

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАЛЬЧЕВСЬКИЙ Валентин Павлович

УДК 621.564.2:629.5.06

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ОСНОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГО-
ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ХОЛОДИЛЬНИХ УСТАНОВОК
ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ**

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Одеса – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Одеському національному морському університеті
Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
ВАРБАНЕЦЬ Роман Анатолійович,
Одеський національний морський університет, завідувач
кафедри суднових енергетичних установок та технічної
експлуатації (м. Одеса)

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент,
ДАКІ Олена Анатоліївна,
Дунайський інститут водного транспорту Державного
університету інфраструктури та технологій
директор інституту (м. Ізмаїл)

доктор технічних наук, професор,
БУДАШКО Віталій Віталійович,
Національний університет «Одеська морська академія»
директор Навчально-наукового інституту автоматичної
та електромеханіки (м. Одеса)

доктор технічних наук, професор,
РАДЧЕНКО Микола Іванович,
Національний університет кораблебудування імені
адмірала Макарова, завідувач кафедри рефрижерації
та кондиціонування (м. Миколаїв)

Захист дисертації відбудеться «24» грудня 2021 р. о 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 41.060.01 в Одеському національному морському університеті за адресою: вул. Мечникова, 34, м. Одеса, 65029, Україна.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці ім. проф. Г.К. Суслова Одеського національного морського університету за адресою: 65029, Україна, м. Одеса, вул. Мечникова, 34.

Автореферат розісланий «23» листопада 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 41.060.01,
кандидат технічних наук, доцент



Олексій ДРОЖЖИН

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вимоги Міжнародної морської організації, урядових агенцій з захисту довкілля та інших неурядових груп націлені на зменшення викиду у навколишнє середовище шкідливих речовин при експлуатації дизельних двигунів. Серед цих речовин найбільш небезпечними є окисли сірки (SO_x), азоту (NO_x) та тверді частки. У відповідності із зазначеними вимогами відбувається активний перехід на палива із наднизьким вмістом сірки. Використання вказаних палив в морських дизелях пов'язане з низкою труднощів, тому що ці двигуни, як правило, розроблені для експлуатації на паливах з високою в'язкістю та змащувальною здатністю. Значення в'язкості для палив із наднизьким вмістом сірки при звичайній температурі повітря у машинному відділенні здебільшого знаходяться у районі нижньої допустимої границі для дизельних двигунів. Найбільші складності мають місце тоді, коли при підвищенні температури палива перед двигуном його в'язкість приймає значення нижче допустимого інтервалу.

Для забезпечення надійної роботи двигуна температуру палива необхідно постійно підтримувати такою, при якій його в'язкість буде у діапазоні, характерному для використання у дизельних двигунах транспортних суден.

Необхідність охорони навколишнього середовища від шкідливого впливу суднових енергетичних установок під час експлуатації у відповідності з вимогами Міжнародної морської організації, урядових агенцій із захисту довкілля та інших міжнародних угод визначає **запит практики**, у відповідності з яким є необхідність використовувати палива із наднизьким вмістом сірки та конструкцією двигуна передбачати наявність системи стабілізації температури палива, за допомогою якої буде забезпечуватися його необхідна в'язкість.

Невід'ємною частиною системи стабілізації температури є агрегована холодильна установка (чіллер) для охолодження води, яка є теплоносієм у процесі відведення теплоти від палива. Для цієї холодильної установки у відповідності з Монреальським та Кіотським протоколами запропоновано використовувати нові суміші озонобезпечних та природних холодоагентів. Такі суміші, на відміну від синтетичних озонобезпечних речовин, мають більш низький потенціал глобального потепління та, на відміну від більшості природних холодоагентів, не є горючими та вибухонебезпечними.

Серед сумішей альтернативних та природних холодоагентів найбільш експериментально дослідженими є суміші R32/R125, R125/R290 та R134a/R290. Для можливості їх використання у якості холодоагентів необхідно мати точні дані про їх термодинамічні властивості у діапазонах параметрів, характерних для роботи суднових холодильних установок. Найбільш раціональним способом отримання таких даних є їх розрахунок за моделями стану, складеними на базі експериментальних даних про термодинамічні властивості. Оскільки для вказа-

них сумішей існуючі моделі стану не враховують нових експериментальних даних, складання уточнених єдиних моделей стану цих сумішей є актуальним.

Отже, **наукова-прикладна проблема**, яка розглянута у роботі, – підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильних установок засобів транспорту при їх експлуатації може бути вирішена за допомогою використання нових еколого-безпечних холодоагентів при наявності методології визначення їх термодинамічних властивостей.

У дослідження термодинамічних властивостей холодоагентів та їх сумішей внесли великий вклад видатні вітчизняні та зарубіжні вчені: Вассерман О.А., Лавренченко Г.К., Недоступ В.І., Загорученко В.О., Загоруйко В.О., Голіков А.О., Геллер В.З., Желєзний В.П., Цветков О.Б., Гребеньков А.Ж., Мазур В.О., Ватанабе К. (Watanabe K.), Їкозокі А. (Yokozeki A.), Леммон Е. (Lemmon E.), Маклінден М. (McLinden M.), Мейдж Дж. (Magee J.), та ін.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалась згідно із: Законом України «Про енергозбереження», затвердженим Постановою Верховної Ради України № 74/94 від 01.07.1994 р.; Законом Кабінету Міністрів України № 148 від 05.02.1997 р., що затвердив «Комплексу Державну Програму Енергозбереження»; Постановами 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»; «Основними положеннями енергетичної стратегії України на період до 2030 р.», прийнятими Кабінетом Міністрів України 15.03.2006 р.

Дисертаційна робота пов'язана з науково-дослідною тематикою кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. Автор приймав участь у розробці НДР «Суміші озонобезпечних та природних холодоагентів R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і R41/R744. Рівняння стану та таблиці термодинамічних властивостей» ДР № 0110U006239 від 18.02.2011 р. та у держбюджетних науково-дослідних роботах «Удосконалення технічної експлуатації суднових енергетичних установок» ДР № 0216U000617 від 29.12.2017 р. та «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» на 2020 – 2022 рр. ДР № 0120U105008 у якості виконавця розділу, присвяченого методам розрахунку теплофізичних властивостей сумішей холодоагентів.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є поліпшення екологічних показників суднових холодильних установок в умовах експлуатації шляхом розробки теоретичних основ розрахунку властивостей перспективних сумішей холодоагентів при використанні цих сумішей у якості робочих речовин.

Досягнення поставленої мети потребує вирішення наступних задач:

- аналіз світових тенденцій переведення суднових холодильних установок на нові екологічно безпечні робочі речовини через припинення виробництва та використання у холодильних установках озоноруйнівних та парникових газів з метою дотримання міжнародних вимог з охорони навколишнього природного середовища при експлуатації суднових енергетичних установок;

- аналіз наявних експериментальних даних про термодинамічні властивості перспективних сумішей холодоагентів R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 та отримання на їх базі моделей стану сумішей для розрахунку термодинамічних властивостей, необхідних при використанні цих сумішей у якості робочих речовин суднових холодильних установок з метою поліпшення їх екологічних показників в умовах експлуатації;

- розробка автоматизованої інформаційної системи розрахунку термодинамічних властивостей на базі отриманих моделей стану сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 для отримання параметрів ефективності циклу суднових холодильних установок при їх використанні у якості робочих речовин;

- аналіз закономірностей термодинамічної поведінки сумішей холодоагентів у стані фазової рівноваги з метою визначення особливостей, які дозволять забезпечити умови для високоефективного використання холодильних установок суднових систем охолодження та кондиціонування на базі цих сумішей з дотриманням вимог охорони навколишнього природного середовища;

- отримання за допомогою розробленої автоматизованої інформаційної системи таблиць термодинамічних властивостей нових сумішей холодоагентів у характерних для суднових холодильних установок інтервалах температури та тиску, які необхідні для поповнення довідкової бази даних про термодинамічні властивості холодоагентів;

- проведення еколого-термоекономічного аналізу холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна для оцінки зменшення шкідливого впливу на навколишнє природне середовище при використанні нових сумішей холодоагентів у якості робочих речовин цієї холодильної установки.

Об'єктом дослідження є термодинамічні процеси в апаратах холодильних установок транспортних суден.

Предметом дослідження є методи аналізу термодинамічної поведінки перспективних холодоагентів та підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильних установок засобів транспорту в умовах експлуатації.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач використовувалися наступні методи:

- метод системного аналізу при розробці технологічної карти наукових досліджень;

- метод покрокового регресійного аналізу та математичного моделювання при визначенні коефіцієнтів моделей стану сумішей холодоагентів на базі експериментальних даних про їх термодинамічні властивості;

- методи половинного ділення та послідовних наближень при розрахунку значень термодинамічних властивостей сумішей за допомогою багатоконстантних моделей стану;

- метод апроксимації при описуванні масивів експериментальних даних з термодинамічних властивостей за допомогою математичних функцій високих ступенів;

- метод математичної статистики при розрахунку середніх квадратичних відхилень розрахованих значень термодинамічних властивостей сумішей від експериментальних.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що *вперше:*

- розроблено метод розрахунку термодинамічних властивостей сумішей з використанням функції взаємодії компонентів, який на відміну від класичного методу комбінування коефіцієнтів моделей стану компонентів, дозволяє підвищити точність розрахунку термодинамічних властивостей речовин у надкритичній області при високих значеннях густини у 1,5 – 2 рази, що є достатнім для розрахунку теплообмінних процесів у суднових холодильних установках з метою підвищення їх екологічних показників в умовах експлуатації;

- виявлені закономірності термодинамічної поведінки сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів у стані фазової рівноваги, які полягають у наявності для них азеотропних складів; при використанні азеотропних сумішей у якості холодоагентів вдається на 20 – 30 % зменшити втрати від зовнішньої необерненості процесів теплообміну у порівнянні з неазеотропними сумішами та значно збільшити енергетичну ефективність циклу холодильних установок суднових систем охолодження та кондиціонування;

- створено наукові основи по розробці автоматизованих систем розрахунку теплофізичних властивостей нових перспективних холодоагентів та їх сумішей, для яких вперше отримані моделі стану, які дозволяють отримати необхідні значення властивостей холодоагентів для їх використання у системах стабілізації температури палива з метою дотримання міжнародних вимог з охорони навколишнього природного середовища;

- створено математичну модель для здійснення еколого-термoeкономічного аналізу холодильних установок систем стабілізації температури палива дизельних двигунів транспортних суден, який на відміну від існуючих методів термодинамічного та ексергетичного аналізу дозволяє оцінити повну еквівалентну емісію парникових газів за весь строк експлуатації обладнання.

Отримало подальший розвиток та вдосконалено:

- метод визначення коефіцієнтів моделей стану сумішей холодоагентів шляхом покрокового регресійного аналізу для розрахунку їх термодинамічних властивостей, який, на відміну від попередніх методів, дозволяє серед повного масиву коефіцієнтів послідовно відбирати найбільш значущі; попередні методи складання моделей стану базувалися на груповому виключенні малозначущих коефіцієнтів, що не є коректним через кореляційні зв'язки між коефіцієнтами;

- метод визначення термодинамічних властивостей сумішей у стані фазової рівноваги насичених пари та рідини на базі використання умови рівності парціальних летючостей сумішей однакового складу при незмінних температурах замість менш точного правила Максвелла, за яким значення тиску насичених пари та рідини при постійній температурі визначалися через рівність площ під реальною та розрахованою ізотермами між значеннями питомого об'єму насичених пари та рідини у координатах тиск – питомий об'єм;

- метод урахування ваги експериментальних даних про тиск та густину сумішей шляхом додавання до виразу для розрахунку дисперсії коефіцієнта стисливості у випадку сумішей доданку, який ураховує погрішність отримання експериментальних значень складу суміші;

- автоматизовану інформаційну систему для розрахунку термодинамічних властивостей холодоагентів шляхом введення отриманих моделей стану нових сумішей холодоагентів, що рекомендуються у якості альтернативних робочих речовин холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна.

Практичне значення результатів дослідження.

Розроблені у дисертації моделі стану і таблиці термодинамічних властивостей сумішей R32/R125 R125/R290 та R134a/R290 є джерелом надійних довідкових даних, необхідних для проектування та експлуатації холодильних установок суднових систем охолодження та кондиціонування на базі цих речовин. Природні холодоагенти є рекомендованими для використання з точки зору вимог Монреальського та Кіотського протоколів, оскільки вони мають мізерно малі потенціали руйнування озонового шару та глобального потепління (3 для пропану). Отже, змішування альтернативних холодоагентів, більшість з яких суттєво впливають на глобальне потепління з природними речовинами і їх використання у суднових холодильних установках дозволить значно зменшити шкідливий вплив на навколишнє середовище. Розроблено автоматизовану інформаційну систему, яка дозволяє розраховувати термодинамічні властивості сумішей холодоагентів при різних комбінаціях незалежних змінних, а також визначати параметри ефективності циклів холодильних установок.

Автоматизована інформаційна система і таблиці термодинамічних властивостей трьох сумішей впроваджені у підприємства «Сістемар» і «Трансшип» при проведенні модернізації холодильних установок систем комфортного кондиціонування суден. Розроблена автоматизована система використовується у Одесь-

кому національному морському університеті у наукових дослідженнях та у навчальному процесі.

Особистий внесок здобувача. При виконанні дисертаційного дослідження особисто здобувачем виконані: збір та аналіз експериментальних даних для перспективних сумішей холодоагентів; розробка алгоритму програми для отримання коефіцієнтів моделей стану сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290; розробка автоматизованої інформаційної системи для розрахунку термодинамічних властивостей сумішей холодоагентів у однофазній області та у стані фазової рівноваги; розробка математичної моделі для виконання еколого-термoeкономічного аналізу холодильних установок; розрахунок таблиць термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей холодоагентів.

