

ВІДГУК

офіційного опонента директора Машинобудівного навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, доктора технічних наук, професора Сербіна Сергія Івановича на дисертаційну роботу Мальчевського Валентина Павловича «Основи забезпечення еколого-енергетичної ефективності суднових дизелів стабілізацією температури палива сумішами холодоагентів», подану до захисту у спеціалізовану вчену раду Д 64.050.13 на здобуття наукового ступеню доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки

1. Актуальність дисертаційної роботи, її зв'язок з державними науковими темами.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної проблеми зменшення шкідливого впливу на навколишнє середовище від суднових енергетичних установок під час їх експлуатації. Для зменшення шкідливих викидів у вигляді оксидів сірки та азоту рекомендовано використовувати для суднових малообертових дизельних двигунів палива із наднизьким вмістом сірки. Однак, на відміну від важких палив, які зазвичай потребують підігріву, легкі палива необхідно охолоджувати для забезпечення потрібної в'язкості і безаварійної експлуатації малообертових двигунів. Необхідна ступінь охолодження, як правило, забезпечується системою стабілізації температури палива, яка є невід'ємною частиною паливної системи суднового дизеля. Головним агрегатом системи стабілізації температури палива є фреонова холодильна установка, яка охолоджує теплоносій (воду) для стабілізації температури палива.

Для вирішення актуальної проблеми поліпшення еколого-енергетичної ефективності суднових дизелів та їх систем запропоновано використовувати у системі стабілізації температури палива перспективні суміші озонобезпечних та природних холодоагентів. Для використання указаних сумішей у якості робочих речовин необхідні точні дані про термодинамічні властивості, для отримання яких складено єдині моделі стану. З метою зручності виконання аналізу особливостей термодинамічної поведінки досліджуваних сумішей, розроблено автоматизовану інформаційну систему, яка крім отриманих моделей стану також містить підмоделі стану великої кількості технічно важливих газів та рідин. У рамках виконаних досліджень показано, що досліджувані суміші R32/R125, R125/R290 та R134a/R290 не поступаються за ефективністю найбільш поширеним холодоагентам і, до того ж, мають значно менший вплив на навколишнє середовище.

Дисертаційна робота виконувалась відповідно Закону України «Про

енергозбереження», затвердженому Постановою Верховної Ради України № 74/94 від 01.07.1994 р.; 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 2035 р.», прийнятими розпорядженням КМУ № 497-р від 06.06.2018 р.

Виконання роботи відбувалося у відповідності із науково-дослідною тематикою кафедри «Суднові енергетичні установки та технічна експлуатація» Одеського національного морського університету. Автор приймав участь у виконанні 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 держбюджетній науково-дослідній роботі «Підвищення ефективності експлуатації суднової енергетичної установки» з 2021 по 2023 рр., ДР № 0122U001539 як виконавець розділу, присвяченого підвищенню ефективності циклів суднових енергетичних установок.

2. Структура, об'єм дисертаційної роботи та її зміст. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій.

Дисертація складається із вступу, переліку умовних позначень, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 290 найменувань і чотирьох додатків, у яких наведені акти про впровадження результатів роботи, формули для розрахунку параметрів ефективності циклів холодильних установок, таблиці термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей холодоагентів та список опублікованих праць за темою дисертації.

Оформлення дисертації відповідає вимогам. Назва дисертації відповідає обраній спеціальності та суті вирішення наукової проблеми, вказує на мету досліджень та її завершеність.

У **вступі** дисертаційної роботи обґрунтовано актуальність теми дисертації, показано її зв'язок з існуючими науковими програмами і темами. Сформульовано мету та задачі дослідження. Розглянуто наукову новизну та практичні значення одержаних результатів. Наведені дані про особистий внесок здобувача, апробацію роботи, публікації, структуру та об'єм роботи.

