Облікова картка дисертації

I. Загальні відомості

Державний обліковий номер: 0825U001025

Особливі позначки: відкрита

Дата реєстрації: 27-03-2025

Статус: Наказ про видачу диплома

Реквізити наказу МОН / наказу закладу: № 732-уч від 20.06.2025, виданий Національним аерокосмічним університетом "Харківський авіаційний інститут"

II. Відомості про здобувача

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Воробйова Ганна Сергіївна
2. Hanna Vorobiova

Кваліфікація: 142

Ідентифікатор ORCID ID: Не застосовується

Вид дисертації: доктор філософії

Аспірантура/Докторантура: так

Шифр наукової спеціальності: 142

Назва наукової спеціальності: Енергетичне машинобудування

Галузь / галузі знань: електрична інженерія

Освітньо-наукова програма зі спеціальності: Енергетичне машинобудування

Дата захисту: 07-05-2025

Спеціальність за освітою: інженер-дослідник (авіаційні двигуни та енергетичні установки)

Місце роботи здобувача:

Код за ЄДРПОУ:

Місцезнаходження:

Форма власності:

Сфера управління:

Ідентифікатор ROR: Не застосовується

III. Відомості про організацію, де відбувся захист

Шифр спеціалізованої вченої ради (разової спеціалізованої вченої ради): PhD 8153

Повне найменування юридичної особи: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02066769

Місцезнаходження: вул. Чкалова, буд. 17, Харків, Харківський р-н., 61070, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

IV. Відомості про підприємство, установу, організацію, в якій було виконано дисертацію

Повне найменування юридичної особи: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02066769

Місцезнаходження: вул. Чкалова, буд. 17, Харків, Харківський р-н., 61070, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

V. Відомості про дисертацію

Мова дисертації: Українська

Коди тематичних рубрик: 30.17, 44.31, 55, 55.42.27.35

Тема дисертації:

1. Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO2

2. Modification of the real gas equation of state for modelling of working processes in a centrifugal compressor near the critical point of CO2

Реферат:

1. Аналізуються проблеми моделювання процесів стискання CO2 у відцентровому компресорі, які здійснюються в безпосередній близькості до критичної точки. Відомо, що оптимальне поєднання умов роботи та обладнання визначають максимальну ефективність енергоустановок. Ефективність компресору вирішальним чином впливає на цей показник. Але робочий процес компресора проходить поблизу критичної точки CO2, де теплофізичні властивості дуже чутливі до змін тиску та температури. Це значно ускладнює математичне моделювання процесу стискання і робить критично важливим достовірний опис параметрів стану робочого середовища. Розглянуто різноманітні рівняння стану реального газу, які здатні цілісно описати однофазні та паро-рідинний стани середовища. Основним недоліком досліджених рівнянь є

значна похибка відносно результатів експериментів для S-CO2 циклів, які реалізуються у безпосередній близькості до критичної точки CO2. Тому актуальною є науково-практична задача забезпечення моделювання робочих процесів у енергетичному обладнанні, яке використовує двоокис вуглецю, в області навколо критичної точки робочого тіла, вибору та модифікації рівняння стану реального газу. Вирішення науково-практичної задачі виконувалася з відцентровим компресором циклу S-CO2, для якого є експериментальні результати, граничні умови та геометричні дані. Проточна частина відцентрового компресора була змодельована за допомогою програмних засобів 1D AxSTREAM® на основі серії звітів Sandia National Laboratories. Як робоче тіло був обраний CO2, властивості якого взяті з mini-NIST RefPROP - програми, яка використовує великі бази даних експериментальних вимірювань і складні рівняння стану). Рівняння Спана-Вагнера, яке використовується для визначення термодинамічних параметрів CO2 має значний недолік при використанні його у 3D CFD моделюванні. Для подальшого розрахунку у програмному пакеті обчислювальної математики FEA AxCFDTM сформована модель робочого тіла, яке описується рівнянням стану Редліха-Квонга-Анг'є. Це рівняння точно визначає властивості робочого тіла в надкритичній та газовій областях (менше 10% для тиску), але для областей рідкого та двофазного станів похибка для визначення тиску збільшується від 15% до 50%. У роботі представлене модифіковане рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, що дозволяє описати всю робочу область CO2. Розроблені масштабні поправки дозволили істотно знизити похибку при визначенні тиску в широкому діапазоні температур і питомих об'ємів. Рідинна область розглядалася у температурному діапазоні від 220 К до 300 К. Для визначення тиску насиченої пари використовувався метод Лі-Кеслера. Порівняння експериментальних і розрахункових значень тиску показало їх добрий збіг. Для двофазної області розглядався температурний діапазон від 216,6 К до 304,12 К. Отриманий за методом Лі-Кеслера тиск насиченої пари використовувався при розв'язанні кубічного рівняння Редліха-Квонга-Анг'є для визначення питомого об'єму газової фази. Питомий об'єм рідкої фази визначався за емпіричним методом Ямади-Ганна. Порівняння об'ємів газової та рідкої фаз показало задовільний збіг з експериментальними даними. Безпосередньо для визначення тиску в критичній точці використано симбіоз масштабового рівняння та рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є із застосуванням класичної функції розподілу випадкових відхилень від середніх значень температури та густини. Наукова новизна роботи: 1. Уперше розроблено масштабну поправку для рівняння Редліха-Квонга-Анг'є, що описує стан двоокису вуглецю як реального газу, яка дозволяє знизити похибку при розрахунку питомого об'єму рідкої фази в двофазній області відносно експериментальних даних з 6-25% до 0,5-1% для діапазону температур 220К-300К. 2. Уперше розроблено масштабну поправку для рівняння Редліха-Квонга-Анг'є, що описує стан двоокису вуглецю як реального газу, яка дозволяє знизити похибку при розрахунку докритичного тиску в області рідинного стану відносно експериментальних даних з 20–40% до 3–15% для діапазону температур 220–300 К. 3. На основі зазначених масштабних поправок суттєво вдосконалено математичну модель, яка описує термодинамічні параметри стану CO2 в усьому діапазоні, включаючи двофазну та надкритичну області, використання якої суттєво підвищує точність чисельного моделювання термодинамічних процесів у відповідному енергетичному обладнанні.