Автор висловлює подяку д.т.н. професору Вассерману О.А. за допомогу у здійсненні роботи на всіх етапах її створення, д.т.н. професору Варбанцю Р.А. за консультації у питаннях експлуатації суднових енергетичних установок та програмної реалізації алгоритмів математичного моделювання і всьому колективу кафедри суднових енергетичних установок та технічної експлуатації за допомогу та підтримку протягом написання дисертації.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційної роботи доповідалися на 20 міжнародних науково-технічних конференціях. Серед них: III Міжнародна науково-практична морська конференція кафедри СЕУ і ТЕ Одеського національного морського університету; XI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті»; XI Міжнародна науково-технічна конференція «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»; IX Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні проблеми холодильної техніки і технології»; III Міжнародна конференція «Современные проблемы теплофизики и энергетики»; Nineteenth Symposium on Thermophysical Properties.

Публікації. Основний зміст дисертації викладено у 43 публікаціях, з них 1 монографія, 1 Державний стандарт України, 21 стаття в наукових журналах (з індексуються в базі SCOPUS), 20 тез доповідей у збірниках праць міжнародних наукових конференцій.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається із вступу, переліку умовних позначень, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 281 найменуванням і трьох додатків, у яких наведені акти про впровадження результатів роботи, формули для розрахунку параметрів ефективності циклів холодильних установок та таблиці термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей холодоагентів.

Основна частина дисертації викладена на 253 сторінках тексту, містить 39 рисунків та 152 таблиці. Обсяг додатків – 52 сторінки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовані актуальність теми дисертації, показаний її зв'язок з існуючими науковими програмами і темами. Сформульовано мету та задачі дослідження. Розглянуті наукова новизна та практичне значення одержаних результатів. Наведені дані про практичне значення результатів, особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації, структуру та обсяг дисертації.

Перший розділ присвячений аналізу світових тенденцій переведення холодильних установок суднових систем охолодження на нові екологічно безпечні холодоагенти через заборону виробництва та використання озоноруйнівних холодоагентів та речовин з підвищеним парниковим ефектом. Виникла гостра потреба у нових холодоагентах, які б не поступалися забороненим за ефективністю та задовольняли міжнародним екологічним вимогам.

В останні роки з метою зменшення викидів у атмосферу шкідливих речовин (таких як окисли сірки (SO_x), азоту (NO_x) та тверді частки) відбувається активний перехід дизельних двигунів транспортних суден на палива із наднизьким вмістом сірки. Для забезпечення необхідної в'язкості цих палив конструкцією двигуна передбачено наявність системи стабілізації температури палива на базі агрегатованої холодильної машини (чіллера). Для цієї машини у роботі зроблено аналіз перспективності використання нових сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів, які сполучають у собі позитивні властивості кожного з компонентів. Серед таких речовин найбільш дослідженими є суміші R32/R125, R125/R290 та R134a/R290.

У ряді робіт відзначається одна з важливих причин проведення досліджень термодинамічних властивостей сумішей гідрофторвуглеців з пропаном (R290). Крім високих значень потенціалу глобального потепління фторпохідні холодоагенти мають ще один суттєвий недолік: вони не розчиняються у мінеральних мастилах, які використовувалися у холодильних агрегатах на базі ХФВ та ГХФВ. Досліди показали, що розчинність в мінеральних компресорних мастилах значно підвищується, якщо в якості робочих тіл використовувати суміші альтернативних холодоагентів з пропаном. При цьому значно легше здійснити процес заміни озоноруйнівного холодоагенту на новий, що робить перспективними такі суміші для суднових холодильних установок. Таким чином, вказані суміші озонобезпечних та природних холодоагентів задовольняють вимогам Монреальського та Кіотського протоколів та рекомендуються для використання в суднових холодильних установках.

Для розрахунку циклів холодильних установок, у яких робочими речовинами є нові суміші, необхідно мати надійні дані про їх термодинамічні властивості. Суміш R32/R125 є досить дослідженою, для неї раніше були складені моделі

стану, але поява нових експериментальних даних дозволяє нам скласти нові уточнені моделі стану цієї речовини та отримати нові таблиці термодинамічних властивостей, які дозволять зробити еколого-енергетичний аналіз використання даного холодоагенту у системі стабілізації температури палива.

Для сумішей R125/R290 та R134a/R290 у наявності є дані про термічні властивості в області перегрітої пари та у стані насичення. Дані про калоричні властивості цих речовин поки що відсутні. Для сумішей R125/R290 та R134a/R290 раніше нами були складені моделі стану, але отримання згодом нових експериментальних даних у стані насичення дозволило скласти уточнені моделі стану та зробити комплексне дослідження ефективності використання нових сумішей у якості холодоагентів.

Другий розділ присвячений вибору форми моделі стану для розрахунку термодинамічних властивостей сумішей.

Існує багато моделей стану, які використовуються для опису термодинамічних властивостей не тільки чистих речовин, але й сумішей. Вони перетворюються в рівняння стану ідеального газу, якщо значення густини та тиску речовини прагнуть до нуля. Найбільш простими є кубічні рівняння, що представляють собою модифікації відомого рівняння Ван-Дер-Ваальса. Серед модифікацій найбільш популярними є рівняння Редліха та Квонга, Пенга та Робінсона, Пателля і Тейя, Карнахана та Старлінга.

Кубічні моделі стану, незважаючи на появу більш точних рівнянь, дотепер використовують багато дослідників. Це обумовлено простотою таких моделей і зручністю розрахунків за їх допомогою термодинамічних властивостей і фазової рівноваги чистих речовин і сумішей. Розрахунки властивостей сумішей за допомогою кубічних рівнянь стану базуються на однокомпонентній моделі. Відповідно до цієї моделі для суміші використовується така ж форма рівняння, як і для чистої речовини, але коефіцієнти моделі визначаються на підставі правил змішування.

Нажаль, за допомогою кубічних моделей стану не вдається досягти високої точності при розрахунку властивостей сумішей, особливо коли їх компонентами є складні вуглеводні. З метою підвищення точності розрахунків термодинамічних властивостей реальних газів були запропоновані рівняння стану з більшим, ніж у кубічних, числом коефіцієнтів. Це такі рівняння, як: Бітті та Бріджмена, Бенедикта – Вебба – Рубіна, Стробріджа, Бендера.

Досягти високої точності при отриманні властивостей сумішей у стані рідини та у надкритичній області дозволяють методи, у яких моделі стану суміші мають вигляд комбінації моделей стану компонентів та добавки від взаємодії між ними. Найбільш відомими з вказаних є методи: Кричевського та Казарновського, Загорученко, Доноха та Праусніца, Табачникова, Рабіновича та Бекетова, Недоступа та Галькевича, Естела-Урібе.

До вказаних вище також відноситься методика Леммона, за якою реально-газова частина енергії Гельмгольца суміші виражається у вигляді суми такої енергії ідеальної суміші та функції взаємодії. Енергія Гельмгольца ідеальної суміші розраховується за допомогою моделей для її компонентів, а функція взаємодії — як емпірична функція температури, густини та складу. В роботі показано, що ця методика досить точно описує властивості сумішей холодоагентів.

Моделі стану для сумішей містять параметри стану, як правило, у безрозмірному виді. Для одержання абсолютних значень цих параметрів необхідно знати псевдокритичні параметри суміші. Для їх розрахунку існує багато методів, найпоширенішими з яких є: правило Кея; Стюарта, Буркхарда та Ву; Леммона та Тілнер-Рота; Леммона та Джекобсена.

Суміші, розглянуті в даній роботі, складаються з компонентів, для яких існують надійні моделі стану. Виходячи з аналізу можливих форм моделей стану та наявних експериментальних даних за температурою, тиском, густиною та складом для досліджуваних у роботі сумішей можна зробити висновок, що для цих сумішей модель у формі Леммона є найбільш підходящою з точки зору апробації та можливості реалізації для двокомпонентних речовин.

Третій розділ присвячений розробці на базі наявних експериментальних даних єдиних моделей стану для розрахунку термодинамічних властивостей сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290.

Суміш R32/R125 є найбільш дослідженою серед сумішей альтернативних холодоагентів. Експериментальні дані для неї включають 3046 значень густини в однофазній області при температурах 200 – 400 К і тисках 0,02 – 39 МПа для 19 складів суміші із 22 джерел та 248 значень густини в стані фазової рівноваги при температурах 206 – 345 для 29 складів суміші. Більшість з цих 248 значень отримана розрахунковим шляхом на базі дослідних даних про тиск співіснуючих фаз. Також використано 388 значень ізохорної теплоємності при температурах 207 – 397 К і тисках 4 – 33 МПа. Області параметрів, які охоплені експериментальними даними, показані на рис. 1.

Функцією ваги було прийнято величину, яка дорівнює оберненому значенню дисперсії досліджуваної величини властивості, узятій у другій степені. У якості такої властивості, приймаючи до уваги правило переносу помилок, про яке докладно говориться у [130], був узятий коефіцієнт стисливості Z , який залежить від тиску, густини, температури та мольної концентрації компонентів суміші. Вираз для розрахунку квадрату дисперсії коефіцієнту Z урахує припущення про високу точність вимірювання даних про температуру та тиск та має вигляд

$$\sigma_Z^2 = \left(\frac{Z_{\text{експ.}}}{\rho} + \frac{\partial Z_{\text{розн}}}{\partial \rho} \right)^2 \left(\frac{\rho \cdot \delta \rho}{2} \right)^2 + \left(\frac{\partial Z_{\text{розн}}}{\partial x} \right)^2 \left(\frac{x \cdot \delta x}{2} \right)^2, \quad (1)$$

де величини $\delta \rho$ та δx є максимальними значеннями відносних похибок експериментальних даних про густину та склад.

Для визначення параметрів $\partial Z_{\text{розр.}}/\partial p$ та $\partial Z_{\text{розр.}}/\partial x$, що є похідними коефіцієнту стисливості за густиною та складом було використано наближену модель, яку створено шляхом лінійної комбінації енергій Гельмгольца реального газу компонентів сумішей.

За допомогою методики, запропонованої Леммоном, використовуючи експериментальні дані, було складено модель стану суміші R32/R125. Вираз для моделі стану має вигляд (2), у якому скомбіновано вільні енергії компонентів суміші у відповідності із їх складом із додаванням добавки до вільної енергії від взаємодії α^E .

$$\alpha_{\text{mix}}(\omega, \vartheta, x) = \alpha^{\text{idmix}}(\omega, \vartheta, x) + \alpha^E(\omega, \vartheta, x) \quad (2)$$

де $\alpha = A/RT$ — безрозмірна енергія Гельмгольца.

Енергія Гельмгольца ідеальної суміші α^{idmix} виражається як

$$\alpha^{\text{idmix}}(\omega, \vartheta, x) = \alpha_{\text{mix}}^0(\omega, \vartheta, x) + \sum_{i=1}^k x_i \alpha_i^r(\omega, \vartheta), \quad (3)$$

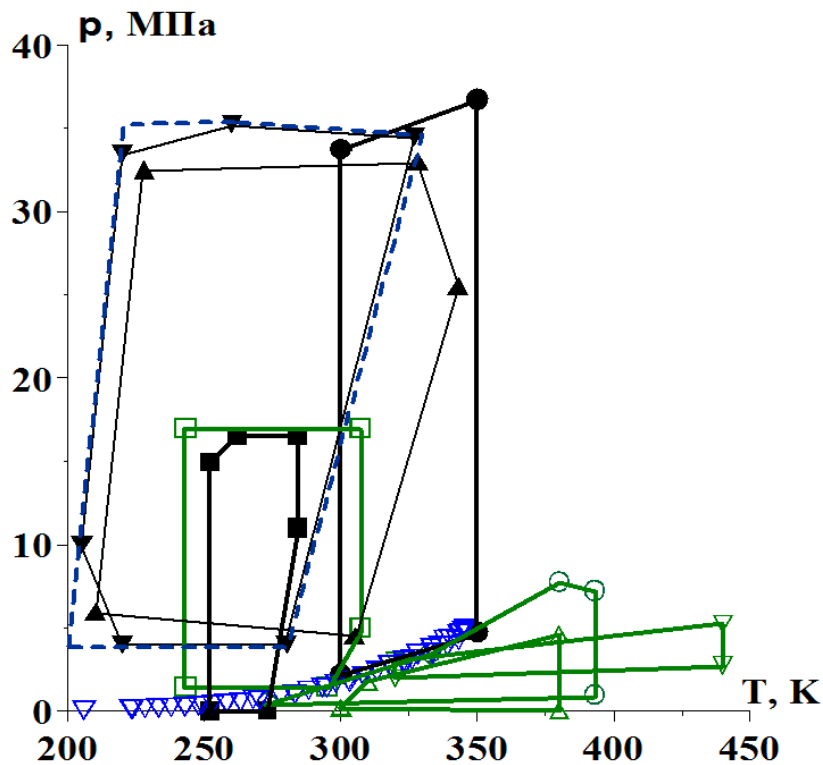


Рисунок 1 – Области параметрів, які охоплені експериментальними даними в однофазній області (\circ , Δ , ∇ , \square , \bullet , \blacktriangle , \blacktriangledown , \blacksquare), в стані насичення (∇) та даними про c_v (---)

де α_{mix}^0 — енергія Гельмгольца ідеального газу, α_i^r — реально-газова енергія Гельмгольца i -го компонента, k – число компонентів суміші.

Функція α_{mix}^0 має вигляд

$$\alpha_{mix}^0(\omega, \mathcal{G}, x) = \sum_{i=1}^k x_i [\alpha_i^0(\omega, \mathcal{G}) + \ln x_i], \quad (4)$$

де α_i^0 — ідеально-газова безрозмірна енергія Гельмгольца компонента i .

