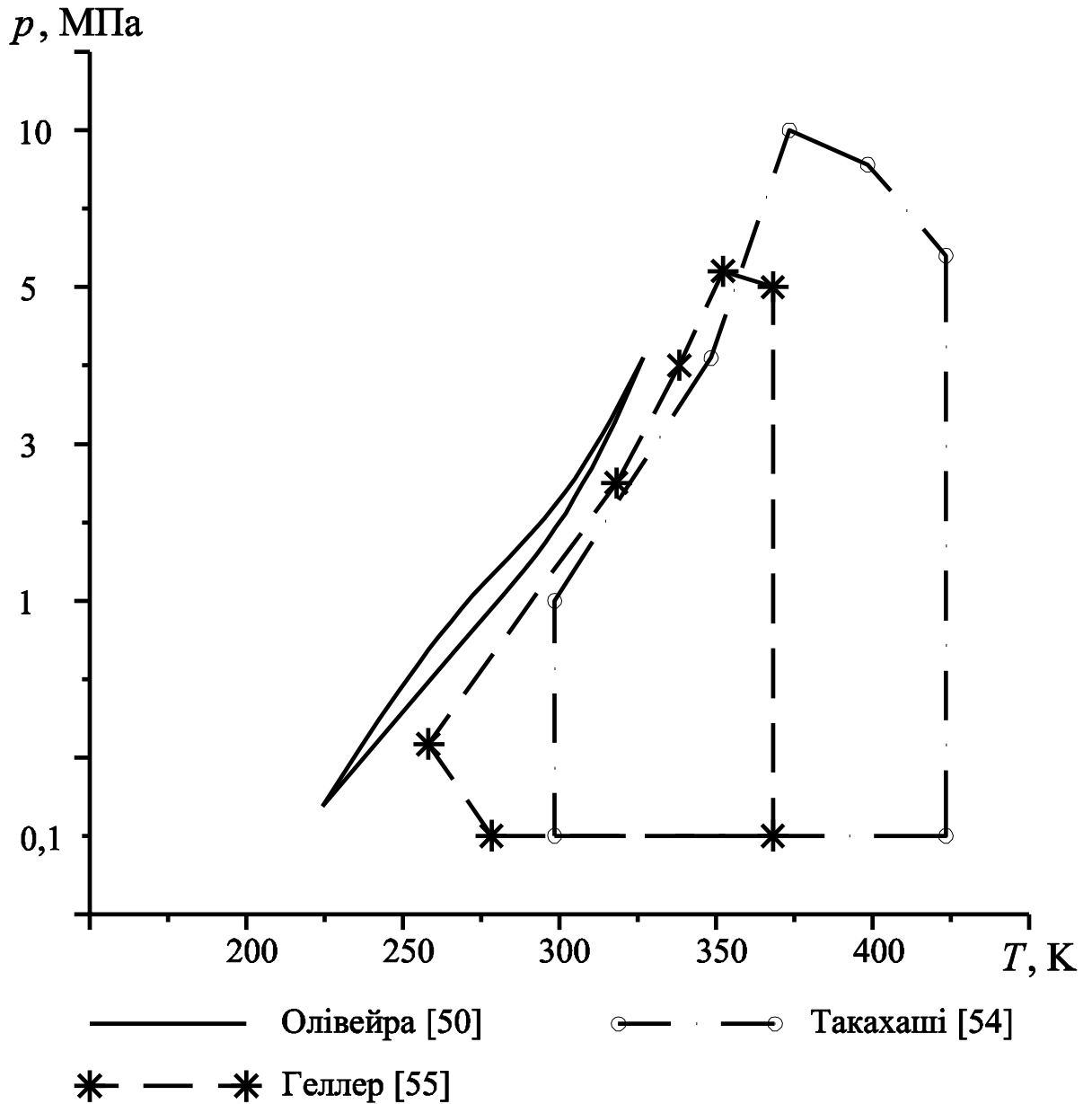


Рис. 3.1 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про в'язкість R32

Також на основі експериментальних даних (6 точок з роботи [54] та 7 точок з [55]) складено рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту при атмосферному тиску:

$$\eta_0 = 5,7221 \cdot 10^{-3} + 4,2000 \cdot 10^{-2} \cdot T. \quad (3.5)$$

Рівняння (3.5) описує використані експериментальні дані в інтервалі температури від 223 до 423 К із середнім квадратичним відхиленням 0,9 % та максимальним 1,1 %.

Для розрахунку густини досліджуваного холодоагенту при атмосферному тиску складене наступне рівняння:

$$\rho_0 = \frac{6,1274 \cdot 10^2}{T} + \frac{8,9754 \cdot 10^3}{T^2}. \quad (3.6)$$

Рівняння (3.6) описує значення  $\rho_0$  [119] в інтервалі температури 223 – 423 К із середнім квадратичним відхиленням 0,2 % та максимальним 0,7 %.

Коефіцієнти рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості R32 в широкій області параметрів визначені по експериментальним даним [50, 51, 54 – 59] методом найменших квадратів. При цьому були виключені окремі точки, що не узгоджувалися з основним масивом даних, оскільки відхилення для них перевищували потроєне середнє квадратичне відхилення для всього масиву. Оптимізація числа коефіцієнтів проводилася по методиці [116]; обрані коефіцієнти наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості R32

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$5,6115 \cdot 10^1$	1	2	$-3,5116 \cdot 10^{-1}$	1	3	$5,2029 \cdot 10^{-4}$
2	1	$1,2237 \cdot 10^{-1}$	2	2	$1,7012 \cdot 10^{-4}$	2	3	$-7,9384 \cdot 10^{-7}$
3	1	$-7,0359 \cdot 10^{-5}$						

Для оцінки точності рівняння (3.4) розраховані значення в'язкості R32 були порівняні з експериментальними. На рисунку 3.2 наведена гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості R32 від розрахованих; розподіл

відхилень близький до нормального. В таблиці 3.1 представлені максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сер}}$  відхилення даних різних авторів. Результати порівняння свідчать, що рівняння (3.4) надійно описує в'язкість R32 в області температури та тиску, характерних для холодильних установок, і може бути рекомендовано для розрахунків.

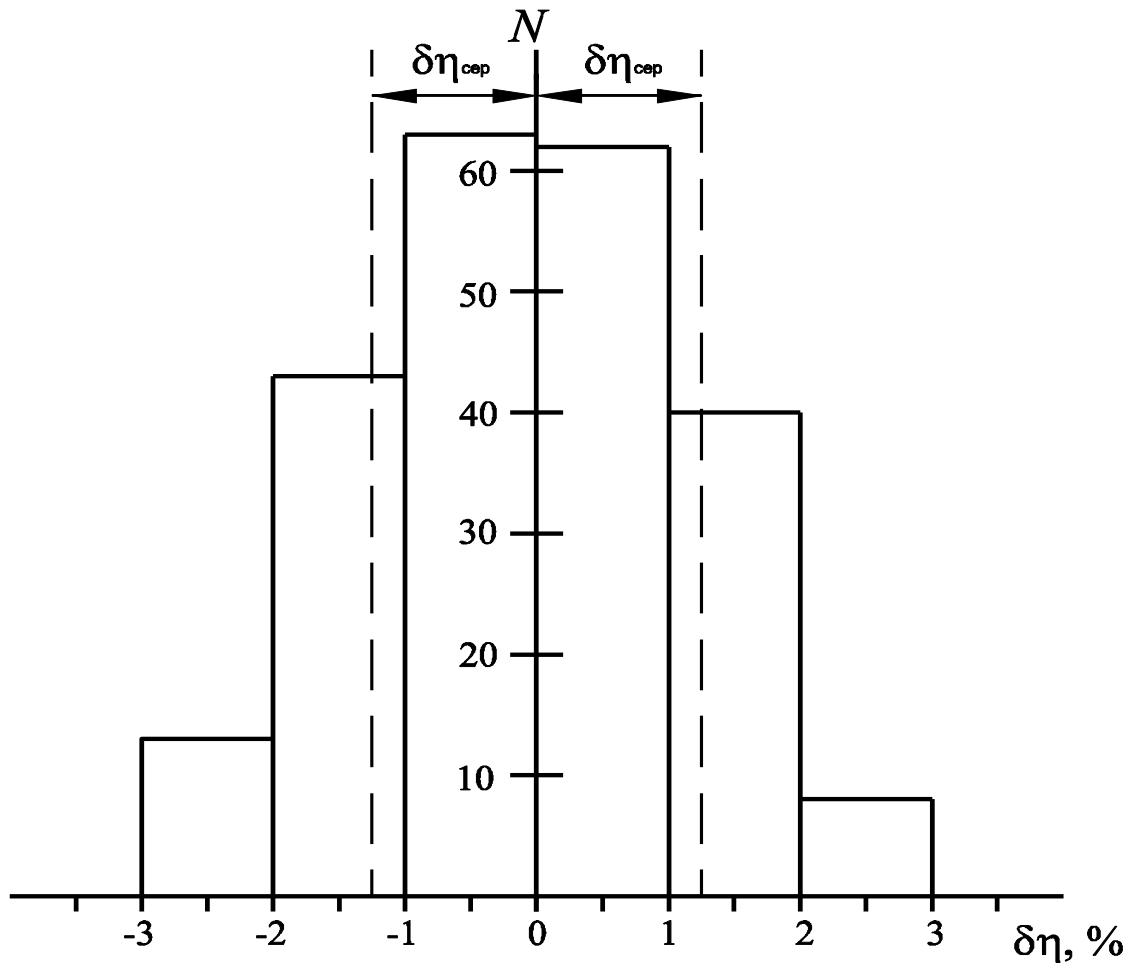


Рис. 3.2 – Гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості від розрахованих для R32

**3.1.2 Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту R125** отримані численними авторами і являються локальними, як і для R32. В цій роботі одержано єдине рівняння для розрахунку в'язкості R125 [117], яке діє в інтервалі температури від 230 до 423 К при тиску до 10,1 МПа. В таблиці 3.3 перелічені  $T, p, \eta$ -дані, використані при складанні цього рівняння, похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів і відхилення дослідних даних від розрахованих.

Дані, що були отримані при температурах нижче нормальної температури кипіння  $T_n = 225,06$  К, не використовувалися.

Таблиця 3.3 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості R125, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta$ , %	$\delta\eta_{\text{макс}}$ , %	$\delta\eta_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Олівейра [50]	8	232,44 – 323,18	0,14 – 2,42	1,0	3,4	2,0
Діллер [61]	31	230,00 – 420,00	0,13 – 7,10	3,0	4,1	1,8
Ріпл [51]	13	250,05 – 301,95	0,30 – 1,52	5,0	3,6	2,5
Ассаель [62]	14	273,15 – 313,15	2,45 – 9,20	0,5	-2,0	1,0
Сун [56]	3	298,15 – 308,15	1,38 – 1,78	3,0	-1,9	1,4
Ассаель [63]	24	273,15 – 313,15	0,13 – 1,29	1,0	-2,0	1,0
Ріпл [64]	8	255,95 – 303,07	0,37 – 1,57	2,4	-1,8	1,0
Такахаші [65]	116	298,15 – 423,15	0,10 – 6,73	0,3	3,6	1,2
Олівейра [58]	6	232,44 – 331,99	0,14 – 2,91	2,0	1,2	0,7
Фрьоба [59]	5	233,15 – 323,15	0,15 – 2,54	4,0	3,2	1,9
Авеліно [66]	116	253,99 – 293,13	1,43 – 10,08	1,0	-1,4	0,6
Весь масив	344	230,00 – 423,15	0,11 – 10,08	–	4,1	1,2

Області параметрів, що охоплені використаними даними, показані на рисунку 3.3. На ньому дані Ч. Олівейри та В. Вейкхема [50] розташовані поблизу лінії насичення. Дані [51, 56, 58, 59, 64] та частина даних Д. Діллера та С. Петерсона [61] для стану насичення не показані окремо, так як вони охоплені областю даних [50].

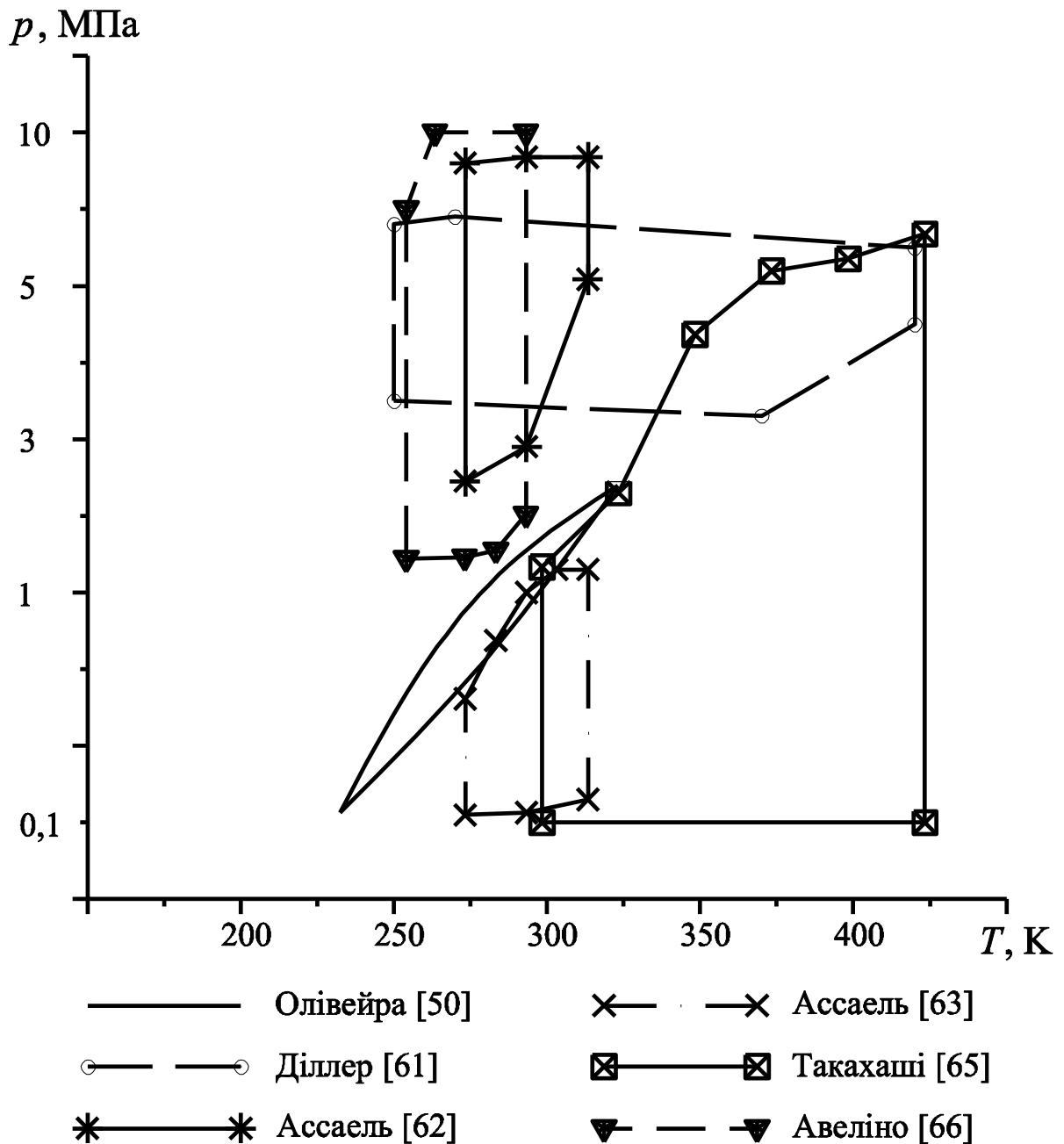


Рис. 3.3 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про в'язкість R125

Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту R125 складено у формі (3.4) по експериментальним даним з таблиці 3.3 за допомогою описаної вище методики. Окремі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних, були виключені. Густина розраховувалась за рівнянням стану [118].

Для розрахунку в'язкості R125 при атмосферному тиску на основі дослідних даних (6 точок з роботи [65]) складено наступне рівняння:

$$\eta_0 = -1,6662 \cdot 10^{-4} + 4,5963 \cdot 10^{-2} \cdot T - 8,7431 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7) описує використані експериментальні дані в інтервалі температури від 226 до 423 К із середнім квадратичним відхиленням 0,8 % та максимальним –1,9 %.

Для розрахунку густини досліджуваного холодоагенту при атмосферному тиску складене рівняння:

$$\rho_0 = \frac{1,4265 \cdot 10^3}{T} + \frac{1,7471 \cdot 10^4}{T^2}. \quad (3.8)$$

Рівняння (3.8) описує значення  $\rho_0$  [119] в інтервалі 226 – 423 К із середнім квадратичним відхиленням 0,5 % та максимальним 1,5 %.

У таблиці 3.4 наведені коефіцієнти рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості холодоагенту R125. Точність рівняння оцінювалася шляхом зіставлення розрахованих значень в'язкості з експериментальними. На рисунку 3.4 наведена гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості холодоагенту від розрахованих. З рисунка видно, що розподіл відхилень достатньо близький до нормального, враховуючи обмежену кількість даних. В таблиці 3.3 представлені максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих.

Таблиця 3.4 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості R125

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$4,9040 \cdot 10^1$	1	2	$-2,9565 \cdot 10^{-1}$	1	3	$4,5905 \cdot 10^{-4}$
2	1	$-9,3058 \cdot 10^{-1}$	2	2	$5,1515 \cdot 10^{-3}$	2	3	$-6,9493 \cdot 10^{-6}$
3	1	$5,5345 \cdot 10^{-4}$	3	2	$-2,8979 \cdot 10^{-6}$	3	3	$3,7073 \cdot 10^{-9}$
4	1	$1,1131 \cdot 10^{-8}$						

Із таблиці 3.3 і гістограми видно, що складене єдине рівняння з прийнятною точністю описує дані про в'язкість холодоагенту R125 в широкій області параметрів і може бути рекомендовано для розрахунків.

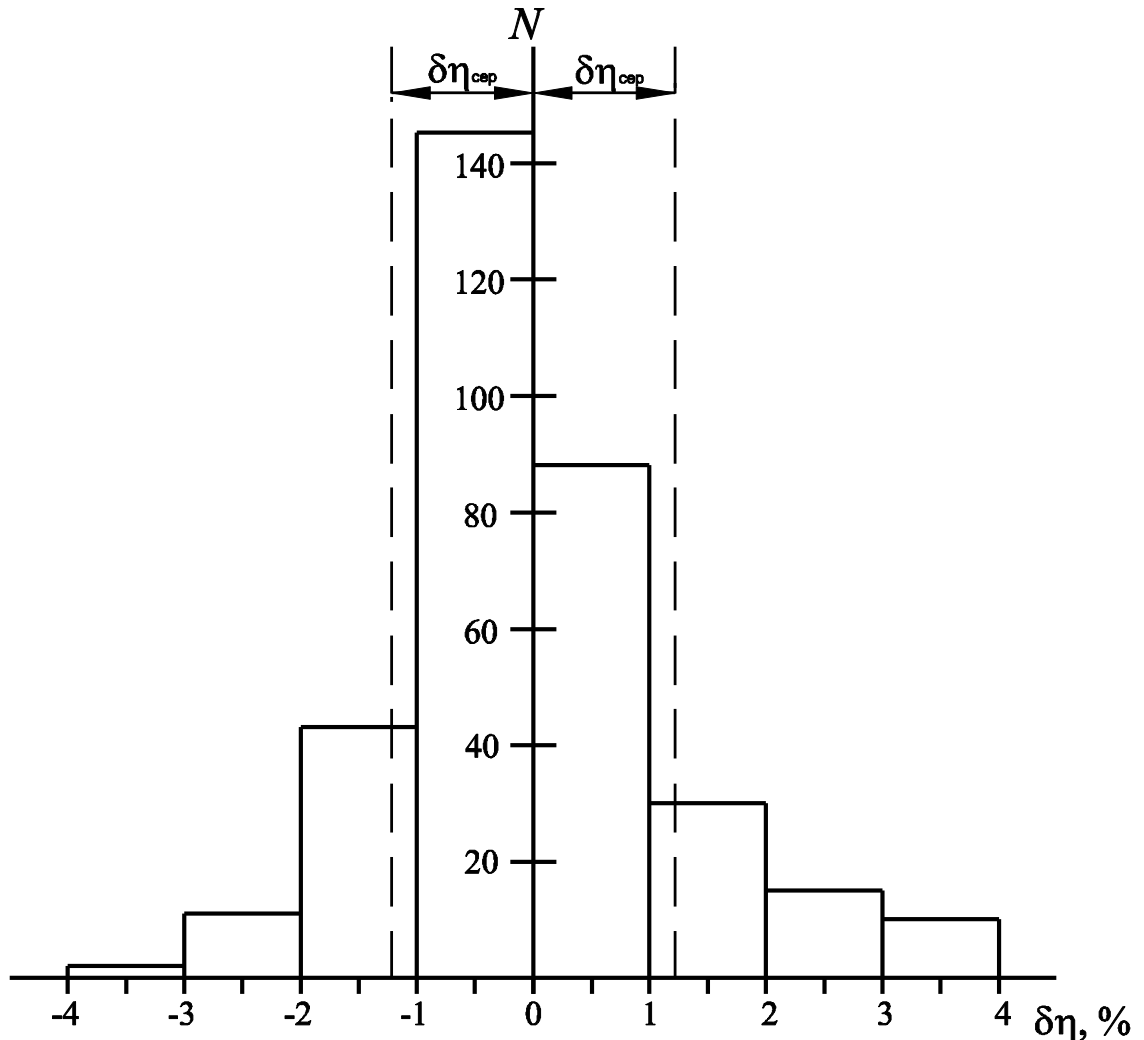


Рис. 3.4 – Гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості від розрахованих для R125

**3.1.3 Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту R134a**  
 переважно були локальними. В цій роботі одержано єдине рівняння через змінні температуру та густину [120] для розрахунку в'язкості R134a в інтервалі температури від 248 до 439 К при тиску до 6,0 МПа. В таблиці 3.5 перелічені  $T, p, \eta$ -дані, використані при складанні рівняння, похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів і відхилення експериментальних даних від

розрахованих. При складанні цього рівняння не використовувалися деякі експериментальні дані, що були отримані при температурах нижче нормальної температури кипіння  $T_n = 247,07$  К.

Таблиця 3.5 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості R134a, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta$ , %	$\delta\eta_{\text{макс}}$ , %	$\delta\eta_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Набізаде [67]	25	302,87 – 424,45	0,10 – 6,02	0,5	3,0	1,1
Кумагаї [68]	5	273,15 – 313,15	0,29 – 1,02	0,5	2,8	1,5
Олівейра [71]	28	248,23 – 343,15	0,14 – 5,84	0,6	3,4	1,2
Діллер [72]	4	250,00 – 280,00	0,12 – 0,37	2,0	3,1	2,9
Ріпл [51]	13	250,05 – 306,05	0,12 – 0,81	5,0	2,8	1,6
Ассаель [52]	16	273,15 – 333,15	0,95 – 4,20	0,5	3,5	2,2
Хан [73]	16	248,15 – 323,15	0,11 – 1,32	1,0	3,1	1,3
Падуа [74]	3	273,15 – 298,11	0,73 – 3,08	0,6	3,1	2,4
Вільгельм [75]	71	297,27 – 438,48	0,10 – 0,32	0,3	-1,4	0,8
Падуа [76]	2	273,15 – 298,11	0,29 – 0,67	2,0	2,6	2,1
Ассаель [63]	19	283,15 – 333,15	0,14 – 1,23	1,0	3,2	1,8
Шібасакі [77]	84	298,15 – 423,15	0,10 – 5,17	0,3	3,0	1,4
Лассек [57]	69	250,01 – 350,10	0,12 – 2,47	2,4	-2,3	1,4
Олівейра [58]	7	263,74 – 303,32	0,19 – 0,76	2,0	2,4	1,7
Фрьоба [59]	6	253,15 – 303,15	0,13 – 0,77	4,0	2,4	1,3
Весь масив	368	248,15 – 438,48	0,10 – 6,02	–	3,5	1,4

Області параметрів, що охоплені використаними даними, показані на рисунку 3.5. На цьому рисунку дані А. Лассека та співавторів [57] представлені вздовж лінії насичення. Дані [51, 58, 59, 68, 72, 73, 76] та частина даних Ч. Олівейри та В. Вейкхема [71] (15 точок у стані насичення) не показані окремо, так як вони входять до області даних [57].

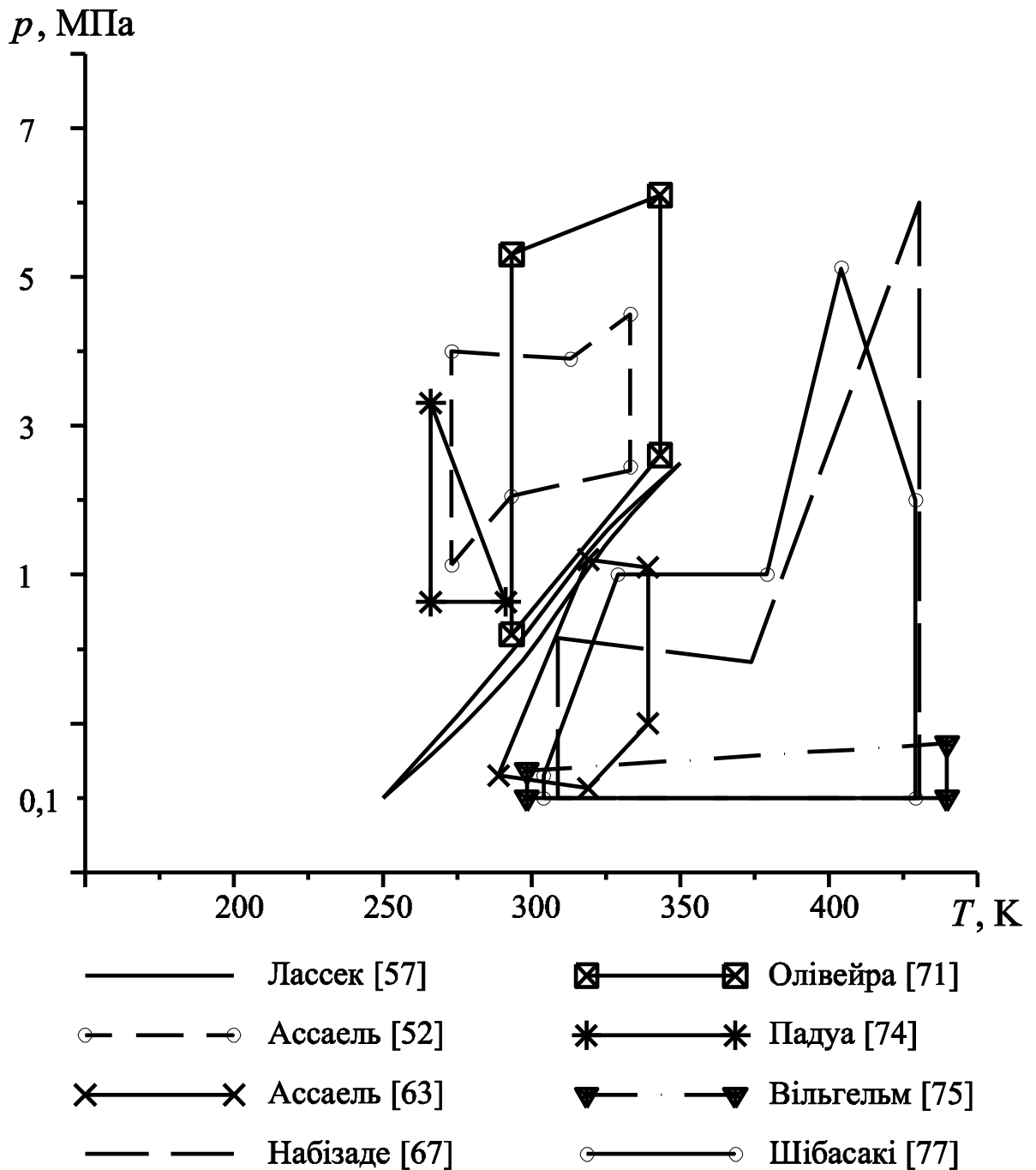


Рис. 3.5 – Області параметрів охоплені, використаними експериментальними даними про в'язкість R134a

Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагенту R134a також має форму (3.4) і складено з використанням методики [116] по дослідним даним, вказаним в таблиці 3.5. Деякі точки були виключені, оскільки вони не узгоджуються з основним масивом даних. Густина R134a розраховувалася за рівнянням стану, яке складено Р. Тільнер-Ротом і Г. Баєром [121].

Для розрахунку в'язкості R134a при атмосферному тиску на основі дослідних даних (4 точки із роботи [67] та 6 із [77]) складено рівняння:

$$\eta_0 = -5,8528 \cdot 10^{-4} + 4,1477 \cdot 10^{-2} \cdot T - 4,8686 \cdot 10^{-6} \cdot T^2. \quad (3.9)$$

Рівняння (3.9) описує використані дані в інтервалі температури від 248 до 439 К із середнім квадратичним відхиленням 0,7 % та максимальним 1,1 %.

Розрахунок густини досліджуваного холодоагенту при атмосферному тиску проводився за рівнянням:

$$\rho_0 = \frac{1,1753 \cdot 10^3}{T} + \frac{2,8049 \cdot 10^4}{T^2}, \quad (3.10)$$

яке описує значення  $\rho_0$  [119] в інтервалі 248 – 439 К із середнім квадратичним відхиленням 0,4 % та максимальним 0,9 %.

У таблиці 3.6 наведені коефіцієнти рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості холодоагенту R134a через змінні температуру та густину. Оцінка точності даного рівняння проводилася зіставленням розрахованих значень в'язкості з експериментальними. На рисунку 3.6 наведена гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості холодоагенту від розрахованих. З рисунка видно, що більшість відхилень знаходиться в межах  $\pm 1$  %. В таблиці 3.5 представлені максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сєр}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих.

Із таблиці 3.5 і рисунка 3.6 видно, що складене рівняння досить точно описує дані про в'язкість холодоагенту R134a в широкій області температури та тиску і може використовуватися при інженерних розрахунках.

Таблиця 3.6 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.4) для розрахунку в'язкості R134a

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$2,2000 \cdot 10^2$	1	2	$-1,2891 \cdot 10^0$	1	3	$1,8416 \cdot 10^{-3}$
2	1	$3,9239 \cdot 10^{-2}$						

Рівняння для розрахунку в'язкості холодоагентів R32, R125 і R134a можуть бути використані при складанні рівнянь для в'язкості їх бінарних сумішей. Також з їх допомогою розраховані дані про в'язкість, що включені до таблиць транспортних властивостей холодоагентів R32, R125 і R134a та їх сумішей, які наведені в додатках до дисертації.