У **першому розділі** виконано аналіз сучасного стану досліджень, пов'язаних із вирішенням проблеми зменшення шкідливих викидів від суднових дизелів та енергетичних установок згідно міжнародних екологічних вимог. Використання холодильної установки у системі стабілізації температури палива приводить до необхідності вирішення проблеми протидії руйнуванню

озонового шару Землі та глобальному потеплінню. Для порівняння наведено перелік існуючих холодоагентів та сумішей, які класифікуються у відповідності із рівнем негативного впливу на навколишнє середовище, походженням (природні або синтетичні), сферою застосування (аміачні, фреонові, абсорбційні холодильні машини) та іншими факторами. У розділі також описані основні системи критеріїв, за якими відбувається вибір холодоагентів для холодильних установок суднових систем. Також приведені сучасні світові тенденції переведення холодильних установок на нові альтернативні робочі речовини через заборону виробництва та використання озоноруйнівних холодоагентів та речовин з підвищеним парниковим ефектом.

У **другому розділі** дається докладний огляд основних відомих способів розрахунку термодинамічних властивостей сумішей речовин. Серед цих способів найбільш поширеними є кубічні рівняння та їх численні варіації, які в основному використовуються для чистих речовин, але, шляхом комбінування коефіцієнтів рівнянь компонентів, можуть застосовуватися і для сумішей. Також є ряд способів, у яких модель стану для суміші отримується шляхом комбінації коефіцієнтів рівнянь компонентів та функції взаємодії. Такі способи забезпечують точний розрахунок теплофізичних властивостей як для газів малої густини, так і для густих газів та рідин. Саме тому для досліджуваних у роботі сумішей холодоагентів вибрано такий тип моделей стану.

У **другому розділі** описано методику отримання моделі стану у порівнянні із деякими найбільш популярними методиками. Алгоритм більшості з них побудовано на мінімізації квадратичного функціоналу з великою кількістю коефіцієнтів, який дозволяє аналітично отримувати значення термодинамічних властивостей, які було використано при складанні моделі. За допомогою регресійної процедури кількість коефіцієнтів значно зменшується за умови збереження високої точності розрахунку властивостей. На думку автора найбільш ефективно регресійна процедура здійснюється за алгоритмом, який дозволяє одночасно оптимізувати структуру і кількість коефіцієнтів моделі стану, який було взято за основу при розробці його власної методики.

У **третьому розділі** на базі експериментальних та додатково отриманих опорних даних складено єдині моделі стану для розрахунку термодинамічних властивостей сумішей R32/R125, R125/R290 та R134a/R290. Після складання моделей стану зроблено порівняння розрахованих значень тиску та густини у однофазній області та у стані насичення із аналогічними експериментальними та опорними даними, які було використано у процесі складання. Виконане порівняння показало добру узгодженість експериментальних та розрахованих даних. Це наочно можна бачити на гістограмах, на яких значення відхилень розподілені за нормальним законом. Також про добру узгодженість свідчать графіки відхилень, які було побудовано для всіх груп експериментальних та

опорних даних. Отже, як показало порівняння, отримані моделі стану за точністю цілком придатні для розрахунку термодинамічних властивостей досліджуваних сумішей холодоагентів з метою їх використання у холодильних установках суднових систем охолодження та кондиціонування.

У **четвертому розділі** описано найбільш відомі банки даних про теплофізичні властивості технічно важливих речовин та холодоагентів, а також автоматизованих інформаційних систем. Банки даних та системи мають велике значення, оскільки вони забезпечують зберігання великої кількості необхідної інформації та відкритий доступ до неї. Автоматизовані системи розрахунку властивостей більш зручно використовувати, ніж банки, оскільки вони дають змогу отримувати необхідні для певних задач значення властивостей у потрібній кількості при завданні різних вхідних параметрів. Банки даних, у свою чергу, забезпечують зберігання великої кількості даних про теплофізичні властивості речовин переважно у вигляді таблиць.

В рамках дисертаційної роботи розроблено та удосконалено автоматизовану інформаційну систему, яка дозволяє отримувати теплофізичні властивості великої кількості технічно важливих газів та рідин. Серед них: благородні гази, повітря і його компоненти, діоксид вуглецю, аміак, п'ять вуглеводнів, шість альтернативних холодоагентів, а також одинадцять сумішей, включаючи досліджувані речовини. Система також дозволяє розраховувати параметри ефективності циклів одно- та двоступеневих холодильних установок на базі введених у систему речовин.