Вираз для функції взаємодії компонентів бінарної суміші, який використовується у роботі, має вигляд:

$$\frac{A^E}{RT} = \alpha^E(\omega, \mathcal{G}, x) = x_1 x_2 \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^r a_{ij} \omega^i \mathcal{G}^j + \exp(-\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s b_{ij} \omega^i \mathcal{G}^j \right], \quad (5)$$

де a_{ij} та b_{ij} — коефіцієнти функції взаємодії;

$\omega = v_{кр}/v$, $\mathcal{G} = T_{кр}/T$ — зведені питома густина та температура

$v_{кр}$ та $T_{кр}$ — псевдокритичні питомий об'єм та температура, які розраховуються за виразами:

$$v_{кр} = x_1 v_{кр1} + x_2 v_{кр2}, \quad (6)$$

$$T_{кр} = x_1 T_{кр1} + x_2 T_{кр2} \quad (7)$$

Моделі стану компонентів суміші у формі вільної енергії Гельмгольца та рівняння для визначення ідеально-газових теплоємностей компонентів складені О.А. Вассерманом та Д.В. Фомінським (2002). Для визначення коефіцієнтів моделі стану суміші R32/R125 використано метод покрокового регресійного аналізу на базі алгоритму, який запропонували де Реук та Армстронг.

Для отримання відсутніх в експерименті з фазової рівноваги даних про густини насичених пари та рідини для суміші R32/R125 було складено допоміжну модель стану за наявними p , ρ , T , x -даними для пари та рідини, а також за наявними нечисленним експериментальними даними про густину суміші в стані насичення. За цією моделлю були розраховані для дослідних p , T , x -даних 92 значення густини насиченої пари ρ'' в інтервалі температур 206 – 345 К для 22 складів і 117 значень густини насиченої рідини ρ' для діапазону 223 – 342 К.

На базі отриманого масиву p , ρ , T , x -даних складено модель стану суміші R32/R125 за вказаною вище методикою для області температур 200 – 440 К і тиску до 39 МПа, яка описує властивості суміші в однофазній області та на лінії насичення. Для правильного опису теплоти фазового переходу за допомогою моделі стану при її складанні враховувалася умова рівності площ під реальною і розрахованою ізотермами суміші постійного складу в інтервалі від v' до v'' (за даними для 50 пар значень p' та p'' на 10 ізотермах в інтервалі температур 280 – 333 К). Після складання моделі дослідні значення тиску насичених пари та рідини були зіставлені із розрахованими за точною умовою фазової рівноваги – рівності парціальних летючостей компонентів суміші в рідкій та паровій фазах.

Значення середніх квадратичних відхилень даних про ρ' та ρ'' суміші від розрахованих за моделлю стану при дотриманні зазначеної вище точної умови фазової рівноваги дорівнюють 0,19 % та 1,73 %. Експериментальні значення p' та p'' узгоджуються із розрахованими з середніми квадратичними відхиленнями 1,16 % та 1,13 % для всього масиву цих даних.

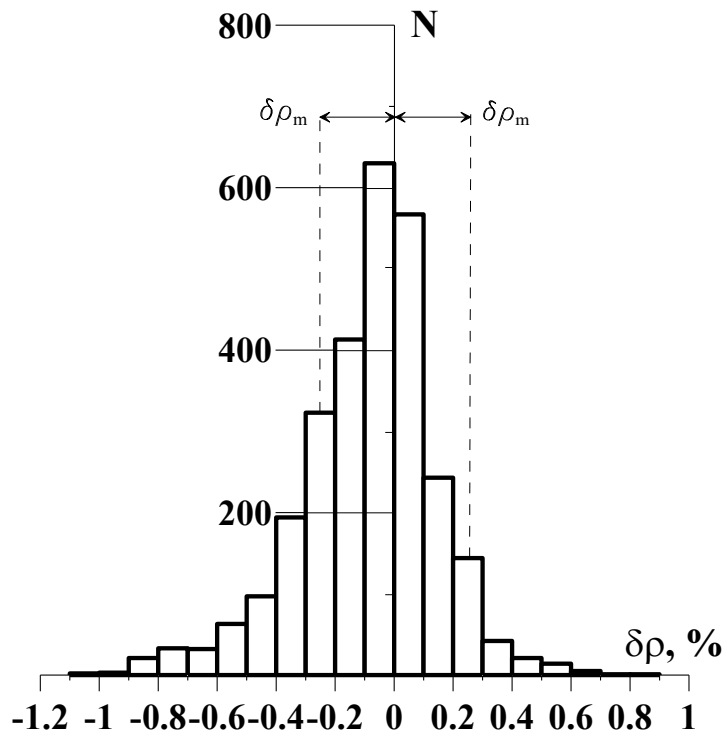


Рисунок 2 – Гістограма відхилень дослідних значень густини від розрахованих за моделлю стану суміші R32/R125

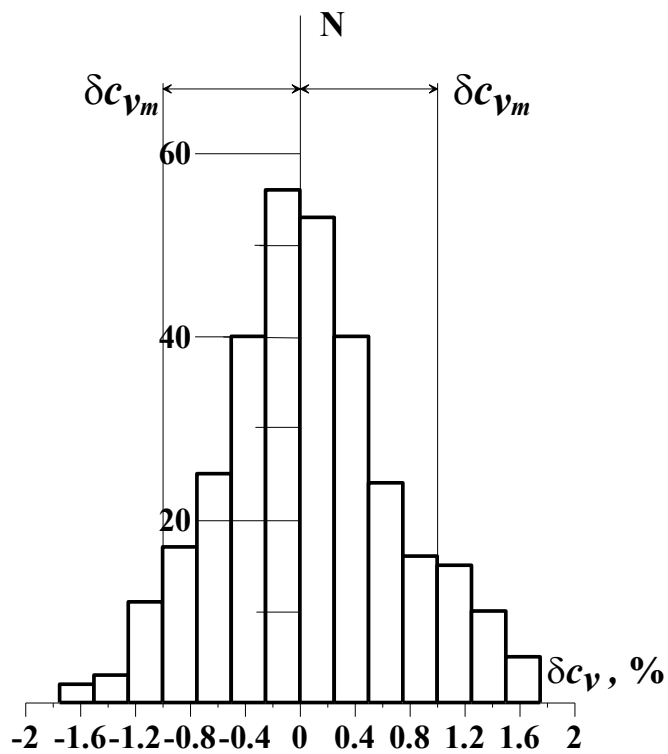


Рисунок 3 – Гістограма відхилень експериментальних значень теплоємності c_v від розрахованих за моделлю стану для суміші R32/R125

Значення середніх квадратичних відхилень для експериментальних даних про ізохорну теплоємність c_v описуються моделлю з високою точністю 1,16 % для даних Макліндена та 0,32 % для даних Мейджа.

На рис. 2 та 3 представлені гістограми відхилень експериментальних значень густини і ізохорної теплоємності від розрахованих за моделлю стану для 3294 даних по ρ і 388 даних по c_v , що беруть участь у складанні моделі стану суміші. Розподіл відхилень в обох гістограмах досить близький до нормального.

Відхилення для більшості експериментальних даних не перевищують діапазон від $-0,4$ до $0,4$ %. Найбільш точними є дві групи даних Мейджа (по 228 та 111 точок), відхилення яких від розрахованих не перевищують $\pm 0,2$ %.

Серед сумішей із пропаном найбільший обсяг експериментальних досліджень було виконано для суміші R125/R290. До експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші R125/R290 відносяться p, ρ, T, x -дані Каюкави і Ватанейба та Йокоями і Такахасі для області перегрітої пари, а також p, T, x -дані Холкомб, Боббо, Кіма та Хау для насичених пари та рідини.

Відсутні експериментальні дані про густину суміші у стані насичення, а також значення густини при низьких температурах (менше 298 K), які необхідні для складання надійної моделі стану для дослідження термодинамічної поведінки суміші, були отримані шляхом розрахунку за додатковими моделями.

Розрахунок необхідних опорних даних у насиченні та при низьких температурах проводився за двома додатковими моделями стану, складених на основі наявних експериментальних даних, які відрізнялись між собою тим, що в першій моделі для компоненту R125 було використано коефіцієнти фундаментальної моделі Міязакі, а в другій моделі – коефіцієнти поліноміальної моделі Вассермана. Для пропану у обох додаткових моделях було використано модель Вассермана (1989). У діапазоні температур, який досліджено експериментально густина насиченої пари суміші розраховувалася для експериментальних значень тиску за першою моделлю. При температурах нижче 298 K значення густини насиченої пари були отримано за двома моделями та осереднені.

Оскільки експериментальні дані про густину перегрітої пари при температурах нижче 298 K також відсутні, вони були отримані у кількості 89 точок у діапазоні значень тиску від 0,5 до 1,0 МПа з використанням описаних вище двох моделей стану та осереднені між собою. Як значення густини насиченої пари, так і відповідні значення для перегрітої пари, що були отримані за двома додатковими моделями, відрізнялися між собою в межах 0,46 %.

Розрахунок відсутніх значень густини насиченої рідини суміші виконувався за допомогою відповідних значень питомого об'єму та температури компонентів, представлених через безрозмірні параметри $\phi' = v'/v_{кр}$ та $\tau = T/T_{кр}$. Значення приведенного питомого об'єму суміші отримані у вигляді адитивних величин на

базі даних компонентів у відповідності зі складом. Області параметрів, охоплені експериментальними і додатковими даними, показані на рис. 4.

Для розрахунку ваги експериментальних даних коефіцієнту стисливості використовувався вираз (1), у який були підставлені прийняті значення максимальних відносних похибок за густиною. Відповідні значення похибок за складом прийняті у розмірі 0,2 % для повного масиву даних. Для компонентів R125 та R290 використано моделі Вассермана (2002) та Вассермана (1989).

Для опису теплоти фазового переходу за допомогою моделі стану при її складанні враховувалася умова рівності площ під реальною і розрахованою ізотермами суміші постійного складу в інтервалі від v' до v'' (за даними для 54 пар значень p' і p'' на 20 ізотермах в інтервалі 253–348 К). Після складання моделі дослідні значення тиску насичених пари та рідини були зіставлені з розрахованими при дотриманні точної умови фазової рівноваги. Цією умовою є рівність парціальних летючостей компонентів суміші в рідкій та паровій фазах.

Як і для попередньої суміші для отримання коефіцієнтів a та b добавочної функції у формі (4) від взаємодії компонентів суміші R125/R290 використовувався алгоритм де Реук та Армстронга.

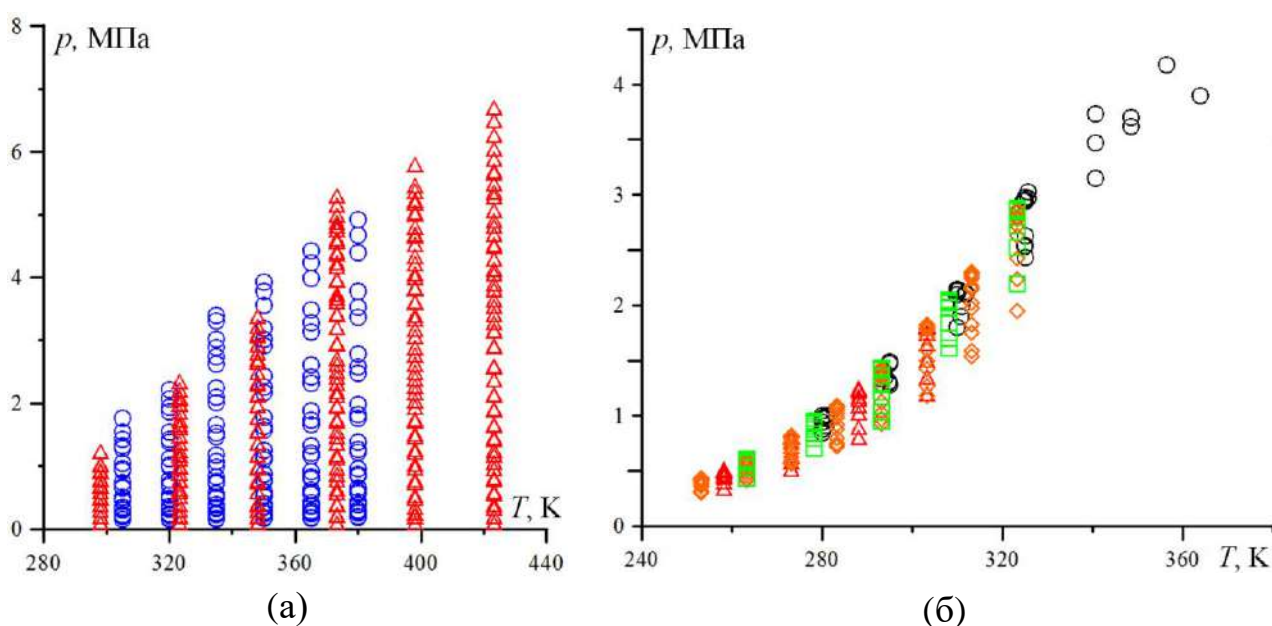


Рисунок 4 – Області параметрів, охоплені експериментальними та опорними даними для суміші R125/R290

а): експериментальні p, ρ, T, x -дані у області перегрітої пари (дані \circ – Каюкави та Δ – Йокоями);

б): експериментальні p, T, x -дані у області насичення, для яких отримано значення густини за додатковими моделями (дані \circ – Холкомб; Δ – Боббо; \diamond – Кіма [73]; \square – Хау [74]).

На відміну від суміші R32/R125 для розрахунку псевдокритичних параметрів суміші R125/R290 було використано просту лінійну модель, через відсутність для даної суміші експериментальних даних про властивості у критичній точці. Однак, як показали подальші розрахунки, отримані за допомогою моделі стану значення термодинамічних властивостей мають прийнятну точність.

Значення середніх квадратичних відхилень $\delta\rho_{cp}$ для даних за густиною, розрахованих за допомогою отриманої моделі стану складають: для експериментальних даних 0,26 %, для екстрапольованих даних у однофазній області – 0,06 %, а для опорних даних про густину у стані насичення – відповідно 0,10 та 0,09 %.

Також були виконані розрахунки середніх квадратичних відхилень для розрахованих значень тиску та густини у насиченні при порівнянні з відповідними експериментальними та опорними даними за умови виконання точної умови рівноваги рідкої та парової фаз, про яку йшлося раніше. Відхилення для значень тиску насичених пари та рідини, на базі яких складено модель стану, мали значення відповідно 1,86 % та 0,82 %. Для експериментальних значень тиску насичених пари та рідини середні квадратичні відхилення склали 0,84 % та 0,99 %, а для відповідних значень густини – 1,35 % та 0,07 % для повного масиву даних.