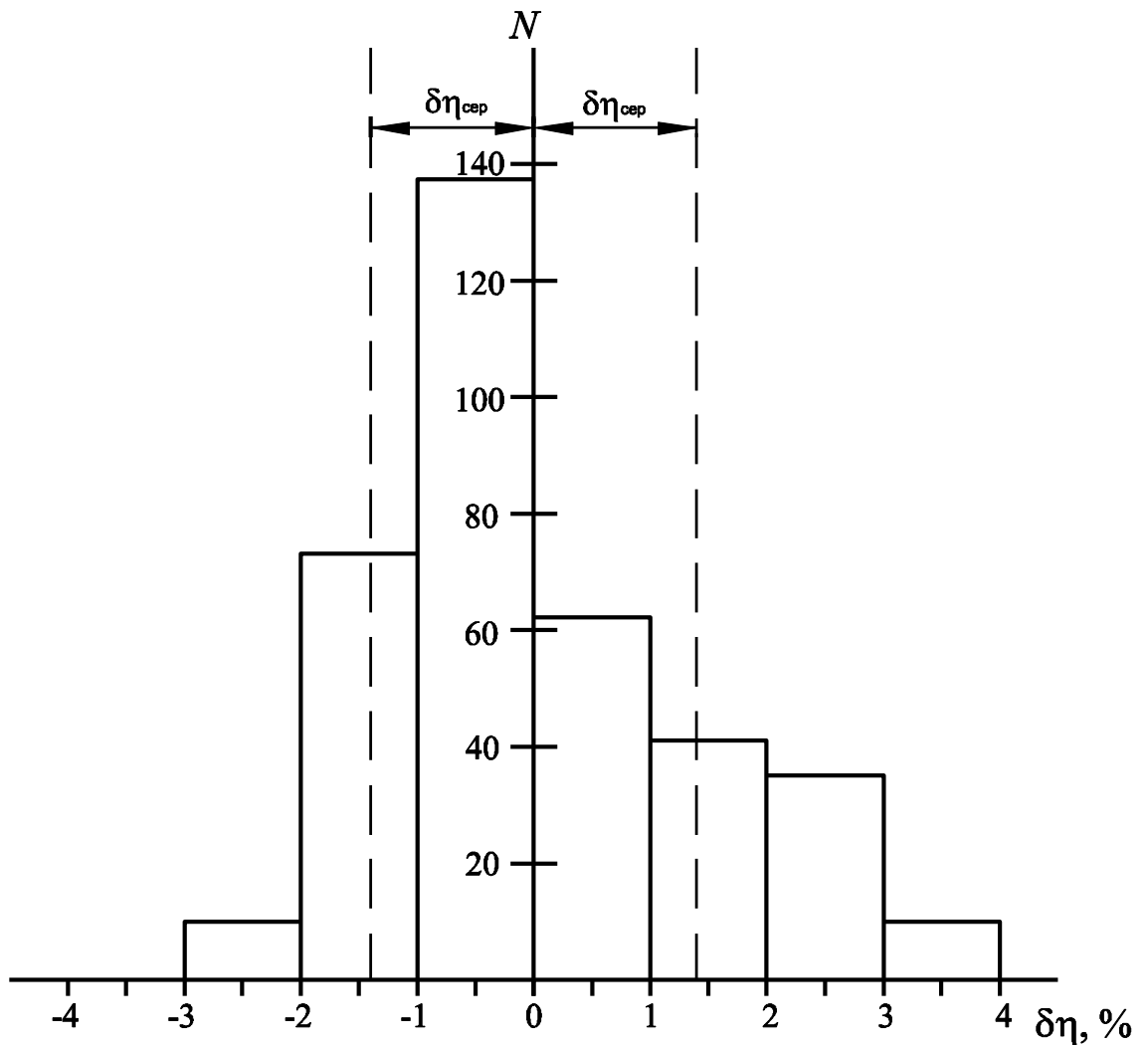


Рис. 3.6 – Гістограма відхилень  $\delta\eta$  дослідних значень в'язкості від розрахованих для R134a

**3.1.4** При розрахунках різноманітних процесів частіше всього у якості вихідних параметрів задаються температура та тиск. В той же час існуючі рівняння для в'язкості в основному представлені через незалежні змінні температуру та густину. В комплексі з такими рівняннями необхідно мати рівняння стану для визначення густини. Такі рівняння мають високу степінь відносно густини, тому визначення цієї властивості при заданих  $T$  і  $p$  проводиться ітераційними методами за допомогою ЕОМ. Враховуючи цю обставину доцільно мати також **рівняння для оперативного розрахунку в'язкості через незалежні змінні температуру та тиск.**

На основі експериментальних даних для трьох холодоагентів складені рівняння, які дозволяють розраховувати в'язкість газу безпосередньо в залежності від температури та тиску в інтервалі температури від 298 до 423 К при тиску до 5,5 МПа для R32, до 3,7 МПа для R125 і до 3,9 МПа для R134a. Ці рівняння, по аналогії із рівнянням отриманим в [122], мають вигляд:

$$\eta(p, T) = \eta(0,1, T) + \sum_{i=1}^n a_i (p - 0,1)^i + \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m b_j (p - 0,1)^j, \quad (3.11)$$

де розмірність тиску – МПа, температури – К.

Рівняння (3.11) задовольняє граничній умові, так як вільні члени поліномів від  $p-0,1$  дорівнюють нулю. В'язкість холодоагентів R32, R125 і R134a при атмосферному тиску розраховується за допомогою рівнянь (3.5), (3.7) і (3.9) відповідно.

На підставі даних [54, 65, 77, 123] методом найменших квадратів визначені коефіцієнти рівнянь у формі (3.11) для в'язкості трьох холодоагентів [124]. У таблиці 3.7 наведені ці коефіцієнти, вказані інтервали параметрів, в яких діють рівняння, максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сеп}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих. Із таблиці видно, що рівняння задовільно описує дослідні дані та може бути рекомендовано для використання.

Таблиця 3.7 – Коефіцієнти рівняння (3.11) для розрахунку в'язкості R32, R125 і R134a та відхилення експериментальних даних від розрахованих

Коефіцієнт	Речовина		
	R32	R125	R134a
$a_1$	3,513	-0,298	0
$a_2$	-1,293	0	0
$a_3$	$1,500 \cdot 10^{-2}$	0	0
$a_4$	$2,754 \cdot 10^{-3}$	0	0
$b_1$	$-1,234 \cdot 10^3$	$4,087 \cdot 10^2$	$-1,124 \cdot 10^3$
$b_2$	$4,518 \cdot 10^2$	$-7,892 \cdot 10^2$	$3,806 \cdot 10^3$
$b_3$	0	$8,543 \cdot 10^2$	$-4,662 \cdot 10^3$
$b_4$	0	$-3,250 \cdot 10^2$	$2,636 \cdot 10^3$
$b_5$	0	$4,259 \cdot 10$	$-6,856 \cdot 10^2$
$b_6$	0	0	$6,692 \cdot 10$
$T, K$	298 – 423	298 – 423	298 – 423
$p, MPa$	0,1 – 5,5	0,1 – 3,7	0,1 – 3,9
$\delta\eta_{\max}, \%$	3,5	3,8	3,2
$\delta\eta_{\text{сер}}, \%$	1,1	1,3	1,1

### 3.2 Рівняння для розрахунку теплопровідності R32, R125 і R134a

Численні рівняння для теплопровідності та їх аналіз наведені у роботах [43, 111, 114, 125]. В основному для опису теплопровідності холодоагентів та інших речовин в широкій області параметрів використовуються рівняння, які представлені через незалежні змінні температуру та густину. Сумісно з

такими рівняннями необхідно використовувати рівняння стану для розрахунку густини при заданих значеннях температури і тиску.

### 3.2.1 Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагенту R32

складені різними авторами на підставі своїх дослідних даних [81, 84, 85, 87] і є локальними. В цій роботі складене єдине рівняння для розрахунку теплопровідності [126], яке описує дослідні дані для R32 в інтервалі температури від 223 до 466 К при тиску до 50 МПа. В таблиці 3.8 перелічені  $T$ ,  $p$ ,  $\lambda$ -дані, використані при складанні згаданого рівняння, похибки даних  $\delta\lambda$  за оцінкою авторів і відхилення експериментальних даних від розрахованих. Дані, що були отримані при температурах нижче нормальної температури кипіння  $T_n = 221,49$  К, не використовувалися.

Таблиця 3.8 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності R32, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda$ , %	$\delta\lambda_{\text{макс}}$ , %	$\delta\lambda_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Пападакі [80]	4	229,42 – 256,70	0,22 – 0,46	1,0	–1,9	1,1
Танака [81]	22	283,15 – 333,15	0,10 – 2,62	1,0	–2,9	1,7
Ро [83]	17	223,15 – 323,15	2,00 – 20,00	2,0	–2,2	1,2
Ята [84]	4	253,57 – 284,99	9,40 – 21,30	1,0	–3,0	2,6
Гросс [85]	36	233,45 – 344,95	0,10 – 6,20	2,0	–3,0	1,6
Ро [86]	21	232,55 – 322,95	2,00 – 20,00	2,0	1,8	0,8
Сун [87]	3	296,41 – 305,31	1,11 – 1,47	3,0	–1,6	1,4
Ле Неїндре [89]	542	298,65 – 465,25	0,10 – 50,00	1,5	–3,0	1,4
Весь масив	649	223,15 – 465,25	0,10 – 50,00	–	–3,0	1,4

Області параметрів, що охоплені використаними даними, показані на рисунку 3.7. На цьому рисунку дані М. Пападакі та В. Вейкхема [80] і Л. Суна зі співавторами [87] розташовані вздовж лінії насичення. Дані [86] не показані окремо, так як вони охоплені областю даних [83].

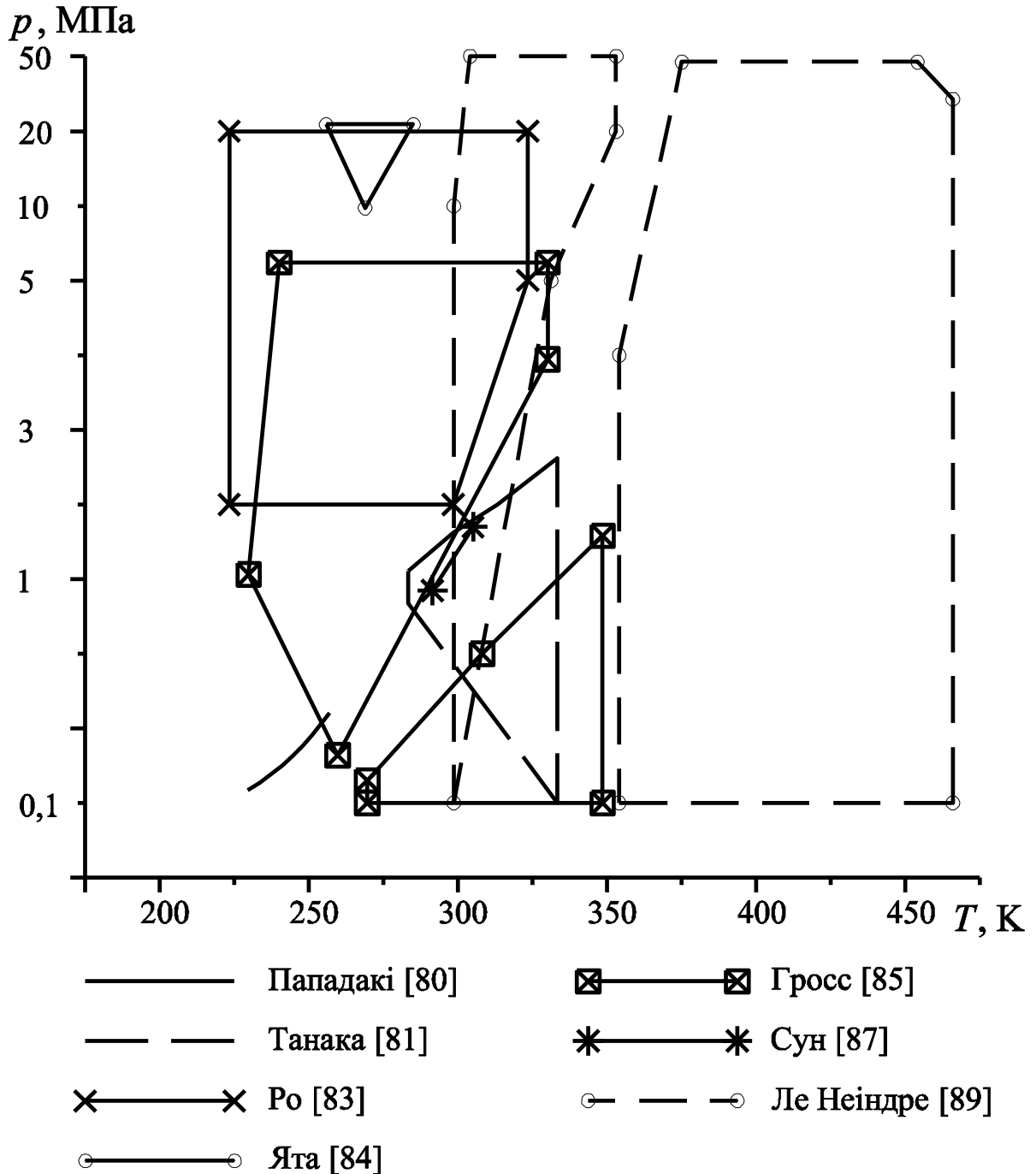


Рис. 3.7 – Області параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про теплопровідність R32

Рівняння для розрахунку теплопровідності R32 складено у формі:

$$\lambda - \lambda_0 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{a_{i1}}{T} + a_{i2} + a_{i3} \cdot T \right) (\rho - \rho_0)^i, \quad (3.12)$$

де індексом «0» позначені властивості при атмосферному тиску.

Розмірність теплопровідності – мВт/(м·К), густини – кг/м<sup>3</sup>, температури – К.

Рівняння у формі (3.12) не описує різке зростання теплопровідності в критичній області, однак у звичайних холодильних установках процеси в цій області не протікають. Це рівняння задовольняє граничній умові, так як при атмосферному тиску обидві його частини стають рівними нулю. Густина R32 розраховувалася за рівнянням стану, складеним О. А. Вассерманом і Д. В. Фомінським [118].

Також на основі експериментальних даних (4 точки з роботи [81] та 38 з [89]) складено рівняння для розрахунку теплопровідності R32 при атмосферному тиску:

$$\lambda_0 = 4,3939 \cdot 10^{-2} \cdot T - 9,1784 \cdot 10^{-5} \cdot T^2 + 2,8945 \cdot 10^{-7} \cdot T^3. \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13) описує використані дані в інтервалі температури від 223 до 466 К із середнім квадратичним відхиленням 0,6 % та максимальним 2,3 %.

Густина досліджуваного холодоагенту при атмосферному тиску розраховувалася в інтервалі 223 – 466 К за допомогою рівняння (3.6).

Коефіцієнти рівняння (3.12) для розрахунку теплопровідності R32 в широкій області параметрів визначені методом найменших квадратів на підставі експериментальних даних, вказаних в таблиці 3.8. При цьому були виключені деякі дослідні точки, що не узгоджувалися з основним масивом даних, оскільки відхилення для них перевищували потроєне середнє квадратичне відхилення для всього масиву. Оптимізація числа коефіцієнтів проводилася по методиці [116]; обрані коефіцієнти наведені в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.12) для розрахунку теплопровідності R32

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$-1,2643 \cdot 10^1$	1	2	$1,2832 \cdot 10^{-1}$	1	3	$-1,0986 \cdot 10^{-4}$
2	1	$1,1076 \cdot 10^{-2}$	2	2	$3,6320 \cdot 10^{-5}$			

На рисунку 3.8 наведена гістограма відхилень  $\delta\lambda$  дослідних значень теплопровідності холодоагенту від розрахованих; розподіл відхилень достатньо близький до нормального. В таблиці 3.8 представлені максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сєр}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих.

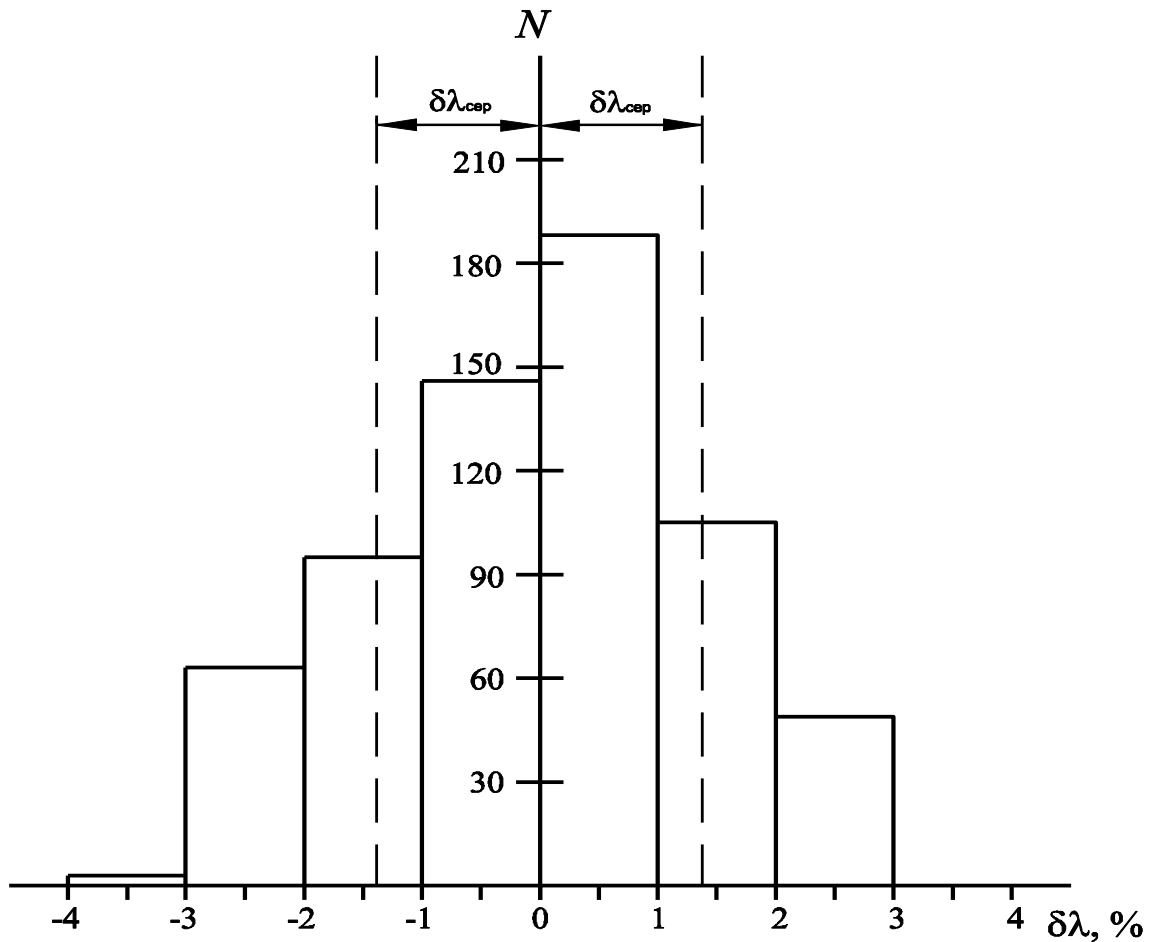


Рис. 3.8 – Гістограма відхилень  $\delta\lambda$  дослідних значень теплопровідності від розрахованих для R32

Із таблиці 3.8 і гістограми видно, що рівняння (3.12) надійно описує дані про теплопровідність холодоагенту R32 при значеннях температури та тиску, що перевищують характерні для холодильних установок. Це рівняння може бути рекомендовано для використання при інженерних розрахунках.

### 3.2.2 Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагенту R125

отримані багатьма авторами. Більшість цих рівнянь є локальними, але Б. Ле Неїндре та Я. Гаррабос [94] представили єдине рівняння для теплопровідності, форма якого є громіздкою. В дисертації одержано єдине рівняння для розрахунку теплопровідності R125 через змінні температуру та густину [126], яке діє в інтервалі температури від 228 до 513 К при тиску до 53 МПа. В таблиці 3.10 перелічені  $T, p, \lambda$ -дані, використані при складанні цього рівняння, похибки даних  $\delta\lambda$  за оцінкою авторів і відхилення експериментальних даних від розрахованих. При складанні рівняння не використовувалися деякі експериментальні дані, що були отримані при температурах нижче нормальної температури кипіння  $T_n = 225,06$  К.

Таблиця 3.10 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності R125, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda$ , %	$\delta\lambda_{\text{макс}}$ , %	$\delta\lambda_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Вільсон [60]	3	238,71 – 333,15	0,10 – 1,38	2,0	–2,8	2,4
Пападакі [80]	2	259,95 – 306,03	0,51 – 1,74	1,0	–2,8	2,5
Цветков [90]	10	235,19 – 290,02	0,17 – 1,11	3,0	–1,8	1,1
Танака [81]	24	283,15 – 333,15	0,50 – 1,80	1,0	–3,2	2,1
Цветков [91]	8	227,79 – 321,30	0,18 – 4,08	3,0	3,3	2,8
Ассаель [82]	5	273,48 – 313,46	11,05 – 16,03	0,5	–3,2	2,9

Продовження таблиці 3.10

Ята [84]	10	257,05 – 304,36	10,00 – 30,90	1,0	–3,1	1,6
Гао [92]	11	233,30 – 333,90	20,00 – 30,00	0,5	–2,9	1,4
Гросс [85]	33	253,45 – 323,45	0,33 – 7,03	2,0	–1,9	1,0
Ассаель [93]	17	272,90 – 313,11	0,16 – 1,13	1,0	3,0	1,1
Ро [86]	9	231,25 – 299,65	5,00 – 20,00	2,0	–3,2	2,0
Сун [87]	9	264,38 – 303,35	0,34 – 1,20	3,0	–2,5	1,7
Ле Неїндре [94]	520	297,27 – 513,21	0,10 – 53,00	1,5	–3,4	1,4
Весь масив	661	227,79 – 513,21	0,10 – 53,00	–	–3,4	1,5

Області параметрів, що охоплені використаними даними, показані на рисунку 3.9. Дані Л. Вільсона та співавторів [60] одержані поблизу лінії насичення та охоплюють області даних [80, 90], які не показані окремо. Дані [86] охоплені областю даних [92], а дані [87, 93] – областю даних [85].

Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагенту R125 також має форму (3.12) і складено з використанням методики [116] по дослідним даним, вказаним в таблиці 3.10. Деякі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних, були виключені. Густина R125 розраховувалася за допомогою рівняння стану [118].

Для розрахунку теплопровідності R125 при атмосферному тиску на основі дослідних даних (44 точки з робіт [60, 81, 90, 94]) складено рівняння:

$$\lambda_0 = 2,3743 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 3,2840 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 + 2,0156 \cdot 10^{-10} \cdot T^4. \quad (3.14)$$

Рівняння (3.14) описує використані дані в інтервалі температури від 225 до 513 К із середнім квадратичним відхиленням 0,2 % та максимальним –0,6 %.

Розрахунок густини холодоагенту при атмосферному тиску в інтервалі 225 – 513 К проводився за допомогою рівняння (3.8).

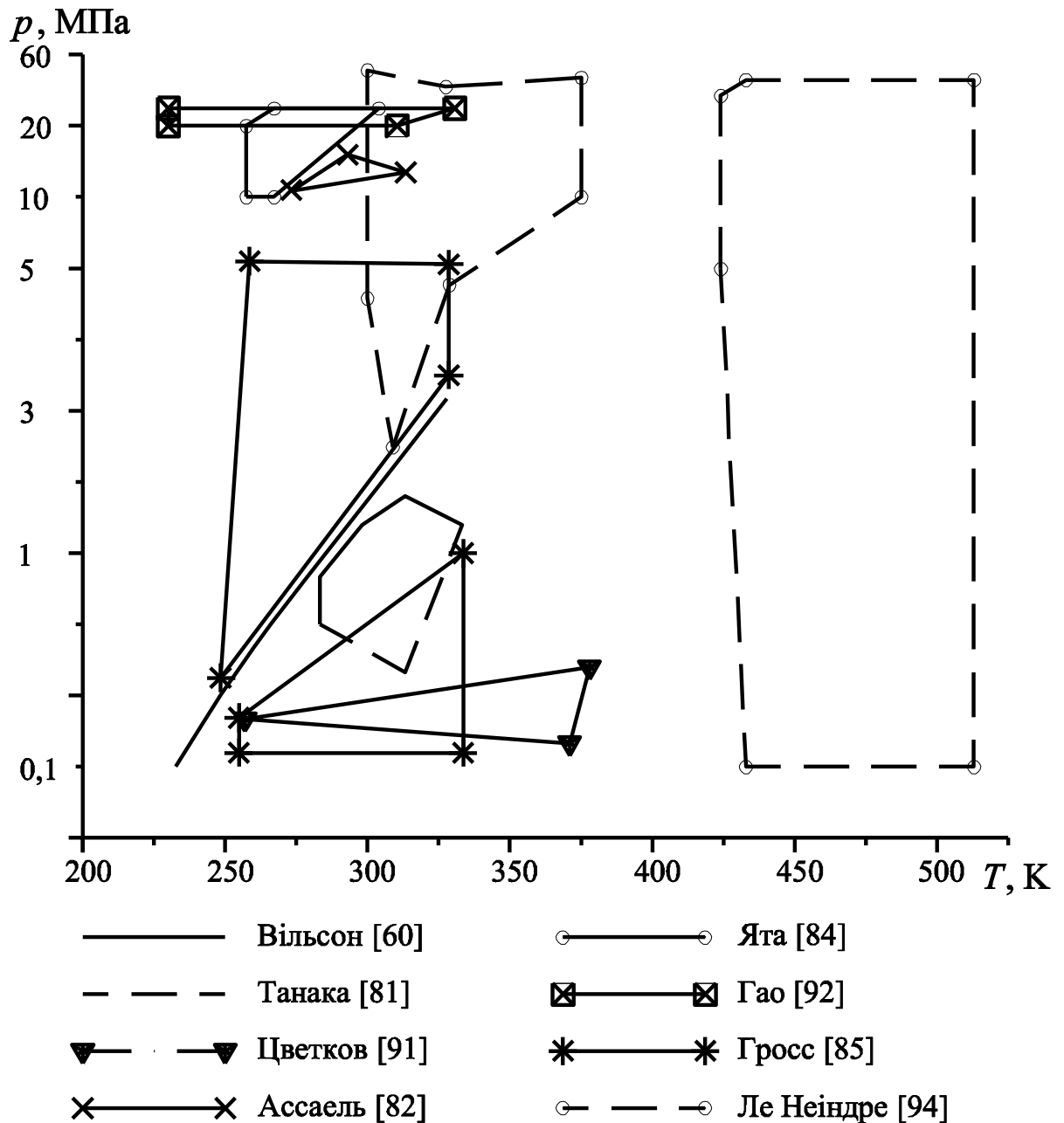


Рис. 3.9 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про теплопровідність R125

У таблиці 3.11 наведені коефіцієнти рівняння (3.12) для розрахунку теплопровідності R125. На рисунку 3.10 наведена гістограма відхилень  $\delta\lambda$  дослідних значень теплопровідності від розрахованих; розподіл відхилень близький до нормального. В таблиці 3.10 представлені максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сер}}$  відхилення дослідних даних від розрахованих. Значення відхилень свідчать, що складене єдине рівняння досить точно

описує дані про теплопровідність холодоагенту R125 в широкій області параметрів, що дозволяє рекомендувати його для використання.

Таблиця 3.11 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.12) для розрахунку теплопровідності R125

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$-9,3369 \cdot 10^0$	1	2	$5,7785 \cdot 10^{-2}$	1	3	$-4,8028 \cdot 10^{-5}$
2	1	$7,6813 \cdot 10^{-3}$						

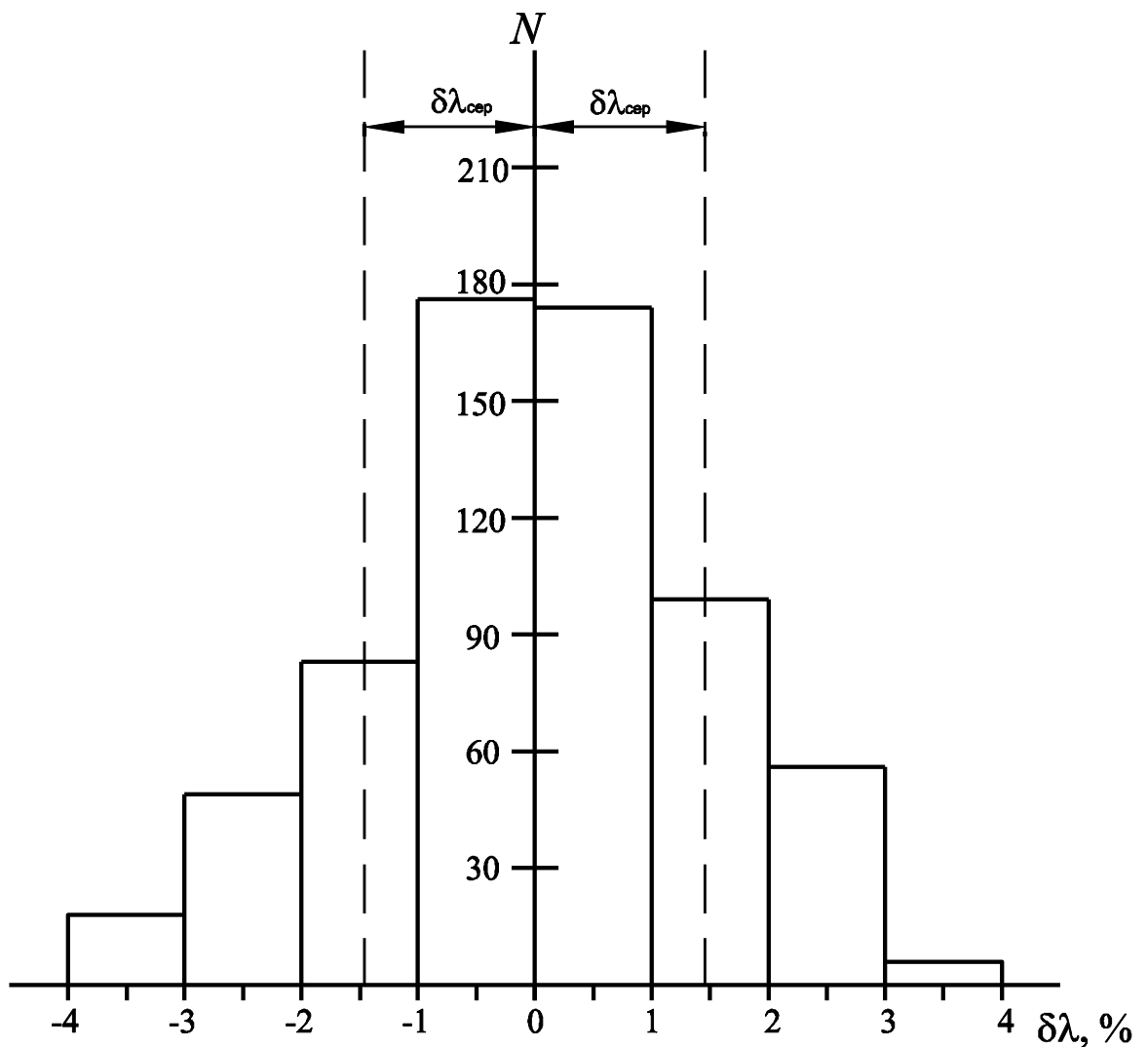


Рис. 3.10 – Гістограма відхилень  $\delta\lambda$  дослідних значень теплопровідності від розрахованих для R125

### 3.2.3 Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагенту R134a

отримані різними авторами, є локальними. В цій роботі одержано єдине рівняння [120] для розрахунку теплопровідності R134a, яке описує дослідні дані в інтервалі температури від 248 до 533 К при тиску до 60,9 МПа. В таблиці 3.12 перелічені  $T, p, \lambda$ -дані, використані при складанні рівняння, вказані авторами похибки даних  $\delta\lambda$  і відхилення експериментальних даних від розрахованих. Дані, отримані при температурах нижче нормальної температури кипіння  $T_n = 247,07$  К, не використовувалися.

Таблиця 3.12 – Перелік експериментальних даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності R134a, і відомості про точність їх апроксимації

Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda$ , %	$\delta\lambda_{\text{макс}}$ , %	$\delta\lambda_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Танака [98]	10	313,15 – 353,15	0,10 – 1,95	2,0	–3,1	2,1
Лассек [99]	42	252,00 – 393,00	0,10 – 37,26	3,8	3,2	1,7
Гросс [100]	72	253,25 – 363,15	0,96 – 60,97	2,0	3,0	1,8
Перкінс [101]	52	262,51 – 303,28	0,70 – 5,18	1,0	–2,0	1,2
Лавренченко [69]	37	253,09 – 400,47	0,10 – 8,94	1,5	–3,1	1,9
Ассаель [102]	26	252,97 – 333,20	2,80 – 22,43	0,5	3,0	1,8
Пападакі [103]	7	252,30 – 306,80	0,13 – 0,85	1,0	–1,8	1,0
Ямамото [104]	5	283,15 – 343,15	0,10 – 0,20	1,0	–3,2	2,6
Цветков [90]	6	248,10 – 290,06	0,11 – 0,52	3,0	–2,0	1,7
Цветков [105]	18	250,62 – 439,51	0,10 – 0,25	3,0	2,9	1,3
Хаммершмідт [106]	4	303,00 – 423,00	0,10	2,0	2,1	1,2
Ро [83]	12	248,15 – 323,15	2,00 – 20,00	2,0	–2,5	1,6

Продовження таблиці 3.12

Ассаель [93]	11	273,15 – 333,15	0,13 – 0,45	1,0	–2,5	1,7
Гурова [107]	24	249,19 – 292,88	0,38 – 18,92	0,5	3,0	1,4
Ле Неїндре [108]	191	299,23 – 532,96	0,10 – 35,00	1,5	3,2	1,8
Ле Неїндре [109]	116	345,58 – 455,92	0,10 – 18,50	3,0	3,2	1,6
Багінський [110]	7	295,85	2,50 – 3,59	1,5	–3,0	2,8
Весь масив	640	248,10 – 532,96	0,10 – 60,97	–	3,2	1,7

Області параметрів, що охоплені використаними експериментальними даними, показані на рисунку 3.11. На ньому дані М. Пападакі та співавторів [103] отримані у стані насичення та охоплюють аналогічні дані [90]. Дані [98] не показані окремо, оскільки входять до області даних [69]. Дані [93, 101, 104, 105, 110] охоплені областю даних [99], дані [83, 107] – областю даних [102], а дані [106] – областю даних [108].