У **п'ятому розділі** за допомогою розробленої автоматизованої інформаційної системи розраховано властивості сумішей у стані фазової рівноваги та побудовано фазові діаграми. На діаграмах можна бачити, що всі три суміші мають азеотропи, а, отже можуть ефективно використовуватися у якості холодоагентів. Порівняння розрахованих показників енергетичної ефективності циклу холодильної установки, серед яких: холодильний коефіцієнт, ефективний ККД, та холодопродуктивність показало, що досліджувані суміші за більшістю показників не поступаються своїм компонентам та більшості поширених холодоагентів. Також були розраховані таблиці термодинамічних властивостей сумішей у однофазній області, у стані насичення та у області вологої пари. Табличні значення властивостей було порівняно із даними при аналогічних вхідних параметрах, отриманими за допомогою відомої автоматизованої системи REFPROP. За результатами порівняння, які прокоментовано у розділі 5, можна бачити що точність табличних даних є прийнятною для розрахунків холодильних установок різних суднових систем охолодження.

У **шостому розділі** виконанню дослідження робочого процесу двигуна внутрішнього згоряння при його роботі на дистилятних паливах із наднизьким

вмістом сірки, які останнім часом отримали досить широке використання на морських суднах через жорсткі умови щодо викидів в навколишнє середовище шкідливих речовин. У якості досліджуваного вибрано дизельний малообертовий двигун, для якого продемонстровано тенденцію зміни показників ефективності при зменшенні в'язкості палива та неминучому збільшенні циклової подачі. Як показало виконане дослідження, у процесі експлуатації двигуна необхідно виключити зменшення в'язкості палива нижче мінімального значення (2 сСт для малообертових двигунів), оскільки при цьому має місце критичне зниження тиску впорскування та імовірний вихід із ладу ПНВТ.

З метою дослідження ефективності холодильної установки при використанні нових холодоагентів проведено комплексний еколого-термoeкономічний аналіз. Такий аналіз дозволяє врахувати усі негативні фактори, які впливають на навколишнє середовище при експлуатації холодильного обладнання, що особливо важливо у тих випадках, коли мова йде про вплив на глобальні екологічні процеси. Комплексний характер має відомий TEWI-аналіз (TEWI – повний еквівалент глобального потепління). Критерій TEWI враховує як прямий внесок у збільшення сумарного радіаційного форсингу від емісії холодоагентів, так і непрямий внесок від викидів CO₂ при виробництві електроенергії, необхідної для експлуатації холодильного обладнання. Виконаний TEWI-аналіз показав, що найбільш ефективною альтернативою базовому холодоагенту для використання у системі стабілізації температури палива дизельного двигуна є суміш R134a/R290, яка має кращі серед досліджуваних речовин екологічні та техніко-економічні показники, а також більш високу, ніж для R134a холодопродуктивність.

Висновки роботи містять у стислому вигляді опис наукових результатів, які було досягнуто у процесі розв'язання поставлених у дисертації задач.

Новизну результатів дослідження та їх цінність підтверджують публікації здобувача за темою дисертації в авторитетних наукових виданнях, у тому числі включених до міжнародних наукометричних баз Scopus та Web of Science Core Collection та доповіді на науково-технічних міжнародних конференціях як на території України, так і за кордоном. Отримані результати представляють як теоретичний, так і практичний інтерес.

Достовірність отриманих в дослідженні результатів базується на коректності застосованих математичних моделей та підтверджується шляхом детального зіставлення з наявними експериментальними даними.

3. Наукова новизна результатів досліджень та їх практична цінність.