2. The paper analyzes the problems of modeling the processes of compression of CO2 in a centrifugal compressor, which are carried out in close proximity to the critical point. It is known that the optimal combination of operating conditions and equipment determine maximum efficiency power plants. The efficiency of the compressor has a decisive influence on this indicator. But the working process of the compressor takes place near the critical point of CO2, where the thermophysical properties are very sensitive to changes in pressure and temperature. This significantly complicates the mathematical modeling of the compression process and makes a reliable description of the parameters of the state of the working medium critically important. Various equations of state of a real gas are considered, which are capable of comprehensively describing the single-phase and vapor-liquid states of the medium. The main drawback of the studied equations is a significant error relative to the results of experiments for S-CO2 cycles, which are implemented in close proximity to the critical point of CO2. Therefore, the scientific and practical task of ensuring the modeling of working processes in energy equipment that uses carbon dioxide in the region around the critical point of the working medium, the selection and modification of the equation of state

of a real gas is relevant. Solution scientific and practical task was performed with a centrifugal compressor of the S-CO2 cycle, for which contains experimental results, boundary conditions and geometric data. The flow part of the centrifugal compressor was modeled on using software tools 1D AxSTREAM® based on a series of reports from Sandia National Laboratories. CO2 was chosen as the working fluid, the properties of which are taken from mini-NIST RefPROP - a program that uses large databases of experimental measurements and complex equations of state). Equations the Span-Wagner method, which is used to determine the thermodynamic parameters of CO2, has a significant drawback when used in 3D CFD modeling. For further calculation, a model of the working fluid was created in the computational mathematics software package FEA AxCFDTM, which is described by the Redlich-Kwong-Aungier equation of state. This equation accurately determines working fluid properties in supercritical and gas regions(less than 10% for pressure), but for regions of liquid and two-phase states the error for determining pressure increases from 15% to 50%. The paper presents a modified Redlich-Kwong-Aungier equation of state, which allows describing the entire working region of CO2. The developed scale corrections allowed to significantly reduce the error in determining the pressure in a wide range of temperatures and specific volumes. The liquid region was considered in the temperature range from 220 K to 300 K. The Lee-Kesler method was used to determine the saturated vapor pressure. Comparison of experimental and calculated pressure values showed their good agreement. For the two-phase region, the temperature range from 216.6 K to 304.12 K was considered. The saturated vapor pressure obtained by the Lee-Kesler method was used when solving the cubic Redlich-Kwong-Aungier equation to determine the specific volume of the gas phase. The specific volume of the liquid phase was determined by the empirical Yamada-Gann method. Comparison of the volumes of the gas and liquid phases showed a satisfactory agreement with the experimental data. Directly to determine the pressure at the critical point, a symbiosis of the scaling equation and the Redlich-Kwong-Aungier equation of state was used with the application of the classical distribution function of random deviations from the average values of temperature and density. Scientific novelty of the work: 1. For the first time, a scaling correction has been developed for the Redlich-Kwong-Angier equation, describing the state of carbon dioxide as a real gas, which makes it possible to reduce the error in calculating the specific volume of the liquid phase in the two-phase region relative to the experimental data from 6-25% to 0.5-1% for the temperature range of 220K-330K. 2. For the first time, a scaling correction has been developed for the Redlich-Kwong-Angier equation, describing the state of carbon dioxide as a real gas, which makes it possible to reduce the error in calculating the subcritical pressure in the liquid state relative to the experimental data from 20-40% to 3-15% for the temperature range of 220K-300K. 3. Based on the indicated large-scale corrections, the mathematical model describing the thermodynamic parameters of the state of CO2 in the entire range, including the two-phase and supercritical regions, has been significantly improved, the use of which significantly increases the accuracy of numerical modeling of thermodynamic processes in the corresponding power equipment.