Рівняння для розрахунку теплопровідності R134a складено у формі (3.12) по дослідним даним, вказаним в таблиці 3.12. Деякі точки були виключені, так як вони не узгоджувалися з основним масивом даних. Розрахунок густини R134a проводився за допомогою рівняння стану Р. Тільнера-Рота та Г. Баєра [121].

Для розрахунку теплопровідності холодоагенту при атмосферному тиску на підставі 58 значень дослідних даних з робіт [69, 98, 104 – 106, 108, 109] складено рівняння:

$$\lambda_0 = -4,9949 \cdot 10^{-3} \cdot T + 2,2339 \cdot 10^{-4} \cdot T^2 - 1,9038 \cdot 10^{-7} \cdot T^3. \quad (3.15)$$

Рівняння (3.15) описує використані дані в інтервалі температури від 248 до 533 К із середнім квадратичним відхиленням 0,5 % та максимальним –2,2 %.

Густина досліджуваного холодоагенту при атмосферному тиску в інтервалі 248 – 533 К розраховувалася за допомогою рівняння (3.10).



що рівняння (3.12) із задовільною точністю описує дані про теплопровідність холодоагенту R134a в широкій області параметрів.

Таблиця 3.13 – Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (3.12) для розрахунку теплопровідності R134a

$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$	$i$	$j$	$a_{ij}$
1	1	$1,9555 \cdot 10^1$	1	2	$-2,2361 \cdot 10^{-2}$	1	3	$3,9502 \cdot 10^{-5}$
2	1	$9,8609 \cdot 10^{-4}$						

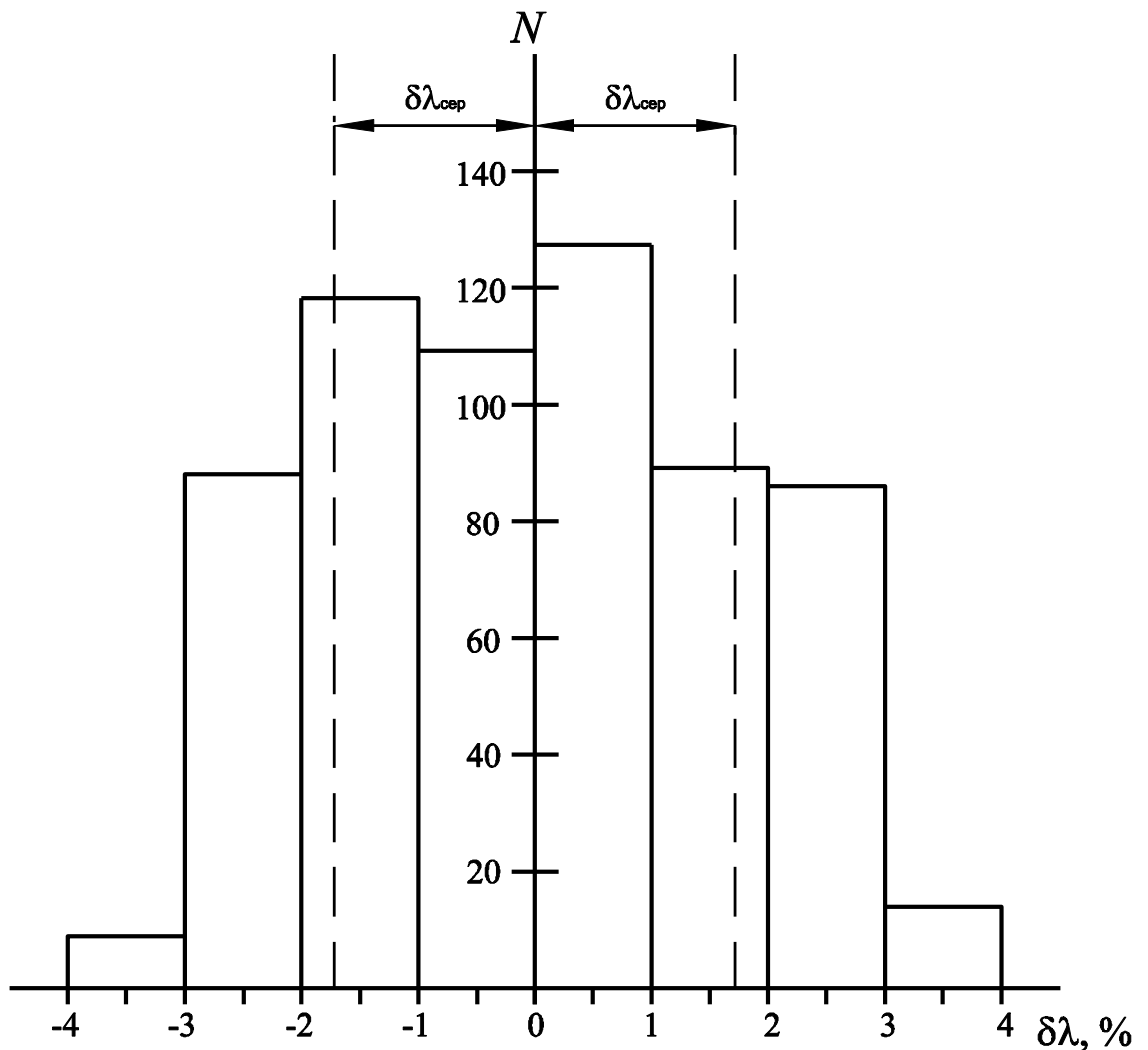


Рис. 3.12 – Гістограма відхилень  $\delta\lambda$  дослідних значень теплопровідності від розрахованих для R134a

Рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a увійшли в подальшому до складу рівнянь для теплопровідності їх бінарних сумішей. Також вони використані для розрахунку даних про теплопровідність, що включені до таблиць транспортних властивостей цих холодоагентів та їх сумішей, які наведені в додатках до дисертації.

**3.2.4** Існуючі рівняння для розрахунку теплопровідності в основному представлені через незалежні змінні температуру та густину. Як зазначено вище, це потребує використання рівняння стану для визначення ітераційними методами густини при заданих значеннях температури та тиску. Тому для практичного використання бажано мати також **рівняння для розрахунку теплопровідності через незалежні змінні температуру та тиск.**

На основі експериментальних даних для досліджуваних холодоагентів складені рівняння, які дозволяють розраховувати теплопровідність газу безпосередньо в залежності від температури та тиску в інтервалах від 283 до 434 К при тиску до 5,0 МПа для R32, від 264 до 354 К при тиску до 2,8 МПа для R125 і від 293 до 515 К при тиску до 2,8 МПа для R134a. Ці рівняння складені у формі, аналогічній запропонованій у роботах [127, 128]:

$$\lambda(p, T) = \lambda(0,1, T) + \frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_i (T \cdot (p - 0,1))^i, \quad (3.16)$$

де розмірність тиску – МПа, температури – К.

Рівняння (3.16) задовольняє граничній умові, так як вільний член поліному від  $T \cdot (p - 0,1)$  дорівнює нулю. Теплопровідність R32, R125 і R134a при атмосферному тиску розраховується за рівняннями (3.13), (3.14) і (3.15).

На підставі даних [81, 85, 87, 89, 93, 98 – 100, 104, 105, 109] методом найменших квадратів визначені коефіцієнти рівнянь у формі (3.16) для теплопровідності вказаних холодоагентів [124]. У таблиці 3.14 наведені коефіцієнти цих рівнянь, інтервали параметрів, в яких діють рівняння, максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  та середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих. Із таблиці видно, що рівняння

має задовільну точність і може використовуватися для розрахунку теплопровідності газу.

Таблиця 3.14 – Коефіцієнти рівняння (3.16) для розрахунку теплопровідності R32, R125 і R134a та відхилення експериментальних даних від розрахованих

Коефіцієнт	Речовина		
	R32	R125	R134a
$a_1$	0,289	0,339	-0,925
$a_2$	$1,560 \cdot 10^{-3}$	$7,397 \cdot 10^{-3}$	0,036
$a_3$	$-1,335 \cdot 10^{-6}$	$-2,851 \cdot 10^{-5}$	$-1,528 \cdot 10^{-4}$
$a_4$	$3,442 \cdot 10^{-10}$	$5,336 \cdot 10^{-8}$	$2,214 \cdot 10^{-7}$
$a_5$	0	$-3,184 \cdot 10^{-11}$	$-1,022 \cdot 10^{-10}$
$T, K$	283 – 434	264 – 354	293 – 515
$p, MPa$	0,1 – 5,0	0,1 – 2,8	0,1 – 2,8
$\delta\lambda_{\text{макс}}, \%$	2,8	2,6	3,4
$\delta\lambda_{\text{сер}}, \%$	1,3	1,2	1,5

### 3.3 Висновки

1. Аналіз переваг та недоліків рівнянь для транспортних властивостей показує, що більш доцільним є складання єдиних рівнянь з використанням сучасних методів статистичної обробки дослідних даних.

2. Складені рівняння для розрахунку в'язкості холодоагентів описують експериментальні дані в інтервалах: 232 – 423 К при тиску до 9,8 МПа для R32, 230 – 423 К до 10,1 МПа для R125 і 248 – 439 К до 6,0 МПа для R134a.

3. Отримані рівняння для розрахунку теплопровідності холодоагентів описують експериментальні дані в інтервалах, що ширше необхідних для холодильних установок: 223 – 466 К при тиску до 50 МПа для R32, 228 – 513 К до 53 МПа для R125 і 248 – 533 К до 60,9 МПа для R134a.

4. Єдині рівняння для в'язкості і теплопровідності холодоагентів R32, R125 і R134a можуть бути використані при розрахунку цих властивостей та при складанні відповідних рівнянь для їх бінарних сумішей.

5. Також складені локальні рівняння для оперативного розрахунку в'язкості і теплопровідності трьох холодоагентів в газоподібному стані через незалежні змінні температуру та тиск.

## 4 РІВНЯННЯ ДЛЯ В'ЯЗКОСТІ І ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ СУМІШЕЙ R32/R125, R32/R134a І R125/R134a

У даному розділі приведено огляд експериментальних даних про в'язкість і теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a. На підставі цих даних складені рівняння для розрахунку в'язкості та теплопровідності досліджуваних сумішей з використанням відповідних рівнянь для їх компонентів.

### 4.1 Огляд експериментальних даних про в'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a

Незважаючи на все ширше використання сумішей альтернативних холодоагентів у промисловості, кількість досліджень їх транспортних властивостей залишається обмеженою. Крім того, наявні експериментальні дані малочисельні, а області параметрів, які ними охоплені, є неповними і мають розриви, зокрема по густині. В той же час для проектування та експлуатації холодильних установок необхідні надійні дані про в'язкість і теплопровідність таких сумішей у відповідній області параметрів стану. Ці властивості зручно розраховувати за допомогою рівнянь, складених на підставі дослідних даних. При цьому задача складання таких рівнянь з використанням обмеженої кількості експериментальних даних ускладнюється і часто не дозволяє описати широку область параметрів.

Перелік експериментальних даних про в'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a приводиться у таблицях 4.1 – 4.3; символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. У другому стовпчику вказаний тільки перший з авторів публікації.

Х. Набізаде та Ф. Маїнгер [129] наводять дані про в'язкість суміші R32/R125 з мольною долею першого компонента 0,6976, тобто холодоагенту R410A. Вимірювання проводилися віскозиметром з диском, що коливається.

Апарат був калібрований азотом для визначення корегуючого фактору. Чистота зразків суміші була 99,72 %. Похибка вимірювань в'язкості складала 0,5 % при атмосферному тиску та 1 % при підвищеному тиску.

Таблиця 4.1 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R32/R125

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1999	Набізаде [129]	9	298,98 – 397,39	0,10	2,24 – 3,00	0,6976	газ
		36	298,15 – 324,15	0,10 – 3,11	2,75 – 142,40	0,6976	газ
		6	221,65 – 324,15	0,10 – 3,15	4,16 – 147,66	0,6976	насичена пара
2000	Геллер [130]	6	253,15 – 338,15	1,78 – 4,74	803,14 – 1261,90	0,6976	насичена рідина
		9	253,13 – 331,95	0,39 – 3,73	14,98 – 190,89	0,6976	насичена пара
		9	353,15	0,10 – 13,19	2,51 – 903,22	0,6976	газ
2001	Йокояма [131]	357	298,15 – 423,15	0,10 – 7,72	2,00 – 346,33	0,2502; 0,5002; 0,7525	газ

В. З. Геллер та співавтори [130] виміряли в'язкість R410A методом капіляру. В апараті використовувалися капілярні трубки діаметром 0,076 та 0,92 мм з довжиною 50 мм. Температура вимірювалася термометром опору з похибкою 0,01 К, а тиск – цифровим датчиком з похибкою 1 КПа. Оцінені авторами похибки вимірювання в'язкості не перевищували 1,2 %.

Ч. Йокояма та співавтори [131] представили численні результати вимірювання в'язкості суміші R32/R125 трьох складів на шести ізотермах. Вимірювання проводилися віскозиметром Максвеллівського типу з диском, що коливається. Постійна приладу визначалася за допомогою азоту. Чистота

зразків компонентів для приготування сумішей складала 99,9 %. Неточності вимірювань температури, тиску та густини були 0,01 К, 0,5 МПа і 0,05 кг/м<sup>3</sup>. Похибка вимірювання в'язкості за оцінкою авторів дорівнювала 0,4 %.

Загалом експериментальні дані про в'язкість суміші R32/R125 охоплюють інтервал температури від 222 до 423 К при тиску до 13,19 МПа.

Таблиця 4.2 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R32/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1993	Ріпл [51]	15	252,05 – 304,55	1,16 – 1,86	1090,00 – 1274,00	0,481 – 0,495	насичена рідина
2001	Лассек [132]	77	247,70 – 335,10	0,24 – 2,34	981,03 – 1324,91	0,235 – 0,297	насичена рідина
		71	246,07 – 325,04	0,29 – 2,62	931,16 – 1237,78	0,691 – 0,699	насичена рідина
2004	Йокояма [133]	329	298,15 – 423,15	0,10 – 7,56	1,87 – 308,30	0,2502; 0,4760; 0,7500	газ

Дані Д. Ріпла та О. Матара [51] одержані за допомогою віскозиметра капілярного типу, калібрування якого проводилося ацетоном, толуолом і метанолом. Чистота зразків холодоагентів для суміші була перевірена хроматографічним аналізом і дорівнювала 99,98 %. Неточність вимірювання температури становила 0,2 К, а в'язкості – від 3 до 5 %.

А. Лассек та співавтори [132] проводили вимірювання гравітаційним віскозиметром закритого типу з прямим вертикальним капіляром. Крок вимірювань становив 5 К з чотирікратним повторенням для кожної температури. Чистота зразків холодоагентів для приготування суміші була проаналізована хроматографом і становила 99,9 % для R32 і 99,43 % для R134a. Максимальна неточність вимірювань в'язкості дорівнювала 2,4 %.

Ч. Йокояма та співавтори [133] вимірювали в'язкість суміші R32/R134a трьох складів на шести ізотермах. Використовувався віскозиметр Максвеллівського типу з диском, що коливається. Постійна приладу визначалася за допомогою азоту. Чистота зразків компонентів для приготування сумішей складала 99,9 %. Неточності вимірювань температури та тиску були 0,01 К і 0,5 КПа. Похибка визначення в'язкості за оцінкою авторів не перевищувала 0,3 %.

Масив дослідних даних про в'язкість суміші R32/R134a охоплює інтервал температури від 246 до 423 К при тиску до 7,56 МПа.

Таблиця 4.3 – Перелік експериментальних даних про в'язкість R125/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1993	Ріпл [51]	15	251,83 – 311,04	1,21 – 2,17	1155,00 – 1396,00	0,478 – 0,493	насичена рідина
2000	Йокояма [134]	340	298,15 – 423,15	0,10 – 6,62	3,09 – 477,87	0,2508; 0,5001; 0,7510	газ
2001	Лассек [132]	79	249,74 – 345,11	0,52 – 2,75	946,86 – 1389,77	0,279 – 0,297	насичена рідина
		77	248,85 – 335,14	0,60 – 2,81	955,76 – 1414,01	0,678 – 0,696	насичена рідина

Д. Ріпл та О. Матар [51] використовували віскозиметр капілярного типу, калібрований за допомогою ацетону, толуолу і метанолу. Чистота зразків холодоагентів для суміші була перевірена хроматографічним аналізом та дорівнювала 99,8 % для R125 і 99,98 % для R134a. Неточність вимірювання температури становила 0,2 К, а в'язкості – від 3 до 5 %.

Ч. Йокояма та співавтори [134] досліджували в'язкість суміші R125/R134a трьох складів на шести ізотермах. Вимірювання проводилися віскозиметром Максвеллівського типу з диском, що коливається. Постійна

приладу визначалася за допомогою азоту. Чистота зразків компонентів для приготування сумішей складала 99,9 %. Неточності вимірювань температури, тиску та густини були 0,01 К, 0,5 КПа і 0,05 кг/м<sup>3</sup>. Похибка значень в'язкості суміші за оцінкою авторів була менше 0,3 %.

А. Лассек та співавтори [132] проводили вимірювання гравітаційним віскозиметром закритого типу з прямим вертикальним капіляром. Крок вимірювань становив 5 К з чотирикратним повторенням для кожної температури. Чистота зразків холодоагентів для приготування суміші була проаналізована хроматографом і становила 99,9 % для R125 і 99,43 % для R134a. Похибка вимірювань в'язкості дорівнювала 2,2 %.

В цілому експериментальні дані про в'язкість суміші R125/R134a представлені в інтервалі температури від 248 до 423 К при тиску до 6,62 МПа. На підставі накопичених дослідних даних для трьох сумішей можна скласти рівняння для розрахунку їх в'язкості.

#### **4.2 Огляд експериментальних даних про теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a**

Перелік експериментальних даних про теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a приводиться у таблицях 4.4 – 4.6; символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. У другому стовпчику вказаний тільки перший з авторів публікації.

Дані Я. Танаки та співавторів [81] отримані для чотирьох складів суміші R32/R125 апаратом з нагрітим дротом. У якості нагрівних елементів, що компенсували кінцеві ефекти, виступали два платинові дроти діаметром 5 мкм та 50 і 25 мм довжиною. Чистота зразків компонентів для приготування сумішей складала 99,99 % для R32 та 99,8 % для R125. Похибка отриманих значень теплопровідності була 1 %.

С. Ро та співавтори [86] проводили вимірювання для п'яти складів суміші методом нагрітого дроту з одним платиновим дротом протягом

короткого періоду часу, щоб запобігти помилкам внаслідок конвекції. Чистота зразків холодоагентів R32 і R125 для приготування сумішей була 99,9 % і 99,8 %. Тиск вимірювався з похибкою 0,4 %. Температура контролювалася в межах 0,02 °С. Неточність вимірювання теплопровідності дорівнювала 2 %.

Таблиця 4.4 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність суміші R32/R125

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1995	Танака [81]	69	283,15 – 298,15	0,10 – 1,20	2,64 – 56,93	0,1876; 0,3696; 0,5721; 0,8222	газ
1997	Ро [86]	120	232,65 – 323,95	2,00 – 20,00	903,75 – 1445,08	0,4376; 0,6189; 0,6939; 0,7714; 0,8793	рідина
1999	Гао [135]	60	213,00 – 293,00	2,00 – 30,00	1039,56 – 1520,29	0,4334; 0,6976; 0,8738	рідина
2001	Геллер [136]	50	255,04 – 409,81	0,10 – 3,69	2,16 – 183,89	0,6976	газ

К. Гао та співавтори [135] отримали дані про теплопровідність суміші R32/R125 трьох складів. Вимірювання проводилися апаратом з платиновим дротом діаметром 10 мкм та довжиною 50 мм. Чистота зразків холодоагентів R32 і R125 становила 99,98 % і 99,6 %. Температура вимірювалася платиновим термометром з похибкою 0,12 К, а тиск – цифровим манометром з похибкою 0,142 МПа. Неточність визначення теплопровідності була 0,7 %.

В. З. Геллер та співавтори [136] виміряли теплопровідність R410A методом нагрітого дроту. Використовувався платиновий дріт діаметром 0,1 мм та довжиною 80 мм, який був поміщений у капілярну трубку. Тиск контролювався цифровим датчиком з похибкою 1 КПа. Неточність значень теплопровідності складала менше 1,5 %.

Загалом експериментальні дані про теплопровідність суміші R32/R125 охоплюють інтервал температури від 213 до 409 К при тиску до 30 МПа.

Таблиця 4.5 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність суміші R32/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1995	Ро [83]	72	223,15 – 323,15	2,00 – 20,00	918,75 – 1398,10	0,4634; 0,6718; 0,8545	рідина
1999	Гао [135]	84	193,20 – 316,10	2,00 – 30,00	934,90 – 1500,00	0,3940; 0,6623; 0,8547	рідина

С. Ро та співавтори [83] представили дані про теплопровідність суміші R32/R134a трьох складів на п'яти ізотермах. Використовувався платиновий дріт діаметром 25 мкм та довжиною 135,26 мм. Чистота зразків холодоагентів R32 і R134a для приготування сумішей була 99,9 % і 99,8 %. Неточність значень теплопровідності складала 2 %.

Дані К. Гао та співавторів [135] отримані для суміші трьох складів апаратом з платиновим дротом діаметром 10 мкм та довжиною 50 мм. Чистота зразків холодоагентів R32 і R134a становила 99,98 % і 99,9 %. Температура вимірювалася платиновим термометром з похибкою 0,12 К, а тиск – цифровим манометром з похибкою 0,142 МПа. Неточність вимірювання теплопровідності за оцінкою авторів дорівнювала 0,7 %.

Масив дослідних даних про теплопровідність суміші R32/R134a охоплює інтервал температури від 193 до 323 К при тиску до 30 МПа.

Таблиця 4.6 – Перелік експериментальних даних про теплопровідність суміші R125/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				Стан
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1999	Джонг [95]	98	232,75 – 323,55	2,00 – 20,00	1092,30 – 1527,40	0,1672; 0,3368; 0,5472; 0,7563	рідина

С. Джонг та співавтори [95] отримали дані про теплопровідність суміші R125/R134a чотирьох складів за допомогою нагрітого платиного дроту діаметром 25 мкм та довжиною 128,4 мм. Чистота холодоагентів R125 і R134a для приготування суміші була 99,8 %. Неточності вимірювань температури та тиску були 0,05 К та 0,5 %, а похибка значень теплопровідності 2 %.

На підставі накопичених дослідних даних для трьох сумішей можна скласти рівняння для розрахунку їх теплопровідності в області параметрів, яка охоплена експериментом. Слід відмітити, що теплопровідність сумішей R32/R134a і R125/R134a визначена лише для стану рідини та кількість експериментальних даних обмежена.

#### **4.3 Рівняння для розрахунку в'язкості сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a**

У зв'язку з розширенням інтервалу температур, якими оперує сучасна холодильна техніка, існує тенденція використання у якості робочих речовин холодильних установок сумішей холодоагентів. Перспективними являються суміші широко розповсюджених альтернативних холодоагентів R32/R125,

R32/R134a і R125/R134a. Дані суміші малотоксичні, вибухобезпечні, неагресивні по відношенню до конструкційних матеріалів та мають сприятливі теплофізичні властивості.

Для розрахунку холодильних установок, що працюють на таких сумішах, необхідно мати надійні відомості про їх теплофізичні властивості. Зокрема, для гідравлічних розрахунків теплообмінної апаратури важливими є дані про в'язкість. У даній роботі складені рівняння, що описують дослідні дані про в'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a. Ці рівняння складені з використанням відповідних рівнянь для компонентів.

**4.3.1 Рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R125** склалися різними авторами на підставі своїх дослідних даних [129 – 131] і діяли у вузьких областях параметрів. В цій роботі складено рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R125 [137], яке відображає залежність в'язкості від температури, густини та складу. Воно описує в'язкість в інтервалі температури від 222 до 423 К при тиску до 7,7 МПа та діє при густині до 290 кг/м<sup>3</sup>. Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\eta$ -даних, які використані при складанні рівняння наведений в таблиці 4.7; символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. Області параметрів, що охоплені даними про в'язкість суміші R32/R125, показані на рисунку 4.1.

Таблиця 4.7 – Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\eta$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R125

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\eta$ , мкПа·с
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1997	Набізаде [129]	46	221,65 – 397,39	0,10 – 2,67	2,24 – 106,19	0,6976	9,21 – 17,21
2000	Геллер [130]	8	253,13 – 353,15	0,39 – 1,87	14,98 – 75,61	0,6976	10,75 – 16,25
2001	Йокояма [131]	329	298,15 – 423,15	0,10 – 7,72	2,00 – 289,42	0,2502; 0,5002; 0,7525	12,80 – 24,22

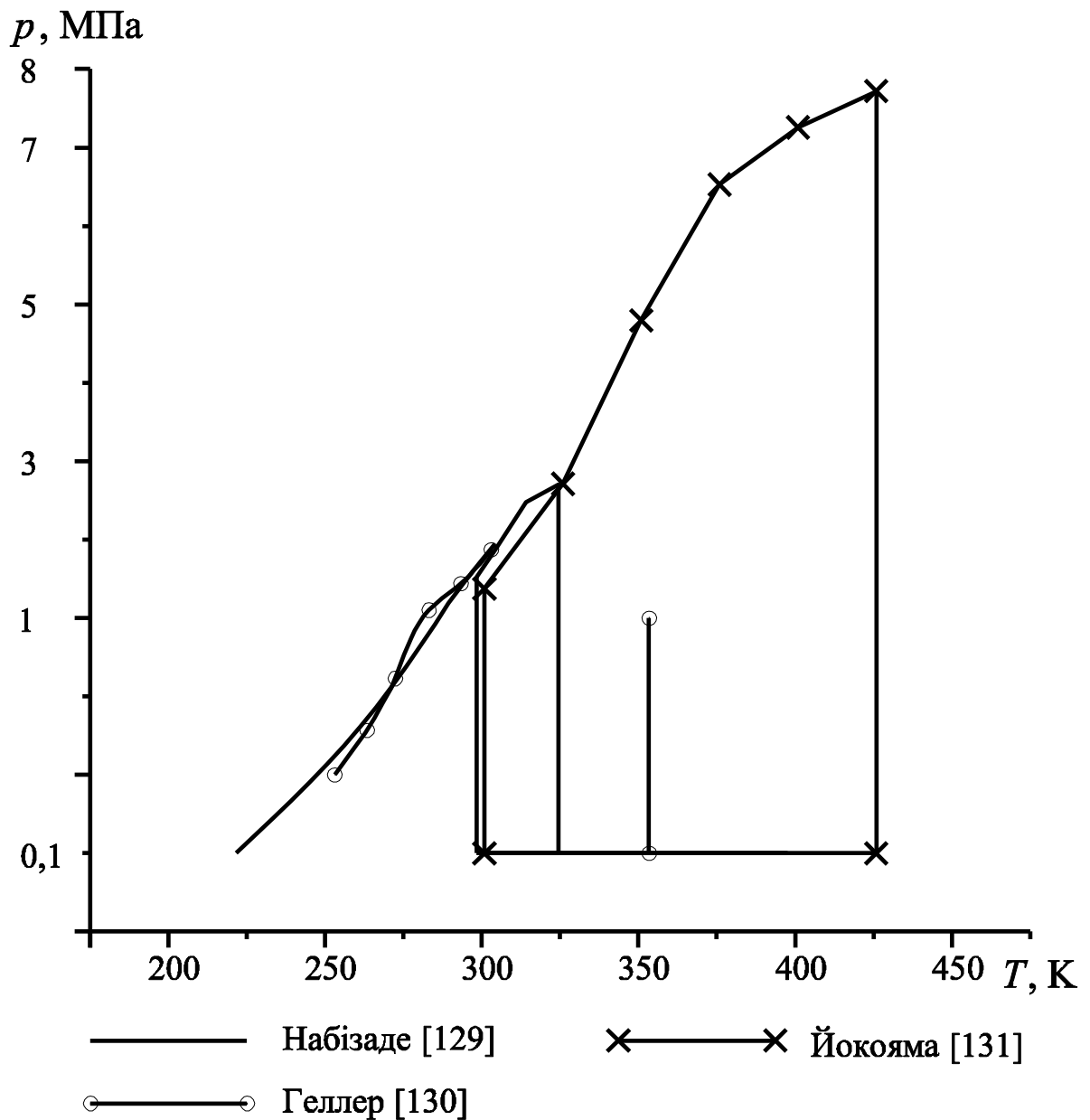


Рис. 4.1 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про в'язкість R32/R125

На першому етапі при складанні рівняння для в'язкості суміші R32/R125 використовувалася методика, аналогічна методикам В. І. Недоступна [138] і Е. Леммона [139], запропонованим для складання рівнянь стану сумішей. При цьому рівняння для в'язкості суміші  $\eta_{mix}$  мали вигляд:

$$\eta_{mix} = x_1^2 \eta_1 + 2x_1 x_2 \eta_{12} + x_2^2 \eta_2, \quad (4.1)$$

$$\eta_{mix} = x_1 \eta_1 + x_1 x_2 \eta_{12} + x_2 \eta_2, \quad (4.2)$$

де  $\eta_1$  і  $\eta_2$  – в'язкості компонентів R32 і R125,  $x_1$  і  $x_2$  – їх мольні доли,  $\eta_{12}$  – функція взаємодії компонентів.

При складанні рівнянь у формах (4.1) і (4.2) відхилення дослідних даних від розрахованих за рівняннями значно перевищували похибки експерименту.

В подальшому при складанні рівняння для в'язкості суміші R32/R125 був використаний метод С. А. Улибіна [13], згідно з яким в'язкість газової суміші розраховується за рівнянням (4.3), яке не враховує функції взаємодії:

$$\eta_{mix} = x_1\eta_1 + x_2\eta_2. \quad (4.3)$$

Однак розрахунки показали, що відхилення дослідних даних від розрахованих за рівнянням (4.3) також перевищили похибки експерименту. Такі відхилення обумовлені більш складною поведінкою сумішей холодоагентів, ніж сумішей простих газів, розглянутих у роботі [13]. Тому рівняння (4.3) було модифіковано шляхом включення додаткових членів. У підсумку розрахунок в'язкості суміші R32/R125 проводився за рівнянням:

$$\eta_{mix} = x_1\eta_1(1 + a_{11}\rho_1 + a_{12}\rho_1^2x_1\eta_1) + x_2\eta_2(1 + a_{21}\rho_2 + a_{22}\rho_2^2x_2\eta_2), \quad (4.4)$$

де розмірність в'язкості – мкПа·с, а густини – кг/м<sup>3</sup>; символ  $\rho$  – різниця значень густини при високому та атмосферному тиску.

В'язкість компонентів R32 і R125 досліджуваної суміші розраховувалася за допомогою рівняння у формі (3.4), а їх густина – за рівняннями, складеними в [118]. Варто зазначити, що точність рівняння (4.4) для в'язкості суміші залежить від точності рівнянь для в'язкості компонентів.