Вперше запропоновано вирішення проблеми поліпшення еколого-енергетичної ефективності судових дизелів та їх систем при роботі на паливах

із наднизьким вмістом сірки шляхом використання у системі стабілізації температури палива перспективних сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів, потенціал глобального потепління яких на 30–40 % менший, ніж для більшості чистих та сумішеподібних фторвуглеводнів;

вперше розроблено метод складання моделей стану сумішей на базі процедури покрокового регресійного аналізу, який дозволяє виконувати апроксимацію дослідних даних при помірних об'ємах розрахунків. Запропонований метод, на відміну від більшості попередніх, дозволяє більш ефективно формувати структуру та кількість коефіцієнтів моделей стану;

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;

вперше створено науково-методичні основи з розробки автоматизованих систем розрахунку теплофізичних властивостей нових перспективних холодоагентів та їх сумішей, для яких вперше отримано моделі стану, які дозволяють знаходити необхідні властивості холодоагентів для їх використання у системах стабілізації температури палива;

вперше виявлено закономірності термодинамічної поведінки сумішей озонобезпечних та природних холодоагентів у стані фазової рівноваги, які полягають у наявності для них азеотропних складів; при використанні азеотропних сумішей як 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 кондиціювання;

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

Удосконалено метод визначення коефіцієнтів моделей стану сумішей холодоагентів шляхом покрокового регресійного аналізу для розрахунку їх термодинамічних властивостей, який, на відміну від існуючих, 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;

удосконалено 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;

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

удосконалено методику розрахунку термодинамічних властивостей холодоагентів у автоматизованій інформаційній системі шляхом введення у неї отриманих моделей стану нових сумішей холодоагентів та використання оновлених програмних алгоритмів, складених з урахуванням запропонованих та удосконалених методів дослідження термодинамічної поведінки сумішей холодоагентів.

Наведені наукові результати отримано здобувачем особисто, що підтверджується його публікаціями.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає в тому, що отримані здобувачем моделі стану нових перспективних сумішей, які відповідають вимогам Монреальського та Кіотського протоколів, дозволяють розрахувати термодинамічні властивості, які необхідні для використання цих сумішей у якості холодоагентів. Використання розробленої у роботі автоматизованої інформаційної системи дозволяє значно спростити процес розрахунку властивостей, а також збільшити його точність. Це є важливим у суднових умовах, де не завжди є можливість працювати з таблицями властивостей або з діаграмами.

Автоматизована інформаційна система і таблиці термодинамічних властивостей трьох сумішей впроваджено на підприємствах «Сістемар» і «Траншип» при проведенні модернізації холодильних установок систем комфортного кондиціонування суден. Розроблена автоматизована система використовується у Одеському національному морському університеті у наукових дослідженнях та навчальному процесі.

4. Повнота викладу наукових положень в опублікованих роботах, відповідність змісту автореферату основним положенням дисертації.

За темою дисертації опубліковано 43 наукових роботи. З них 1 монографія, 1 таблиця стандартних довідкових даних, чотири публікації зроблено у виданнях, які входять до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 17 – у спеціалізованих науково-технічних виданнях, рекомендованих МОН України для публікації результатів дисертаційних досліджень і включених до наукометричних баз даних, та 20 публікацій у збірниках матеріалів науково-технічних конференцій міжнародного та всеукраїнського рівня. Кількість робіт та періодичні видання, у яких опубліковані статті автора, відповідають вимогам до докторських дисертацій. Зміст публікацій відповідає матеріалам, що викладено у дисертаційній роботі.

Матеріали дисертації доповідалися на чисельних науково-практичних конференціях, серед яких: 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.

Матеріал дисертаційної роботи викладено у логічній послідовності, відповідно до поставлених у дослідженні задач. Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам МОН України (наказ № 40 від 12.01.2017 р.).

Автореферат написано грамотно та містить всі необхідні структурні елементи. Його зміст ідентично відображає основні положення дисертації. Оформлення автореферату виконано у відповідності з вимогами МОН України.

5. Зауваження по дисертаційній роботі

1. Сформульовані на стор. 29 наукові результати (відповідно до рис. 1.1 технологічної карти дослідження) здебільшого є практичними і не пов'язані з проголошеними автором положеннями наукової новизни результатів дисертації.

2. При огляді експериментальних даних про термодинамічні властивості сумішей бажано було б більш докладно навести дані про методи вимірювання, які було використано у роботі.

3. Було б корисно для порівняння скласти моделі стану на базі кубічного рівняння та зіставити отримані на їх базі значення властивостей з експериментом для того, щоб продемонструвати більш високу точність моделей з використанням функції взаємодії у випадку густих газів та рідин.

