

## ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації *Воробйової Ганни Сергіївни* на тему «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO<sub>2</sub>», представлену на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 Електрична інженерія  
за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

На засіданні кафедри конструкції авіаційних двигунів за участі:

- Спіфанова Сергія Валерійовича, д.т.н., професора, завідувача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Білогуба Олександра Віталійовича, д.т.н., професора, професора кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Гусева Юрія Олексійовича, к.т.н., доцента, професора кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Гаркуші Олександра Івановича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Безуглого Сергія Володимировича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Суховія Сергія Івановича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Зеленського Романа Леонідовича, к.т.н., доцента, доцента кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Марценюка Євгена Вікторовича, ст. викладача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Ганжи Антона Миколайовича, д.т.н., професора, професора кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;  
Петухова Іллі Івановича, к.т.н., доцента, доцента кафедри аерокосмічної теплотехніки «ХАІ»;  
Долматова Дмитра Анатолійовича, д.т.н., провідного наукового співробітника кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Скоба Юрія Олексійовича, д.т.н., професора, професора кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту «ХАІ»;  
Торби Юрія Івановича, к.т.н., начальника відділу ДП «Івченко-Прогрес»;  
Краснікова Олександра Олеговича, провідного конструктора ДП «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Лі Цицзе, аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Хадживанда Масуда, аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;  
Карпенка Артема Михайловича, провідного конструктора ДП «Івченко-Прогрес», аспіранта кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»;

відбулася публічна презентація дисертаційної роботи *Воробйової Ганни Сергіївни* на тему «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки  $\text{CO}_2$ ».

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи ухвалено такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

### **1. Актуальність теми дослідження**

Використання надкритичних циклів  $\text{CO}_2$  – це ефективний напрямок технологій виробництва електроенергії, включаючи використання викопного палива, сонячної та морської енергії, біомаси та ядерної енергії. Команда під керівництвом Інституту газових технологій (GTI), Південно-Західного дослідницького інституту (SwRI) та General Electric Global Research (GE) ініціювала проектування, будівництво, введення в експлуатацію універсальної та реконфігурованої установки надкритичного двоокису вуглецю. Проєкт під назвою STEP Demo (Supercritical Transformational Electric Power) є одним із наймасштабніших і найкомплексніших у світі. Його ключовим елементом є забезпечення сучасної продуктивності силового циклу  $\text{S-CO}_2$  за високих температур: від підтвердження концепції до прототипу системи.

Обов'язковим для аналізу процесів, які відбуваються в енергетичних установках, оснований на використанні двоокису вуглецю, є використання рівняння стану реального газу. Найбільшою складністю є опис зміни тиску та питомого об'єму при фазових переходах та в області біля критичної точки. Для забезпечення ефективності чисельного аналізу рівняння стану мають бути достатньо простими, щоб дозволити швидке визначення термодинамічних параметрів середовища, одночасно враховуючи всю складність нелінійного зв'язку між змінними параметрами робочого тіла.

Значна похибка в моделюванні поведінки  $\text{CO}_2$  в околиці критичної точки за допомогою існуючих співвідношень показує необхідність модифікації рівняння стану. Таким чином, моделювання фазових переходів, опису реального газу в рідкому стані та в околиці критичної точки є актуальною науковою задачею, яка велике практичне значення. Один із підходів до її розв'язання пропонується в дисертаційній роботі, що визначає її актуальність

### **2. Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Представлені в роботі дослідження виконані в рамках удосконалення програмного пакету обчислювальної математики FEA AxCFD<sup>TM</sup> (SoftInWay inc), який використовується для проєктування енергетичного обладнання.

### **3. Наукова новизна отриманих результатів**

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

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  $\text{CO}_2$  в усьому діапазоні, включаючи двофазну та надкритичну області, використання якої суттєво підвищує точність чисельного моделювання термодинамічних процесів у відповідному енергетичному обладнанні.

#### **4. Теоретичне та практичне значення результатів роботи**

Розроблена математична модель адекватно описує властивості  $\text{CO}_2$  в усіх станах цієї речовини, використовуючи при цьому мінімально необхідну кількість емпіричних коефіцієнтів у стандартному рівнянні стану Редліха-Квонга-Анг'є. Тому вона дозволяє визначати параметри робочого тіла та розраховувати робочі процеси в енергетичному обладнанні, в якому в якості робочого середовища використовується двоокис вуглецю, в будь-яких умовах його роботи.

Розроблена математична модель інтегрована до складу програмного пакету AxCFD<sup>TM</sup> для 3D CFD розрахунків лопаткових машин.

Отримані наукові результати можуть бути використані в науково-дослідних та проєктних організаціях, конструкторських бюро, які виконують роботи з проєктування та експериментального дослідження енергетичного обладнання, робочим тілом якого є двоокис вуглецю.

#### **5. Апробація/використання результатів дисертації**

Основні результати роботи представлені на конференціях:

1. Vorobiova, H. Application Of The Scaling Theory To Determine The Pressure In The Near-Critical  $\text{CO}_2$  Region, Current aspects of science modernization: Status, problems, development trends, 337, Materials of the 24th International Scientific and Practical Conference, УДК 001.3-048.35:0/9](06) C91.

2. Vorobiova H. Crossover Equations of State to Determine the Pressure in the  $\text{CO}_2$  Near-Critical Region, International Symposium on Advanced Materials and Application, ISSN : 1662-9752.