По експериментальним даним [129 – 131] методом найменших квадратів були визначені коефіцієнти рівняння для в'язкості суміші. При цьому були виключені деякі дослідні точки, що не узгоджувалися з масивом даних, оскільки відхилення для них перевищували потроєне середнє квадратичне відхилення для всього масиву. Оптимізація числа коефіцієнтів проводилася по методиці [116]. Коефіцієнти  $a_{ij}$  рівняння (4.4) наведені в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Коефіцієнти рівняння (4.4) для в'язкості суміші R32/R125

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$
$-4,7317 \cdot 10^{-5}$	$6,4898 \cdot 10^{-8}$	$8,7151 \cdot 10^{-5}$	$-2,1304 \cdot 10^{-9}$

Для оцінки точності рівняння (4.4) виконано порівняння розрахованих значень в'язкості суміші з дослідними даними. В таблиці 4.9 наведені похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  і середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих. Дослідні дані про в'язкість суміші при атмосферному тиску (32 значення з робіт [129, 131]) описуються з середнім квадратичним відхиленням 2,0 %. Слід зауважити, що розбіжності даних [131], які одержані при близьких значеннях параметрів, помітно перевищують вказану авторами похибку.

Таблиця 4.9 – Точність апроксимації дослідних даних про в'язкість суміші R32/R125 при  $\rho < 290 \text{ кг/м}^3$  рівнянням (4.4)

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta, \%$	$\delta\eta_{\text{макс}}, \%$	$\delta\eta_{\text{сер}}, \%$
		$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$			
Набізаде [129]	44	221,65 – 397,39	0,10 – 2,67	1,0	5,2	3,4
Геллер [130]	6	253,13 – 303,02	0,39 – 1,87	1,2	5,8	3,5
Йокояма [131]	318	298,15 – 423,15	0,10 – 7,72	0,4	-5,7	2,1
Весь массив	368	221,65 – 423,15	0,10 – 7,72	–	5,8	2,3

Із таблиці 4.9 видно, що рівняння (4.4) з достатньою точністю описує дані про в'язкість суміші холодоагентів R32/R125 в області параметрів, яка представляє інтерес для холодильних установок. Це рівняння може бути рекомендовано для інженерних розрахунків. У зв'язку з обмеженою кількістю досліджених складів суміші, дане рівняння справедливе при

мольній долі першого компоненту в межах 0,25 – 0,75. Рівняння у формі (4.4) автоматично не описує в'язкість чистих компонентів, але при розрахунку в'язкості останніх з його допомогою похибки не перевищують 3,3 %.

**4.3.2 Рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R134a** наведено у роботі [133]. Воно діє для трьох досліджених в експерименті складів суміші і має форму з функцією радіального розподілення, що ускладнює розрахунки.

В даній роботі складено рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R134a, яке відображає залежність в'язкості від температури, густини та складу [140]. Воно описує в'язкість в інтервалі температури від 298 до 423 К при тиску до 7,6 МПа та діє при густині до 300 кг/м<sup>3</sup>. Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \eta$ -даних, які використані при складанні рівняння, наведений в таблиці 4.10, де символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. Область параметрів, що охоплена дослідними даними, показана на рисунку 4.2.

Таблиця 4.10 – Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \eta$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості суміші R32/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\eta$ , мкПа·с
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
2004	Йокояма [133]	258	298,15 – 423,15	0,10 – 7,56	1,87 – 303,00	0,2502; 0,4760; 0,7500	11,63 – 22,75

На підставі експериментальних даних [133] при густині до 300 кг/м<sup>3</sup> складено рівняння, яке дозволяє розраховувати в'язкість суміші R32/R134a в залежності від температури, густини та складу в інтервалі температури від 298 до 423 К при тиску до 7,6 МПа. При цьому були виключені окремі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних. Це рівняння по аналогії з рівнянням, отриманим в [137], також має вигляд (4.4); його коефіцієнти  $a_{ij}$  наведені у таблиці 4.11.

Таблиця 4.11 – Коефіцієнти рівняння (4.4) для розрахунку в'язкості суміші R32/R134a при  $\rho < 300 \text{ кг/м}^3$

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$
$-1,6976 \cdot 10^{-3}$	$1,4375 \cdot 10^{-7}$	$2,3836 \cdot 10^{-4}$	$-4,3589 \cdot 10^{-8}$

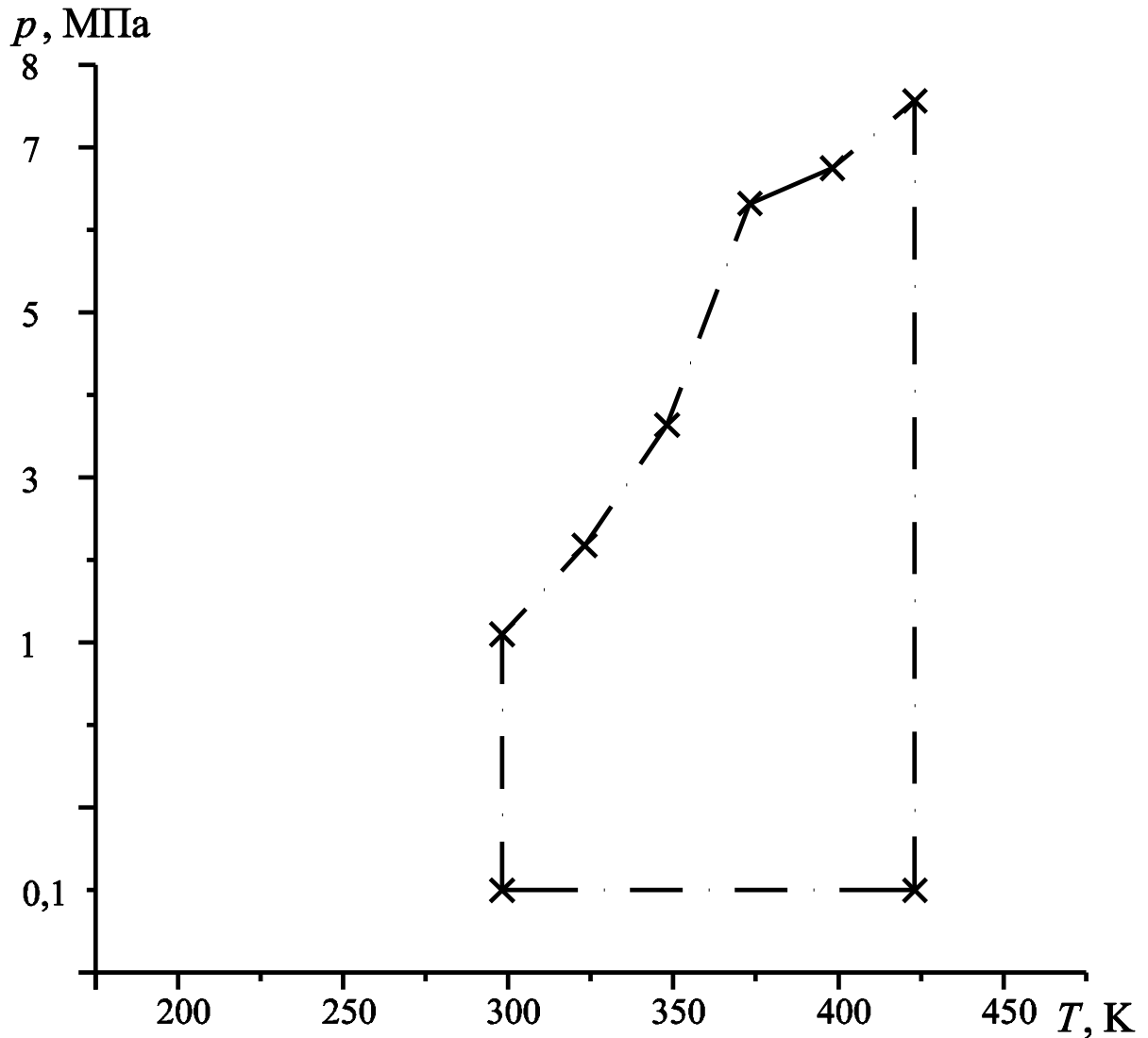


Рис. 4.2 – Область параметрів, охоплена використаними експериментальними даними Ч. Йокоями та співавторів [133] про в'язкість R32/R134a

Розрахунок в'язкості компонентів суміші R32 і R134a проводився за допомогою рівнянь у формі (3.4). Для розрахунку густини R32 було використане рівняння стану [118], а густини R134a – інформаційна система REFPROP [119].

У таблиці 4.12 наведені похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\eta_{\max}$  і середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих за рівнянням (4.4). Слід відмітити, що розбіжності даних [133], одержаних при близьких значеннях параметрів, помітно перевищують вказану авторами похибку. Дослідні дані про в'язкість суміші при атмосферному тиску (19 значень з роботи [133]) описані з середнім квадратичним відхиленням 2,5 %.

Таблиця 4.12 – Точність апроксимації дослідних даних про в'язкість суміші R32/R134a при  $\rho < 300 \text{ кг/м}^3$  рівнянням (4.4)

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta$ , %	$\delta\eta_{\max}$ , %	$\delta\eta_{\text{сер}}$ , %
		$T$ , К	$p$ , МПа			
Йокояма [133]	241	298,15 – 423,15	0,10 – 7,56	0,3	–4,9	2,3

Із таблиці 4.12 видно, що рівняння (4.4) задовільно описує дані про в'язкість суміші R32/R134a в області параметрів, що представляє інтерес для холодильних установок. Це рівняння можна рекомендувати для використання при інженерних розрахунках, коли мольна доля першого компоненту суміші знаходиться в межах 0,25 – 0,75.

**4.3.3 Рівняння для розрахунку в'язкості суміші R125/R134a** складено у роботі [134]. Воно описує в'язкість трьох складів суміші, які досліджені в експерименті, з використанням функції розподілення.

В цій роботі складено рівняння для розрахунку в'язкості суміші R125/R134a, яке відображає залежність в'язкості від температури, густини та складу [141]. Рівняння описує в'язкість в інтервалі температури від 298 до 423 К до тиску 6,0 МПа та охоплює густину до  $385 \text{ кг/м}^3$ . Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\eta$ -даних, які використані при складанні рівняння, наведений в таблиці 4.13, де  $x$  – мольна доля першого компонента суміші. Область параметрів, охоплена дослідними даними, показана на рисунку 4.3.

Таблиця 4.13 – Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\eta$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку в'язкості суміші R125/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\eta$ , мкПа·с
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
2000	Йокояма [134]	251	298,15 – 423,15	0,10 – 6,00	3,09 – 384,66	0,2508; 0,5001; 0,7510	11,95 – 26,17

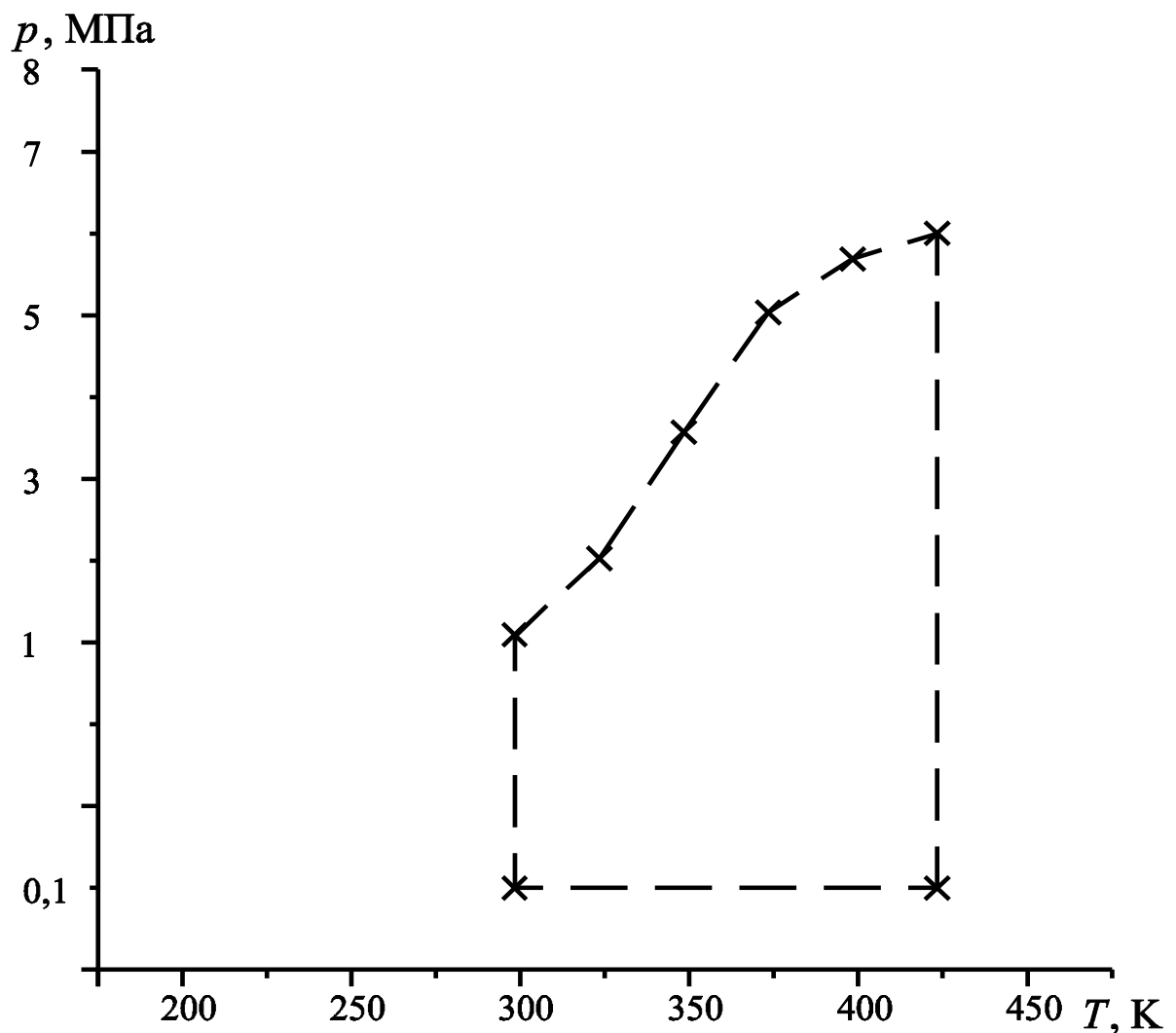


Рис. 4.3 – Область параметрів, охоплена використаними експериментальними даними Ч. Йокоями та співавторів [134] про в'язкість R125/R134a

На основі експериментальних даних [134] при густині до 385 кг/м<sup>3</sup> складено рівняння, яке дозволяє розраховувати в'язкість суміші R125/R134a в інтервалі температури від 298 до 423 К при тиску до 6,0 МПа. При цьому

були виключені окремі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних. Це рівняння складено у формі (4.4), аналогічно представленим у роботах [137, 140]. Його коефіцієнти  $a_{ij}$  наведені у таблиці 4.14.

Таблиця 4.14 – Коефіцієнти рівняння (4.4) для розрахунку в'язкості суміші R125/R134a при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$

$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{21}$	$a_{22}$
$1,1334 \cdot 10^{-3}$	$-1,0532 \cdot 10^{-7}$	$-9,4676 \cdot 10^{-4}$	$1,4032 \cdot 10^{-9}$

Розрахунок в'язкості R125 і R134a проводився за рівняннями у формі (3.4). Для розрахунку густини R125 було використане рівняння стану [118], а густини R134a – інформаційна система REFPROP [119].

У таблиці 4.15 наведені похибки даних  $\delta\eta$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\eta_{\text{макс}}$  і середні квадратичні  $\delta\eta_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих. Дослідні дані про в'язкість суміші при атмосферному тиску (24 значення в'язкості з роботи [134]) описані з середнім квадратичним відхиленням 0,6 %. Варто зазначити, що розбіжності даних [134] перевищують вказану авторами похибку.

Таблиця 4.15 – Точність апроксимації дослідних даних про в'язкість суміші R125/R134a при  $\rho < 385 \text{ кг/м}^3$  рівнянням (4.4)

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\eta, \%$	$\delta\eta_{\text{макс}}, \%$	$\delta\eta_{\text{сер}}, \%$
		$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$			
Йокояма [134]	226	298,15 – 423,15	0,10 – 5,95	0,3	-4,9	2,2

Із таблиці 4.15 видно, що рівняння (4.4) достатньо точно описує дані про в'язкість суміші R125/R134a. Воно може використовуватися при інженерних розрахунках, коли мольна доля першого компоненту суміші знаходиться в межах 0,25 – 0,75.

За допомогою складених рівнянь розраховані дані про в'язкість сумішей відповідного складу, що включені до таблиць транспортних властивостей холодоагентів R32, R125 і R134a та їх сумішей, які наведені в додатках до дисертації.

#### **4.4 Рівняння для розрахунку теплопровідності сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a**

Для теплових розрахунків теплообмінної апаратури важливими є відомості про теплопровідність. У даній роботі складені рівняння, що описують експериментальні дані про теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a. Ці рівняння складені із залученням відповідних рівнянь для компонентів.

**4.4.1 Рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R32/R125** складалися у різних формах різними авторами [81, 86, 135, 136] на підставі своїх дослідних даних і були локальними. У цій роботі складено єдине рівняння для розрахунку теплопровідності суміші холодоагентів R32/R125 [137], яке відображає залежність теплопровідності від температури, густини та складу. Воно описує теплопровідність в інтервалі температури від 213 до 405 К при тиску до 30 МПа. Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\lambda$ -даних, які використані при складанні рівняння, наведений в таблиці 4.16; символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. Області параметрів, що охоплені дослідними даними, показані на рисунку 4.4. Теплопровідність суміші R32/R125 експериментально досліджена до більших значень тиску, ніж в'язкість.

Рівняння для розрахунку теплопровідності досліджуваної суміші R32/R125 складено у формі, аналогічній (4.4):

$$\lambda_{mix} = x_1 \lambda_1 (1 + b_{11} \rho_1 + b_{12} \rho_1^2 x_1 \lambda_1) + x_2 \lambda_2 (1 + b_{21} \rho_2 + b_{22} \rho_2^2 x_2 \lambda_2), \quad (4.5)$$

де  $\lambda_{mix}$ ,  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$  – теплопровідності суміші і компонентів, мВт/(м·К);  $x_1$  і  $x_2$  – мольні долі R32 і R125;  $\rho_1$  і  $\rho_2$  – різниці значень їх густини при високому та атмосферному тиску, кг/м<sup>3</sup>.

Таблиця 4.16 – Перелік експериментальних  $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ,  $x$ ,  $\lambda$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R32/R125

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\lambda$ , мВт/(м·К)
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1995	Танака [81]	69	283,15 – 298,15	0,10 – 1,20	2,64 – 56,93	0,1876; 0,3696; 0,5721; 0,8222	11,70 – 15,02
1997	Ро [86]	120	232,65 – 323,95	2,00 – 20,00	903,75 – 1445,08	0,4376; 0,6189; 0,6939; 0,7714; 0,8793	63,90 – 166,70
1999	Гао [135]	60	213,00 – 293,00	2,00 – 30,00	1039,56 – 1520,29	0,4334; 0,6976; 0,8738	81,40 – 178,50
2001	Геллер [136]	50	255,04 – 409,81	0,10 – 3,69	2,16 – 183,89	0,6976	9,98 – 22,76

По експериментальним даним [81, 86, 135, 136] методом найменших квадратів визначені коефіцієнти рівняння (4.5) для теплопровідності суміші, які наведені в таблиці 4.17. При цьому були виключені деякі дослідні точки, що не узгоджувалися з масивом даних, оскільки відхилення для них перевищували потроєне середнє квадратичне відхилення для всього масиву. Оптимізація числа коефіцієнтів проводилася по методиці [116].

Розрахунок теплопровідності R32 і R125 проводився за допомогою рівнянь у формі (3.12), а їх густини – за рівняннями, складеними в [118]. Слід

зауважити, що точність рівняння (4.5) для теплопровідності суміші залежить від точності рівнянь для теплопровідності компонентів.

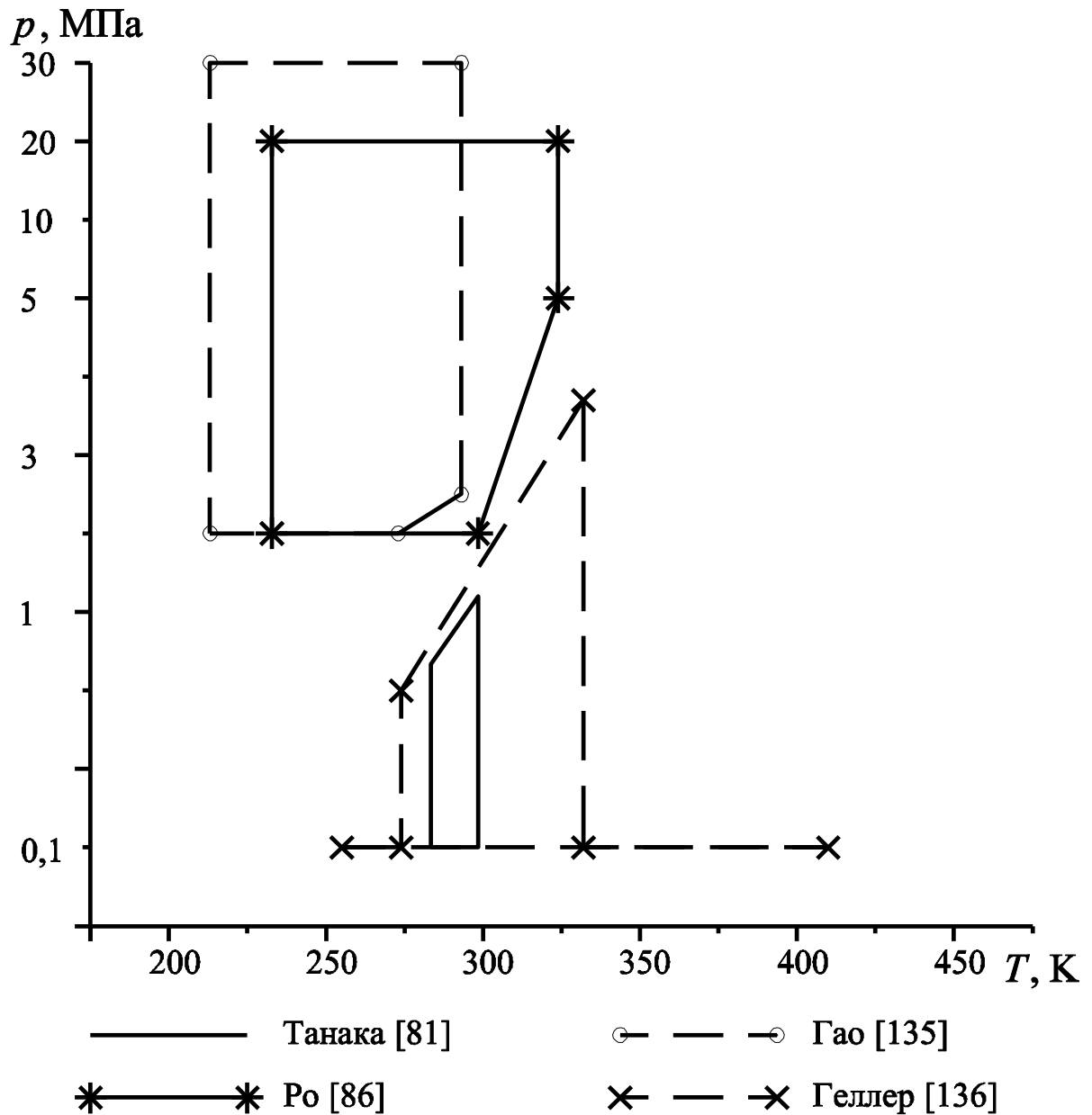


Рис. 4.4 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про теплопровідність R32/R125

Таблиця 4.17 – Коефіцієнти рівняння (4.5) для розрахунку теплопровідності суміші R32/R125

$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{21}$	$b_{22}$
$-1,1949 \cdot 10^{-4}$	$2,5422 \cdot 10^{-10}$	$-3,6631 \cdot 10^{-4}$	$1,8984 \cdot 10^{-9}$

Для оцінки точності рівняння (4.5) виконано порівняння розрахованих значень теплопровідності суміші R32/R125 з дослідними даними. В таблиці 4.18 наведені похибки даних  $\delta\lambda$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  і середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих. Дослідні дані про теплопровідність суміші при атмосферному тиску (24 значення з робіт [81, 136]) описуються із середнім квадратичним відхиленням 2,1 %.

Таблиця 4.18 – Точність апроксимації дослідних даних про теплопровідність суміші R32/R125 рівнянням (4.5)

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda, \%$	$\delta\lambda_{\text{макс}}, \%$	$\delta\lambda_{\text{сер}}, \%$
		$T, \text{K}$	$p, \text{МПа}$			
Танака [81]	69	283,15 – 298,15	0,10 – 1,20	1,0	4,4	1,7
Ро [86]	108	232,65 – 323,95	2,00 – 20,00	2,0	–5,0	2,8
Гао [135]	60	213,00 – 293,00	2,00 – 30,00	0,7	–4,2	2,0
Геллер [136]	45	255,04 – 404,52	0,10 – 3,01	1,5	–5,0	2,7
Весь массив	282	213,00 – 404,52	0,10 – 30,00	–	–5,0	2,4

Із таблиці 4.18 видно, що рівняння (4.5) з достатньою точністю описує дані про теплопровідність суміші холодоагентів R32/R125. Це рівняння можна рекомендувати для використання при розрахунках холодильних установок та обладнання. Дане рівняння справедливе при мольній долі першого компонента суміші в межах 0,18 – 0,88.

**4.4.2 Рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R32/R134a** представлені у роботах [83, 135] і є локальними. В даній роботі складено рівняння для розрахунку теплопровідності суміші холодоагентів R32/R134a,

яке відображає залежність теплопровідності від температури, густини та складу [140] в інтервалі температури від 193 до 323 К при тиску до 30 МПа та діє при густині більше  $900 \text{ кг/м}^3$ . Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \lambda$ -даних, які використані при складанні рівняння, наведений в таблиці 4.19, де символ  $x$  означає мольну доля першого компонента суміші. Теплопровідність суміші R32/R134a експериментально досліджена до більшого тиску, ніж в'язкість, але тільки в рідкому стані. Області параметрів, що охоплені використаними експериментальними даними, показані на рисунку 4.5.

Таблиця 4.19 – Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \lambda$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R32/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\lambda$ , мВт/(м·К)
			$T$ , К	$p$ , МПа	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$x$	
1995	Ро [83]	72	223,15 – 323,15	2,00 – 20,00	918,75 – 1398,10	0,4634; 0,6718; 0,8545	81,65 – 173,78
1999	Гао [135]	84	193,20 – 316,10	2,00 – 30,00	934,90 – 1500,00	0,3940; 0,6623; 0,8547	84,60 – 195,30

Рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R32/R134a складено у формі (4.5). По експериментальним даним [83, 135] при надкритичних густинах методом найменших квадратів були визначені його коефіцієнти. При цьому були виключені окремі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних. Оптимізація числа коефіцієнтів проводилася по методиці [116]. Коефіцієнти рівняння (4.5) для розрахунку теплопровідності суміші R32/R134a наведені у таблиці 4.20.

Розрахунок теплопровідності R32 і R134a проводився за рівняннями у формі (3.12). Густина R32 розраховувалася за рівнянням стану [118], а густина R134a – за допомогою системи REFPROP [119]. В таблиці 4.21

наведені похибки даних  $\delta\lambda$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  і середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сер}}$  відхилення експериментальних даних від розрахованих.

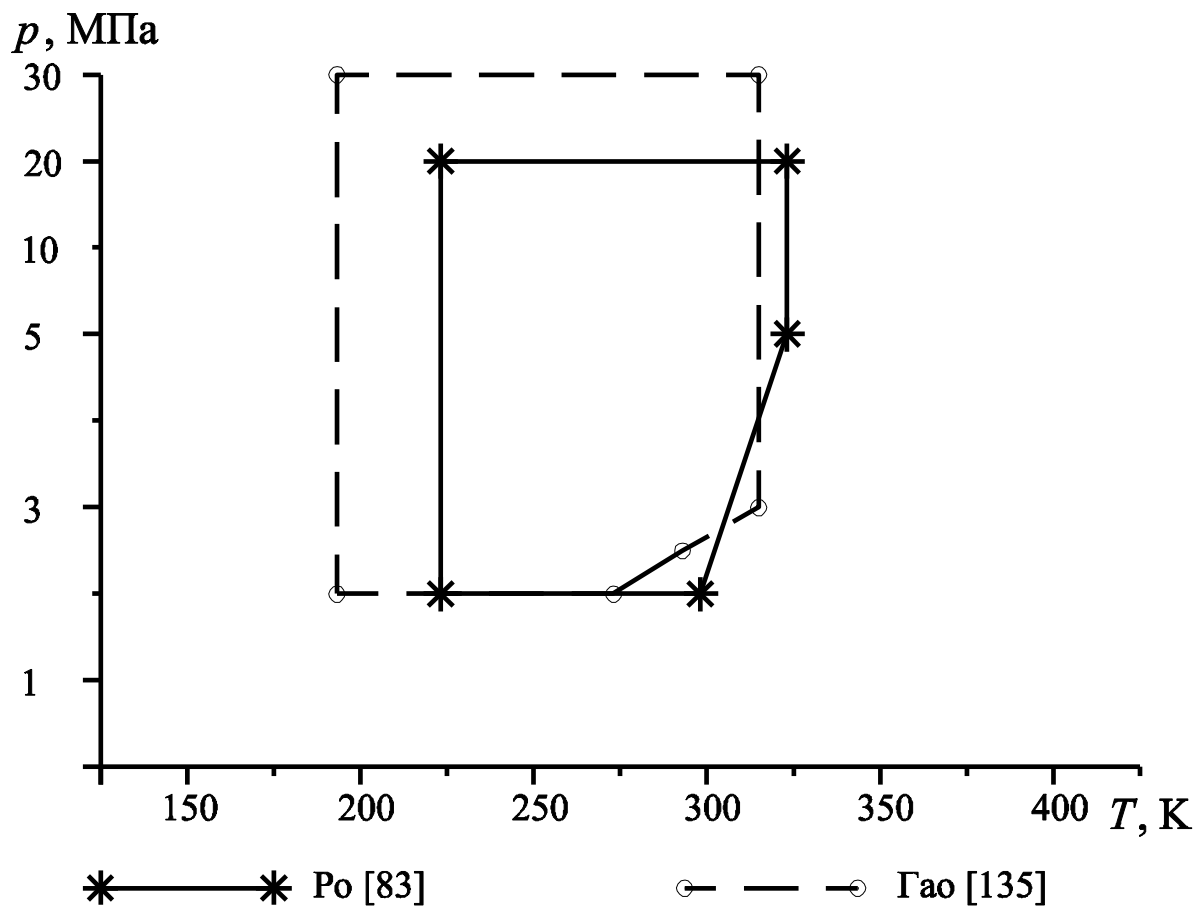


Рис. 4.5 – Области параметрів, охоплені використаними експериментальними даними про теплопровідність R32/R134a

Таблиця 4.20 – Коефіцієнти рівняння (4.5) для розрахунку теплопровідності суміші R32/R134a при  $\rho > 900 \text{ кг/м}^3$

$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{21}$	$b_{22}$
$-5,9434 \cdot 10^{-5}$	0	$-1,6345 \cdot 10^{-4}$	0

Із таблиці 4.21 видно, що рівняння (4.5) задовільно описує дані про теплопровідність суміші R32/R134a. Таким чином, його можна використовувати при інженерних розрахунках, коли мольна доля першого компоненту суміші знаходиться в межах 0,39 – 0,85.

Таблиця 4.21 – Точність апроксимації дослідних даних про теплопровідність суміші R32/R134a при  $\rho > 900 \text{ кг/м}^3$

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda, \%$	$\delta\lambda_{\text{макс}}, \%$	$\delta\lambda_{\text{сер}}, \%$
		$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$			
Ро [83]	66	223,15 – 323,15	2,00 – 20,00	2,0	–4,9	2,3
Гао [135]	75	193,20 – 316,10	2,00 – 30,00	0,7	4,8	2,2
Весь массив	141	193,20 – 323,15	2,00 – 30,00	–	–4,9	2,3

#### 4.4.3 Рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R125/R134a

складено у роботі [95] через незалежні змінні температуру, тиск та масову частку R125. У даній роботі складено рівняння для розрахунку теплопровідності вказаної суміші в залежності від температури, густини та мольного складу [141]. Воно діє в інтервалі температури від 232 до 323 К при тиску до 20 МПа при густині більше  $1100 \text{ кг/м}^3$ . Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \lambda$ -даних, які використані при складанні рівняння, наведений в таблиці 4.22; символом  $x$  позначена мольна доля першого компонента суміші. Теплопровідність суміші R125/R134a експериментально досліджена тільки в рідкому стані. Область параметрів, що охоплена використаними даними, показана на рисунку 4.6.