Для оцінки точності складеної моделі стану на рис. 5 було побудовано гістограму розбіжностей між експериментальними та опорними даними по густини та даними, отриманими за допомогою моделі стану. Для суміші R125/R290 було використано 364 дослідних та 650 опорних значень густини.

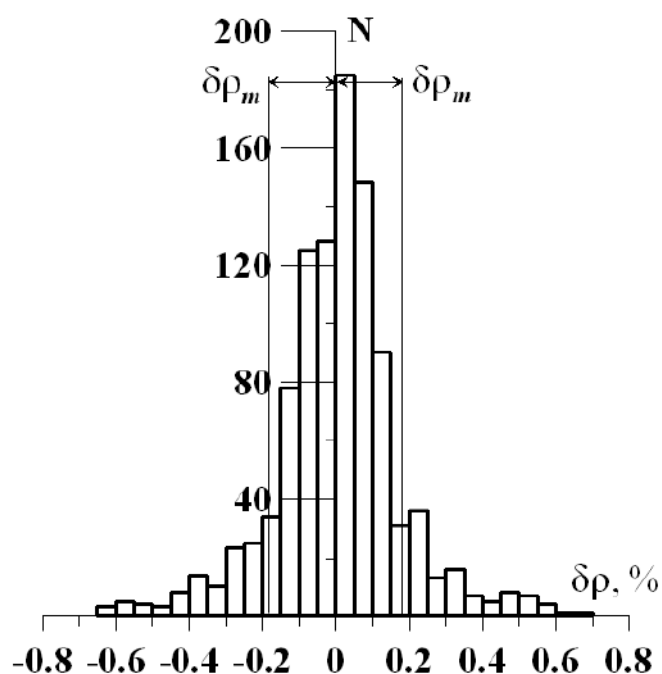


Рисунок 5 – Гістограма відхилень дослідних і опорних значень густини від розрахованих за моделлю стану для суміші R125/R290

У результаті порівняння можна зробити висновок, що на базі наявних експериментальних та додатково отриманих даних за температурою, тиском, густиною та складом для суміші R125/R290 отримано модель стану, яка точно описує термодинамічну поведінку суміші у діапазоні параметрів, характерному для роботи холодильних установок суднових систем охолодження.

Суміш R134a/R290 також є перспективною для використання у суднових системах охолодження через ряд позитивних властивостей, про які говорилося у попередніх розділах. Основними з них є те, що завдяки змішуванню з одного боку вдається позбутися горючих властивостей, які притаманні чистому пропану, а з іншого – зменшити вплив на глобальне потепління Землі у порівнянні із чистим холодоагентом R134a.

У якості експериментальних даних за температурою, тиском, густиною та складом для суміші R134a/R290 були узяті дані для перегрітої пари у діапазоні значень складу від 0,25 до 0,78 мольних долей. Крім того було використано експериментальні значення температури, тиску та складу у стані насичення, які отримані у діапазоні значень складу від 0,03 до 0,98 мольних долей першого компоненту суміші.

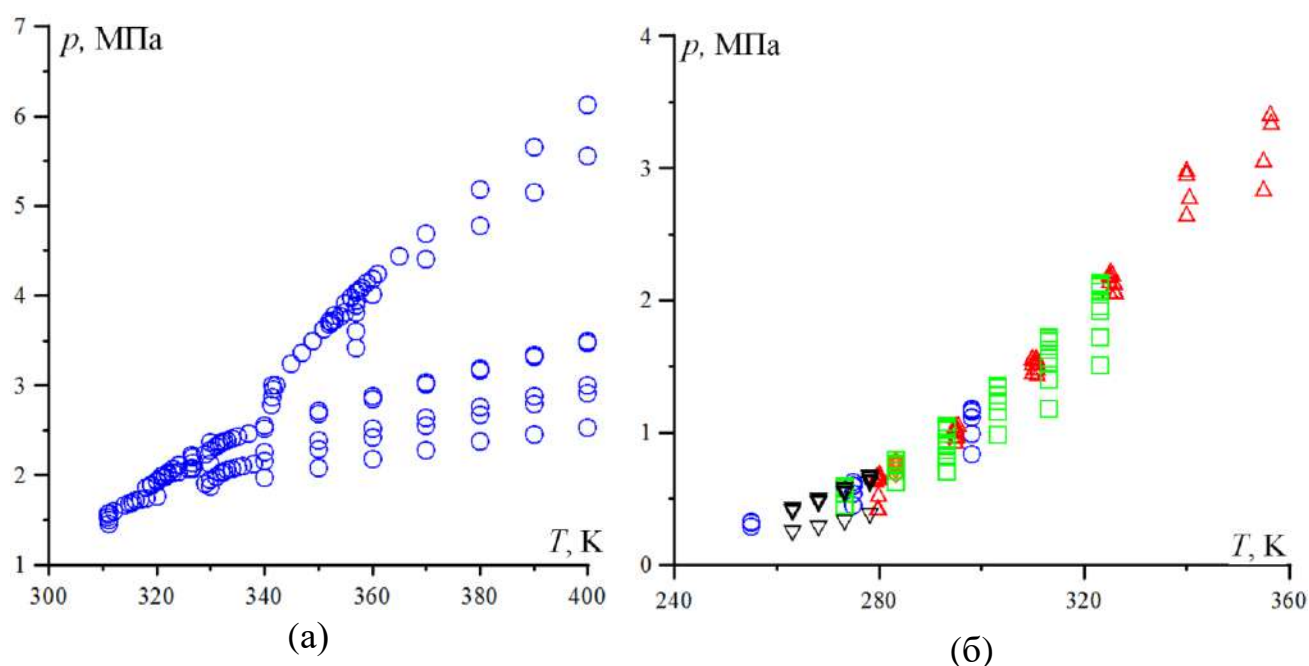


Рисунок 6 – Области параметрів, які охоплені експериментальними та опорними даними для суміші R134a/R290

а): експериментальні p, ρ, T, x -дані у області перегрітої пари (○–Наганума);

б): експериментальні p, T, x -дані у області насичення, для яких отримано

значення густини за додатковими рівняннями

(дані ○ – Клейбера; △ – Холкомб; ◇ – Стрієка;

□ – Ліма; ▽ – Донга)

Як і для суміші R125/R290, значення густини насичених пари та рідини та густини у однофазній області при низьких температурах для суміші R134a/R290 не вимірювалися. Тому ці значення також отримані за допомогою розрахунку. Розподіл експериментальних даних у однофазній області та у насиченні за температурою та тиском показаний на рис. 6.

За наявними експериментальними даними для суміші були отримані дві допоміжні моделі стану, які відрізняються тим, що для експериментальних значень при складанні задавалися два варіанти значень відносної похибки за складом суміші (0,1 та 0,2 %). Значення густини пари у стані насичення та перегрітої пари при низьких температурах (нижче 320 К) були розраховані за обома моделями стану та осереднені між собою.

Значення густини при температурах від 255 до 311 К та значеннях тиску від 0,10 МПа до 1,45 МПа були розраховані з використанням вказаних моделей стану. Розбіжності між значеннями, отриманими за двома моделями стану знаходяться у діапазоні від 0,01 до 0,5 %.

Для суміші R134a/R290, як і для попередньої речовини, значення густини для рідини у стані насичення були отримані шляхом комбінації відповідних значень для компонентів суміші. Зіставлення отриманих значень приведенного питомого об'єму компонентів при однакових температурах показало, що вони мають досить близькі значення, а їх відносні розходження між собою не перевищують 5,6 %. Тому, як і у випадку суміші R125/R290, відповідні дані для компонентів при 163 експериментальних значеннях температури суміші перераховані у приведені значення питомого об'єму і температури та зіставлені між собою, урахувавши експериментальні значення складу насиченої рідини.

У якості значень ваг експериментальних даних для суміші R134a/R290, як і для попередньої суміші використовувалися обернені величини квадрату дисперсії коефіцієнту стисливості суміші, для розрахунку яких було використано вираз (1). У якості моделей стану компонентів при визначенні ваг і при складанні моделі стану суміші використано: для R134a — рівняння Тільнер-Рота, а для R290 — рівняння Вассермана.

З метою правильного опису термодинамічної поведінки суміші у стані насичення у процесі складання моделі стану було використано експериментальні дані за температурою та тиском насиченої рідини та відповідні їм за складом та температурою дані про тиск насиченої пари, які було отримано інтерполяцією за фазовими діаграмами. Значення густини насичених пари та рідини для відповідних значень тиску, як і для попередніх сумішей були отримані за додатковими моделями стану.

Як і для попередніх сумішей коефіцієнти a та b виразу (4), за яким визначалася добавка до енергії Гельмгольца від взаємодії компонентів суміші R134a/R290, отримані з використанням алгоритму де Реук та Армстронга.

Модель описує експериментальні дані про густину пари із середнім квадратичним відхиленням $\delta\rho_{cp} = 0,12\%$, екстрапольовані дані для пари — з відхиленням $0,07\%$, опорні дані про густину насичених пари та рідини — з відхиленнями $0,08\%$ і $0,05\%$ відповідно.

Також виконано зіставлення експериментальних та опорних значень тиску та густини у стані насичення із розрахованими за моделлю стану з урахуванням точної умови рівноваги між рідкою та паровою фазами для суміші постійного складу. Як можна бачити із табл. 3.12 значення відповідних середніх квадратичних відхилень для експериментальних даних [46, 76-79] складають відповідно $1,47\%$ та $1,83\%$ за тиском пари та рідини у насиченні та $2,14\%$ та $0,05\%$ за густиною.

Розподіл відхилень для повного масиву експериментальних та опорних даних, які приймали участь у складанні моделі стану суміші, у кількості 522 точок можна наглядно оцінити за допомогою гістограми на рис. 7.

Як можна бачити з результатів виконаного порівняння експериментальних та опорних даних із розрахованими значеннями тиску та густини, складена модель стану для суміші R134/R290 цілком задовільно описує наявні дані та може бути використана для дослідження термодинамічної поведінки суміші з метою її використання у якості холодоагенту.

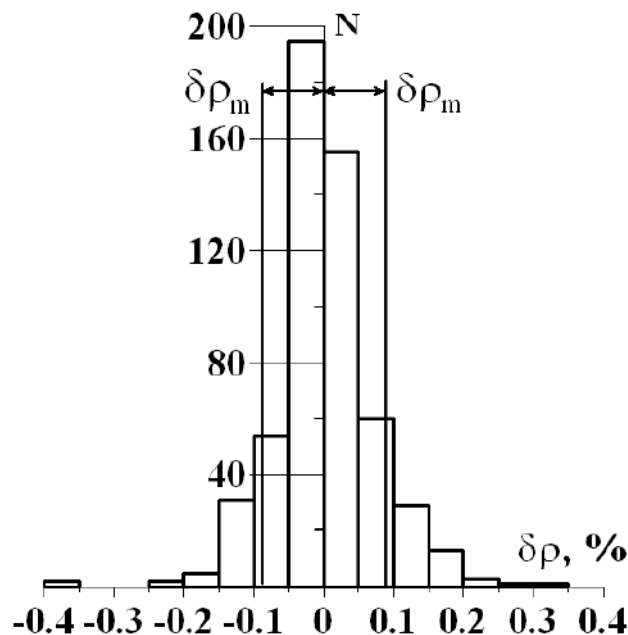


Рисунок 7 – Гістограма відхилень дослідних та опорних значень густини від розрахованих за моделлю стану для суміші R134a/R290

Четвертий розділ присвячено створенню автоматизованої інформаційної системи.

Для можливості використання сумішей холодоагентів у якості робочих речовин холодильних установок потрібна наявність точних даних про їх власти-

вості у характерних точках циклу цих установок в необхідних інтервалах параметрів. Найбільша потреба є в теплофізичних властивостях, які зручніше всього визначати за допомогою банків даних про властивості або автоматизованих інформаційних систем. У банках значення властивостей зберігаються як-правило у вигляді таблиць та діаграм, а автоматизовані системи дозволяють визначити значення термодинамічних та транспортних властивостей за допомогою моделей стану, які введені у них програмним шляхом.

На даний момент провідними дослідниками світу розроблено багато потужних систем, які містять в собі повний набір інформації про різноманітні властивості технічно важливих газів та рідин, яку накопичено у результаті проведених досліджень. Як відзначено вище, у банках даних забезпечується централізоване накопичення у вигляді файлів та колективне використання наявних даних про властивості речовин, отриманих шляхом експерименту та розрахунку. Досить часто крім числової інформації та відповідних посилань на джерело приводяться самі моделі, за якими виконано розрахунок властивостей.

У роботі зроблено огляд найбільш відомих банків даних. Це такі, як: IBTANTERMO, TЕРМАЛЬ, NIST/TRC SOURCE, NIST/TRC WinTable, DIPPR, DETHERM, DDB, KDB та інші.

При всіх досягненнях обчислювальної техніки безперервне зростання обсягу інформації, що зберігається в банках даних, ускладнює процес її вибору для конкретних речовин. Тому у випадках використання даних про властивості обмеженого числа речовин для розв'язання прикладних задач досить ефективні автоматизовані інформаційні системи. На відміну від банків даних, ці системи не зберігають числові значення властивостей, але за допомогою включених у них програмних модулів і моделей можуть генерувати необмежений обсяг інформації при різних комбінаціях незалежних змінних. Системи досить прості за структурою та в експлуатації і можуть бути встановлені на персональних комп'ютерах користувачів. При цьому можна забезпечити оперативну взаємодію систем із прикладними програмами.

Короткі відомості про основні вітчизняні і закордонні інформаційні системи представлені у роботі. Це системи AICT, ABECTA, Air-Pro, Thermo-Pro, Cryo-Syst, Cryo-Refr, СТАРС, NIST Chemistry WebBook, REFPROP, Solkane, CoolPack, PROPATN та інші.

Для можливості розрахунку теплофізичних властивостей досліджуваних холодоагентів у Одеському національному морському університеті створено систему, в яку введено моделі стану великої кількості чистих речовин та їх сумішей. Крім отриманих у роботі нових моделей стану сумішей у систему також введена велика кількість стандартних вітчизняних моделей, які мають більш просту форму, ніж аналогічні закордонні моделі, але не поступаються їм за точністю.