4. У таблиці 3.1 перелік експериментальних даних для суміші R32/R125 представлено у групах відповідно окремих авторів. Оскільки ці групи містять дані як для пари, так і для рідини, було б зручно відокремити пар від рідини для можливості більш коректного завдання ваги даних при складанні моделей.

5. Було б корисно крім гістограм, які показують розподіл відхилень експериментальних значень густини та ізохорної теплоємності від розрахованих, також побудувати гістограми відхилень розрахованих та експериментальних значень тиску та густини у стані насичення при виконанні точної умови фазової рівноваги.

6. Графіки відхилень експериментальних та розрахованих даних для окремих груп даних, які представлені на рис. 3.4, також зручніше було б зробити окремо для пари та рідини, оскільки, як відомо, відхилення для рідини в основному приймають менші значення, ніж для пари.

7. Було б корисно указати (розділ 4) які автоматизовані інформаційні системи із наведених у огляді забезпечують розрахунок термодинамічних властивостей холодоагентів (і яких саме холодоагентів) для порівняння із створеною автоматизованою системою.

8. Було б бажано при розробці автоматизованої інформаційної системи передбачити створення термодинамічних діаграм холодоагентів із зображенням на них циклів холодильних установок.

9. Не зрозуміло, чи можна передбачити у розробленій автоматизованій інформаційній системі розрахунок властивостей водо-аміачних розчинів та циклів абсорбційних холодильних машин, оскільки такі установки досить поширені, у тому числі в інноваційних циклах суднових дизельних двигунів.

10. У розділі 6.1 “Використання малов’язких палив на морських судах та аналіз впливу в’язкості палив а на параметри робочого процесу” автор провів дослідження параметрів малообертового двигуна MAN B&W 8S90M C C9.2 при різних значеннях в’язкості палива. Але, на жаль, немає співставлення розрахункових даних з будь-якими експериментами, тому отримані результати можна вважати здебільшого якісними.

11. В авторефераті не вказано, які значення температур та кінематичної в’язкості актуальних морських палив потрібно підтримувати перед паливними насосами високого тиску головних двигунів транспортних суден.

12. Не вказано, для яких типів сучасних морських головних двигунів транспортних суден розглянута система стабілізації температури палива є перспективною.

13. В розділі 6.2 автор робить еколого-енергетичний аналіз ефективності використання холодоагентів. Хотілось, що він більше уваги приділив обґрунтуванню комплексних критеріїв ефективності робочих процесів, а не тільки критерію, пов’язаному з еквівалентом глобального потепління.

14. Метою роботи є поліпшення екологічних та енергетичних показників суднових дизельних установок, але в висновках роботи не наведено кількісних характеристик, які демонструють досягнення мети дослідження.

Незважаючи на вказані зауваження, що висловлені до дисертаційної роботи, всі викладені автором результати досліджень є новими, змістовними та корисними.

6. Загальні висновки

Дисертаційна робота Мальчевського Валентина Павловича «Основи забезпечення еколого-енергетичної ефективності суднових дизелів стабілізацією температури палива сумішами холодоагентів» є завершеною роботою, яка виконана автором самостійно і на високому рівні.

Сформульовані у дисертаційній роботі наукові результати відрізняються науковою новизною та практичною цінністю та забезпечують вирішення важливої науково-прикладної проблеми – підвищення еколого-енергетичної ефективності суднових дизелів та їх систем.

Актуальність обраної теми дисертації, ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій, новизна та повнота викладу в опублікованих наукових працях повністю відповідають вимогам до докторських дисертацій.

Дисертаційна робота повністю відповідає паспорту спеціальності 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки та вимогам п.п. 9, 10, 12, 13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України від 24.07.2013 р. № 567 зі змінами, а здобувач, Мальчевський Валентин Павлович, заслуговує присудження йому наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки.

Офіційний опонент

д-р техн. наук, професор, директор
Машинобудівного навчально-
наукового інституту Національного
університету кораблебудування
імені адмірала Макарова



Сергій СЕРБІН

23.05.2023 р.

Підпис професора С.Р. Сербіна
засвідчую