Таблиця 4.22 – Перелік експериментальних  $T, p, \rho, x, \lambda$ -даних, використаних при складанні рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R125/R134a

Рік	Автор і джерело	Кільк. точок	Інтервали параметрів				$\lambda, \text{ мВт/(м}\cdot\text{К)}$
			$T, \text{ К}$	$p, \text{ МПа}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$x$	
1999	Джонг [95]	98	232,75 – 323,55	2,00 – 20,00	1092,30 – 1527,40	0,1672; 0,3368; 0,5472; 0,7563	59,70 – 114,30

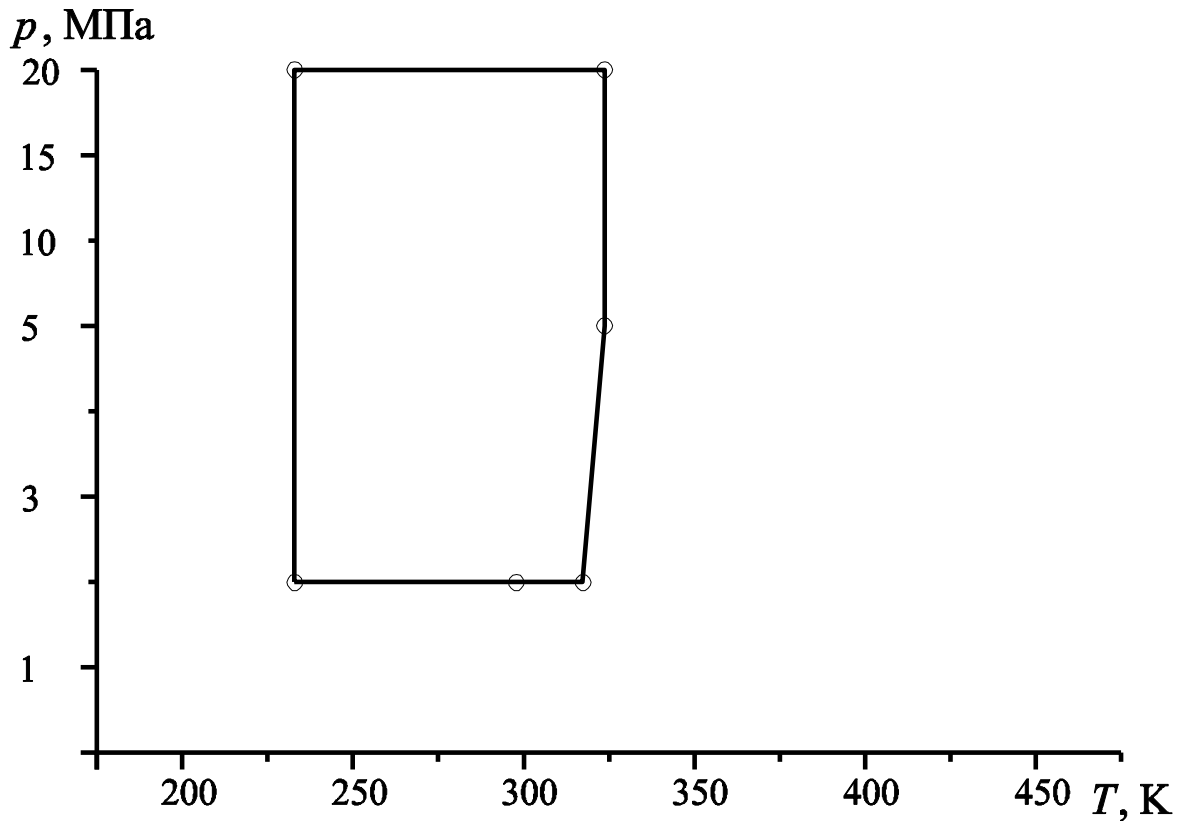


Рис. 4.6 – Область параметрів, охоплена використаними експериментальними даними С. Джонга та співавторів [95] про теплопровідність R125/R134a

Рівняння для розрахунку теплопровідності суміші R125/R134a складено у формі, аналогічній (4.5). По експериментальним даним [95] при надкритичних густинах методом найменших квадратів та за методикою [116] були визначені коефіцієнти рівняння для теплопровідності суміші R125/R134a. Окремі точки, які не узгоджувалися з основним масивом даних, були виключені. Коефіцієнти рівняння (4.5) для розрахунку теплопровідності суміші R125/R134a наведені у таблиці 4.23.

Таблиця 4.23 – Коефіцієнти рівняння (4.5) для розрахунку теплопровідності суміші R125/R134a при  $\rho > 1100 \text{ кг/м}^3$

$b_{11}$	$b_{12}$	$b_{21}$	$b_{22}$
$-3,7631 \cdot 10^{-5}$	0	$-5,5773 \cdot 10^{-6}$	0

Розрахунок теплопровідності R125 і R134a проводився за допомогою рівнянь у формі (3.12). Для розрахунку густини R125 було використане рівняння стану [118], а густини R134a – система REFPROP [119]. В таблиці 4.24 наведені похибки даних  $\delta\lambda$  за оцінкою авторів, максимальні  $\delta\lambda_{\text{макс}}$  і середні квадратичні  $\delta\lambda_{\text{сер}}$  відхилення дослідних даних від розрахованих.

Таблиця 4.24 – Точність апроксимації дослідних даних про теплопровідність суміші R125/R134a при  $\rho > 1100 \text{ кг/м}^3$

Автор і джерело	Число точок	Інтервали параметрів		$\delta\lambda, \%$	$\delta\lambda_{\text{макс}}, \%$	$\delta\lambda_{\text{сер}}, \%$
		$T, \text{ K}$	$p, \text{ МПа}$			
Джонг [95]	95	232,75 – 323,55	2,00 – 20,00	2,0	5,0	2,2

Із таблиці 4.24 видно, що рівняння (4.5) описує дані про теплопровідність суміші R125/R134a з задовільною точністю, тому його можна рекомендувати для використання в розрахунках при мольній долі першого компоненту в межах 0,16 – 0,76.

За допомогою складених рівнянь розраховані дані про теплопровідність сумішей відповідного складу, що включені до таблиць транспортних властивостей холодоагентів R32, R125 і R134a та їх сумішей, які наведені в додатках до дисертації.

## 4.5 Висновки

1. Суміші холодоагентів R32/R125, R32/R134a і R125/R134a є перспективними робочими речовинами холодильних установок, тому дослідження їх в'язкості і теплопровідності являються актуальними.

2. Незважаючи на використання вказаних сумішей в холодильній техніці, кількість експериментальних досліджень їх транспортних властивостей обмежена, а дослідні дані малочисельні.

3. Складені рівняння для розрахунку в'язкості трьох сумішей холодоагентів, які описують експериментальні дані в наступних інтервалах параметрів: 222 – 423 К при тиску до 7,7 МПа для R32/R125, 298 – 423 К до 7,6 МПа для R32/R134a і 298 – 423 К до 6,0 МПа R125/R134a.

4. Отримані рівняння для розрахунку теплопровідності сумішей холодоагентів, що описують експериментальні дані в інтервалах: 213 – 405 К до 30 МПа для R32/R125, 193 – 323 К до 30 МПа для R32/R134a і 232 – 323 К до 20 МПа для R125/R134a.

5. Рівняння для в'язкості і теплопровідності сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a використані при складанні таблиць цих властивостей, наведених в додатках до дисертації.

## ВИСНОВКИ

1. Аналіз методів вимірювання в'язкості і теплопровідності речовин дозволив оцінити точність дослідних даних отриманих різними методами. Огляд методів аналітичного опису в'язкості і теплопровідності чистих речовин та їх сумішей показує, що частіше всього вказані властивості розраховуються в залежності від температури та густини.

2. Транспортні властивості холодоагентів R32, R125 і R134a експериментально досліджені у досить широких областях параметрів. Похибки отриманих значень в'язкості і теплопровідності цих холодоагентів за оцінками авторів знаходяться в межах 0,5 – 4 %. Такі розбіжності викликані використанням різноманітних установок та особливостями проведення експерименту.

3. Складені рівняння для розрахунку в'язкості компонентів сумішей, які описують експериментальні дані в інтервалах параметрів: 232 – 423 К при тиску до 9,8 МПа для R32, 230 – 423 К до 10,1 МПа для R125 і 248 – 439 К до 6,0 МПа для R134a. Ці рівняння використані в подальшому при складанні відповідних рівнянь для бінарних сумішей вказаних холодоагентів.

4. Отримані рівняння для розрахунку теплопровідності трьох холодоагентів, що описують експериментальні дані в інтервалах: 223 – 466 К при тиску до 50 МПа для R32, 228 – 513 К до 53 МПа для R125 і 248 – 533 К до 60,9 МПа для R134a. Вони використані при складанні відповідних рівнянь для бінарних сумішей трьох холодоагентів.

5. Аналіз експериментальних даних про транспортні властивості сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a показав, що кількість досліджень незначна, а дослідні дані малочисельні. Тому на їх підставі можна скласти рівняння для розрахунку в'язкості і теплопровідності в обмежених інтервалах параметрів.

6. Складені рівняння для розрахунку в'язкості сумішей холодоагентів, які описують експериментальні дані при докритичних значеннях густини в

інтервалах параметрів: 222 – 423 К при тиску до 7,7 МПа для R32/R125, 298 – 423 К до 7,6 МПа для R32/R134a і 298 – 423 К до 6,0 МПа для R125/R134a.

7. Отримані рівняння для розрахунку теплопровідності сумішей холодоагентів, які описують експериментальні дані в інтервалах: 213 – 405 К при тиску до 30 МПа для R32/R125, 193 – 323 К до 30 МПа при густині більше 900 кг/м<sup>3</sup> для R32/R134a і 232 – 323 К до 20 МПа при густині більше 1100 кг/м<sup>3</sup> для R125/R134a.

8. Рівняння для в'язкості і теплопровідності сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів використані при розрахунку цих властивостей для таблиць, наведених в додатках до дисертації.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ**

1. UN. Montreal Protocol on Substances That Deplete The Ozone Layer. Final Act. Adopted in Montreal on 16 September 1987. – 11 p.
2. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Adopted in Kyoto on 11 December 1997. – 21 p.
3. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей / И. Ф. Голубев. – М.: Физматгиз, 1959. – 377 с.
4. Железний В. П. Експериментальна теплофізика. Методи дослідження теплофізичних властивостей речовин / В. П. Железний, В. З. Геллер, Ю. В. Семенюк. – Одеса: Фенікс, 2015. – 320 с.
5. MacWood, G. E. The Theory of the Measurement of Viscosity and Slip of Fluids by the Oscillating Disc Method, part II / G. E. MacWood // *Physica*. – 1938. – Vol. 5. – No. 8 – P. 763–768
6. Голубев И. Ф. Вязкость газовых смесей / И. Ф. Голубев, Н. Е. Гнездилов. – М.: Госкомстандарт, 1971. – 325 с.
7. Гиршфельдер Д. Молекулярная теория газов и жидкостей / Д. Гиршфельдер, Ч. Кертисс, Р. Берд. – М.: Изд-во Ин. Лит., 1961. – 929 с.
8. Кессельман П. М. О расчете коэффициента вязкости газовых смесей при атмосферном давлении / П. М. Кессельман, А. С. Литвинов // *ИФЖ*. – 1966. – Том 10. – № 3. – С. 385–392.
9. Sutherland, W. XXXVII. The Viscosity of Mixed Gases / W. Sutherland // *Philosophical Magazine Series 5*. – 1895. – Vol. 40. – No. 246. – P. 421–431.
10. Thiesen, M. // *Verhandl. Deut. Physic. Ges* – 1902. – Vol. 4. – P. 348.
11. Maxwell, J. C. XV. On the Dynamical Theory of Gases / J. C. Maxwell // *Philosophical Magazine Series 4*. – 1868. – Vol. 35. – No. 235. – P. 129–145.
12. Enskog, D. Kinetische Theorie der Wärmeleitung, Reibung und Selbstdiffusion in gewissen verdichteten Gasen und Flüssigkeiten / D. Enskog // *Kungliga Svenska vetenskapsakademiens handlingar*. – 1922. – Vol. 63. – P. 3–44.

13. Улыбин С. А. Температурная зависимость вязкости разреженных газовых смесей / С. А. Улыбин // Теплоэнергетика. – 1962. – № 8. – С. 93–94.
14. Mason, E. A. Transport Properties of Polar-Gas Mixtures / E. A. Mason, L. Monchick // J. Chem. Phys. – 1962. – Vol. 36. – No. 10. – P. 2746–2757.
15. Strunk, M. R. The Prediction of the Viscosity of Multicomponent, Nonpolar Gaseous Mixtures at Atmospheric Pressure / M. R. Strunk, D. Fensenfeld // A.I.Ch.E. Journal. – 1965. – Vol. 11. – No. 3. – P. 389–390.
16. Варгафтик Н. Б // Изв. ВТИ. – 1952. – Том 9. – № 1.
17. Вассерман А. А. Теплофизические свойства воздуха и его компонентов / А. А. Вассерман, Я. З. Казавчинский, В. А. Рабинович. – М.: Наука, 1966. – 375 с.
18. Вассерман А. А. Теплофизические свойства жидкого воздуха и его компонентов / А. А. Вассерман, В. А. Рабинович. – М.: Изд-во. стандартов, 1968. – 239 с.
19. Рабинович В. А. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / В. А. Рабинович, А. А. Вассерман, В. И. Недоступ, Л. С. Векслер / под ред. В. А. Рабиновича. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 636 с.
20. Kestin, J. Equilibrium and Transport Properties of the Noble Gases and Their Mixtures at Low Density / J. Kestin, K. Knierim, E. A. Mason, B. Najafi, S. T. Ro, M. Waldman // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1984. – Vol. 13. – No. 1. – P. 229–303.
21. Assael, M. J. On the correlation of transport properties of liquid mixtures / M. J. Assael, N. K. Dalaouti, I. Metaxa // Fluid Phase Equilibria. – 2002. – Vol. 199. – P. 237–247.
22. Sheng, W. Prediction of Transport Properties of Dense Gases and Liquids by the Peng-Robinson (PR) Equation of State / W. Sheng, G.-J. Chen, H.-C. Lu // Int. J. Thermophysics. – 1989. – Vol. 10. – No. 1. – P. 133–144.
23. Millat, J. Transport Properties of Fluids: Their Correlation, Prediction and Estimation / J. Millat, J. H. Dymond, C. A. Nieto de Castro. – New York: Cambridge University Press, 1996. – 500 p.

24. Chapman, S. *The Mathematical Theory of Non-Uniform Gases* / S. Chapman, T. G. Cowling. – Cambridge: Cambridge University Press, 1970. – 448 p.
25. Rabinovich, V. A. *Viscosity and Thermal Conductivity of Individual Substances in the Critical Region* / V. A. Rabinovich, I. M. Abdulagatov. – Begell House, Inc., 1996. – 208 p.
26. Laesecke, A. *Viscosity of Fluorinated Propane Isomers. 2. Measurements of Three Compounds and Model Comparisons* / A. Laesecke, R. F. Hafer // *J. Chem. Eng. Data.* – 1998. – Vol. 43. – No. 1. – P. 84–92.
27. Assael, M. J. *Correlation and Prediction of Dense Fluid Transport Coefficients. VII. Refrigerants* / M. J. Assael, J. H. Dymond, S. K. Polimatidou // *Int. J. Thermophysics.* – 1995. – Vol. 16. – No. 3. – P. 761–772.
28. Teja, A. S. *Correlation and Prediction of the Transport Properties of Refrigerants Using Two Modified Rough Hard-Sphere Models* / A. S. Teja, R. L. Smith, R. K. King, T. F. Sun // *Int. J. Thermophysics.* – 1999. – Vol. 20. – No. 1. – P. 149–161.
29. Kiselev, S. B. *Transport properties of refrigerants R32, R125, R134a and R125+R32 mixtures in and beyond the critical region* / S. B. Kiselev, R. A. Perkins, M. L. Huber // *Int. J. Refrigeration.* – 1999. – Vol. 22. – P. 509–520.
30. Nagaoka, K. *A New Correlation for the Viscosity of Gaseous Fluorocarbon Refrigerants* / K. Nagaoka, Y. Tanaka, H. Kubota, T. Makita // *Int. J. Thermophysics.* – 1986. – Vol. 7. – No. 5. – P. 1023–1031.
31. Lemmon, E. W. *Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air* / E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen // *Int. J. Thermophysics.* – 2004. – Vol. 25. – No. 1. – P. 21–69.
32. Цедерберг Н. В. *Теплопроводность газов и жидкостей* / Н. В. Цедерберг. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.
33. Yata, J. *Thermal Conductivity of Alternative Fluorocarbons in Liquid Phase* / J. Yata, M. Hori, T. Kurahashi, T. Minamiyama // *Fluid Phase Equilibria.* – 1992. – Vol. 80. – P. 287–296.

34. Варгафтик Н. Б. Теплопроводность газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Р. П. Юрчак. – М.: Изд-во Комитета Стандартов, 1970. – 158 с.
35. Шашков А. Г. Методы определения теплопроводности и температуропроводности / А. Г. Шашков, Г. М. Волохов и др. / под ред. А. В. Лыкова. – М.: Энергия, 1973. – 336 с.
36. Тимрот Д. Л. Дилатометрический метод экспериментального определения теплопроводности агрессивных газов и паров при высоких температурах / Д. Л. Тимрот, Е. Е. Тоцкий // Теплофизика высоких температур. – 1965. – Том 3. – № 5. – С. 740–746.
37. Chapman, S. The Kinetic Theory of a Gas Constituted of Spherically Symmetrical Molecules / S. Chapman. – Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character – 1912. – Vol. 211. – P. 433–483.
38. Pidduk, F. B. The Kinetic Theory of a Special Type of Rigid Molecule / F. B. Pidduk, M. A. Fellow. – Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1922. – Vol. 101. – No. 708. – P. 101–112.
39. Абас-Заде А. К. Температурная зависимость вязкости и теплопроводности многоатомных газов / А. К. Абас-Заде // Изв. АН Азербайджанской ССР. – 1948. – No. 2. – С. 25.
40. Enskog, D. Kinetische Theorie der Vorgänge in Mässig Verdünnten Gasen. I. Allgemeiner teil. Inaugural Dissertation / D. Enskog. – Uppsala: Alqvist & Wiksells, 1917. – 160 p.
41. Боровик Е. С. Теплопроводность азота / Е. С. Боровик // ЖЭТФ. – 1947. – Том 17. – № 4. – С. 328.
42. Предводителев А. С. О некоторых инвариантных количествах в теории теплопроводности и вязкости жидкостей / А. С. Предводителев // ЖФХ. – 1948. – Том 22. – № 3. – С. 339–348.

43. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплопроводности жидкостей и газов / Н. Б. Варгафтик, Л. П. Филиппов, А. А. Тарзиманов, Е. Е. Тоцкий. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
44. Столяров Е. А. Явления переноса в сжатых газах. I. Определение коэффициентов теплопроводности сжатых газов ( $H_2$ ,  $N_2$ , воздух,  $CH_4$  и  $CO_2$ ) / Е. А. Столяров, В. В. Ипатьев, В. П. Теодорович // ЖФХ. – 1950. – Том 24. – № 2. – С. 166–176.
45. Столяров Е. А. Явления переноса в сжатых газах. II. Эмпирическое уравнение зависимости теплопроводности сжатых газов от температуры и давления / Е. А. Столяров // ЖФХ. – 1950. – Том 24. – № 3.
46. Franck, E. U. Wärmeleitung in Hochverdichteten Gasen / E. U. Franck // Chemie Ingenieur Technik. – 1953. – Vol. 25. – No. 5. – P. 238–244.
47. Wassiljewa, A. Wärmeleitung in Gasmischen / A. Wassiljewa // Physikalische Zeitschrift. – 1904. – Vol. 5. – No. 22. – P. 737–742.
48. Kennard, E. H. Kinetic Theory of Gases / E. H. Kennard. – New York, NY: McGraw-Hill, 1938. – 483 p.
49. Phillips, T. W. Liquid Viscosity of Halocarbons / T. W. Phillips, K. P. Murphy // J. Chem. Eng. Data. – 1970. – Vol. 15. – No. 2. – P. 304–307.
50. Oliveira, C. M. B. P. The Viscosity of R32 and R125 at Saturation / C. M. B. P. Oliveira, W. A. Wakeham // Int. J. Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1131–1143.
51. Ripple, D. The Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Six Halogenated Compounds and Three Mixtures / D. Ripple, O. Matar // J. Chem. Eng. Data. – 1993. – Vol. 38. – No. 4. – P. 560–564.
52. Assael, M. J. Measurements of the Viscosity of R134a and R32 in the Temperature Range 270–340 K at Pressures up to 20 MPa / M. J. Assael, J. H. Dymond, S. K. Polimatidou // Int. J. Thermophysics. – 1994. – Vol. 15. – No. 4. – P. 591–601.

53. Dunlop, P. J. Viscosities of a series of gaseous fluorocarbons at 25°C / P. J. Dunlop // *The Journal of Chemical Physics*. – 1994. – Vol. 100. – No. 4. – P. 3149–3151.
54. Takahashi, M. Gas Viscosity of Difluoromethane from 298.15 to 423.15 K and up to 10 MPa / M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakava, S. Takahashi // *J. Chem. Eng. Data*. – 1995. – Vol. 40. – No. 4. – P. 900–902.
55. Geller, V. Z. Viscosities of HFC-32 and HFC-32/Lubricant Mixtures / V. Z. Geller, M. E. Paulaitis, D. B. Bivens, A. Yokozeki // *Int. J. Thermophysics*. – 1996. – Vol. 17. – No. 1. – P. 75–83.
56. Sun, L. Viscosity of Difluoromethane and Pentafluoroethane along the Saturation Line / L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin // *J. Chem. Eng. Data*. – 1996. – Vol. 41. – No. 2. – P. 292–296.
57. Laesecke, A. Viscosity Measurements of Ammonia, R32, and R134a. Vapor Buoyancy and Radial Acceleration in Capillary Viscometers / A. Laesecke, T. O. D. Luddecke, R. F. Hafer, D. J. Morris // *Int. J. Thermophysics*. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 401–434.
58. Oliveira, C. M. B. P. Viscosity of R134a, R32, and R125 at Saturation / C. M. B. P. Oliveira, W. A. Wakeham // *Int. J. Thermophysics*. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 365–373.
59. Froba, A. P. Saturated Liquid Viscosity and Surface Tension of Alternative Refrigerants / A. P. Froba, S. Will, A. Leipertz // *Int. J. Thermophysics*. – 2000. – Vol. 21. – No. 6. – P. 1225–1253.
60. Wilson, L. C. Thermophysical Properties of HFC-125 / L. C. Wilson, W. V. Wilding, G. M. Wilson, R. L. Rowley, V. M. Felix, T. Chisolm-Carter // *Fluid Phase Equilibria*. – 1992. – Vol. 80. – P. 167–177.
61. Diller, D.E. Measurements of the Viscosities of Saturated and Compressed Fluid 1-Chloro-1,2,2,2-Tetrafluoroethane (R124) and Pentafluoroethane (R125) at Temperatures Between 120 and 420 K / D. E. Diller, S. M. Peterson // *Int. J. Thermophysics*. – 1993. – Vol. 14. – No. 1. – P. 55–66.

62. Assael, M. J. Measurements of the Viscosity of Liquid R22, R124, and R125 in the Temperature Range 273-333 K at Pressures up to 17 MPa / M. J. Assael, S. K. Polimatidou // *Int. J. Thermophysics*. – 1994. – Vol. 15. – No. 5. – P. 779–790.
63. Assael, M. J. Measurements of the Viscosity of Refrigerants in the Vapor Phase / M. J. Assael, S. K. Polimatidou // *Int. J. Thermophysics*. – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 353–366.
64. Ripple, D. Viscosity of the Saturated Liquid Phase of Three Fluorinated Ethanes: R152a, R143a, and R125 / D. Ripple, D. Defibaugh // *J. Chem. Eng. Data*. – 1997. – Vol. 42. – No. 2. – P. 360–364.
65. Takahashi, M. Viscosity of Gaseous HFC-125 (Pentafluoroethane) Under High Pressures / M. Takahashi, N. Shibasaki-Kitakawa, C. Yokoyama // *Int. J. Thermophysics*. – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 445–453.
66. Avelino, H. M. N. T. Viscosity of Compressed Liquid 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a) and Pentafluoroethane (HFC-125) / H. M. N. T. Avelino, J. M. N. A. Fareleira, C. M. B. P. Oliveira // *J. Chem. Eng. Data*. – 2006. – Vol. 51. – No. 5. – P. 1672–1677.
67. Nabizadeh, H. Viscosity of Gaseous R123, R134a and R142b / H. Nabizadeh, F. Mayinger // Paper presented on 12th European Conference on Thermophysical Properties (1990), Vienna, Austria.
68. Kumagai, A. Viscosity of Saturated Liquid Fluorocarbon Refrigerants from 273 to 353 K / A. Kumagai, S. Takahashi // *Int. J. Thermophysics*. – 1991. – Vol. 12. – No. 1. – P. 105–117.
69. Lavrenchenko, G. K. Thermophysical Properties of Refrigerant R134a / G. K. Lavrenchenko, G. Ya. Ruvinskij, S. V. Iljushenko, V. V. Kanaev // *Int. J. Refrigeration*. – 1992. – Vol. 15. – No. 6. – P. 386–392.
70. Dowdell, D. C. Gas Viscosities and Intermolecular Interactions of Replacement Refrigerants HCFC 123 (2,2-Dichloro-1,1,1-trifluoroethane), HCFC 124 (2-Chloro-1,1,1,2-tetrafluoroethane) and HFC 134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) /

- D. C. Dowdell, G. P. Matthews // *J. Chem. Soc. Faraday Trans.* – 1993. – Vol. 89. – No. 19. – P. 3545–3552.
71. Oliveira, C. M. B. P. The Viscosity of Liquid R134a / C. M. B. P. Oliveira, W. A. Wakeham // *Int. J. Thermophys.* – 1993. – Vol. 14. – No. 1. – P. 33–44.
72. Diller, D. E. Measurements of the Viscosities of Saturated and Compressed Liquid 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a), 2,2-dichloro-1,1,1-trifluoroethane (R123) and 1,1-dichloro-1-fluoroethane (R141b) / D. E. Diller, A. S. Aragon, A. Laesecke // *Fluid Phase Equilibria.* – 1993. – Vol. 88. – P. 251–262.
73. Han, L. Viscosity of Saturated Liquid for 1,1,1,2-Tetrafluoroethane / L. Han, M. Zhu, X. Li, D. Luo // *J. Chem. Eng. Data.* – 1995. – Vol. 40. – No. 3. – P. 650–652.
74. Padua, A. A. H. Density and Viscosity Measurements of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) from 199 K to 298 K and up to 100 MPa / A. A. H. Padua, J. M. N. A. Fareleira, J. C. G. Calado, W. A. Wakeham // *J. Chem. Eng. Data.* – 1996. – Vol. 41. – No. 4. – P. 731–735.
75. Wilhelm, J. Gas-phase viscosity of the alternative refrigerant R134a at low densities / J. Wilhelm, E. Vogel // *Fluid Phase Equilibria.* – 1996. – Vol. 125. – P. 257–266.
76. Padua, A. A. H. Validation of an Accurate Vibrating-Wire Densimeter: Density and Viscosity of Liquids Over Wide Ranges of Temperature and Pressure / A. A. H. Padua, J. M. N. A. Fareleira, J. C. G. Calado, W. A. Wakeham // *Int. J. Thermophys.* – 1996. – Vol. 17. – No. 4. – P. 781–802.
77. Shibasaki-Kitakawa, N. Viscosity of Gaseous HFC-134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) Under High Pressures / N. Shibasaki-Kitakawa, M. Takahashi, C. Yokoyama // *Int. J. Thermophys.* – 1998. – Vol. 19. – No. 5. – P. 1285–1295.
78. Comunas, M. J. P. Viscosity measurements and correlations for 1,1,1,2-tetrafluoroethane (HFC-134a) up to 140 MPa / M. J. P. Comunas, A. Baylaucq,

- S. E. Quinones-Cisneros, C. K. Zeberg-Mikkelsen, C. Boned, J. Fernandez // Fluid Phase Equilibria. – 2003. – Vol. 210. – P. 21–32.
79. Laesecke, A. High-Pressure Viscosity Measurements of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane / A. Laesecke, S. Bair // Int. J. Thermophysics. – 2011. – Vol. 32. – No. 5. – P. 925–941.
80. Papadaki, M. Thermal Conductivity of R32 and R125 in the Liquid Phase at the Saturation Vapor Pressure / M. Papadaki, W. A. Wakeham // Int. J. Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 6. – P. 1215–1220.
81. Tanaka, Y. Gaseous Thermal Conductivity of Difluoromethane (HFC-32), Pentafluoroethane (HFC-125), and Their Mixtures / Y. Tanaka, S. Matsuo, S. Taya // Int. J. Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 1. – P. 121–131.
82. Assael, M. J. Measurements of the Thermal Conductivity of Liquid R32, R124, R125, and R141b / M. J. Assael, L. Karagiannidis // Int. J. Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 4. – P. 851–865.
83. Ro, S. T. Thermal Conductivity of R32 and Its Mixture with R134a / S. T. Ro, J. Y. Kim, D. S. Kim // Int. J. Thermophysics. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1193–1201.
84. Yata, J. Thermal Conductivity of Alternative Refrigerants in the Liquid Phase / J. Yata, M. Hori, K. Kobayashi, T. Minamiyama // Int. J. Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 561–571.
85. Gross, U. Thermal Conductivities of New Refrigerants R125 and R32 Measured by the Transient Hot-Wire Method / U. Gross, Y. W. Song // Int. J. Thermophysics. – 1996. – Vol. 17. – No. 3. – P. 607–619.
86. Ro, S. T. Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Difluoromethane (R32) and Pentafluoroethane (R125) / S. T. Ro, M. S. Kim, S. U. Jeong // Int. J. Thermophysics. – 1997. – Vol. 18. – No. 4. – P. 991–999.
87. Sun, L. Thermal Conductivity of Gaseous Difluoromethane and Pentafluoroethane near the Saturation Line / L. Sun, M. Zhu, L. Han, Z. Lin // J. Chem. Eng. Data. – 1997. – Vol. 42. – No. 1 – P. 179–182.

88. Gao, X. Thermal Conductivity of HFC-32, HFC-125, and HFC-134a in the Solid Phase / X. Gao, Y. Nagasaka, A. Nagashima // *Int. J. Thermophysics.* – 1998. – Vol. 19. – No. 2. – P. 415–425.
89. Le Neindre, B. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-32 (Difluoromethane) in the Temperature Range from 300 to 465 K at Pressures up to 50 MPa / B. Le Neindre, Y. Garrabos // *Int. J. Thermophysics.* – 2001. – Vol. 22. – No. 3. – P. 701–722.
90. Tsvetkov, O. B. Thermal Conductivity of Refrigerants R123, R134a, and R125 at Low Temperatures / O. B. Tsvetkov, Yu. A. Laptev, A. G. Asambaev // *Int. J. Thermophysics.* – 1994. – Vol. 15. – No. 2. – P. 203–214.
91. Tsvetkov, O. B. Thermal Conductivity and PVT Measurements of Pentafluoroethane (Refrigerant HFC-125) / O. B. Tsvetkov, A. V. Kletski, Yu. A. Laptev, A. J. Asambaev, I. A. Zausaev // *Int. J. Thermophysics.* – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1185–1192.
92. Gao, X. The Thermal Conductivity of CFC Alternatives HFC-125 and HCFC-141b in the Liquid Phase / X. Gao, T. Yamada, Y. Nagasaka, A. Nagashima // *Int. J. Thermophysics.* – 1996. – Vol. 17. – No. 2. – P. 279–292.
93. Assael, M. J. Measurements of the Thermal Conductivity of Refrigerants in the Vapor Phase / M. J. Assael, N. Malamataris, L. Karagiannidis // *Int. J. Thermophysics.* – 1997. – Vol. 18. – No. 2. – P. 341–352.
94. Le Neindre, B. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-125 in the Temperature Range from 300 to 515 K at Pressures up to 53 MPa / B. Le Neindre, Y. Garrabos // *Int. J. Thermophysics.* – 1999. – Vol. 20. – No. 2. – P. 375–399.
95. Jeong, S. U. Liquid Thermal Conductivity of Binary Mixtures of Pentafluoroethane (R125) and 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R134a) / S. U. Jeong, M. S. Kim, S. T. Ro // *Int. J. Thermophysics.* – 1999. – Vol. 20. – No. 1. – P. 55–62.