За допомогою розробленої автоматизованої системи можуть бути розраховані властивості 21-ї чистої речовини, серед яких одноатомні гази, повітря та його основні компоненти, діоксид вуглецю, аміак, вуглеводні та озонобезпечні холодоагенти, а також одинадцять сумішей речовин, у тому числі і досліджувані у даній роботі холодоагенти.

Термодинамічні властивості у автоматизованій системі розраховуються за допомогою поліноміальних та фундаментальних моделей стану. Для частини речовин передбачено розрахунок властивостей за допомогою обох форм моделей стану, що дозволяє зробити порівняльний аналіз між ними. Властивості переносу розраховуються за емпіричними моделями розрахунку в'язкості та теплопровідності, у яких вхідними параметрами є температура та густина. Крім вказаних моделей, для кожної речовини задані параметри критичної точки та рівняння для розрахунків ідеально-газових функцій і тисків на кривих насичення і плавлення. Для багатьох речовин використані стандартні моделі, які точно описують дослідні дані про теплофізичні властивості.

Найбільш зручними для програмування через просту форму є «поліноміальні» моделі стану. Незважаючи на простоту форми, ці моделі стану забезпечують високу точність розрахунків.

Фундаментальні моделі забезпечують більш високу точність у критичній області, ніж поліноміальні. До того ж при використанні даної моделі стану термодинамічні властивості можуть бути розраховані шляхом визначення часткових похідних від енергії Гельмгольца. При отриманні всіх моделей стану було ураховано умову рівності рідкої та парової фаз при незмінній температурі (та значенні складу у випадку суміші). Таким чином забезпечено точний розрахунок властивостей як у області пари та рідини, так і у стані насичення та двофазній області.

Створена автоматизована система активно використовується в Одеському національному морському університеті в наукових дослідженнях і навчальному процесі. Система заміняє при розрахунках діаграми стану та має істотні переваги у порівнянні із звичайними довідниками.

П'ятий розділ присвячений дослідженню термодинамічних властивостей сумішей холодоагентів.

При використанні суміші як холодоагенту бажано, щоб вона була азеотропною. Це дозволяє зменшити різницю температур між водою або повітрям і холодоагентом при його конденсації та різницю температур між охолоджуваним об'єктом і киплячим холодоагентом. Відповідно зменшуються втрати від зовнішньої необерненості процесів теплообміну при кінцевій різниці температур, які становлять близько 60 % усіх втрат від необерненості процесів циклу парокомпресорної холодильної установки.

Для аналізу термодинамічної поведінки сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 у стані фазової рівноваги з використанням розробленої автоматизо-

ваної інформаційної системи були побудовані діаграми залежності тиску цих сумішей від складу на ізотермах. Такий графік-діаграму для суміші R32/R125 приведено на рис. 8. Значення тиску на діаграмі лежать в інтервалі від 0,1 МПа до критичного.

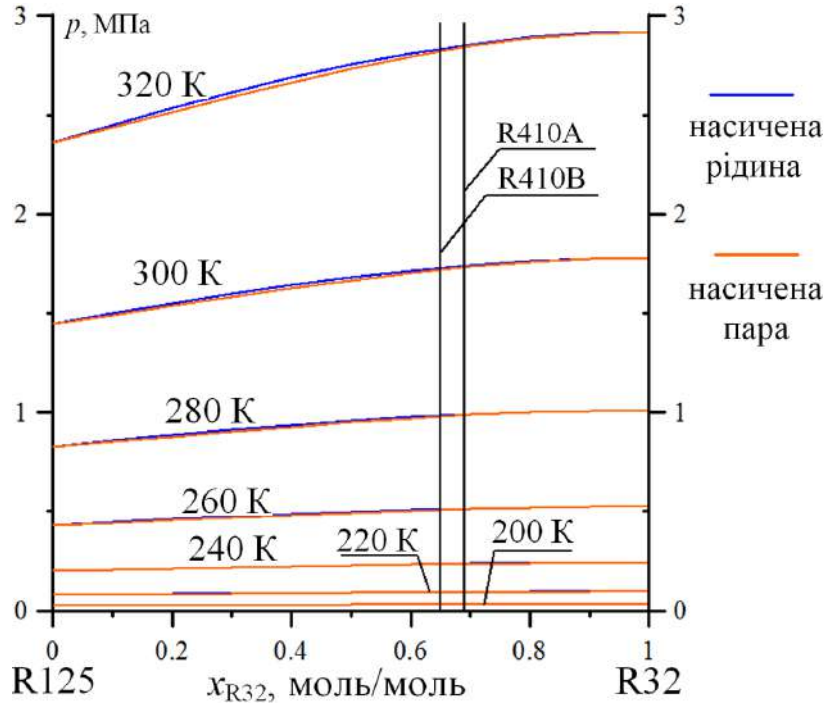


Рисунок 8 – Залежність тиску насичених пари та рідини від складу для сумішей R32/R125

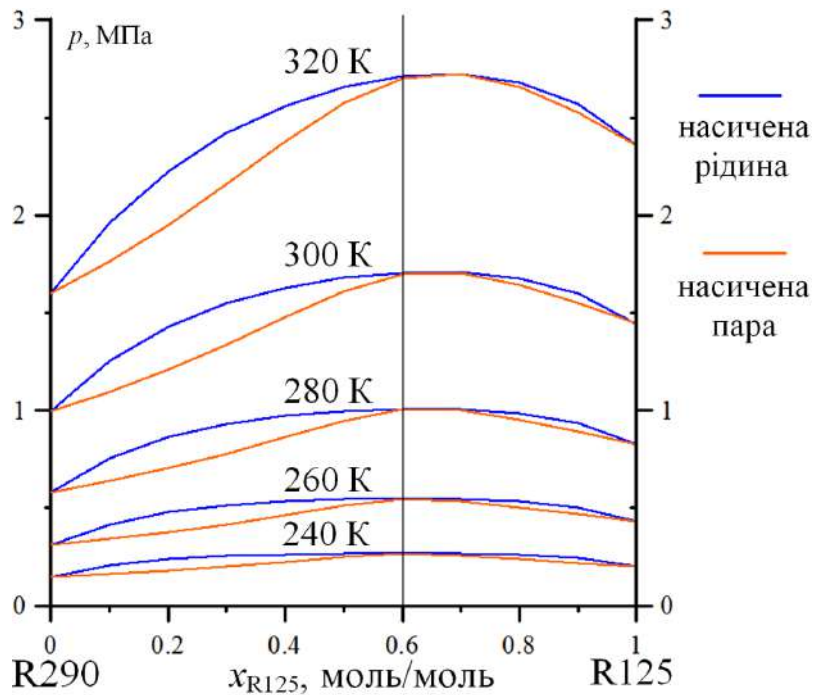


Рисунок 9 – Залежність тиску насичених пари та рідини від складу для сумішей R125/R290

Як можна бачити з діаграми p - x , суміш R32/R125 є азеотропною при концентрації R32 у діапазоні від 0,7 до 1,0 мольної долі. Залежність тиску від складу на ізотермах має мінімум в азеотропній точці. Взагалі для даної суміші різниця між значеннями тиску насичених пари та рідини приймає невеликі значення (на діаграмі 8 криві насиченої рідини виділені синім кольором, а криві насиченої пари – оранжевим). Найбільша різниця тиску насичених пари та рідини має місце на ізотермі 320 К при $x_{R32} = 0,2 \dots 0,5$ мольної долі. Як було зазначено раніше, найбільше використання у холодильній техніці отримали суміші R410A ($x_{R32} = 0,6976$ мольної долі) та R410B ($x_{R32} = 0,6537$ мольної долі). Ці значення складу позначені на діаграмі 8 вертикальними лініями.

Аналогічну діаграму на рис. 9 побудовано для суміші R125/R290. Як можна бачити з цієї діаграми, суміш з концентрацією 0,6 мольної долі R125 найбільш близька до азеотропної практично на всіх ізотермах, для неї різниця тиску насиченої рідини та пари на ізотермах лежить у межах 0,01 МПа. Цей склад на діаграмі 9 відмічений вертикальною лінією. Прийнятні значення Δp спостерігаються при $x_{R125} = 0,8$ (від 0,10 до 0,15 МПа). Найбільша різниця тисків насичених рідини та пари ($\Delta p = 0,65$ МПа) має місце на ізотермі 320 К при $x_{R125} = 0,2$ мольної долі.

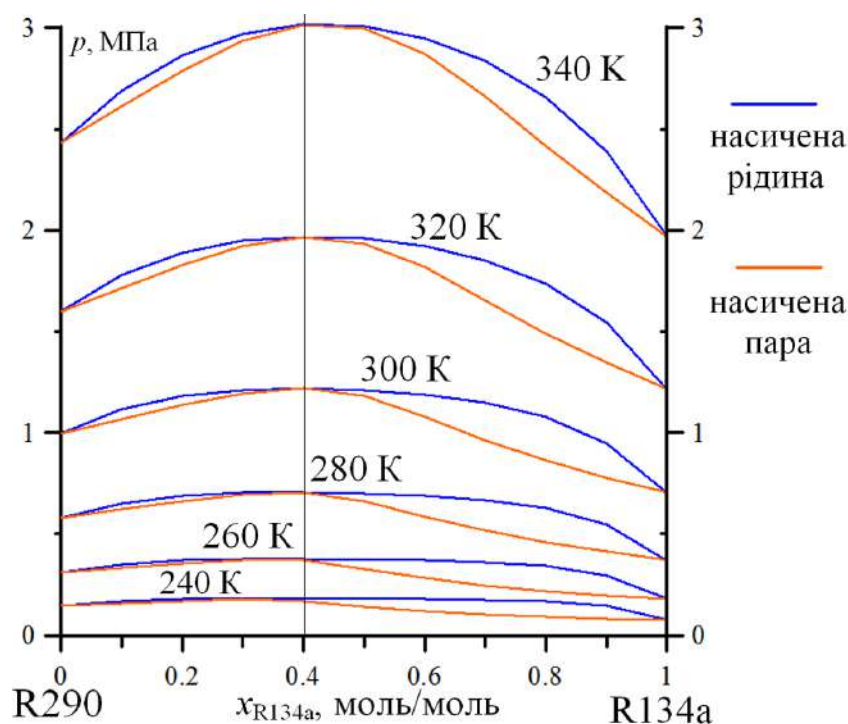


Рисунок 10 – Залежність тиску насичених пари та рідини від складу для сумішей R134a/R290

На рис. 10 приведена p - x діаграма суміші R134a/R290 у стані рівноваги фаз. Із діаграми можна бачити, що ця суміш також є азеотропною при мольній концентрації R134a приблизно 0,4 мольної долі, яку також позначено вертикальною лінією. Суміш веде себе практично як чиста речовина при значеннях температури від 280 К до 340 К, а на більш низьких ізотермах значення азеотропного складу зміщується до 0,2 мольної долі. Найбільша різниця значень тиску насичених рідини та пари спостерігається при $x_{R134a} = 0,8$ мольної долі.

Як було сказано раніше, холодильні установки на базі нових альтернативних холодоагентів повинні мати не меншу енергетичну ефективність (або навіть більшу), ніж при використанні попередніх робочих речовин. Для визначення степені термодинамічної ефективності роботи холодильної установки використовують холодильний коефіцієнт. Цей параметр можна визначити при відомих значеннях ентальпії холодоагенту на вході та виході агрегатів установки, які можуть бути розраховані за допомогою розробленої автоматизованої системи.

Дослідження ефективності виконувалося на базі одноступеневого теоретичного циклу, в якому передбачено теплообмін між більш гарячим рідким холодоагентом та більш холодним холодоагентом у вигляді пару шляхом регенерації. Цей цикл показано на рис. 11. В процесі дослідження визначаються термодинамічні властивості холодоагенту в кожній точці циклу, які необхідні для розрахунку повної холодопродуктивності Q_0 , ефективного ККД компресора η_e та ефективного холодильного коефіцієнта ε_e .

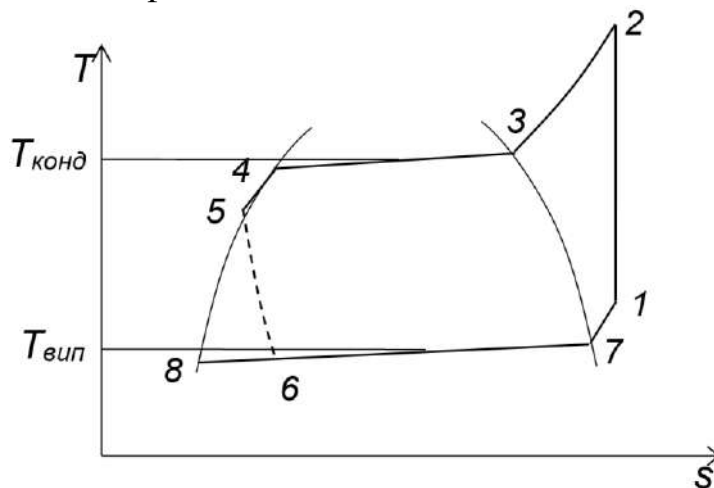


Рисунок 11 – Цикл одноступінчастої холодильної установки

Для отримання термодинамічних властивостей досліджуваних робочих речовин використовуються введені у автоматизовану інформаційну систему моделі стану, які описані у третьому розділі роботи. Окремим блоком автоматизованої системи є програма дослідження ефективності холодильних циклів. У якості вихідних даних до цієї програми вводять назву робочої речовини та відповідні температури у випарнику та конденсаторі. На базі цих даних з використанням моделей стану розраховуються необхідні значення термодинамічних властивостей в кожній точці циклу. Для визначення властивостей перегрітої пари та ріди-

ни використовуються різні комбінації незалежних параметрів. Властивості вологої пари та на лінії насичення визначаються з урахуванням степені сухості. За розрахованими значеннями властивостей визначаються характеристики циклу.