3. Воробійова Г.С. Модифікація рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є для застосування у широкому діапазоні роботи  $\text{CO}_2$ . Сучасні проблеми

машинобудування - 2021, секція "Механіка".9, Тези доповідей конференції молодих вчених та спеціалістів. Друкується за рішенням Вченої ради Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України, протокол № 5 від 16.06.2021 р.

4. Vorobiova H., Fesenko K., Dehtiarov O. Implementation of a Modified Redlich-Kwong-Aungier Equation of State for the Centrifugal Compressor Simulation in the Two-Phase CO<sub>2</sub> Region. Information technologies: science, engineering, technology, education, health: theses of the 32nd international scientific-practical conference MicroCAD-2024, [May 22-25, 2024] / ed. E. I. Sokol. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2024. – P. 13. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/79693>.

5. Воробійова Г. С., Фесенко К. В., Дегтярьов О.Д. Моделювання одновимірних і тривимірних потоків рідкого вуглекислого газу в промисловому відцентровому компресорі. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доп. 32-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2024, [22-25 травня 2024 р.] / ред. Є. І. Сокол. – Харків : НТУ "ХПІ", 2024. – P. 24. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/80332>.

Розроблена математична модель інтегрована до складу програмного пакету AxCFD™ для 3D CFD розрахунків лопаткових машин.

#### **6. Дотримання принципів академічної доброчесності**

Дисертація Г.С. Воробійової є оригінальною роботою, виконана здобувачкою самостійно й доброчесно, текст рукопису дисертаційної роботи на містить ознак академічного шахрайства. Роботу передано експерту для проведення науково-технічної експертизи щодо збігів з Internet-джерелами, про що буде надано відповідний звіт.

**7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.**

За результатами досліджень опубліковано 7 наукових публікацій, у тому числі:

– чотири статті в наукових фахових виданнях України за спеціальністю, всі з них – одноосібні;

– дві статті в закордонних наукових виданнях, проіндексованих в базах Scopus та Web of Science;

– п'ять тез доповідей на міжнародних наукових конференціях.

Статті в закордонних наукових виданнях, які проіндексовані в базах Scopus та Web of Science:

[1] Vorobiova, H., Dolmatov, D., Fesenko, K., Sysoiev, I., Dehtiarov, O., & Ivashchenko, M. (2024). 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, 128(8). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.302837>.

Здобувачкою виконано моделювання тривимірних потоків рідкого вуглекислого газу в промисловому відцентровому компресорі із застосуванням модифікованого нею рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є. Впровадження математичної моделі у код програмного пакету обчислювальної математики FEA AxCFD™, її апробація та валідація з результатами серії експериментів, отриманими для відцентрового компресора в циклі S-CO<sub>2</sub>.

[2] Goldenberg, V., Conser, B., & Vorobyova, A. (2023, June). A Method of Pseudo-Steady State CFD Calculation to Predict Turbomachine Characteristics. In Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air (Vol. 87103, p. V13CT32A005). American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1115/GT2023-101016>

Здобувачкою запропоновано метод моделювання робочих характеристик турбомашини для забезпечення плавного сполучення різних робочих точок без необхідності моделювати ці точки окремо.

Статті в наукових виданнях України, затверджених як фахові за спеціальністю 142:

Vorobieva, H. S. (2021). Modification of the Redlich-Kwong-Aungier equation of state to determine the degree of dryness in the CO<sub>2</sub> two-phase region. *Journal of mechanical engineering*, (24, № 4), 17-27. <https://doi.org/10.15407/pmach2021.04.017>.

У статті описано розроблену масштабну поправку для рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, яка дозволяє знизити похибку у визначенні питомого об'єму рідкої фази у двофазній області з 6-25% до 0,5-1% для діапазону температур 220К-300К відносно експериментальних даних.

Vorobiova, H. (2022). Modification of the Redlich-Kwong-Aungier Equation of State to Determine the Main Thermodynamic Parameters in the Pure Liquid CO<sub>2</sub> Region. *Journal of mechanical engineering*, 25(2), 6-13. <https://doi.org/10.15407/pmach2022.02.006>

У статті описано розроблену масштабну поправку для рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, яка дозволяє знизити похибку визначення докритичного тиску в області рідинних станів з 20-40% до 3-15% відносно експериментальних даних для діапазону температур 220К - 300К.

Воробйова, Г. С. (2024). Огляд і бібліометричне дослідження надкритичних енергетичних циклів CO<sub>2</sub>. Поточний стан досліджень і розробок. <https://doi.org/10.32620/akt.2024.3.07>.

У статті представлено огляд і бібліометричне дослідження надкритичних енергетичних циклів CO<sub>2</sub>.

## 8. Висновок наукового керівника

Виконання індивідуального навчального плану, індивідуального плану наукової роботи, досягнення результатів навчання за відповідною науково-освітньою програмою та написання дисертації Воробйовою Ганною Сергіївною вважаю успішним. Дисертаційна робота є результатом самостійного дослідження, завершеною науковою працею, яка містить наукову новизну. Вона виконана на високому науковому рівні та відповідає всім установленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, й може бути рекомендована до захисту, а її авторка Воробйова Ганна Сергіївна – до присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Отже, вважаємо, що дисертаційна робота Воробйової Ганни Сергіївни на тему «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO<sub>2</sub>», представлена на здобуття ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження наукового ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44). Відтак, вона може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Головуючий на засіданні  
доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри конструкції авіаційних двигунів  
Національного аерокосмічного університету  
ім. М.Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»  Сергій ЄПІФАНОВ