96. Richard, R. G. A Transient Hot-Wire Method for Measuring the Thermal Conductivity of Gases and Liquids / R. G. Richard, I. R. Shankland // *Int. J. Thermophysics.* – 1989. – Vol. 10. – No. 3. – P. 673–686.
97. Fellows, B. R. Thermal Conductivity Data for Some Environmentally Acceptable Fluorocarbons / B. R. Fellows, R. G. Richard, I. R. Shankland // *Thermal Conductivity 21*, C. J. Cremmers and H. A. Fine, eds. (Plenum Press, New York, 1990), P. 311–325.
98. Tanaka, Y. Thermal Conductivity of Gaseous HFC-134a, HFC-143a, HCFC-141b, and HCFC-142b / Y. Tanaka, M. Nakata, T. Makita // *Int. J. Thermophysics.* – 1991. – Vol. 12. – No. 6. – P. 949–963.
99. Laesecke, A. Thermal conductivity of R134a / A. Laesecke, R. A. Perkins, C. A. Nieto de Castro // *Fluid Phase Equilibria.* – 1992. – Vol. 80. – P. 263–274.
100. Gross, U. Thermal Conductivity of the New Refrigerants R134a, R152a, and R123 Measured by the Transient Hot-Wire Method / U. Gross, Y. W. Song, T. Hahne // *Int. J. Thermophysics.* – 1992. – Vol. 13. – No. 6. – P. 957–983.
101. Perkins, R. A. Polarized Transient Hot Wire Thermal Conductivity Measurements / R. A. Perkins, A. Laesecke, C. A. Nieto de Castro // *Fluid Phase Equilibria.* – 1992. – Vol. 80. – P. 275–286.
102. Assael, M. J. Measurements of the Thermal Conductivity of R22, R123, and R134a in the Temperature Range 250-340 K at Pressures up to 30 MPa / M. J. Assael, E. Karagiannidis // *Int. J. Thermophysics.* – 1993. – Vol. 14. – No. 2. – P. 183–197.
103. Papadaki, M. Thermal Conductivity of R134a and R141b Within the Temperature Range 240-307 K at the Saturation Vapor Pressure / M. Papadaki, M. Schmitt, A. Seitz, K. Stephan, B. Taxis, W. A. Wakeham // *Int. J. Thermophysics.* – 1993. – Vol. 14. – No. 2. – P. 173–181.
104. Yamamoto, R. Thermal Conductivity of Halogenated Ethanes, HFC-134a, HCFC-123, and HCFC-141b / R. Yamamoto, S. Matsuo, Y. Tanaka // *Int. J. Thermophysics.* – 1993. – Vol. 14. – No. 1. – P. 79–90.

105. Tsvetkov, O. B. Experimental study and correlation of the thermal conductivity of 1,1,1,2-tetrafluoroethane (R134a) in the rarefied gas state / O. B. Tsvetkov, Yu. A. Laptev, A. G. Asambaev // *Int. J. Refrigeration*. – 1995. – Vol. 18. – No. 6. – P. 373–377.
106. Hammerschmidt, U. Thermal Conductivity of a Wide Range of Alternative Refrigerants Measured with an Improved Guarded Hot-Plate Apparatus / U. Hammerschmidt // *Int. J. Thermophysics*. – 1995. – Vol. 16. – No. 5. – P. 1203–1211.
107. Gurova, A. N. The Thermal Conductivity of Liquid 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC 134a) / A. N. Gurova, U. V. Mardolcar, C. A. Nieto de Castro // *Int. J. Thermophysics*. – 1997. – Vol. 18. – No. 5. – P. 1077–1087.
108. Le Neindre, B. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-134a in the Temperature Range from 300 to 530 K and at Pressures up to 50 MPa / B. Le Neindre, Y. Garrabos // *Int. J. Thermophysics*. – 1999. – Vol. 20. – No. 5. – P. 1379–1401.
109. Le Neindre, B. Measurements of the Thermal Conductivity of HFC-134a in the Supercritical Region / B. Le Neindre, Y. Garrabos, F. Gumerov, A. Sabirzianov // *J. Chem. Eng. Data*. – 2009. – Vol. 54. – No. 9 – P. 2678–2688.
110. Baginsky, A. V. Thermal conductivity and thermal diffusivity of the R134a refrigerant in the liquid state / A. V. Baginsky, A. S. Shipitsyna // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2009. – Vol. 16. – No. 2. – P. 267–273.
111. Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода / В. В. Алтунин. – М.: Изд. стандартов, 1975. – 551 с.
112. Люстерник В. Е. Уравнение вязкости сжатого газообразного и жидкого водорода / В. Е. Люстерник // *Теплофизика высоких температур*. – 1969. – Том 7. – № 2. – С. 367–369.
113. Вассерман А. А. Уравнение для расчета коэффициента вязкости азота и водорода в газообразном и жидком состояниях / А. А. Вассерман,

- В. И. Недоступ // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1971. – № 3. – С. 118–121.
114. Кессельман П. М. Свойства переноса реальных газов / П. М. Кессельман, В. Р. Каменецкий, Е. С. Якуб. – К.: Вища школа, 1976. – 152 с.
115. Худсон Д. Статистика для физиков / Д. Худсон. – М.: Мир, 1970. – 296 с.
116. Вассерман А. А. Оптимизация числа коэффициентов уравнения состояния / А. А. Вассерман, А. Я. Крейзерова // Теплофизика высоких температур. – 1978. – Том 16. – № 6. – С. 1185–1188.
117. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости хладагентов R32 и R125 / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 4 (150). – С. 18–21.
118. Vasserman, A. A. Equations of State for the Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125 / A. A. Vasserman, D. V. Fominsky // Int. J. Thermophys. – 2001. – Vol. 22. – No. 4. – P. 1089–1098.
119. Lemmon, E. W. NIST Standard Reference Database 23, Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties (REFPROP), Version 8.0 / E. W. Lemmon, M. L. Huber, and M. O. McLinden. – National Institute of Standards and Technology: Gaithersburg, MD, 2007.
120. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагента R134a / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2015. – № 2 (51). – С. 42–47.
121. Tillner-Roth, R. An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 to 455 K and Pressure up to 70 MPa / R. Tillner-Roth, H. D. Baehr // J. Phys. Chem. Ref. Data. – 1994. – Vol. 23. – № 5. – P. 657–729.

122. Вассерман А. А. Уравнения для расчета вязкости сжатого газа при высоких температурах / А. А. Вассерман // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Том 13. – № 5. – С. 1104–1105.
123. Krauss, R. Transport Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (R 134a) / R. Krauss, J. Luettmer-Strathmann, J. V. Sengers, K. Stephan // Int. J. Thermophysics. – 1993. – Vol. 14. – No. 4. – P. 951–988.
124. Бойчук А. С. Уравнения для расчета вязкости и теплопроводности хладагентов R32, R125 и R134a / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – № 6 (146). – С. 24–28.
125. Варгафтик Н. Б. Теплопроводность сжатых газов и жидкостей / Н. Б. Варгафтик // Известия ВТИ. – 1951. – № 7. – С. 13–19.
126. Бойчук А. С. Уравнения для расчета теплопроводности хладагентов R32 и R125 / А. С. Бойчук // Холодильна техніка та технологія. – 2014. – № 6 (152). – С. 10–13.
127. Вассерман А. А. О расчете теплопроводности газа при высоких температурах и давлениях / А. А. Вассерман // Теплофизика высоких температур. – 1972. – Том 10. – № 5. – С. 1116–1118.
128. Вассерман А. А. Уравнения для расчета теплопроводности одноатомных газов при высоких температурах и давлениях до 1000 бар / А. А. Вассерман // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Том 13. – № 4. – С. 879–881.
129. Nabizadeh, H. Viscosity of Gaseous R404A, R407C, R410A and R507 / H. Nabizadeh, F. Mayinger // Int. J. Thermophysics. – 1999. – Vol. 20. – No. 3. – P. 777–790.
130. Geller, V. Z. Viscosity of Mixed Refrigerants, R404A, R407C, R410A, and R507C / V. Z. Geller, D. Bivens, and A. Yokozeki // Paper 508. Presented on 8th International Refrigeration Conference at Purdue University (2000), West Lafayette, IN, USA.

131. Yokoyama, C. Viscosity of Gaseous Mixtures of HFC-125 + HFC-32 / C. Yokoyama, T. Nishino, and M. Takahashi // *Int. J. Thermophysics.* – 2001. – Vol. 22. – No. 5. – P. 1329–1347.
132. Laesecke, A. Saturated-Liquid Viscosity of Ten Binary and Ternary Alternative Refrigerant Mixtures. Part I: Measurements / A. Laesecke, R. F. Hafer, and D. J. Morris // *J. Chem. Eng. Data.* – 2001. – Vol. 46. – No. 2. – P. 433–445.
133. Yokoyama, C. Viscosity of Gaseous Mixtures of HFC-134a (1,1,1,2-Tetrafluoroethane) + HFC-32 (Difluoromethane) / C. Yokoyama, T. Nishino, and M. Takahashi // *Int. J. Thermophysics.* – 2004. – Vol. 25. – No. 1. – P. 71–88.
134. Yokoyama, C. Viscosity of Gaseous Mixtures of HFC-125 (pentafluoroethane) + HFC-134a (1,1,1,2-tetrafluoroethane) under pressure / C. Yokoyama, T. Nishino, and M. Takahashi // *Fluid Phase Equilibria.* – 2000. – Vol. 174. – P. 231–240.
135. Gao, X. Thermal Conductivity of Binary Refrigerant Mixtures of HFC-32/125 and HFC-32/134a in the Liquid Phase / X. Gao, Y. Nagasaka, and A. Nagashima // *Int. J. Thermophysics.* – 1999. – Vol. 20. – No. 5. – P. 1403–1415.
136. Geller, V. Z. Thermal Conductivity of the Refrigerant Mixtures R404A, R407C, R410A, and R507A / V. Z. Geller, B. V. Nemzer, and U. V. Cheremnykh // *Int. J. Thermophysics.* – 2001. – Vol. 22. – No. 4. – P. 1035–1043.
137. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R32/R125 / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // *Технические газы.* – 2016. – Том 16. – No. 3. – С. 47–51.
138. Nedostup, V. I. The Equation of State for Gas Mixtures in the Canonical Form / V. I. Nedostup, O. V. Nedostup // *Russian Journal of Physical Chemistry.* – 2006. – Vol. 80. – No. 8. – P. 1221–1224.

139. Lemmon, E. W. A Generalized Model for the Thermodynamic Properties of Mixtures/ E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen // *Int. J. Thermophysics*. – 1999. – Vol. 20. – No. 3. – P. 825–835.
140. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R32/R134a / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // *Технические газы*. – 2016. – Том 16. – No. 5. – С. 46–50.
141. Вассерман А. А. Вязкость и теплопроводность смеси хладагентов R125/R134a / А. А. Вассерман, А. С. Бойчук // *Холодильна техніка та технологія*. – 2016. – № 52 (4). – С. 11–15.

**ДОДАТКИ**

## Додаток А

### В'язкість сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів

#### Позначення та розмірності табличних величин

$T$	абсолютна температура, К;
$p$	тиск, МПа;
$x$	мольна доля першого компонента суміші;
$\eta$	динамічна в'язкість, мкПа·с.

Відсутність деяких значень в'язкості сумішей у таблицях обумовлена тим, що дія рівнянь для розрахунку в'язкості досліджуваних сумішей обмежена.

Таблиця А.1 – В'язкість суміші R32/R125 та її компонентів

$T = 240 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	10,53	10,44	10,35	10,26	10,17	10,09
0,15	10,58	10,49	10,39	10,29	10,19	10,10
0,20	10,64	10,54	10,43	10,32	10,22	10,11
0,25	326,18					219,94
0,30	326,45					219,94
0,35	326,71					219,94
0,40	326,98					219,93
0,50	327,51					219,92
0,60	328,04					219,91
0,70	328,58					219,91
0,80	329,11					219,90
0,90	329,78					219,89
1,00	330,31					219,88
1,20	331,38					219,86
1,40	332,46					219,84
1,60	333,53					219,83
1,80	334,61					219,81
2,00	335,69					219,79
2,50	338,39					219,74
3,00	340,97					219,69
3,50	343,70					219,65
4,00	346,30					219,60
4,50	348,78					219,55
5,00	351,41					219,49
5,50	353,90					219,44
6,00	356,41					219,39
6,50	358,93					219,34
7,00	361,31					219,28
7,50	363,85					219,23

Продовження таблиці А.1

$T = 260 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	11,36	11,27	11,19	11,10	11,01	10,93
0,15	11,39	11,30	11,21	11,11	11,02	10,93
0,20	11,42	11,33	11,23	11,13	11,03	10,93
0,25	11,45	11,35	11,25	11,14	11,04	10,93
0,30	11,48	11,38	11,27	11,16	11,05	10,94
0,35	11,50	11,40	11,28	11,17	11,06	10,94
0,40	11,51	11,41	11,30	11,18	11,07	10,95
0,50	241,90			77,34	53,55	10,98
0,60	242,45					176,36
0,70	243,00					176,35
0,80	243,55					176,34
0,90	244,10					176,33
1,00	244,65					176,33
1,20	245,66					176,31
1,40	246,76					176,30
1,60	247,78					176,28
1,80	248,80					176,26
2,00	249,82					176,25
2,50	252,43					176,21
3,00	254,97					176,16
3,50	257,42					176,12
4,00	259,89					176,08
4,50	262,38					176,03
5,00	264,78					175,98
5,50	267,10					175,93
6,00	269,43					175,88
6,50	271,78					175,83
7,00	274,04					175,77
7,50	276,31					175,72

Продовження таблиці А.1

$T = 280 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	12,18	12,10	12,02	11,93	11,85	11,77
0,15	12,20	12,12	12,03	11,94	11,85	11,76
0,20	12,22	12,13	12,04	11,94	11,85	11,76
0,25	12,24	12,15	12,05	11,95	11,85	11,75
0,30	12,26	12,17	12,06	11,96	11,85	11,75
0,35	12,27	12,18	12,07	11,96	11,85	11,75
0,40	12,29	12,19	12,08	11,97	11,86	11,75
0,50	12,31	12,22	12,10	11,98	11,87	11,75
0,60	12,32	12,23	12,11	12,00	11,88	11,76
0,70	12,33	12,25	12,13	12,01	11,89	11,78
0,80	12,32	12,25	12,14	12,02	11,91	11,80
0,90	182,53		84,46	69,59	45,38	11,83
1,00	183,09			69,73	45,50	11,87
1,20	184,27					140,29
1,40	185,33					140,28
1,60	186,45					140,27
1,80	187,52					140,25
2,00	188,59					140,24
2,50	191,26					140,21
3,00	193,82					140,18
3,50	196,34					140,14
4,00	198,82					140,10
4,50	201,25					140,06
5,00	203,64					140,01
5,50	205,98					139,97
6,00	208,27					139,92
6,50	210,51					139,87
7,00	212,70					139,82
7,50	214,84					139,76

Продовження таблиці А.1

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	13,00	12,92	12,84	12,76	12,69	12,61
0,15	13,02	12,93	12,85	12,77	12,68	12,60
0,20	13,03	12,95	12,86	12,77	12,68	12,59
0,25	13,04	12,96	12,86	12,77	12,68	12,58
0,30	13,05	12,97	12,87	12,77	12,67	12,58
0,35	13,07	12,98	12,88	12,77	12,67	12,57
0,40	13,08	12,99	12,88	12,78	12,67	12,57
0,50	13,10	13,01	12,90	12,78	12,67	12,56
0,60	13,13	13,04	12,92	12,79	12,67	12,56
0,70	13,15	13,06	12,93	12,81	12,68	12,56
0,80	13,17	13,08	12,95	12,82	12,69	12,56
0,90	13,19	13,10	12,97	12,84	12,70	12,57
1,00	13,21	13,13	12,99	12,85	12,72	12,59
1,20	13,24	13,17	13,04	12,90	12,77	12,64
1,40	13,26	13,22	13,09	12,96	12,84	12,72
1,60	137,81	88,31	76,15	59,52	38,41	12,83
1,80	139,13	135,94				110,64
2,00	140,45	136,32				110,64
2,50	143,55	137,16				110,64
3,00	146,53	137,89				110,63
3,50	149,39	138,53				110,62
4,00	152,16	139,08				110,60
4,50	154,78	139,56				110,57
5,00	157,31	139,96				110,54
5,50	159,78	140,29				110,51
6,00	162,18	140,57				110,47
6,50	164,52	140,80				110,42
7,00	166,79	140,97				110,38
7,50	168,99	141,09				110,33

Продовження таблиці А.1

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	13,81	13,74	13,67	13,59	13,52	13,45
0,15	13,82	13,75	13,67	13,59	13,51	13,44
0,20	13,83	13,76	13,67	13,59	13,51	13,43
0,25	13,85	13,77	13,68	13,59	13,51	13,42
0,30	13,86	13,78	13,69	13,59	13,50	13,41
0,35	13,87	13,79	13,69	13,60	13,50	13,41
0,40	13,88	13,80	13,70	13,60	13,50	13,40
0,50	13,91	13,82	13,71	13,60	13,49	13,39
0,60	13,94	13,85	13,73	13,61	13,49	13,38
0,70	13,97	13,87	13,75	13,62	13,50	13,38
0,80	14,00	13,91	13,77	13,64	13,50	13,37
0,90	14,03	13,94	13,80	13,65	13,51	13,37
1,00	14,07	13,98	13,82	13,67	13,52	13,38
1,20	14,16	14,06	13,89	13,72	13,55	13,39
1,40	14,26	14,16	13,97	13,79	13,60	13,43
1,60	14,38	14,28	14,08	13,88	13,68	13,48
1,80	14,53	14,44	14,21	13,99	13,77	13,56
2,00	14,73	14,63	14,39	14,14	13,90	13,66
2,50	98,77	74,75	62,24	47,97	31,92	14,09
3,00	103,63	105,05				86,29
3,50	107,84	107,25				86,40
4,00	111,64	109,12				86,48
4,50	115,11	110,75				86,54
5,00	118,28	112,16				86,57
5,50	121,28	113,42				86,59
6,00	124,10	114,54				86,60
6,50	126,76	115,54				86,59
7,00	129,30	116,44				86,58
7,50	131,72	117,24				86,55

Продовження таблиці А.1

$T = 340 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	14,62	14,55	14,48	14,42	14,35	14,29
0,15	14,63	14,56	14,49	14,42	14,35	14,28
0,20	14,64	14,57	14,49	14,42	14,34	14,27
0,25	14,65	14,58	14,50	14,42	14,34	14,26
0,30	14,66	14,59	14,50	14,42	14,34	14,25
0,35	14,67	14,60	14,51	14,42	14,33	14,25
0,40	14,69	14,61	14,52	14,42	14,33	14,24
0,50	14,72	14,64	14,53	14,43	14,33	14,23
0,60	14,75	14,67	14,55	14,44	14,33	14,22
0,70	14,78	14,70	14,57	14,45	14,33	14,21
0,80	14,82	14,73	14,60	14,47	14,33	14,21
0,90	14,86	14,77	14,63	14,48	14,34	14,20
1,00	14,91	14,81	14,66	14,50	14,35	14,20
1,20	15,02	14,91	14,73	14,55	14,38	14,21
1,40	15,14	15,02	14,82	14,62	14,42	14,22
1,60	15,29	15,16	14,93	14,70	14,47	14,25
1,80	15,46	15,32	15,06	14,80	14,54	14,29
2,00	15,67	15,51	15,21	14,92	14,63	14,35
2,50	16,39	16,18	15,77	15,37	14,97	14,56
3,00	17,69	17,36	16,76	16,15	15,55	14,93
3,50	21,15	20,43	19,22	18,01	16,81	15,55
4,00	63,26	53,85	45,25	36,20	26,70	16,60
4,50	73,10	61,02	51,58	41,48	30,70	18,80
5,00	79,45	80,04				65,76
5,50	84,42	83,55				66,35
6,00	88,62	86,36				66,75
6,50	92,30	88,70				67,03
7,00	95,60	90,71				67,22
7,50	98,63	92,47				67,36

Продовження таблиці А.1

$T = 360 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	15,41	15,36	15,30	15,24	15,18	15,13
0,15	15,43	15,37	15,30	15,24	15,18	15,12
0,20	15,44	15,38	15,31	15,24	15,18	15,11
0,25	15,45	15,39	15,32	15,25	15,18	15,11
0,30	15,47	15,40	15,33	15,25	15,17	15,10
0,35	15,48	15,41	15,33	15,25	15,17	15,09
0,40	15,50	15,43	15,34	15,26	15,17	15,09
0,50	15,53	15,46	15,36	15,27	15,17	15,08
0,60	15,57	15,49	15,38	15,28	15,17	15,07
0,70	15,60	15,52	15,41	15,29	15,17	15,06
0,80	15,65	15,56	15,43	15,31	15,18	15,06
0,90	15,69	15,60	15,46	15,32	15,19	15,06
1,00	15,74	15,65	15,50	15,35	15,20	15,05
1,20	15,85	15,75	15,57	15,40	15,22	15,06
1,40	15,98	15,86	15,66	15,46	15,26	15,06
1,60	16,13	15,99	15,76	15,53	15,30	15,08
1,80	16,30	16,15	15,88	15,62	15,36	15,10
2,00	16,49	16,32	16,02	15,72	15,43	15,14
2,50	17,11	16,88	16,47	16,07	15,67	15,27
3,00	17,98	17,66	17,12	16,57	16,03	15,48
3,50	19,26	18,82	18,06	17,32	16,57	15,80
4,00	21,26	20,60	19,53	18,46	17,39	16,25
4,50	24,74	23,67	22,01	20,35	18,71	16,91
5,00	31,42	29,44	26,62	23,81	20,99	17,87
5,50	41,79	38,19	33,70	29,15	24,55	19,34
6,00	51,02	45,92	40,36	34,69	28,91	21,81
6,50	57,81	52,16	46,86	41,55	36,23	27,15
7,00	63,09	59,32	58,14			40,57
7,50	67,44	64,53				47,21

Продовження таблиці А.1

$T = 380 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	16,20	16,16	16,11	16,06	16,01	15,97
0,15	16,22	16,17	16,12	16,06	16,01	15,96
0,20	16,23	16,18	16,13	16,07	16,01	15,96
0,25	16,25	16,20	16,14	16,07	16,01	15,95
0,30	16,27	16,21	16,15	16,08	16,01	15,95
0,35	16,29	16,23	16,16	16,08	16,01	15,94
0,40	16,30	16,24	16,17	16,09	16,01	15,94
0,50	16,34	16,28	16,19	16,10	16,02	15,94
0,60	16,38	16,31	16,22	16,12	16,02	15,93
0,70	16,43	16,35	16,24	16,14	16,03	15,93
0,80	16,47	16,39	16,27	16,15	16,04	15,92
0,90	16,52	16,44	16,31	16,18	16,04	15,92
1,00	16,57	16,48	16,34	16,20	16,06	15,92
1,20	16,69	16,58	16,42	16,25	16,08	15,92
1,40	16,81	16,70	16,50	16,31	16,12	15,93
1,60	16,95	16,82	16,60	16,38	16,16	15,95
1,80	17,11	16,96	16,71	16,46	16,21	15,96
2,00	17,28	17,12	16,83	16,55	16,27	15,99
2,50	17,80	17,58	17,20	16,83	16,45	16,08
3,00	18,46	18,18	17,69	17,20	16,72	16,23
3,50	19,30	18,94	18,31	17,69	17,07	16,43
4,00	20,40	19,93	19,13	18,33	17,54	16,70
4,50	21,84	21,22	20,19	19,17	18,16	17,05
5,00	23,74	22,92	21,60	20,28	18,97	17,52
5,50	26,25	25,16	23,44	21,74	20,05	18,11
6,00	29,47	28,01	25,81	23,62	21,44	18,88
6,50	33,37	31,46	28,70	25,95	23,22	19,88
7,00	37,66	35,24	31,95	28,67	25,42	21,17
7,50	41,92	39,03	35,35	31,71	28,10	22,87

Продовження таблиці А.1

$T = 400 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	16,99	16,95	16,91	16,88	16,84	16,81
0,15	17,01	16,97	16,93	16,88	16,84	16,80
0,20	17,02	16,98	16,94	16,89	16,85	16,80
0,25	17,05	17,00	16,95	16,90	16,85	16,80
0,30	17,07	17,02	16,96	16,91	16,85	16,80
0,35	17,09	17,04	16,98	16,92	16,86	16,80
0,40	17,11	17,06	16,99	16,93	16,86	16,80
0,50	17,15	17,10	17,02	16,94	16,87	16,79
0,60	17,20	17,14	17,05	16,96	16,88	16,79
0,70	17,25	17,18	17,08	16,98	16,89	16,79
0,80	17,30	17,23	17,12	17,01	16,90	16,79
0,90	17,35	17,27	17,15	17,03	16,91	16,80
1,00	17,40	17,32	17,19	17,06	16,92	16,80
1,20	17,52	17,42	17,27	17,11	16,95	16,81
1,40	17,64	17,53	17,35	17,17	16,99	16,82
1,60	17,77	17,65	17,44	17,24	17,03	16,83
1,80	17,91	17,78	17,54	17,31	17,08	16,85
2,00	18,06	17,92	17,65	17,39	17,13	16,88
2,50	18,49	18,30	17,96	17,63	17,29	16,96
3,00	18,99	18,76	18,34	17,92	17,50	17,07
3,50	19,59	19,31	18,78	18,27	17,75	17,22
4,00	20,29	19,95	19,32	18,69	18,07	17,41
4,50	21,13	20,71	19,95	19,20	18,46	17,65
5,00	22,11	21,61	20,71	19,81	18,93	17,93
5,50	23,27	22,67	21,60	20,54	19,49	18,28
6,00	24,62	23,91	22,64	21,40	20,17	18,70
6,50	26,18	25,33	23,85	22,40	20,97	19,19
7,00	27,93	26,93	25,22	23,55	21,91	19,78
7,50	29,85	28,68	26,75	24,86	23,00	20,47

Продовження таблиці А.1

$T = 420 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	17,76	17,74	17,72	17,69	17,67	17,65
0,15	17,79	17,76	17,73	17,70	17,67	17,65
0,20	17,81	17,78	17,75	17,71	17,68	17,65
0,25	17,83	17,80	17,76	17,73	17,69	17,65
0,30	17,86	17,83	17,78	17,74	17,69	17,65
0,35	17,88	17,85	17,80	17,75	17,70	17,65
0,40	17,91	17,87	17,82	17,76	17,70	17,65
0,50	17,96	17,92	17,85	17,78	17,72	17,66
0,60	18,01	17,96	17,89	17,81	17,73	17,66
0,70	18,07	18,01	17,92	17,84	17,75	17,67
0,80	18,12	18,06	17,96	17,86	17,76	17,67
0,90	18,18	18,11	18,00	17,89	17,78	17,68
1,00	18,23	18,16	18,04	17,92	17,80	17,68
1,20	18,35	18,26	18,12	17,98	17,83	17,70
1,40	18,46	18,37	18,21	18,04	17,87	17,72
1,60	18,59	18,48	18,29	18,11	17,92	17,74
1,80	18,71	18,60	18,39	18,18	17,97	17,76
2,00	18,85	18,72	18,49	18,25	18,02	17,79
2,50	19,19	19,04	18,75	18,45	18,16	17,87
3,00	19,57	19,40	19,04	18,68	18,33	17,98
3,50	19,98	19,78	19,36	18,95	18,53	18,10
4,00	20,43	20,21	19,72	19,24	18,77	18,26
4,50	20,92	20,67	20,12	19,57	19,03	18,44
5,00	21,45	21,18	20,55	19,94	19,34	18,64
5,50	22,03	21,73	21,03	20,35	19,69	18,89
6,00	22,65	22,33	21,56	20,81	20,08	19,16
6,50	23,32	22,98	22,14	21,32	20,52	19,48
7,00	24,04	23,67	22,76	21,88	21,02	19,83
7,50	24,80	24,41	23,43	22,49	21,58	20,22

Таблиця А.2 – В'язкість суміші R32/R134а та її компонентів

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	12,00	12,12	12,25	12,37	12,49	12,61
0,15	12,00	12,12	12,23	12,35	12,46	12,60
0,20	11,99	12,11	12,22	12,33	12,44	12,59
0,25	11,99	12,11	12,21	12,31	12,41	12,58
0,30	11,99	12,11	12,20	12,29	12,39	12,58
0,35	11,98	12,10	12,19	12,28	12,37	12,57
0,40	11,98	12,10	12,18	12,26	12,35	12,57
0,50	11,99	12,11	12,17	12,24	12,31	12,56
0,60	12,00	12,12	12,17	12,22	12,27	12,56
0,70	12,02	12,14	12,17	12,20	12,23	12,56
0,80	195,19					12,56
0,90	195,37					12,57
1,00	195,56					12,59
1,20	195,96					12,64
1,40	196,34					12,72
1,60	196,71					12,83
1,80	197,08					110,64
2,00	197,46					110,64
2,50	198,36					110,64
3,00	199,24					110,63
3,50	200,11					110,62
4,00	200,96					110,60
4,50	201,81					110,57
5,00	202,63					110,54
5,50	203,42					110,51
6,00	204,21					110,47
6,50	205,01					110,42
7,00	205,77					110,38
7,50	206,50					110,33

Продовження таблиці А.2

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	12,77	12,91	13,04	13,18	13,31	13,45
0,15	12,75	12,89	13,02	13,15	13,28	13,44
0,20	12,73	12,87	13,00	13,13	13,25	13,43
0,25	12,70	12,85	12,97	13,10	13,23	13,42
0,30	12,68	12,83	12,95	13,08	13,20	13,41
0,35	12,66	12,81	12,93	13,05	13,17	13,41
0,40	12,64	12,79	12,91	13,03	13,14	13,40
0,50	12,60	12,76	12,87	12,98	13,09	13,39
0,60	12,57	12,73	12,83	12,94	13,04	13,38
0,70	12,53	12,70	12,80	12,90	12,99	13,38
0,80	12,51	12,68	12,77	12,86	12,95	13,37
0,90	12,49	12,67	12,75	12,83	12,91	13,37
1,00	12,47	12,66	12,73	12,80	12,87	13,38
1,20	12,47	12,66	12,71	12,76	12,80	13,39
1,40	151,43					13,43
1,60	151,92					13,48
1,80	152,45					13,56
2,00	152,92					13,66
2,50	154,13					14,09
3,00	155,29					86,29
3,50	156,41					86,40
4,00	157,47					86,48
4,50	158,54					86,54
5,00	159,56					86,57
5,50	160,53					86,59
6,00	161,50					86,60
6,50	162,42					86,59
7,00	163,34					86,58
7,50	164,24					86,55