У якості холодоагенту може виступати не тільки чиста речовина (або азеотропна суміш), но і суміш холодоагенту, в якій температури насичених пари та рідини на ізобарі можуть відрізнитися (рис. 11). Для урахування цієї можливості спочатку за температури кипіння та конденсації приймаються відповідні значення на виході з випарника та конденсатора, для яких розраховуються значення тиску. Далі при цих значеннях тиску визначають температури, які мали місце на початку процесів конденсації та випарювання та знаходять середні значення для вказаних ізобарних процесів. Шляхом ітерації визначають такі значення тиску, при яких середні температури при незмінних значеннях тиску будуть дорівнювати заданим (з урахуванням погрешності ітерації).

При відомій температурі холодоагенту на виході з конденсатора можна визначити температуру за регенеративним теплообмінником. Значення температури переохолодження холодоагенту також можна задавати разом із іншими вихідними даними. При відомих значеннях тиску у конденсаторі та випарнику та температури на виході з регенеративного теплообмінника розраховуються термодинамічні властивості у точках 3, 4, 5, 7 та 8 циклу на рис. 11.

Наприкінці розрахунку теоретичного циклу визначається значення степені сухості холодоагенту у точці 6. Оскільки процес дроселювання 5-6 проходить при незмінній ентальпії, можна, визначивши ентальпію насичених пари та рідини у процесі випарювання холодоагенту, розрахувати степінь сухості за відомим адитивним виразом. Для визначення ентальпії холодоагенту перед всмоктуванням у компресор використовують рівняння, яке ураховує тепловий баланс у регенеративному теплообміннику. Тиск всмоктування у компресор дорівнює тиску у конденсаторі. Термодинамічні властивості перегрітої пари на виході з компресора розраховуються з урахуванням рівності ентропії на вході та виході з компресора та рівності тиску нагнітання та тиску конденсації. На базі відомих значень термодинамічних властивостей характеристики циклу Q_0 , η_e та ε_e знаходяться за відомими формулами.

В табл. 1 приведені значення ефективного холодильного коефіцієнта ε_e циклу, повної холодопродуктивності Q_0 та ефективного ККД компресора η_e одноступінчастої холодильної установки з регенеративним теплообміном при $t_{\text{вип}} = -30 \div -10$ °C, $t_{\text{конд}} = 35$ °C (температура заборотної води для охолодження конденсатора) та $\Delta t_p = 5$ °C при роботі на азеотропних сумішах R410A та R410B та їх компонентах. Розрахунки проводилися для холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна, яку детально описано у розділі 6. Як можна бачити із таблиці, значення ε_e , Q_0 , η_e для сумішей R32/R125 суттєво більші, ніж для компоненту R125. Найбільші значення цих параметрів відповідають холодоагенту R32. Але через наявність ви-

соких значень тиску (та, відповідно, температури) на виході з компресора даний холодоагент складно використовувати у чистому вигляді.

Аналогічні значення параметрів ефективності циклу холодильної установки при роботі на азеотропних сумішах R125/R290 (0,6/0,4) та R134a/R290 (0,4/0,6) були розраховані та зведені у табл. 2. Як можна бачити з таблиці, максимальні значення ефективного холодильного коефіцієнту відповідають компоненту R134a, а найменші – суміші R125/R290. Однак, по параметрам Q_0 , η_e картина протилежна: для холодоагенту R134a значення повної холодопродуктивності та ефективного ККД є найменшими у діапазоні температур випарювання від – 30 до – 10 °С. Найбільші значення Q_0 , η_e мають місце для сумішей, причому при збільшенні температури у випарнику значення холодопродуктивності Q_0 для суміші R125/R290 значно збільшуються у порівнянні із R134a/R290.

Таблиця 1 – Значення характеристик циклу одноступінчастої холодильної установки при роботі на сумішах R32/R125 та компонентах

$t_{\text{вип}}, ^\circ\text{C}$	–30	–25	–20	–15	–10	–30	–25	–20	–15	–10
	Для R32/R125 при $x_{\text{R32}} = 0,6976$					Для R32/R125 при $x_{\text{R32}} = 0,6537$				
ε_e	1,706	2,031	2,420	2,894	3,480	1,694	2,018	2,406	2,879	3,466
Q_0 , кДж	94,58	133,1	179,9	235,9	302,8	92,53	130,4	176,4	231,6	297,5
η_e	0,668	0,703	0,735	0,766	0,795	0,668	0,702	0,734	0,765	0,795
	Для R32					Для R125				
ε_e	1,758	2,101	2,492	2,979	3,577	1,463	1,785	2,161	2,609	3,202
Q_0 , кДж	105,7	148,9	199,8	260,4	332,9	63,93	91,83	125,7	167,9	219,1
η_e	0,672	0,706	0,737	0,768	0,797	0,656	0,692	0,725	0,756	0,786

Таблиця 2 – Значення характеристик циклу одноступінчастої холодильної установки при роботі на сумішах R125/R290 та R134a/R290 та компонентах

$t_{\text{кип}}, ^\circ\text{C}$	–30	–25	–20	–15	–10	–30	–25	–20	–15	–10
	Для R125/R290 при $x_{\text{R32}} = 0,6$					Для R134a/R290 при $x_{\text{R32}} = 0,4$				
ε_e	1,461	1,744	2,076	2,500	2,990	1,672	1,996	2,324	2,820	3,424
Q_0 , кДж	84,1	115,8	154,4	201,0	256,3	77,4	101,2	131,1	160,0	206,0
η_e	0,670	0,703	0,735	0,765	0,795	0,663	0,694	0,721	0,750	0,780
	Для R134a					Для R125				
ε_e	1,773	2,034	2,447	2,933	3,541	1,463	1,785	2,161	2,609	3,202
Q_0 , кДж	59,78	71,21	92,22	118,0	150,0	63,93	91,83	125,7	167,9	219,1
η_e	0,621	0,665	0,699	0,730	0,760	0,656	0,692	0,725	0,756	0,786

Більш детальний еколого-термoeкономічний аналіз, який ураховує велику кількість як експлуатаційних, так і екологічних аспектів у процесі експлуатації холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна зроблено у шостому розділі дисертаційної роботи.

За складеними моделями стану були розраховані таблиці термодинамічних властивостей на кривій насичення та в однофазній області в інтервалі тиску 0,1 – 34 МПа та інтервалах температур 200 – 400 К для сумішей R410A та R410B. Для сумішей із пропаном таблиці було розраховано в інтервалі тиску 0,05 – 6 МПа та температур 240 – 440 К для суміші R125/R290 та 240 – 420 К для суміші R134a/R290 при складах 0,2, 0,4, 0,6 та 0,8 мольної долі першого компонента. Таблиці властивостей містять значення густини ρ (кг/м³), ентальпії h (кДж/кг) та ентропії s (кДж/кг·К). Ці значення та моделі стану атестовані у якості стандартних довідкових даних.

Значення термодинамічних властивостей розраховані шляхом диференціювання вільної енергії Гельмгольца за допомогою наступних виразів, отриманих на підставі моделі стану та відомих диференційних співвідношень термодинаміки:

$$\rho = \frac{p}{RT} \cdot \frac{1}{1 + \omega \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \omega} \right)_{\vartheta, x}}, \quad (8)$$

$$\frac{h}{RT} = \frac{h^0}{RT} + \omega \cdot \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \omega} \right)_{\vartheta, x} + \vartheta \cdot \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \vartheta} \right)_{\omega, x}, \quad (9)$$

$$\frac{h^0}{RT} = 1 + \sum_{k=1}^2 x_k \vartheta_{0k} \frac{\partial \alpha_k^0}{\partial \vartheta_{0k}}, \quad (10)$$

$$\frac{s}{R} = \frac{s^0}{R} + \vartheta \cdot \left(\frac{\partial \alpha^r}{\partial \vartheta} \right)_{\omega, x} - \sum_{k=1}^2 x_k \alpha_k^r(\omega, \vartheta) + \alpha^E(\omega, \vartheta, x), \quad (11)$$

$$\frac{s^0}{R} = \sum_{k=1}^2 x_k \vartheta_{0k} \frac{\partial \alpha_k^0}{\partial \vartheta_{0k}} - \sum_{k=1}^2 x_k [\alpha_k^0(\rho, T) + \ln x_k]. \quad (12)$$

У рівняннях (8) – (12) α_k^0 та α_k^r — відповідно ідеально-газова та реально-газова енергія Гельмгольца компонента k суміші; α^E – добавка до енергії Гельмгольца від змішування у формі (5). Вираз для α_k^r має вигляд

$$\alpha_k^r = \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^r a_{ij} \omega^i \vartheta^j + \exp(-\omega^2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s b_{ij} \omega^i \vartheta^j, \quad (13)$$

де a_{ij} та b_{ij} – коефіцієнти поліноміальної та експоненціальної частин моделі стану чистого компонента.

У зв'язку з відсутністю таблиць термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей було виконано порівняння розраховані значення тиску насичених

пари та рідини, а також густини, ентальпії та ентропії у стані насичення та в однофазній області з даними, отриманими за допомогою відомої автоматизованої системи REFPROP (версія 10.0).

На підставі зіставлення з експериментальними даними для сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 можна виконати оцінку погрішності розрахованих нами даних. В області параметрів, яка досліджена експериментально ($T = 300 \div 420$ K і p до 3,5 МПа при низьких температурах і до 6,7 МПа при високих), погрішність розрахунку значень густини не перевищує $\pm 0,3$ %, а значень тиску насичених пари та рідини – ± 2 %. У недослідженій області параметрів і для калоричних властивостей погрішність можна оцінити за результатами зіставлення з даними REFPROP. Якщо вважати, що погрішності розрахованих даних і даних REFPROP однакові (близькі), то вони дорівнюють $\frac{1}{2}$ цих відхилень. Виходячи з цього, оцінені можливі погрішності для більшості розрахованих значень густини у недослідженій області, а також ентальпії і ентропії, які, відповідно, складають: 0,3 %, 2,5 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для пари і 2 %, 4 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для рідини.

Шостий розділ присвячений виконанню еколого-термoeкономічного аналізу перспективності використання досліджуваних сумішей у системах стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна. При комплексному аналізі ефективності холодильного обладнання необхідно урахувувати усі негативні фактори, які впливають на навколишнє середовище при експлуатації холодильного обладнання. Це можливо при здійсненні TEWI-аналізу (TEWI – повний еквівалент глобального потепління). Критерій TEWI урахує як прямий внесок у збільшення сумарного радіаційного форсингу від емісії холодоагентів, так і непрямий внесок від викидів CO₂ при виробництві електроенергії, яка необхідна для експлуатації холодильного обладнання.

Еколого-термoeкономічний аналіз виконано для холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна, схема якої представлена на рис.12. Вказані системи необхідні при використанні палив з наднизьким вмістом сірки. Суттєвим недоліком таких палив є зменшення їх в'язкості нижче допустимого інтервалу при підвищенні температури палива. Тому для підтримки необхідної температури палива конструкцією багатьох дизельних двигунів транспортних суден передбачено наявність зазначених систем стабілізації. Основним вузлом такої системи є агрегатована холодильна установка (чіллер) для охолодження води, яка забезпечує охолодження палива до необхідної температури у теплообмінному апараті О блоку охолодження дизельного палива.

Холодильна установка чіллера працює за одноступеневим циклом з регенерацією теплоти між рідиною та паром (рис. 11). Конденсатор та випарник установки кожухотрубного типу, для охолодження холодоагенту у конденсаторі використовується забортна вода. Базовим холодоагентом є R134a.

Аналіз перспектив переходу з базового фреону на альтернативні речовини проведено для досліджуваних у роботі перспективних сумішей R32/R125, R125/R290 і R134a/R290 при значеннях складу, які є найбільш близькими до азеотропу (це значення складу (у мольних долях): $x_{R32} = 0,6976$ (R410A) та $0,6537$ (R410B), $x_{R125} = 0,6$ та $x_{R134a} = 0,4$), а також для компонентів сумішей з метою порівняння. Розрахунок холодильного коефіцієнту, питомої холодопродуктивності та ексергетичних витрат відбувався при наступних параметрах холодильного циклу, найбільш характерних для систем охолодження палива: температури випарювання $t_{\text{вип}} = -5 \text{ }^\circ\text{C}$, температури конденсації $t_{\text{к}} = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ (при температурі заборотної води для охолодження конденсатора $t_{3B} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) та температури переохолодження рідини у регенеративному теплообміннику $\Delta t_p = 5 \text{ }^\circ\text{C}$.