Державний реєстраційний номер ДіР:

Пріоритетний напрям розвитку науки і техніки: Енергетика та енергоефективність

Стратегічний пріоритетний напрям інноваційної діяльності: Освоєння нових технологій транспортування енергії, впровадження енергоефективних, ресурсозберігаючих технологій, освоєння альтернативних джерел енергії

Підсумки дослідження: Нове вирішення актуального наукового завдання

Публікації:

- 1. Vorobiova, H., Dolmatov, D., Fesenko, K., Sysoiev, I., Dehtiarov, O., & Ivashchenko, M. Effect Detection Of Using A Modified Redlich-Kwong-Aungier Equation Of State On The Calculation Of Carbon Dioxide Flow In A Centrifugal Compressor. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024, 128(8)
- 2. Vorobieva H. S. Modification Of The Redlich-Kwong-Aungier Equation Of State To Determine The Degree Of Dryness In The CO2 Two-Phase Region. Journal of mechanical engineering, 2021, (24,№ 4), 17-27.

- 3. Vorobieva H.S. Modification Of The Redlich-Kwong-Aungier Equation Of State To Determine The Main Thermodynamic Parameters In The Pure Liquid CO2 Region. Journal of mechanical engineering, 2022, 25(2), 6-13.
- 4. Воробйова, Г. С. Огляд і бібліометричне дослідження надкритичних енергетичних циклів CO2. Поточний стан досліджень і розробок. Авійційно-космічна техніка і технологія, 2024, №3(195).
- 5. Vorobiova, Hanna. "Modification of scaled equation of state to determine the pressure in the CO2 critical region." Technology audit and production reserves 3.1/65 (2022): 12-19.

Наукова (науково-технічна) продукція: технології; матеріали; методи, теорії, гіпотези

Соціально-економічна спрямованість: економія енергоресурсів

Охоронні документи на ОПІВ:

Впровадження результатів дисертації: Впроваджено

Зв'язок з науковими темами:

VI. Відомості про наукового керівника/керівників (консультанта)

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Долматов Дмитро Анатолійович

2. Dmytro Dolmatov

Кваліфікація: д. т. н., 05.05.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-7268-1509

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02066769

Місцезнаходження: вул. Чкалова, буд. 17, Харків, Харківський р-н., 61070, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VII. Відомості про офіційних опонентів та рецензентів

Офіційні опоненти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Мальчевський Валентин Павлович

2. Valentyn P. Malchevsky

Кваліфікація: д.т.н., доц., 05.05.03

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-3117-1251

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Одеський національний морський університет

Код за ЄДРПОУ: 01127777

Місцезнаходження: вул. Мечникова, буд. 34, Одеса, 65029, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Ганжа Антон Миколайович
2. Anton M. Ganzha

Кваліфікація: д.т.н., професор, 05.14.06

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-3967-2421

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02071180

Місцезнаходження: вул. Кирпичова, буд. 2, Харків, Харківський р-н., 61002, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Рецензенти

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Петухов Ілля Іванович
2. Illia I. Petukhov

Кваліфікація: к. т. н., доц., 05.14.06

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0002-0645-7912

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02066769

Місцезнаходження: вул. Чкалова, буд. 17, Харків, Харківський р-н., 61070, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

Власне Прізвище Ім'я По-батькові:

1. Скоб Юрій Олексійович

2. Yurii O. Skob

Кваліфікація: д. т. н., професор, 01.05.02

Ідентифікатор ORCID ID: 0000-0003-3224-1709

Додаткова інформація:

Повне найменування юридичної особи: Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського "Харківський авіаційний інститут"

Код за ЄДРПОУ: 02066769

Місцезнаходження: вул. Чкалова, буд. 17, Харків, Харківський р-н., 61070, Україна

Форма власності: Державна

Сфера управління: Міністерство освіти і науки України

Ідентифікатор ROR:

VIII. Заключні відомості

Власне Прізвище Ім'я По-батькові голови ради	Гакал Павло Григорович
Власне Прізвище Ім'я По-батькові головуючого на засіданні	Гакал Павло Григорович
Відповідальний за підготовку облікових документів	Дмитренко Євгенія Валеріївна
Реєстратор	УкрІНТЕІ
Керівник відділу УкрІНТЕІ, що є відповідальним за реєстрацію наукової діяльності	Юрченко Тетяна Анатоліївна