Продовження таблиці А.2

$T = 340 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	13,54	13,69	13,84	13,99	14,14	14,29
0,15	13,51	13,66	13,81	13,96	14,11	14,28
0,20	13,48	13,64	13,79	13,93	14,08	14,27
0,25	13,45	13,62	13,76	13,90	14,05	14,26
0,30	13,43	13,59	13,73	13,88	14,02	14,25
0,35	13,40	13,57	13,71	13,85	13,99	14,25
0,40	13,37	13,55	13,69	13,83	13,96	14,24
0,50	13,32	13,50	13,64	13,77	13,91	14,23
0,60	13,27	13,46	13,59	13,73	13,86	14,22
0,70	13,22	13,42	13,55	13,68	13,81	14,21
0,80	13,18	13,39	13,51	13,63	13,76	14,21
0,90	13,14	13,35	13,47	13,59	13,71	14,20
1,00	13,10	13,32	13,44	13,55	13,66	14,20
1,20	13,04	13,27	13,38	13,48	13,58	14,21
1,40	13,00	13,25	13,33	13,42	13,50	14,22
1,60	12,99	13,25	13,31	13,38	13,44	14,25
1,80	13,03	13,28	13,32	13,36	13,40	14,29
2,00	115,62					14,35
2,50	117,59					14,56
3,00	119,40					14,93
3,50	121,09					15,55
4,00	122,69					16,60
4,50	124,18					18,80
5,00	125,58					65,76
5,50	126,93					66,35
6,00	128,22					66,75
6,50	129,47					67,03
7,00	130,66					67,22
7,50	131,80					67,36

Продовження таблиці А.2

$T = 360 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	14,30	14,47	14,63	14,80	14,96	15,13
0,15	14,27	14,44	14,61	14,77	14,93	15,12
0,20	14,25	14,42	14,58	14,75	14,91	15,11
0,25	14,22	14,40	14,56	14,72	14,88	15,11
0,30	14,20	14,38	14,54	14,70	14,85	15,10
0,35	14,18	14,36	14,52	14,67	14,83	15,09
0,40	14,15	14,34	14,49	14,65	14,80	15,09
0,50	14,11	14,30	14,45	14,60	14,75	15,08
0,60	14,06	14,26	14,41	14,55	14,70	15,07
0,70	14,02	14,23	14,37	14,51	14,65	15,06
0,80	13,98	14,20	14,33	14,47	14,60	15,06
0,90	13,94	14,17	14,30	14,43	14,56	15,06
1,00	13,91	14,14	14,26	14,39	14,51	15,05
1,20	13,85	14,09	14,20	14,31	14,43	15,06
1,40	13,81	14,06	14,16	14,25	14,35	15,06
1,60	13,79	14,04	14,12	14,20	14,28	15,08
1,80	13,79	14,05	14,10	14,16	14,22	15,10
2,00	13,82	14,07	14,11	14,14	14,17	15,14
2,50	14,11	14,33	14,26	14,20	14,12	15,27
3,00	15,19	15,24	14,94	14,62	14,29	15,48
3,50	87,31				21,72	15,80
4,00	90,83				21,31	16,25
4,50	93,76				20,98	16,91
5,00	96,31				20,79	17,87
5,50	98,57				20,85	19,34
6,00	100,63					21,81
6,50	102,52					27,15
7,00	104,28					40,57
7,50	105,92					47,21

Продовження таблиці А.2

$T = 380 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	15,06	15,24	15,42	15,60	15,78	15,97
0,15	15,04	15,23	15,40	15,58	15,76	15,96
0,20	15,02	15,21	15,39	15,56	15,74	15,96
0,25	15,01	15,20	15,37	15,54	15,71	15,95
0,30	14,99	15,19	15,35	15,52	15,69	15,95
0,35	14,98	15,17	15,34	15,50	15,67	15,94
0,40	14,96	15,16	15,32	15,48	15,64	15,94
0,50	14,94	15,14	15,29	15,45	15,60	15,94
0,60	14,91	15,12	15,26	15,41	15,56	15,93
0,70	14,89	15,10	15,24	15,37	15,51	15,93
0,80	14,87	15,08	15,21	15,34	15,47	15,92
0,90	14,85	15,06	15,19	15,31	15,43	15,92
1,00	14,83	15,05	15,16	15,28	15,39	15,92
1,20	14,81	15,03	15,13	15,22	15,32	15,92
1,40	14,80	15,02	15,10	15,17	15,25	15,93
1,60	14,80	15,03	15,08	15,13	15,19	15,95
1,80	14,83	15,05	15,08	15,10	15,13	15,96
2,00	14,87	15,08	15,08	15,08	15,08	15,99
2,50	15,09	15,28	15,19	15,10	15,00	16,08
3,00	15,58	15,68	15,46	15,24	15,01	16,23
3,50	16,57	16,48	16,05	15,61	15,15	16,43
4,00	18,87	18,25	17,43	16,54	15,61	16,70
4,50	32,11	25,29	18,43	17,32	18,38	17,05
5,00	59,05		19,95	18,23	22,44	17,52
5,50	67,42			19,43	23,08	18,11
6,00	72,75			19,88	23,38	18,88
6,50	76,82				23,64	19,88
7,00	80,17				24,03	21,17
7,50	83,05				24,70	22,87

Продовження таблиці А.2

$T = 400 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	15,81	16,01	16,21	16,41	16,61	16,81
0,15	15,81	16,01	16,20	16,39	16,59	16,80
0,20	15,80	16,00	16,19	16,38	16,57	16,80
0,25	15,80	16,00	16,18	16,37	16,55	16,80
0,30	15,80	16,00	16,18	16,35	16,53	16,80
0,35	15,80	16,00	16,17	16,34	16,51	16,80
0,40	15,80	16,00	16,16	16,33	16,50	16,80
0,50	15,80	16,00	16,15	16,31	16,46	16,79
0,60	15,80	16,00	16,14	16,28	16,42	16,79
0,70	15,80	16,00	16,13	16,26	16,39	16,79
0,80	15,81	16,00	16,12	16,24	16,36	16,79
0,90	15,81	16,01	16,12	16,22	16,33	16,80
1,00	15,83	16,02	16,11	16,20	16,30	16,80
1,20	15,86	16,05	16,11	16,17	16,24	16,81
1,40	15,90	16,08	16,11	16,15	16,18	16,82
1,60	15,95	16,13	16,13	16,13	16,14	16,83
1,80	16,02	16,18	16,15	16,12	16,09	16,85
2,00	16,11	16,26	16,19	16,12	16,05	16,88
2,50	16,41	16,51	16,34	16,16	15,99	16,96
3,00	16,88	16,89	16,59	16,29	15,98	17,07
3,50	17,58	17,45	16,99	16,52	16,03	17,22
4,00	18,63	18,28	17,60	16,91	16,19	17,41
4,50	20,27	19,52	18,56	17,55	16,49	17,65
5,00	22,92	21,40	20,05	18,59	17,03	17,93
5,50	27,47	24,14	22,38	20,33	18,00	18,28
6,00	35,06	26,93	25,29	22,84	19,55	18,70
6,50	44,36		26,67	24,98	21,29	19,19
7,00	52,43			25,77	22,59	19,78
7,50	58,72				23,50	20,47

Продовження таблиці А.2

$T = 420 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	16,56	16,78	16,99	17,21	17,43	17,65
0,15	16,57	16,79	17,00	17,21	17,42	17,65
0,20	16,59	16,80	17,00	17,20	17,40	17,65
0,25	16,60	16,81	17,00	17,20	17,39	17,65
0,30	16,61	16,82	17,01	17,19	17,38	17,65
0,35	16,63	16,83	17,01	17,19	17,36	17,65
0,40	16,64	16,85	17,01	17,18	17,35	17,65
0,50	16,67	16,87	17,02	17,17	17,32	17,66
0,60	16,71	16,90	17,03	17,17	17,30	17,66
0,70	16,74	16,93	17,04	17,16	17,28	17,67
0,80	16,78	16,96	17,06	17,16	17,26	17,67
0,90	16,82	16,99	17,07	17,15	17,23	17,68
1,00	16,86	17,03	17,09	17,15	17,21	17,68
1,20	16,96	17,11	17,13	17,15	17,17	17,70
1,40	17,06	17,19	17,18	17,16	17,14	17,72
1,60	17,18	17,29	17,23	17,17	17,11	17,74
1,80	17,31	17,40	17,29	17,19	17,08	17,76
2,00	17,46	17,52	17,37	17,22	17,06	17,79
2,50	17,89	17,88	17,60	17,32	17,03	17,87
3,00	18,45	18,33	17,90	17,47	17,04	17,98
3,50	19,17	18,90	18,31	17,71	17,09	18,10
4,00	20,08	19,63	18,84	18,03	17,20	18,26
4,50	21,26	20,53	19,51	18,46	17,38	18,44
5,00	22,79	21,67	20,38	19,04	17,65	18,64
5,50	24,77	23,06	21,48	19,81	18,03	18,89
6,00	27,37	24,71	22,83	20,79	18,56	19,16
6,50	30,71	26,51	24,42	22,00	19,25	19,48
7,00	34,86	28,17	26,07	23,38	20,10	19,83
7,50	39,70	29,12	27,47	24,78	21,07	20,22

Таблиця А.3 – В'язкість суміші R125/R134а та її компонентів

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	12,00	12,20	12,40	12,60	12,80	13,00
0,15	12,00	12,19	12,40	12,62	12,84	13,02
0,20	11,99	12,18	12,41	12,64	12,87	13,03
0,25	11,99	12,16	12,41	12,66	12,90	13,04
0,30	11,99	12,15	12,41	12,68	12,94	13,05
0,35	11,98	12,14	12,42	12,70	12,98	13,07
0,40	11,98	12,13	12,42	12,72	13,01	13,08
0,50	11,99	12,10	12,43	12,76	13,08	13,10
0,60	12,00	12,09	12,45	12,80	13,16	13,13
0,70	12,02	12,07	12,46	12,85	13,24	13,15
0,80	195,19					13,17
0,90	195,37					13,19
1,00	195,56					13,21
1,20	195,96					13,24
1,40	196,34					13,26
1,60	196,71					137,81
1,80	197,08					139,13
2,00	197,46					140,45
2,50	198,36					143,55
3,00	199,24					146,53
3,50	200,11					149,39
4,00	200,96					152,16
4,50	201,81					154,78
5,00	202,63					157,31
5,50	203,42					159,78
6,00	204,21					162,18

## Продовження таблиці А.3

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	12,77	12,98	13,19	13,40	13,60	13,81
0,15	12,75	12,95	13,18	13,41	13,63	13,82
0,20	12,73	12,92	13,17	13,42	13,66	13,83
0,25	12,70	12,90	13,16	13,43	13,69	13,85
0,30	12,68	12,87	13,15	13,44	13,72	13,86
0,35	12,66	12,84	13,14	13,45	13,75	13,87
0,40	12,64	12,81	13,14	13,46	13,78	13,88
0,50	12,60	12,76	13,12	13,48	13,85	13,91
0,60	12,57	12,71	13,11	13,51	13,91	13,94
0,70	12,53	12,66	13,10	13,54	13,98	13,97
0,80	12,51	12,62	13,10	13,58	14,06	14,00
0,90	12,49	12,57	13,10	13,62	14,14	14,03
1,00	12,47	12,54	13,10	13,66	14,22	14,07
1,20	12,47	12,47	13,12	13,77	14,41	14,16
1,40	151,43				12,20	14,26
1,60	151,92				12,43	14,38
1,80	152,45				12,69	14,53
2,00	152,92				13,01	14,73
2,50	154,13					98,77
3,00	155,29					103,63
3,50	156,41					107,84
4,00	157,47					111,64
4,50	158,54					115,11
5,00	159,56					118,28
5,50	160,53					121,28
6,00	161,50					124,10

Продовження таблиці А.3

$T = 340 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	13,54	13,76	13,97	14,19	14,40	14,62
0,15	13,51	13,72	13,96	14,19	14,43	14,63
0,20	13,48	13,69	13,94	14,20	14,45	14,64
0,25	13,45	13,66	13,93	14,21	14,48	14,65
0,30	13,43	13,62	13,92	14,22	14,51	14,66
0,35	13,40	13,59	13,91	14,22	14,54	14,67
0,40	13,37	13,56	13,90	14,23	14,57	14,69
0,50	13,32	13,50	13,88	14,26	14,63	14,72
0,60	13,27	13,44	13,86	14,28	14,70	14,75
0,70	13,22	13,38	13,85	14,31	14,77	14,78
0,80	13,18	13,33	13,84	14,34	14,84	14,82
0,90	13,14	13,28	13,83	14,38	14,92	14,86
1,00	13,10	13,23	13,82	14,42	15,01	14,91
1,20	13,04	13,14	13,83	14,51	15,19	15,02
1,40	13,00	13,06	13,85	14,62	15,39	15,14
1,60	12,99	13,00	13,89	14,76	15,63	15,29
1,80	13,03	12,97	13,96	14,94	15,90	15,46
2,00	115,62			15,43	15,58	15,67
2,50	117,59			16,06	16,50	16,39
3,00	119,40				18,00	17,69
3,50	121,09					21,15
4,00	122,69					63,26
4,50	124,18					73,10
5,00	125,58					79,45
5,50	126,93					84,42
6,00	128,22					88,62

Продовження таблиці А.3

$T = 360 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	14,30	14,52	14,75	14,97	15,19	15,41
0,15	14,27	14,49	14,73	14,98	15,22	15,43
0,20	14,25	14,46	14,72	14,99	15,25	15,44
0,25	14,22	14,43	14,72	15,00	15,28	15,45
0,30	14,20	14,41	14,71	15,01	15,31	15,47
0,35	14,18	14,38	14,70	15,02	15,34	15,48
0,40	14,15	14,35	14,69	15,03	15,37	15,50
0,50	14,11	14,29	14,68	15,06	15,44	15,53
0,60	14,06	14,24	14,66	15,09	15,51	15,57
0,70	14,02	14,19	14,65	15,12	15,58	15,60
0,80	13,98	14,14	14,65	15,15	15,66	15,65
0,90	13,94	14,09	14,64	15,19	15,74	15,69
1,00	13,91	14,05	14,64	15,24	15,82	15,74
1,20	13,85	13,97	14,65	15,33	16,01	15,85
1,40	13,81	13,90	14,68	15,45	16,21	15,98
1,60	13,79	13,84	14,72	15,58	16,43	16,13
1,80	13,79	13,80	14,78	15,74	16,68	16,30
2,00	13,82	13,78	14,86	15,92	16,96	16,49
2,50	14,11	13,86	15,21	16,53	17,80	17,11
3,00	15,19	14,28	15,91	17,48	18,97	17,98
3,50	87,31		20,54	20,52	21,04	19,26
4,00	90,83			21,97	22,89	21,26
4,50	93,76				25,34	24,74
5,00	96,31					31,42
5,50	98,57					41,79
6,00	100,63					51,02

Продовження таблиці А.3

$T = 380 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	15,06	15,29	15,52	15,74	15,97	16,20
0,15	15,04	15,27	15,51	15,76	16,01	16,22
0,20	15,02	15,24	15,51	15,77	16,04	16,23
0,25	15,01	15,22	15,51	15,79	16,07	16,25
0,30	14,99	15,20	15,50	15,81	16,11	16,27
0,35	14,98	15,18	15,50	15,82	16,14	16,29
0,40	14,96	15,16	15,50	15,84	16,18	16,30
0,50	14,94	15,12	15,50	15,88	16,25	16,34
0,60	14,91	15,08	15,50	15,91	16,33	16,38
0,70	14,89	15,05	15,50	15,96	16,41	16,43
0,80	14,87	15,02	15,51	16,00	16,49	16,47
0,90	14,85	14,99	15,52	16,05	16,57	16,52
1,00	14,83	14,96	15,53	16,10	16,66	16,57
1,20	14,81	14,91	15,56	16,21	16,85	16,69
1,40	14,80	14,86	15,60	16,33	17,05	16,81
1,60	14,80	14,84	15,66	16,47	17,27	16,95
1,80	14,83	14,82	15,73	16,62	17,51	17,11
2,00	14,87	14,81	15,81	16,80	17,76	17,28
2,50	15,09	14,88	16,12	17,32	18,49	17,80
3,00	15,58	15,10	16,58	18,01	19,38	18,46
3,50	16,57	15,57	17,30	18,94	20,48	19,30
4,00	18,87	16,54	18,48	20,25	21,87	20,40
4,50	32,11	20,21	21,74	23,03	24,08	21,84
5,00	59,05		24,57	25,44	26,05	23,74
5,50	67,42			26,84	27,38	26,25
6,00	72,75				27,95	29,47

Продовження таблиці А.3

$T = 400 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	15,81	16,05	16,28	16,52	16,75	16,99
0,15	15,81	16,04	16,29	16,54	16,79	17,01
0,20	15,80	16,03	16,29	16,56	16,83	17,02
0,25	15,80	16,02	16,30	16,58	16,87	17,05
0,30	15,80	16,01	16,31	16,61	16,91	17,07
0,35	15,80	16,00	16,31	16,63	16,95	17,09
0,40	15,80	15,99	16,32	16,65	16,99	17,11
0,50	15,80	15,97	16,34	16,70	17,07	17,15
0,60	15,80	15,96	16,36	16,76	17,16	17,20
0,70	15,80	15,94	16,38	16,81	17,24	17,25
0,80	15,81	15,93	16,40	16,87	17,33	17,30
0,90	15,81	15,92	16,43	16,93	17,42	17,35
1,00	15,83	15,92	16,45	16,99	17,52	17,40
1,20	15,86	15,91	16,51	17,12	17,71	17,52
1,40	15,90	15,91	16,58	17,25	17,92	17,64
1,60	15,95	15,92	16,67	17,40	18,13	17,77
1,80	16,02	15,94	16,76	17,56	18,36	17,91
2,00	16,11	15,97	16,86	17,74	18,60	18,06
2,50	16,41	16,10	17,18	18,23	19,25	18,49
3,00	16,88	16,32	17,59	18,81	19,98	18,99
3,50	17,58	16,67	18,13	19,51	20,82	19,59
4,00	18,63	17,18	18,83	20,35	21,76	20,29
4,50	20,27	17,93	19,74	21,37	22,82	21,13
5,00	22,92	19,03	20,94	22,60	24,01	22,11
5,50	27,47	20,61	22,55	24,11	25,30	23,27
6,00	35,06		24,51	25,83	26,61	24,62

Продовження таблиці А.3

$T = 420 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,10	16,56	16,80	17,04	17,28	17,52	17,76
0,15	16,57	16,80	17,06	17,31	17,57	17,79
0,20	16,59	16,81	17,08	17,34	17,61	17,81
0,25	16,60	16,81	17,09	17,38	17,66	17,83
0,30	16,61	16,82	17,11	17,41	17,70	17,86
0,35	16,63	16,82	17,13	17,44	17,75	17,88
0,40	16,64	16,82	17,15	17,47	17,80	17,91
0,50	16,67	16,84	17,19	17,54	17,89	17,96
0,60	16,71	16,85	17,23	17,61	17,99	18,01
0,70	16,74	16,86	17,27	17,68	18,08	18,07
0,80	16,78	16,88	17,31	17,75	18,18	18,12
0,90	16,82	16,89	17,36	17,82	18,28	18,18
1,00	16,86	16,91	17,40	17,89	18,38	18,23
1,20	16,96	16,95	17,50	18,05	18,59	18,35
1,40	17,06	17,00	17,61	18,21	18,80	18,46
1,60	17,18	17,06	17,72	18,37	19,01	18,59
1,80	17,31	17,12	17,84	18,54	19,24	18,71
2,00	17,46	17,20	17,97	18,72	19,46	18,85
2,50	17,89	17,42	18,33	19,21	20,06	19,19
3,00	18,45	17,70	18,74	19,74	20,69	19,57
3,50	19,17	18,06	19,23	20,32	21,36	19,98
4,00	20,08	18,51	19,79	20,97	22,06	20,43
4,50	21,26	19,07	20,44	21,69	22,79	20,92
5,00	22,79	19,75	21,20	22,47	23,55	21,45
5,50	24,77	20,57	22,07	23,32	24,32	22,03
6,00	27,37	21,55	23,06	24,24	25,08	22,65

## Додаток Б

### Теплопровідність сумішей R32/R125, R32/R134a і R125/R134a та їх компонентів

#### Позначення та розмірності табличних величин

$T$	абсолютна температура, К;
$p$	тиск, МПа;
$x$	мольна доля першого компоненту суміші;
$\lambda$	теплопровідність, мВт/(м·К).

Відсутність деяких значень теплопровідності сумішей R32/R134a і R125/R134a у таблицях Б.2 і Б.3 обумовлена тим, що для цих двох сумішей дослідних даних у стані газу немає і рівняння для розрахунку теплопровідності описують лише стан рідини.

Таблиця Б.1 – Теплопровідність суміші R32/R125 та її компонентів

$T = 220 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	96,94	94,29	108,75	127,63	150,95	192,74
0,2	96,97	94,33	108,78	127,67	150,99	192,79
0,3	97,01	94,38	108,82	127,69	151,01	192,82
0,4	97,05	94,42	108,85	127,73	151,06	192,87
0,5	97,08	94,46	108,89	127,77	151,10	192,92
0,6	97,12	94,50	108,92	127,80	151,14	192,97
0,7	97,15	94,54	108,95	127,83	151,16	193,00
0,8	97,18	94,58	108,99	127,86	151,20	193,05
0,9	97,22	94,62	109,02	127,90	151,25	193,10
1,0	97,25	94,65	109,05	127,92	151,27	193,13
2,0	97,58	95,05	109,40	128,26	151,65	193,59
3,0	97,92	95,45	109,74	128,59	152,01	194,03
4,0	98,24	95,84	110,07	128,92	152,37	194,47
5,0	98,57	96,22	110,40	129,23	152,71	194,88
6,0	98,88	96,60	110,73	129,55	153,07	195,32
7,0	99,20	96,98	111,06	129,86	153,41	195,73
8,0	99,50	97,35	111,37	130,17	153,75	196,15
9,0	99,80	97,71	111,69	130,48	154,10	196,56
10,0	100,09	98,07	111,99	130,77	154,42	196,95
12,0	100,67	98,79	112,61	131,37	155,08	197,76
14,0	101,24	99,50	113,22	131,97	155,75	198,57
16,0	101,79	100,19	113,81	132,54	156,37	199,33
18,0	102,32	100,87	114,39	133,10	157,00	200,09
20,0	102,84	101,53	114,96	133,66	157,63	200,85
22,0	103,36	102,19	115,52	134,20	158,22	201,56
24,0	103,85	102,84	116,08	134,74	158,83	202,29
26,0	104,35	103,49	116,63	135,28	159,42	203,00
28,0	104,83	104,11	117,16	135,79	159,99	203,69
30,0	105,29	104,73	117,69	136,30	160,56	204,38

Продовження таблиці Б.1

$T = 240 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	9,80	9,70	9,59	9,48	9,37	9,26
0,2	9,86	9,74	9,66	9,57	9,48	9,40
0,3	88,01	83,70	98,53	116,70	138,19	176,83
0,4	88,05	83,74	98,57	116,73	138,23	176,88
0,5	88,09	83,79	98,61	116,78	138,29	176,95
0,6	88,13	83,83	98,65	116,81	138,33	177,00
0,7	88,17	83,87	98,68	116,85	138,37	177,05
0,8	88,21	83,91	98,72	116,88	138,41	177,10
0,9	88,26	83,96	98,77	116,94	138,46	177,17
1,0	88,30	84,01	98,81	116,97	138,50	177,22
2,0	88,70	84,43	99,19	117,35	138,93	177,75
3,0	89,09	84,86	99,56	117,73	139,35	178,28
4,0	89,49	85,28	99,94	118,10	139,76	178,79
5,0	89,86	85,69	100,31	118,47	140,19	179,32
6,0	90,23	86,08	100,66	118,82	140,58	179,80
7,0	90,59	86,48	101,02	119,18	140,98	180,31
8,0	90,94	86,87	101,37	119,53	141,37	180,80
9,0	91,29	87,26	101,71	119,88	141,76	181,28
10,0	91,63	87,64	102,05	120,23	142,15	181,77
12,0	92,29	88,38	102,71	120,89	142,90	182,70
14,0	92,93	89,10	103,36	121,54	143,63	183,60
16,0	93,54	89,81	104,00	122,18	144,36	184,51
18,0	94,13	90,50	104,61	122,79	145,05	185,37
20,0	94,72	91,18	105,22	123,41	145,74	186,23
22,0	95,27	91,84	105,81	124,00	146,42	187,07
24,0	95,82	92,49	106,39	124,59	147,08	187,89
26,0	96,35	93,13	106,96	125,15	147,72	188,68
28,0	96,87	93,76	107,52	125,72	148,36	189,47
30,0	97,38	94,38	108,06	126,26	148,97	190,22

Продовження таблиці Б.1

$T = 260 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	11,20	11,02	10,84	10,66	10,48	10,31
0,2	11,26	11,07	10,91	10,75	10,59	10,44
0,3	11,32	11,13	10,99	10,85	10,71	10,58
0,4	11,39	11,19	11,07	10,95	10,83	10,72
0,5	79,75	48,45	36,33	26,02	17,53	10,88
0,6	79,80	74,67	89,34	106,48	126,07	161,30
0,7	79,86	74,72	89,39	106,52	126,12	161,37
0,8	79,91	74,77	89,44	106,57	126,17	161,44
0,9	79,97	74,82	89,48	106,62	126,23	161,51
1,0	80,02	74,88	89,53	106,67	126,28	161,57
2,0	80,53	75,36	89,99	107,13	126,81	162,25
3,0	81,03	75,85	90,43	107,59	127,32	162,90
4,0	81,51	76,31	90,86	108,03	127,82	163,53
5,0	81,97	76,77	91,29	108,47	128,32	164,16
6,0	82,42	77,21	91,70	108,89	128,80	164,78
7,0	82,85	77,65	92,10	109,32	129,28	165,39
8,0	83,28	78,08	92,50	109,73	129,75	165,98
9,0	83,69	78,49	92,89	110,13	130,21	166,57
10,0	84,09	78,90	93,27	110,53	130,66	167,14
12,0	84,85	79,70	94,02	111,30	131,54	168,26
14,0	85,59	80,47	94,73	112,04	132,39	169,34
16,0	86,29	81,21	95,42	112,75	133,20	170,38
18,0	86,96	81,93	96,09	113,45	134,00	171,39
20,0	87,61	82,63	96,75	114,13	134,79	172,39
22,0	88,23	83,31	97,38	114,79	135,54	173,34
24,0	88,83	83,98	98,01	115,44	136,29	174,30
26,0	89,42	84,64	98,61	116,07	137,01	175,21
28,0	89,98	85,27	99,20	116,68	137,71	176,10
30,0	90,54	85,90	99,78	117,28	138,40	176,96

Продовження таблиці Б.1

$T = 280 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	12,64	12,41	12,17	11,93	11,70	11,46
0,2	12,70	12,46	12,24	12,02	11,80	11,58
0,3	12,77	12,52	12,31	12,11	11,91	11,71
0,4	12,84	12,57	12,39	12,20	12,02	11,85
0,5	12,92	12,64	12,47	12,31	12,14	11,99
0,6	13,00	12,71	12,56	12,41	12,26	12,13
0,7	13,09	12,78	12,65	12,52	12,39	12,29
0,8	13,19	12,86	12,75	12,64	12,53	12,45
0,9	71,86	43,32	33,70	25,38	18,34	12,63
1,0	71,93	43,40	33,80	25,50	18,49	12,81
2,0	72,65	67,25	81,31	97,17	114,84	146,58
3,0	73,33	67,84	81,87	97,76	115,51	147,44
4,0	73,96	68,40	82,41	98,33	116,16	148,28
5,0	74,57	68,94	82,93	98,88	116,78	149,08
6,0	75,14	69,46	83,44	99,42	117,40	149,89
7,0	75,69	69,96	83,93	99,93	117,99	150,65
8,0	76,21	70,45	84,39	100,43	118,57	151,39
9,0	76,71	70,92	84,85	100,92	119,12	152,12
10,0	77,20	71,38	85,30	101,39	119,67	152,82
12,0	78,12	72,26	86,15	102,31	120,73	154,19
14,0	78,98	73,10	86,97	103,18	121,74	155,50
16,0	79,79	73,90	87,75	104,02	122,71	156,76
18,0	80,57	74,67	88,50	104,83	123,64	157,97
20,0	81,31	75,42	89,23	105,61	124,55	159,15
22,0	82,01	76,14	89,93	106,35	125,41	160,26
24,0	82,69	76,84	90,61	107,08	126,26	161,36
26,0	83,34	77,52	91,26	107,78	127,08	162,41
28,0	83,96	78,18	91,90	108,47	127,88	163,45
30,0	84,57	78,83	92,53	109,13	128,65	164,45

Продовження таблиці Б.1

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	14,13	13,85	13,57	13,29	13,01	12,73
0,2	14,20	13,91	13,64	13,38	13,11	12,85
0,3	14,26	13,96	13,71	13,46	13,21	12,97
0,4	14,33	14,02	13,78	13,55	13,32	13,09
0,5	14,40	14,08	13,86	13,64	13,42	13,22
0,6	14,48	14,14	13,94	13,74	13,53	13,35
0,7	14,57	14,21	14,02	13,84	13,65	13,49
0,8	14,66	14,28	14,11	13,94	13,77	13,63
0,9	14,75	14,35	14,20	14,05	13,90	13,78
1,0	14,86	14,43	14,30	14,17	14,03	13,93
2,0	64,40	59,43	72,54	86,84	102,32	129,90
3,0	65,46	60,25	73,35	87,70	103,30	131,17
4,0	66,41	61,01	74,11	88,51	104,23	132,37
5,0	67,26	61,71	74,81	89,27	105,10	133,51
6,0	68,06	62,37	75,47	89,99	105,92	134,59
7,0	68,80	63,00	76,10	90,67	106,71	135,63
8,0	69,49	63,59	76,70	91,33	107,47	136,62
9,0	70,14	64,15	77,27	91,95	108,20	137,58
10,0	70,75	64,69	77,82	92,56	108,90	138,50
12,0	71,90	65,71	78,86	93,70	110,23	140,25
14,0	72,94	66,66	79,83	94,77	111,48	141,90
16,0	73,91	67,56	80,74	95,78	112,66	143,45
18,0	74,81	68,41	81,60	96,73	113,78	144,92
20,0	75,66	69,23	82,43	97,64	114,85	146,33
22,0	76,46	70,00	83,21	98,50	115,86	147,66
24,0	77,22	70,75	83,97	99,34	116,85	148,96
26,0	77,95	71,47	84,70	100,14	117,80	150,20
28,0	78,65	72,16	85,40	100,91	118,70	151,39
30,0	79,30	72,83	86,07	101,65	119,57	152,54

Продовження таблиці Б.1

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	15,66	15,36	15,06	14,75	14,45	14,14
0,2	15,73	15,41	15,12	14,83	14,54	14,25
0,3	15,79	15,46	15,19	14,91	14,63	14,36
0,4	15,86	15,51	15,25	14,99	14,73	14,48
0,5	15,93	15,57	15,32	15,08	14,83	14,60
0,6	16,01	15,63	15,40	15,16	14,93	14,72
0,7	16,08	15,69	15,47	15,25	15,03	14,84
0,8	16,17	15,75	15,55	15,35	15,14	14,97
0,9	16,25	15,82	15,63	15,44	15,25	15,10
1,0	16,34	15,89	15,72	15,54	15,37	15,23
2,0	17,69	16,87	16,85	16,83	16,81	16,89
3,0	56,11	52,05	63,71	76,08	89,17	112,10
4,0	57,98	53,38	65,07	77,56	90,85	114,29
5,0	59,47	54,49	66,23	78,84	92,31	116,21
6,0	60,74	55,46	67,25	79,98	93,63	117,95
7,0	61,84	56,32	68,17	81,01	94,83	119,54
8,0	62,82	57,11	69,01	81,96	95,94	121,01
9,0	63,71	57,84	69,79	82,84	96,98	122,39
10,0	64,54	58,52	70,53	83,67	97,95	123,68
12,0	66,02	59,77	71,86	85,18	99,74	126,07
14,0	67,32	60,90	73,07	86,56	101,36	128,23
16,0	68,49	61,94	74,18	87,82	102,86	130,23
18,0	69,56	62,90	75,21	88,99	104,24	132,08
20,0	70,55	63,80	76,17	90,08	105,54	133,81
22,0	71,47	64,66	77,07	91,11	106,76	135,44
24,0	72,33	65,46	77,93	92,08	107,92	136,99
26,0	73,15	66,24	78,75	93,01	109,03	138,46
28,0	73,92	66,98	79,53	93,89	110,07	139,85
30,0	74,66	67,69	80,27	94,73	111,08	141,19