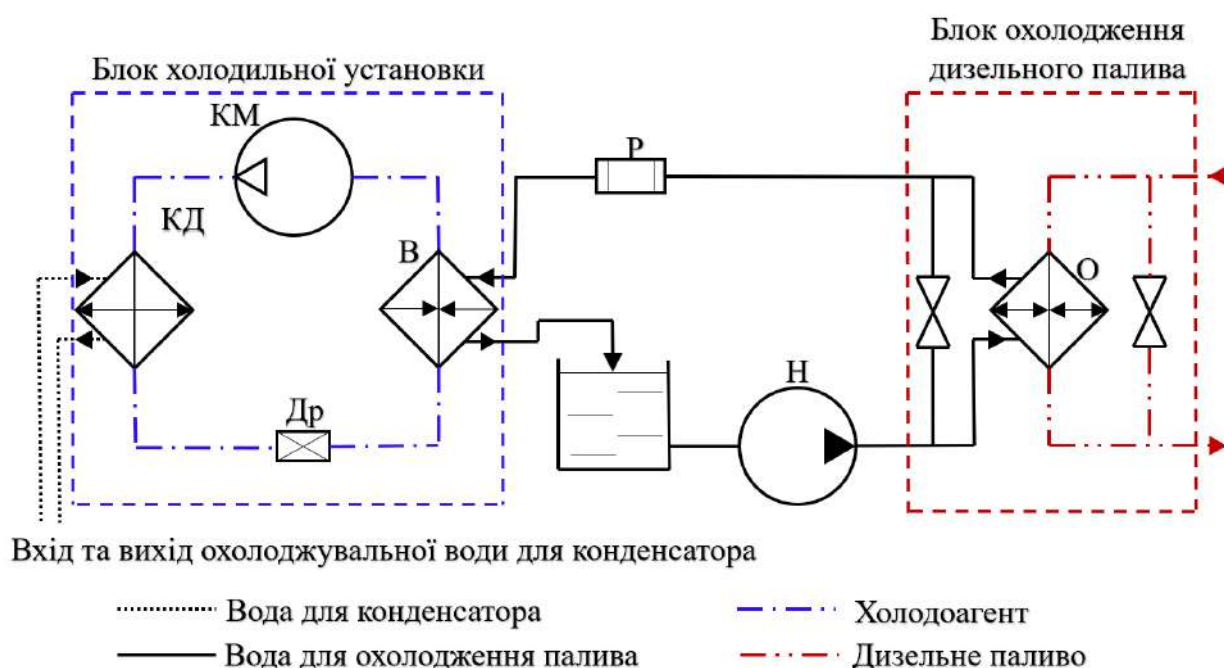


Рисунок 12 – Схема системи стабілізації температури палива дизельного двигуна на транспортному судні

КМ – компресор, Р – реле потоку,
 КД – конденсатор, Н – насос,
 Др – дросельний вентиль, О – охолоджувач дизельного палива
 В – випарник,

Розрахунок показав, що енергоефективність холодильної установки для базового холодоагенту R134a дещо вища, ніж для досліджуваних сумішей (холодильний коефіцієнт ε_e для R134a приймає найбільше значення). Компоненти сумішей R32 та R290 також мають досить високі значення ε_e , однак суттєвим недоліком для R32 є велике значення ефективної потужності. Холодильний коефіцієнт для R290 навіть більший, ніж у R134a, але R290 є горючою речовиною і для її використання у системі охолодження палива потрібно впровадити суттєві

конструкційні зміни у холодильній установці для забезпечення пожежної безпеки. Компонент R125 має саму низьку енергетичну ефективність і як потенційний холодоагент у даній холодильній установці взагалі не розглядається.

З точки зору впливу на парниковий ефект при отриманні одиниці холоду, який характеризується коефіцієнтом приведеної емісії парникових газів tew_i , базовий холодоагент R134a має досить велике значення цього параметру через високе значення потенціалу глобального потепління (для R134a ПГП дорівнює 1600). Найбільш вдалою альтернативою базовому холодоагенту є суміш R134a/R290, для якої коефіцієнт tew_i дорівнює 3,865 при ПГП = 920. Для решти досліджуваних сумішей показник tew_i досить високий (для R410A – 5,145 (ПГП = 2340), для R410B – 5,054 (ПГП = 2490) та для R125/R290 – 4,276 (ПГП = 2100)). Високе значення ПГП суміші R125/R290 обумовлене тим, що для компонента R125 воно є найбільшим серед досліджуваних речовин (3800).

Виконаний еколого-термоекономічний аналіз показав, що найбільш підходящою альтернативою базовому холодоагенту для використання у системі стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна є суміш R134a/R290. Ця суміш має кращі серед досліджуваних речовин екологічні та техніко-економічні показники, а також більш високу, ніж для R134a холодопродуктивність холодильної установки (260,5 кВт у порівнянні із значенням 154,3 кВт для чистого R134a).

ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дисертаційного дослідження розроблено теоретичні основи розрахунку властивостей перспективних сумішей холодоагентів для їх використання у суднових холодильних установках. Здійснено вирішення науково-прикладної проблеми, яка полягає у підвищенні еколого-енергетичної ефективності холодильних установок засобів транспорту при їх експлуатації шляхом використання нових еколого-безпечних холодоагентів при отриманні методології визначення їх термодинамічних властивостей. Висновки, що узагальнюють результати поставлених у роботі задач, полягають у наступному.

1. Рекомендовано у холодильних установках систем стабілізації температури палива дизельних двигунів транспортних суден використовувати перспективні суміші озонобезпечних та природних холодоагентів. Ці суміші відповідають вимогам Монреальського та Кіотського протоколів щодо речовин, які руйнують озоновий шар Землі та значно впливають на процес глобального потепління, тому їх використання дозволить поліпшити екологічні показники суднових холодильних установок в умовах експлуатації.

2. Для використання сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів у якості робочих речовин суднових холодильних установок необхідні дані про їх термодинамічні властивості. Такі дані можуть бути отримані шляхом розра-

хунку за надійними моделями стану. Для розрахунку термодинамічних властивостей сумішей існує досить багато форм моделей стану. Серед усіх розглянутих у роботі найбільш прийнятною є модель за формою Леммона, яка забезпечує високу точність розрахунків при наявності моделей стану для компонентів та точних експериментальних p, ρ, T, x -даних для суміші.

3. Аналіз наявних експериментальних даних про термодинамічні властивості сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів, які необхідні для складання моделей стану, показав, що достатню кількість таких даних накопичено для сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290. На їх базі можливо складання моделей стану сумішей у діапазонах температури та тиску, характерних для суднових систем охолодження та кондиціонування.

4. На базі наявних експериментальних та додатково отриманих опорних даних складені моделі стану для трьох досліджуваних сумішей, які описують їх термодинамічні властивості в області перегрітої пари і рідини та у стані насичення. Детальне порівняння розрахованих за допомогою моделей стану значень густини з використаними у процесі складання експериментальними та опорними даними показало, що отримані моделі описують вихідні p, ρ, T, x -дані для перегрітої пари та насичених пари і рідини сумішей із прийнятною точністю та можуть бути використані для розрахунку параметрів ефективності суднових холодильних установок на базі досліджуваних сумішей.

5. Створено автоматизовану інформаційну систему для розрахунку термодинамічних властивостей великої кількості речовин, включаючи досліджувані суміші холодоагентів, а також експлуатаційних параметрів холодильних установок на базі цих речовин. За допомогою автоматизованої інформаційної системи досліджено термодинамічну поведінку сумішей у стані фазової рівноваги та визначено азеотропні склади для кожної з них. Використання азеотропних сумішей у якості робочих речовин холодильних установок систем стабілізації температури палива створює необхідні умови для їх високоефективної експлуатації. Були розраховані значення холодильного коефіцієнту, холодопродуктивності та ефективного ККД холодильної установки системи стабілізації температури палива на базі азеотропних сумішей та їх компонентів. Результати розрахунку показали більш високі значення основних параметрів ефективності при використанні сумішей холодоагентів, ніж при використанні їх компонентів.

6. За допомогою розробленої автоматизованої інформаційної системи розраховані таблиці значень густини, ентальпії та ентропії суміші R32/R125 на кривій насичення та в однофазній області в інтервалах тиску 0,1–34 МПа та температури 200–400 К. Для сумішей із пропаном таблиці було розраховано в інтервалі тиску 0,05–6 МПа та температур 240–440 К для суміші R125/R290 та 240–420 К для суміші R134a/R290 при складах 0,2, 0,4, 0,6 та 0,8 мольної долі першого компонента. Виконана детальна оцінка погрешностей розрахованих значень термодинамічних властивостей сумішей та встановлено, що вони мають

цілком задовільну точність для розрахунку параметрів ефективності суднових холодильних установок. Погрішності для більшості розрахованих значень густини, ентальпії та ентропії відповідно складають: 0,3 %, 2,5 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для пари і 2 %, 4 кДж/кг і 0,005 кДж/(кг·К) для рідини.

7. У результаті огляду основних існуючих методів аналізу ефективності холодильного обладнання було показано, що для об'єктивної оцінки можливості використання нових речовин у якості альтернативи забороненим холодоагентам з метою поліпшення екологічних показників суднових холодильних установок необхідно, крім параметрів ефективності циклу холодильних установок, також урахувати такі фактори, як затрати на виробництво холодильної установки, прямий вклад у глобальне потепління через емісію холодоагентів та непрямий вклад через виробництво електроенергії для холодильної установки.

8. На базі отриманих даних про термодинамічні властивості сумішей холодоагентів R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 виконано комплексний еколого-термoeкономічний аналіз холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна. Отримані у результаті аналізу значення еколого-термoeкономічних індикаторів показали, що найбільш прийнятною альтернативою базовому холодоагенту R134a з точки зору техніко-економічної ефективності та рівню впливу на довколишнє середовище є суміш R134a/R290, яка має помірний вплив на парниковий ефект та забезпечує більш високу холодопродуктивність установки, ніж базовий холодоагент.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографія:

1. Вассерман О.А. Термодинамические свойства смесей гидрофторуглеродов и природных хладагентов: монографія / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський. – Одеса: Фенікс, 2013 – 288 с.
Автором виконані: розділи 2, 3 (частина I) та частина II.

Статті у закордонних виданнях, проіндексованих у базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus:

2. Vasserman O. Automated system for calculation thermophysical properties of important for power engineering substances [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky // Journal of Physics: Conference Series [Міжнародне фахове наукове видання (Великобританія)]. – Vol. 1683. – 2020. – P. 1–7. *Видання входить до МНБ – SCOPUS. Автором розроблено текст комп'ютерної програми та дизайн автоматизованої системи розрахунку термодинамічних властивостей.*
3. Vasserman O. Improving the quality of learning discipline “Technical thermodynamics and heat exchange” at ONMU [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky //

Journal of Physics: Conference Series [Міжнародне фахове наукове видання (Великобританія)]. – Vol. 891. – 2017. – P. 1–4. *Видання входить до МНБ – SCOPUS. Автором розроблено опис методики викладання дисципліни «Технічна термодинаміка» та розробка рисунків до статті.*

4. Vasserman O. Equation of State and Phase Behavior of a Propane–Tetrafluoroethane Mixture [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky // Russian Journal of Physical Chemistry [Міжнародне фахове наукове видання (США)]. – V. 86. – No. 9. – New York: Pleiades Publishing, 2012. – P. 1416–1419. *Видання входить до МНБ – SCOPUS. Автором виконано складання моделі стану та зіставлення з експериментальними даними.*

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав із напрямку, з якого підготовлено дисертацію:

5. Vasserman O. Student’s knowledge checking at studying “Technical thermodynamics and heat exchange” discipline [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky // IOSR Journal of Research & Method in Education (IOSR-JRME) [Міжнародне фахове наукове видання (Індія)]. – Vol. 10. – Iss. 3. – Ser. III, – 2020. – P. 1–5. *Видання входить до МНБ – American National Engineering Database (ANED), arXiv Database, Cabell Publishing Inc, CrossRef, EBSCO, Google Scholar, Jour Informatics, SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS), J-Gate, Ulrich's. Автором виконано складання моделі стану та зіставлення з експериментальними даними.*

Статті у наукових виданнях, включених до Переліку наукових фахових видань України:

6. Мальчевський В.П. Дослідження ефективності системи охолодження палива суднового дизеля на базі нових холодоагентів [Текст] / В.П. Мальчевський, Р.А. Варбанець // Двигуни внутрішнього згоряння [Фахове видання України]. – № 2. – Харків: НТУ «ХПІ», 2021 р. – С. 36–39. *Видання входить до МНБ – Ulrich's Periodicals Directory, Google Scholar, DRIVER, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), WorldCat. Автором досліджено ефективність циклу холодильної установки чіллера, зроблено відповідні рисунки та таблиці.*
7. Вассерман О.А. Термодинамические свойства девяти смесей гидрофторуглеродов и природных хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Холодильна техніка та технологія [Фахове видання України]. – № 5. – Одеса: ОДАХ, 2013 р. – С. 12–22. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar. Автором складено моделі стану п'яти сумішей холодоагентів та виконано зістав-*

лення з експериментальними даними для цих сумішей.

8. Вассерман О.А. Фазовое равновесие смеси метан–диоксид углерода и её характеристики как хладагента [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Технічні газы [Фахове видання України]. – № 4. – Одеса: UA-SIGMA, 2013 р. – С. 53–58. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано аналіз ефективності циклу холодильної установки на базі дослідженої суміші та побудовано відповідні діаграми.*
9. Вассерман О.А. Сравнение точности двух уравнений состояния смесей хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Проблеми техніки [Фахове видання України]. – № 4. – Одеса: ОНМУ, 2010 р. – С. 51–58. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar. Автором виконано аналіз ефективності циклу холодильної установки на базі дослідженої суміші та побудовано відповідні діаграми.*
10. Вассерман О.А. Автоматизированная система по теплофизическим свойствам рабочих веществ низкотемпературной техники [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Технічні газы [Фахове видання України]. – № 6. – Одеса: UA-SIGMA, 2010 р. – С. 50 – 58. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано введення до автоматизованої системи моделей стану речовин та зовнішній інтерфейс системи.*
11. Вассерман О.А. Уравнение состояния смеси хладагентов этан–диоксид углерода [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Холодильна техніка і технологія [Фахове видання України]. – № 6. – Одеса: ОДАХ, 2009 р. – С. 55–59. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar. Автором виконано розробку масиву експериментальних даних про термодинамічні властивості суміші.*
12. Вассерман О.А. Банки данных и автоматизированные информационные системы по теплофизическим свойствам газов и жидкостей [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Технічні газы [Фахове видання України]. – № 5. – Одеса: UA-SIGMA, 2009 р. – С. 59–66. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано збір та систематизацію відомостей про відомі банки даних та автоматизовані інформаційні системи.*
13. Вассерман О.А. Термодинамические свойства хладагента R143a [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Наукові праці ОНАХТ [Фахове видання України]. – Вип. 35. – т. I. – Одеса: ОНАХТ, 2009 р. – С. 92–97. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienceIndex, Google Scholar. Автором виконано підготовку масиву експериментальних даних та його введення у програму розрахунку моделі стану.*
14. Вассерман О.А. Характеристики цикла одноступенчатой холодильной ма-

шины при работе на смесях R23/R744 и R41/R744 [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Технічні газети [Фахове видання України]. – № 3. – Одеса: UA-SIGMA, 2009 р. – С. 53–57. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано розробку програми розрахунку ефективності циклів та побудову відповідних діаграм.*

15. Вассерман О.А. Об эффективности смесей R125/R290 и R134a/R290 как рабочих тел холодильных машин [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Технічні газети [Фахове видання України]. – № 3. – Одеса: UA-SIGMA, 2008 р. – С. 55–59. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано розрахунок відповідних показників ефективності сумішей та побудову відповідних характеристик.*
16. Вассерман О.А. Об эффективности смесей R125/R290 и R134a/R290 как рабочих тел холодильных машин [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Холодильный бизнес [Міжнародне фахове видання]. – № 9. – Москва: ИД «Холодильное дело», 2008 р. – С. 54–58. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано розрахунок відповідних показників ефективності сумішей та побудову відповідних характеристик.*
17. Вассерман О.А. Программа для расчёта термодинамических циклов холодильных установок и выбора компрессоров [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Вісник Одеського національного морського університету [Фахове видання України]. – Вип. 25. – Одеса: ОНМУ, 2008 р. – С. 157–165. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано складання та налагодка комп'ютерної програми та розробка інтерфейсу.*
18. Вассерман О.А. Термодинамические свойства смеси хладагентов R134a/R290 [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Вісник Одеського національного морського університету [Фахове видання України]. – Вип. 23. – Одеса: ОНМУ, 2007 р. – С. 160–171. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано підготовку масиву експериментальних даних та його введення у програму розрахунку моделі стану.*
19. Вассерман О.А. Система для расчета теплофизических свойств криогенных веществ и альтернативных хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Технічні газети [Фахове видання України]. – № 5. – Одеса: UA-SIGMA, 2007 р. – С. 59–64. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, Scisearch, Google Scholar, WorldCat, CrossRef. Автором виконано складання та налагодка комп'ютерної програми та розробка інтерфейсу.*
20. Мальчевський В.П. Термодинамические свойства смеси хладагентов

R125/R290 [Текст] / В.П. Мальчевський // Проблеми техніки [Фахове видання України]. – № 2. – Одеса: ОНМУ, 2007 р. – С. 56–63. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienseIndex, Google Scholar. Автором виконано підготовку масиву експериментальних даних та його введення у програму розрахунку моделі стану.*

21. Вассерман О.А. О точности уравнения состояния смеси, составленного на основе ограниченного количества экспериментальных данных [Текст] / О.А. Вассерман, А.В. Богданов, В.П. Мальчевський // Проблеми техніки [Фахове видання України]. – № 3. – Одеса: ОНМУ, 2006 р. – С. 55–63. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienseIndex, Google Scholar. Автором виконано підготовку масивів експериментальних даних для складання серії моделей.*
22. Вассерман О.А. Уравнение состояния смеси хладагентов R32/R125 [Текст] / О.А. Вассерман, А.В. Богданов, В.П. Мальчевський // Проблеми техніки [Фахове видання України]. – № 2. – Одеса: ОНМУ, 2006 р. – С. 62–68. *Видання входить до МНБ – Index Copernicus, ScienseIndex, Google Scholar. Автором виконано підготовку масиву експериментальних даних та його введення у програму розрахунку моделі стану.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації та додатково відображають отримані у ході дослідження результати:

23. Вассерман О.А. Суміші ознобезпечних та природних холодоагентів R125/R290, R134a/R290, R23/R744 і 41/R744. Рівняння стану і таблиці термодинамічних властивостей [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // СДД–15–2011. Таблиці стандартних довідкових даних [Державний Стандарт України]. – Київ: Видавництво стандартів, 2012 р. – 112 с. *Автором виконано підготовку масиву експериментальних даних для сумішей холодоагентів та розрахунок таблиць термодинамічних властивостей.*
24. Мальчевський В.П. Исследование азеотропности смесей альтернативных хладагентов R125/R290 и R134a/R290 [Текст] / В.П. Мальчевський // Матеріали III Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. – Одеса: ОНМУ, 2021 р., С. 333–336.
25. Мальчевський В.П. Дослідження ефективності роботи холодильної установки ізотермічного контейнера на базі сумішей холодоагентів R125/R290 та R134a/R290 [Текст] / В.П. Мальчевський // Матеріали конференції MINTT-2021: XI Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: ХДМА, 2021 р., С. 145–151.
26. Вассерман О.А. Автоматизированная система для расчёта тепловых физических

свойств важных для теплоэнергетики веществ [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали III Міжнародної конференції «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – Москва: Національний дослідний університет «Московський енергетичний інститут», 2020 р. – С. 396–397. *Автором виконано розрахунок термодинамічних властивостей сумішей та їх параметрів ефективності.*

27. Вассерман О.А. Эффективность смесей R23/R744 та R41/R744 как рабочих тел холодильных установок [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв: Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, 2020 р. – С. 516–520. *Автором виконано розробку програмних модулів та інтерфейсу системи.*
28. Вассерман О.А. Уравнение состояния смеси R290/R125 и её фазовое поведение [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали II Міжнародної науково-практичної морської конференції кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. – Одеса: ОНМУ, 2020 р., С. 190–198. *Автором виконано розрахунок термодинамічних властивостей суміші та побудова відповідних графіків.*
29. Вассерман О.А. Применение в учебном процессе банка данных о термодинамических свойствах хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали XI Міжнародної науково-практичної конференції «MINTT-2019: Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: ХДМА, 2019 р., С. 439. *Автором виконано розробку програмних модулів та інтерфейсу системи.*
30. Вассерман О.А. Технологии в судовой энергетике для соблюдения экологических норм [Текст] / О.А. Вассерман, А.С. Бойчук, В.П. Мальчевский // Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми». – Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2019 р., С. 237. *Автором виконано підбирання матеріалу з методів очищення випускних газів дизельних двигунів.*
31. Вассерман О.А. Принципы эксергетического метода анализа циклов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції FS-2019 кафедри СЕУ та ТЕ ОНМУ, присвяченої пам'яті професорів Фоміна Ю.Я. і Семенова В.С. – Одеса: ОНМУ, 2019 р., С. 54 – 56. *Автором виконано опис різних варіантів эксергетичного методу аналізу термодинамічних циклів.*
32. Вассерман О.А. Характеристики циклов холодильных установок при работе на хладагенте R134a [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевский // Матеріали IX Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2018 р.,

- С. 125. *Автором виконано розрахунок термодинамічних властивостей холодоагенту та його параметрів ефективності.*
33. Вассерман О.А. Повышение качества изучения дисциплины «Техническая термодинамика и теплообмен» в ОНМУ [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали Міжнародної конференції «Современные проблемы теплофизики и энергетики». – Москва: Національний дослідний університет «Московський енергетичний інститут», 2017 р. – С. 296 – 298. *Автором виконано опис модульної системи навчання та розробка ілюстрацій до статті.*
34. Вассерман О.А. Уравнение состояния и термодинамические свойства 1,1,1,2-тетрафторэтана (R134a) [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції «MINTT-2017: Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: ХДМА, 2017 р., С. 305. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних та розрахунок термодинамічних властивостей холодоагенту.*
35. Вассерман О.А. Термодинамические свойства смесей R23/R744 и R41/R744 и их основные данные как хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали VIII Міжнародної науково-практичної конференції «MINTT-2016: Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: ХДМА, 2016 р., С. 312–314. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних та розрахунок термодинамічних властивостей сумішей.*
36. Вассерман О.А. Характеристики смесей R23/R744 и R41/R744 как хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці». – Миколаїв: НУК імені адмірала Макарова, 2015 р., С. 176. *Автором виконано розрахунок термодинамічних властивостей сумішей та їх параметрів ефективності.*
37. Vasserman O. Equation of State and Phase Behavior of Difluoromethane [Text] – Pentafluoroethane Mixture / O. Vasserman, V. Malchevsky, I. Abdulagatov // Materials of the Nineteenth Symposium on Thermophysical Properties. – Boulder: National Institute of Standards and Technology, 2015, P. 219. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних та побудова фазових діаграм.*
38. Вассерман О.А. Термодинамические свойства шести бинарных смесей хладагентов в широкой области параметров [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Матеріали XIV Російської конференції (з міжнародною участю) з теплофізичних властивостей речовин (РКТС-14). – Казань: КНИТУ, 2015 р., С. 125–129. *Автором виконано складання моделей стану чотирьох сумішей.*
39. Вассерман О.А. Термодинамические свойства шести смесей озонобезопас-

- ных и природных хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський, С.В. Козловський // Матеріали другої Міжнародної науково-технічної конференції «Современные методы и средства исследований теплофизических свойств веществ». – Санкт-Петербург: МАХ, 2012 р., С. 308–316. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних та комп'ютерної програми для чотирьох сумішей.*
40. Вассерман О.А. Смесь R290/R125 как альтернативный хладагент [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції «MINTT-2012: Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті». – Херсон: ХДМА, 2012 р., С. 148–152. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних для суміші.*
41. Vasserman O. Equations of State and Thermodynamic Properties of Mixtures R290/R125 and R290/R744 [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky, S. Kozlovsky, I. Abdulagatov // Materials of the Eighteenth Symposium on Thermophysical Properties. – Boulder: National Institute of Standards and Technology, 2012. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних та розрахунків термодинамічних властивостей сумішей.*
42. Вассерман О.А. Термодинамические свойства смесей хладагентов [Текст] / О.А. Вассерман, В.П. Мальчевський // Матеріали XIII Російської конференції з теплофізичних властивостей речовин (РКТС-13). – Новосибірськ: Інститут теплофізики ім. С.С. Кутателадзе СО РАН, 2011 р., С. 195–199. *Автором виконано формування масиву експериментальних даних сумішей.*
43. Vasserman O. Phase Behavior of Some Binary Mixtures of Refrigerants with Carbon Dioxide [Text] / O. Vasserman, V. Malchevsky, S. Kozlovsky // Materials of the 19 Thermophysical Properties Conference (ECTP). – Thessaloniki: “N. Germanos” Conference Center, HELEXPO, 2011. *Автором складено моделі стану чотирьох сумішей.*

АНОТАЦІЯ

Мальчевський В.П. Науково-технічні основи підвищення еколого-енергетичної ефективності холодильних установок засобів транспорту – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Одеський національний морський університет, м. Одеса. 2021.

Дисертація присвячена розробці теоретичних основ розрахунку властивостей перспективних сумішей холодоагентів та проведенню еколого-термоeconomic аналізу холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна.

На підставі експериментальних та додатково отриманих опорних даних за методикою Леммона розроблені єдині моделі стану для розрахунку термодинамічних властивостей перспективних сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290. Ці властивості необхідні для проектування холодильних установок суднових систем охолодження та кондиціонування на базі вказаних сумішей.

Отримані моделі стану введені у автоматизовану інформаційну систему, за допомогою якої виконано аналіз термодинамічної поведінки сумішей холодоагентів у стані фазової рівноваги. У результаті аналізу визначені азеотропні склади досліджуваних сумішей та отримані таблиці термодинамічних властивостей сумішей у діапазонах температури та тиску, характерних для роботи холодильних установок суднових систем охолодження.

Проведено еколого-термoeкономічний аналіз холодильної установки системи стабілізації температури палива дизельного двигуна транспортного судна, який працює на паливі з наднизьким вмістом сірки. У результаті аналізу зроблено висновок про перспективність використання нових сумішей холодоагентів та їх компонентів у якості робочих речовин суднових холодильних установок.

Ключові слова: екологічні вимоги, палива з наднизьким вмістом сірки, система стабілізації температури палива, дизельний двигун транспортного судна, суміші холодоагентів, моделі стану, термодинамічні властивості, автоматизована система, фазова рівновага, таблиці властивостей, перспективність використання.

ABSTRACT

Malchevsky V.P. Scientific and technical bases of ecological and energy efficiency increase of transport means refrigerating plants. – Qualifying scientific work on the rights of the manuscript.

The dissertation is devoted to the development of theoretical bases for calculating the properties of perspective refrigerants' mixtures and to performance the ecological and thermoeconomic analysis of temperature stabilization system refrigeration plant of the marine diesel fuel system.

On the basis of experimental and additionally obtained reference data according to Lemmon's method, uniform state models for calculation of thermodynamic properties of perspective mixtures R32/R125, R125/R290 and R134a/R290 were developed. These properties are necessary for the design of refrigeration systems for marine cooling and air conditioning systems based on these mixtures.

To solve the applied problems related to the operation of refrigeration systems of transport means, the obtained state models were entered into an automated information system. This system allows to calculate more than 20 properties for about 20 pure substances and 11 mixtures in the single-phase, two-phase region and in the saturation state.

With the help of the developed automated information system the analysis of thermodynamic behavior of mixtures R32/R125, R125/R290 and R134a/R290 in the state of phase equilibrium is performed. In the framework of this analysis, diagrams of the dependence of the pressure of these mixtures on the composition on isotherms are constructed, on which it can be seen that all three mixtures are azeotropic, i.e. have compositions in which the mixture behaves as a pure substance.

To evaluate the efficiency of using the studied mixtures as refrigerants, refrigeration capacity, effective compressor efficiency and effective refrigeration coefficient of a single-stage refrigeration unit with regenerative heat exchange based on mixtures and their components were calculated. As a result of calculations it can be seen that the maximum values of the refrigeration coefficient in the studied ranges of condensation and evaporation temperatures correspond to the component R134a, and the maximum values of refrigeration capacity - mixtures with propane.

According to the compiled state models, tables of thermodynamic properties of mixtures in the single-phase region on the phase equilibrium line are calculated for the ranges of parameters characteristic of the operation of refrigeration units. For mixtures R32/R125 it is a temperature range of 200 - 400 K and pressure values up to 34 MPa, and for mixtures with propane it is temperatures from 240 to 440 K and pressure values up to 6 MPa.

The ecological and thermoeconomic analysis of the temperature stabilization system refrigeration plant of the marine diesel fuel system also has been performed. As a result of the analysis, a conclusion was made about the perspectives of using new mixtures of refrigerants and their components as working substances of the investigated refrigeration plant.

Key words: ecological requirements, ultra-low sulfur fuels, fuel temperature stabilization system, marine diesel of transport vessel, refrigerant mixtures, equation of state, thermodynamic properties, automated system, phase equilibrium, property tables, perspectives of using.