Продовження таблиці Б.1

$T = 340 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	17,23	16,93	16,62	16,32	16,01	15,70
0,2	17,29	16,97	16,68	16,39	16,10	15,81
0,3	17,36	17,02	16,74	16,46	16,18	15,91
0,4	17,42	17,07	16,80	16,54	16,27	16,02
0,5	17,49	17,12	16,87	16,62	16,36	16,12
0,6	17,56	17,18	16,94	16,70	16,46	16,23
0,7	17,64	17,23	17,00	16,78	16,55	16,35
0,8	17,71	17,29	17,08	16,86	16,65	16,46
0,9	17,79	17,35	17,15	16,95	16,75	16,58
1,0	17,87	17,41	17,22	17,04	16,85	16,70
2,0	18,95	18,18	18,14	18,10	18,05	18,10
3,0	21,02	19,56	19,63	19,70	19,78	20,04
4,0	44,09	30,81	28,52	26,44	24,56	23,21
5,0	49,48	45,56	54,84	64,52	74,62	92,02
6,0	52,24	47,67	57,33	67,48	78,14	96,73
7,0	54,23	49,23	59,14	69,64	80,71	100,18
8,0	55,83	50,49	60,61	71,38	82,79	102,97
9,0	57,18	51,57	61,87	72,86	84,56	105,35
10,0	58,35	52,53	62,97	74,17	86,12	107,45
12,0	60,34	54,18	64,86	76,40	88,80	111,07
14,0	62,01	55,59	66,47	78,30	91,08	114,14
16,0	63,46	56,83	67,88	79,96	93,08	116,83
18,0	64,74	57,96	69,15	81,45	94,87	119,25
20,0	65,91	58,99	70,31	82,81	96,50	121,46
22,0	66,97	59,95	71,38	84,06	98,00	123,48
24,0	67,96	60,84	72,37	85,23	99,40	125,37
26,0	68,87	61,68	73,30	86,31	100,71	127,14
28,0	69,73	62,48	74,19	87,34	101,94	128,80
30,0	70,54	63,25	75,02	88,31	103,11	130,37

Продовження таблиці Б.1

$T = 360 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	18,83	18,55	18,27	17,99	17,71	17,43
0,2	18,89	18,60	18,33	18,06	17,79	17,52
0,3	18,96	18,64	18,38	18,13	17,87	17,62
0,4	19,02	18,69	18,44	18,20	17,95	17,72
0,5	19,08	18,73	18,50	18,27	18,03	17,82
0,6	19,15	18,78	18,56	18,34	18,12	17,92
0,7	19,22	18,83	18,62	18,42	18,21	18,02
0,8	19,29	18,88	18,69	18,49	18,30	18,13
0,9	19,37	18,94	18,75	18,57	18,39	18,24
1,0	19,44	18,99	18,82	18,65	18,48	18,35
2,0	20,37	19,64	19,60	19,56	19,53	19,58
3,0	21,76	20,58	20,68	20,77	20,87	21,13
4,0	24,25	22,14	22,33	22,52	22,72	23,20
5,0	30,46	25,57	25,59	25,63	25,71	26,26
6,0	40,02	30,89	30,79	30,81	30,96	32,04
7,0	44,97	37,69	41,53	45,58	49,86	57,39
8,0	48,01	42,27	48,90	55,85	63,10	75,68
9,0	50,24	44,53	52,06	59,98	68,29	82,79
10,0	52,02	46,17	54,25	62,78	71,76	87,53
12,0	54,81	48,64	57,41	66,74	76,63	94,19
14,0	56,98	50,53	59,77	69,65	80,19	99,04
16,0	58,78	52,10	61,68	72,00	83,06	102,95
18,0	60,32	53,46	63,32	73,99	85,48	106,26
20,0	61,69	54,67	64,76	75,73	87,60	109,15
22,0	62,92	55,76	66,04	77,29	89,49	111,73
24,0	64,03	56,76	67,22	78,70	91,21	114,07
26,0	65,06	57,69	68,30	80,00	92,79	116,21
28,0	66,01	58,56	69,31	81,20	94,25	118,20
30,0	66,90	59,39	70,25	82,32	95,61	120,06

Продовження таблиці Б.1

$T = 380 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	20,47	20,24	20,01	19,78	19,55	19,32
0,2	20,53	20,28	20,06	19,84	19,63	19,41
0,3	20,58	20,32	20,11	19,91	19,70	19,50
0,4	20,65	20,36	20,17	19,97	19,78	19,60
0,5	20,71	20,41	20,22	20,04	19,86	19,69
0,6	20,77	20,45	20,28	20,11	19,94	19,78
0,7	20,84	20,50	20,34	20,18	20,02	19,88
0,8	20,91	20,54	20,39	20,25	20,10	19,98
0,9	20,97	20,59	20,45	20,32	20,18	20,08
1,0	21,05	20,64	20,51	20,39	20,26	20,18
2,0	21,87	21,20	21,20	21,19	21,19	21,28
3,0	22,98	21,93	22,06	22,19	22,31	22,60
4,0	24,56	22,94	23,20	23,45	23,71	24,22
5,0	26,96	24,41	24,77	25,14	25,52	26,27
6,0	30,67	26,57	27,01	27,48	27,97	29,02
7,0	35,48	29,41	30,01	30,67	31,39	32,97
8,0	39,86	32,44	33,63	34,94	36,36	39,16
9,0	43,19	35,63	38,14	40,82	43,67	48,79
10,0	45,75	38,68	42,78	47,11	51,66	59,63
12,0	49,52	42,88	48,97	55,40	62,16	74,00
14,0	52,29	45,60	52,74	60,30	68,28	82,41
16,0	54,49	47,65	55,47	63,79	72,62	88,36
18,0	56,33	49,33	57,64	66,53	76,01	93,01
20,0	57,91	50,77	59,46	68,81	78,82	96,87
22,0	59,30	52,02	61,03	70,77	81,24	100,19
24,0	60,56	53,16	62,43	72,50	83,36	103,11
26,0	61,70	54,19	63,70	74,06	85,27	105,73
28,0	62,75	55,15	64,85	75,47	87,01	108,11
30,0	63,72	56,04	65,92	76,78	88,61	110,30

Продовження таблиці Б.1

$T = 400 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	22,13	21,99	21,84	21,70	21,56	21,41
0,2	22,19	22,02	21,89	21,76	21,63	21,50
0,3	22,24	22,06	21,94	21,82	21,70	21,58
0,4	22,30	22,10	21,99	21,88	21,77	21,67
0,5	22,36	22,14	22,04	21,94	21,84	21,76
0,6	22,42	22,18	22,09	22,00	21,91	21,84
0,7	22,48	22,22	22,14	22,06	21,99	21,93
0,8	22,55	22,26	22,20	22,13	22,06	22,02
0,9	22,61	22,31	22,25	22,19	22,14	22,11
1,0	22,68	22,35	22,30	22,26	22,21	22,21
2,0	23,43	22,84	22,91	22,98	23,05	23,21
3,0	24,37	23,44	23,63	23,82	24,01	24,36
4,0	25,58	24,21	24,52	24,84	25,16	25,71
5,0	27,16	25,19	25,63	26,08	26,53	27,32
6,0	29,26	26,45	27,02	27,60	28,20	29,26
7,0	31,89	28,02	28,74	29,48	30,26	31,66
8,0	34,90	29,86	30,79	31,76	32,79	34,69
9,0	37,90	31,83	33,11	34,47	35,91	38,55
10,0	40,62	33,86	35,69	37,63	39,69	43,39
12,0	44,95	37,80	41,18	44,74	48,50	55,08
14,0	48,18	41,09	45,91	51,00	56,36	65,76
16,0	50,73	43,62	49,49	55,70	62,26	73,83
18,0	52,83	45,63	52,26	59,30	66,76	80,01
20,0	54,61	47,31	54,51	62,20	70,37	84,98
22,0	56,16	48,75	56,41	64,62	73,38	89,13
24,0	57,54	50,03	58,06	66,71	75,98	92,70
26,0	58,79	51,17	59,53	68,56	78,26	95,84
28,0	59,92	52,21	60,84	70,21	80,30	98,66
30,0	60,97	53,17	62,05	71,70	82,15	101,21

Таблиця Б.2 – Теплопровідність суміші R32/R134a та її компонентів

$T = 200 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	142,87	124,93	142,10	159,28	176,45	209,40
0,2	142,89	124,94	142,13	159,31	176,49	209,46
0,3	142,90	124,95	142,14	159,33	176,51	209,48
0,4	142,92	124,97	142,15	159,34	176,53	209,51
0,5	142,94	124,98	142,18	159,38	176,57	209,57
0,6	142,95	124,99	142,19	159,39	176,60	209,59
0,7	142,97	125,01	142,22	159,43	176,64	209,65
0,8	142,98	125,02	142,23	159,44	176,66	209,68
0,9	143,00	125,03	142,25	159,46	176,68	209,70
1,0	143,02	125,05	142,27	159,50	176,72	209,76
2,0	143,17	125,17	142,44	159,72	176,99	210,12
3,0	143,32	125,31	142,63	159,95	177,27	210,50
4,0	143,48	125,44	142,81	160,19	177,56	210,89
5,0	143,63	125,56	142,99	160,41	177,83	211,25
6,0	143,78	125,69	143,16	160,63	178,10	211,61
7,0	143,92	125,81	143,33	160,85	178,37	211,97
8,0	144,07	125,93	143,50	161,07	178,64	212,33
9,0	144,22	126,06	143,67	161,29	178,90	212,69
10,0	144,36	126,18	143,84	161,51	179,17	213,05
12,0	144,64	126,42	144,17	161,93	179,69	213,75
14,0	144,93	126,66	144,51	162,36	180,21	214,45
16,0	145,19	126,88	144,82	162,76	180,71	215,12
18,0	145,47	127,11	145,14	163,17	181,21	215,79
20,0	145,73	127,34	145,46	163,58	181,70	216,46
22,0	145,99	127,55	145,76	163,97	182,18	217,10
24,0	146,25	127,77	146,07	164,36	182,66	217,75
26,0	146,50	127,98	146,36	164,74	183,12	218,37
28,0	146,75	128,19	146,65	165,12	183,58	218,99
30,0	146,99	128,40	146,95	165,49	184,04	219,61

## Продовження таблиці Б.2

$T = 220 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	126,12	112,76	129,28	145,79	162,31	192,74
0,2	126,14	112,78	129,30	145,83	162,35	192,79
0,3	126,15	112,79	129,32	145,84	162,37	192,82
0,4	126,17	112,80	129,34	145,87	162,41	192,87
0,5	126,19	112,82	129,36	145,91	162,45	192,92
0,6	126,21	112,84	129,39	145,94	162,49	192,97
0,7	126,22	112,85	129,40	145,95	162,51	193,00
0,8	126,24	112,87	129,43	145,98	162,54	193,05
0,9	126,26	112,88	129,45	146,02	162,58	193,10
1,0	126,28	112,89	129,46	146,03	162,60	193,13
2,0	126,45	113,05	129,68	146,32	162,95	193,59
3,0	126,62	113,20	129,89	146,58	163,28	194,03
4,0	126,79	113,35	130,10	146,85	163,60	194,47
5,0	126,96	113,49	130,30	147,11	163,91	194,88
6,0	127,12	113,64	130,50	147,37	164,24	195,32
7,0	127,28	113,78	130,70	147,63	164,55	195,73
8,0	127,44	113,92	130,90	147,88	164,86	196,15
9,0	127,59	114,06	131,09	148,13	165,17	196,56
10,0	127,75	114,19	131,28	148,37	165,46	196,95
12,0	128,06	114,46	131,66	148,86	166,06	197,76
14,0	128,36	114,73	132,04	149,35	166,66	198,57
16,0	128,65	114,99	132,40	149,81	167,23	199,33
18,0	128,95	115,24	132,76	150,28	167,79	200,09
20,0	129,23	115,49	133,11	150,74	168,36	200,85
22,0	129,50	115,73	133,45	151,17	168,89	201,56
24,0	129,78	115,97	133,79	151,61	169,43	202,29
26,0	130,04	116,21	134,13	152,05	169,96	203,00
28,0	130,30	116,44	134,45	152,46	170,47	203,69
30,0	130,57	116,67	134,77	152,88	170,98	204,38

## Продовження таблиці Б.2

$T = 240 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	112,52					9,26
0,2	112,54					9,40
0,3	112,56	102,48	118,03	133,57	149,12	176,83
0,4	112,58	102,50	118,05	133,60	149,16	176,88
0,5	112,60	102,52	118,08	133,65	149,21	176,95
0,6	112,62	102,53	118,11	133,68	149,25	177,00
0,7	112,64	102,55	118,13	133,71	149,28	177,05
0,8	112,66	102,57	118,15	133,74	149,32	177,10
0,9	112,68	102,59	118,19	133,78	149,37	177,17
1,0	112,70	102,61	118,21	133,81	149,41	177,22
2,0	112,90	102,79	118,46	134,13	149,81	177,75
3,0	113,09	102,97	118,71	134,46	150,20	178,28
4,0	113,27	103,14	118,95	134,77	150,58	178,79
5,0	113,47	103,31	119,20	135,09	150,98	179,32
6,0	113,65	103,48	119,43	135,39	151,34	179,80
7,0	113,83	103,64	119,67	135,70	151,72	180,31
8,0	114,00	103,81	119,90	135,99	152,09	180,80
9,0	114,18	103,97	120,13	136,29	152,45	181,28
10,0	114,36	104,13	120,36	136,59	152,81	181,77
12,0	114,69	104,44	120,79	137,15	153,51	182,70
14,0	115,02	104,74	121,22	137,70	154,18	183,60
16,0	115,34	105,04	121,64	138,25	154,86	184,51
18,0	115,66	105,32	122,05	138,77	155,50	185,37
20,0	115,96	105,60	122,45	139,30	156,14	186,23
22,0	116,26	105,88	122,84	139,80	156,77	187,07
24,0	116,55	106,14	123,22	140,30	157,38	187,89
26,0	116,84	106,41	123,59	140,78	157,97	188,68
28,0	117,12	106,67	123,96	141,26	158,56	189,47
30,0	117,39	106,91	124,31	141,71	159,11	190,22

## Продовження таблиці Б.2

$T = 260 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	10,45					10,31
0,2	101,27					10,44
0,3	101,30					10,58
0,4	101,33					10,72
0,5	101,35					10,88
0,6	101,37	93,58	107,88	122,18	136,49	161,30
0,7	101,39	93,60	107,91	122,23	136,54	161,37
0,8	101,42	93,63	107,95	122,27	136,59	161,44
0,9	101,44	93,65	107,98	122,31	136,64	161,51
1,0	101,47	93,67	108,01	122,35	136,69	161,57
2,0	101,70	93,89	108,33	122,76	137,20	162,25
3,0	101,92	94,11	108,63	123,16	137,69	162,90
4,0	102,15	94,32	108,93	123,55	138,16	163,53
5,0	102,36	94,53	109,23	123,93	138,64	164,16
6,0	102,57	94,73	109,52	124,31	139,10	164,78
7,0	102,78	94,93	109,80	124,68	139,56	165,39
8,0	102,98	95,12	110,08	125,04	140,00	165,98
9,0	103,18	95,32	110,36	125,40	140,44	166,57
10,0	103,38	95,51	110,63	125,75	140,87	167,14
12,0	103,76	95,87	111,15	126,43	141,71	168,26
14,0	104,13	96,22	111,65	127,09	142,52	169,34
16,0	104,48	96,56	112,14	127,71	143,29	170,38
18,0	104,83	96,89	112,61	128,33	144,05	171,39
20,0	105,17	97,22	113,08	128,93	144,79	172,39
22,0	105,49	97,52	113,52	129,51	145,51	173,34
24,0	105,81	97,83	113,96	130,09	146,22	174,30
26,0	106,12	98,12	114,38	130,64	146,90	175,21
28,0	106,42	98,41	114,79	131,18	147,56	176,10
30,0	106,71	98,69	115,20	131,70	148,21	176,96

Продовження таблиці Б.2

$T = 280 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	11,93					11,46
0,2	12,21					11,58
0,3	12,51					11,71
0,4	91,78					11,85
0,5	91,81					11,99
0,6	91,84					12,13
0,7	91,87					12,29
0,8	91,90					12,45
0,9	91,93					12,63
1,0	91,96					12,81
2,0	92,24	85,94	98,85	111,76	124,67	146,58
3,0	92,52	86,22	99,25	112,29	125,32	147,44
4,0	92,79	86,49	99,65	112,80	125,95	148,28
5,0	93,05	86,76	100,02	113,29	126,56	149,08
6,0	93,30	87,01	100,40	113,78	127,16	149,89
7,0	93,54	87,26	100,75	114,24	127,73	150,65
8,0	93,79	87,50	101,10	114,70	128,29	151,39
9,0	94,02	87,74	101,44	115,14	128,84	152,12
10,0	94,25	87,96	101,77	115,57	129,37	152,82
12,0	94,69	88,41	102,40	116,40	130,40	154,19
14,0	95,11	88,83	103,01	117,20	131,38	155,50
16,0	95,52	89,23	103,60	117,96	132,32	156,76
18,0	95,90	89,62	104,16	118,69	133,23	157,97
20,0	96,28	89,99	104,70	119,41	134,11	159,15
22,0	96,64	90,35	105,22	120,08	134,95	160,26
24,0	96,99	90,70	105,72	120,75	135,77	161,36
26,0	97,33	91,04	106,21	121,38	136,56	162,41
28,0	97,66	91,37	106,69	122,01	137,33	163,45
30,0	97,98	91,68	107,15	122,61	138,07	164,45

Продовження таблиці Б.2

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	13,46					12,73
0,2	13,70					12,85
0,3	13,95					12,97
0,4	14,21					13,09
0,5	14,49					13,22
0,6	14,78					13,35
0,7	15,10					13,49
0,8	83,56					13,63
0,9	83,60					13,78
1,0	83,64					13,93
2,0	84,02	78,50	89,51	100,52	111,53	129,90
3,0	84,37	78,90	90,10	101,30	112,49	131,17
4,0	84,72	79,28	90,65	102,03	113,40	132,37
5,0	85,05	79,63	91,18	102,72	114,26	133,51
6,0	85,37	79,98	91,68	103,38	115,08	134,59
7,0	85,67	80,30	92,16	104,01	115,86	135,63
8,0	85,97	80,62	92,62	104,61	116,61	136,62
9,0	86,25	80,92	93,06	105,19	117,33	137,58
10,0	86,52	81,21	93,48	105,75	118,03	138,50
12,0	87,05	81,77	94,29	106,82	119,34	140,25
14,0	87,54	82,28	95,05	107,82	120,58	141,90
16,0	88,01	82,77	95,77	108,76	121,75	143,45
18,0	88,45	83,24	96,44	109,65	122,85	144,92
20,0	88,88	83,68	97,09	110,50	123,91	146,33
22,0	89,29	84,10	97,71	111,31	124,92	147,66
24,0	89,68	84,51	98,30	112,10	125,89	148,96
26,0	90,05	84,90	98,87	112,85	126,82	150,20
28,0	90,42	85,27	99,42	113,56	127,71	151,39
30,0	90,76	85,63	99,95	114,26	128,57	152,54

Продовження таблиці Б.2

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	15,04					14,14
0,2	15,24					14,25
0,3	15,46					14,36
0,4	15,68					14,48
0,5	15,91					14,60
0,6	16,15					14,72
0,7	16,40					14,84
0,8	16,67					14,97
0,9	16,95					15,10
1,0	17,25					15,23
2,0	76,48					16,89
3,0	77,01	71,51	80,23	88,95	97,67	112,10
4,0	77,48	72,14	81,20	90,26	99,32	114,29
5,0	77,94	72,71	82,06	91,42	100,78	116,21
6,0	78,36	73,22	82,85	92,47	102,09	117,95
7,0	78,76	73,70	83,56	93,43	103,30	119,54
8,0	79,14	74,15	84,23	94,32	104,41	121,01
9,0	79,50	74,56	84,86	95,15	105,45	122,39
10,0	79,84	74,96	85,45	95,94	106,43	123,68
12,0	80,49	75,69	86,54	97,38	108,23	126,07
14,0	81,08	76,36	87,53	98,69	109,86	128,23
16,0	81,64	76,98	88,44	99,90	111,37	130,23
18,0	82,16	77,55	89,29	101,03	112,76	132,08
20,0	82,65	78,09	90,08	102,07	114,07	133,81
22,0	83,12	78,59	90,83	103,06	115,29	135,44
24,0	83,56	79,07	91,53	104,00	116,46	136,99
26,0	83,99	79,53	92,21	104,89	117,56	138,46
28,0	84,39	79,96	92,84	105,73	118,61	139,85
30,0	84,78	80,38	93,45	106,53	119,61	141,19

Таблиця Б.3 – Теплопровідність суміші R125/R134a та її компонентів

$T = 240 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	112,52	91,28				9,80
0,2	112,54	91,30				9,86
0,3	112,56	105,99	100,29	94,59	88,89	88,01
0,4	112,58	106,01	100,31	94,62	88,93	88,05
0,5	112,60	106,03	100,34	94,65	88,96	88,09
0,6	112,62	106,05	100,37	94,68	88,99	88,13
0,7	112,64	106,08	100,40	94,71	89,03	88,17
0,8	112,66	106,10	100,42	94,74	89,06	88,21
0,9	112,68	106,13	100,45	94,78	89,10	88,26
1,0	112,70	106,15	100,48	94,81	89,13	88,30
2,0	112,90	106,38	100,74	95,10	89,47	88,70
3,0	113,09	106,60	101,00	95,40	89,79	89,09
4,0	113,27	106,82	101,25	95,68	90,12	89,49
5,0	113,47	107,04	101,50	95,96	90,43	89,86
6,0	113,65	107,25	101,74	96,24	90,73	90,23
7,0	113,83	107,46	101,98	96,50	91,02	90,59
8,0	114,00	107,66	102,21	96,77	91,32	90,94
9,0	114,18	107,86	102,44	97,03	91,61	91,29
10,0	114,36	108,06	102,67	97,28	91,89	91,63
11,0	114,52	108,25	102,89	97,53	92,16	91,96
12,0	114,69	108,45	103,11	97,77	92,43	92,29
13,0	114,86	108,64	103,33	98,01	92,70	92,61
14,0	115,02	108,82	103,54	98,25	92,96	92,93
15,0	115,18	109,00	103,74	98,48	93,21	93,23
16,0	115,34	109,19	103,95	98,71	93,47	93,54
17,0	115,50	109,37	104,15	98,94	93,72	93,84
18,0	115,66	109,54	104,35	99,16	93,97	94,13
19,0	115,81	109,71	104,55	99,38	94,21	94,42
20,0	115,96	109,89	104,74	99,60	94,45	94,72

## Продовження таблиці Б.3

$T = 260 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	10,45					11,20
0,2	101,27					11,26
0,3	101,30	82,70				11,32
0,4	101,33	82,73				11,39
0,5	101,35	95,60	90,61	85,62	80,62	79,75
0,6	101,37	95,63	90,64	85,65	80,67	79,80
0,7	101,39	95,66	90,67	85,69	80,71	79,86
0,8	101,42	95,69	90,71	85,73	80,76	79,91
0,9	101,44	95,72	90,74	85,77	80,80	79,97
1,0	101,47	95,74	90,78	85,81	80,84	80,02
2,0	101,70	96,02	91,10	86,18	81,26	80,53
3,0	101,92	96,29	91,42	86,54	81,67	81,03
4,0	102,15	96,55	91,72	86,89	82,07	81,51
5,0	102,36	96,81	92,02	87,24	82,45	81,97
6,0	102,57	97,05	92,31	87,56	82,82	82,42
7,0	102,78	97,29	92,59	87,88	83,17	82,85
8,0	102,98	97,53	92,86	88,19	83,52	83,28
9,0	103,18	97,77	93,13	88,50	83,86	83,69
10,0	103,38	97,99	93,39	88,79	84,19	84,09
11,0	103,57	98,21	93,65	89,08	84,51	84,47
12,0	103,76	98,44	93,90	89,36	84,83	84,85
13,0	103,95	98,65	94,14	89,64	85,13	85,22
14,0	104,13	98,86	94,38	89,91	85,44	85,59
15,0	104,31	99,06	94,62	90,17	85,73	85,94
16,0	104,48	99,26	94,85	90,43	86,02	86,29
17,0	104,66	99,47	95,08	90,69	86,30	86,63
18,0	104,83	99,66	95,30	90,94	86,57	86,96
19,0	105,00	99,85	95,52	91,18	86,84	87,28
20,0	105,17	100,04	95,73	91,42	87,11	87,61

## Продовження таблиці Б.3

$T = 280 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	11,93					12,64
0,2	12,21					12,70
0,3	12,51					12,77
0,4	91,78					12,84
0,5	91,81	75,51				12,92
0,6	91,84	75,55				13,00
0,7	91,87	75,59				13,09
0,8	91,90	75,64				13,19
0,9	91,93	86,70	82,12	77,55	72,97	71,86
1,0	91,96	86,74	82,17	77,60	73,03	71,93
2,0	92,24	87,09	82,60	78,11	73,61	72,65
3,0	92,52	87,43	83,01	78,59	74,16	73,33
4,0	92,79	87,76	83,40	79,04	74,68	73,96
5,0	93,05	88,08	83,78	79,48	75,18	74,57
6,0	93,30	88,38	84,14	79,89	75,65	75,14
7,0	93,54	88,68	84,48	80,29	76,10	75,69
8,0	93,79	88,96	84,82	80,67	76,53	76,21
9,0	94,02	89,24	85,14	81,04	76,94	76,71
10,0	94,25	89,51	85,45	81,40	77,34	77,20
11,0	94,47	89,77	85,76	81,74	77,73	77,67
12,0	94,69	90,02	86,05	82,07	78,10	78,12
13,0	94,90	90,27	86,33	82,40	78,46	78,55
14,0	95,11	90,51	86,61	82,72	78,82	78,98
15,0	95,31	90,75	86,89	83,02	79,16	79,40
16,0	95,52	90,98	87,15	83,32	79,49	79,79
17,0	95,71	91,20	87,41	83,61	79,82	80,19
18,0	95,90	91,43	87,66	83,90	80,13	80,57
19,0	96,09	91,65	87,91	84,18	80,44	80,94
20,0	96,28	91,86	88,15	84,45	80,75	81,31

## Продовження таблиці Б.3

$T = 300 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	13,46					14,13
0,2	13,70					14,20
0,3	13,95					14,26
0,4	14,21					14,33
0,5	14,49					14,40
0,6	14,78					14,48
0,7	15,10					14,57
0,8	83,56					14,66
0,9	83,60	69,38				14,75
1,0	83,64	69,43				14,86
2,0	84,02	79,07	74,69	70,30	65,92	64,40
3,0	84,37	79,55	75,29	71,03	66,77	65,46
4,0	84,72	79,99	75,84	71,69	67,54	66,41
5,0	85,05	80,41	76,35	72,29	68,23	67,26
6,0	85,37	80,81	76,83	72,86	68,88	68,06
7,0	85,67	81,19	77,29	73,39	69,49	68,80
8,0	85,97	81,54	77,71	73,88	70,05	69,49
9,0	86,25	81,89	78,12	74,35	70,58	70,14
10,0	86,52	82,21	78,50	74,79	71,09	70,75
11,0	86,79	82,53	78,88	75,22	71,57	71,34
12,0	87,05	82,84	79,24	75,63	72,03	71,90
13,0	87,29	83,13	79,58	76,02	72,47	72,43
14,0	87,54	83,42	79,91	76,40	72,89	72,94
15,0	87,78	83,70	80,23	76,77	73,30	73,43
16,0	88,01	83,96	80,54	77,12	73,69	73,91
17,0	88,23	84,22	80,84	77,46	74,08	74,37
18,0	88,45	84,48	81,14	77,79	74,45	74,81
19,0	88,67	84,73	81,42	78,11	74,80	75,25
20,0	88,88	84,97	81,70	78,43	75,15	75,66

## Продовження таблиці Б.3

$T = 320 \text{ K}$						
$p, \text{ МПа}$	$x = 0$	$x = 0,2$	$x = 0,4$	$x = 0,6$	$x = 0,8$	$x = 1,0$
0,1	15,04					15,66
0,2	15,24					15,73
0,3	15,46					15,79
0,4	15,68					15,86
0,5	15,91					15,93
0,6	16,15					16,01
0,7	16,40					16,08
0,8	16,67					16,17
0,9	16,95					16,25
1,0	17,25					16,34
2,0	76,48	64,32	52,65			17,69
3,0	77,01	71,99	67,47	62,94	58,42	56,11
4,0	77,48	72,72	68,44	64,17	59,90	57,98
5,0	77,94	73,35	69,27	65,18	61,09	59,47
6,0	78,36	73,92	69,98	66,05	62,11	60,74
7,0	78,76	74,44	70,62	66,81	63,00	61,84
8,0	79,14	74,92	71,21	67,51	63,80	62,82
9,0	79,50	75,37	71,75	68,14	64,53	63,71
10,0	79,84	75,79	72,26	68,74	65,21	64,54
11,0	80,17	76,19	72,74	69,29	65,83	65,30
12,0	80,49	76,57	73,19	69,80	66,42	66,02
13,0	80,79	76,93	73,61	70,29	66,97	66,68
14,0	81,08	77,28	74,02	70,76	67,50	67,32
15,0	81,36	77,61	74,40	71,20	67,99	67,92
16,0	81,64	77,93	74,78	71,62	68,47	68,49
17,0	81,90	78,24	75,14	72,03	68,92	69,04
18,0	82,16	78,54	75,48	72,42	69,36	69,56
19,0	82,41	78,83	75,81	72,80	69,78	70,07
20,0	82,65	79,11	76,13	73,15	70,18	70,55

## **Додаток В**

**Акти про впровадження результатів дисертаційної роботи**

ООО «Институт низкотемпературных  
энерготехнологий»  
а/я 266, г. Одесса-23, 65023, Украина



LLC «Institute of low temperature  
energy technology»  
POB 266, Odessa-23, 65023, Ukraine

Tel: : + 38 (0482) 344162  
Tel /fax: + 38 (048) 777 00 87

[www.uasigma.odessa.ua](http://www.uasigma.odessa.ua)  
<http://indgases-journal.info/>

E-mail: [uasigmaintet@gmail.com](mailto:uasigmaintet@gmail.com)

You number/Your data  
Ваш номер/Ваша дата

Our number (Please, refer to in your reply)  
Наш номер (Будь ласка, вкажіть при відповіді)

63

Data  
Дата

11.09.2017

### АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи А. С. Бойчука «В'язкість та теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a, R125/R134a»

Таблиці транспортних властивостей трьох бінарних сумішей холодоагентів, які складені в кандидатській дисертації Артема Сергійовича Бойчука «В'язкість та теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a, R125/R134a», використовуються в ТОВ «Інститут низкотемпературних енерготехнологій» (м. Одеса, Україна) при виконанні наукових досліджень і технічних розрахунків. Використання цих таблиць сприяє вибору нових робочих речовин для холодильного обладнання.

Генеральний директор

ТОВ «Інститут низкотемпературних енерготехнологій»

Заслужений діяч науки і техніки України

д.т.н., професор



Г. К. Лавренченко

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
кораблебудування

імені адмірала Макарова

д.т.н., професор Блінцов В. С.

« 25 » 09 2017 р.



впровадження результатів дисертаційної роботи А. С. Бойчука «В'язкість та теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a, R125/R134a».

Таблиці транспортних властивостей бінарних сумішей альтернативних холодоагентів R32/R125, R32/R134a, R125/R134a, які розроблені в кандидатській дисертації Артема Сергійовича Бойчука «В'язкість та теплопровідність сумішей холодоагентів R32/R125, R32/R134a, R125/R134a» в Одеському національному морському університеті, використовуються в Національному університеті кораблебудування імені адмірала Макарова при виконанні науково-дослідних робіт, курсових і дипломних проектів. Використання цих таблиць розширює можливості вибору робочих тіл для холодильних установок і забезпечує підвищення точності розрахунку машин і апаратів таких установок.

Директор машинобудівного інституту

НУК імені адмірала Макарова

д.т.н., професор

С. І. Сербін

Завідуючий кафедрою

кондиціонування та рефрижерації

НУК імені адмірала Макарова

д.т.н., професор

М. І. Радченко