

ВІДГУК

рецензента – професора кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», доктора технічних наук, професора Скоба Юрія Олексійовича на дисертаційну роботу Воробйової Ганни Сергіївни на тему **«Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO₂»**, подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань 14 – «Електрична інженерія» за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування»

Обґрунтування вибору теми дослідження. Дисертаційна робота присвячена аналізу робочих процесів у енергетичному обладнанні, що використовує діоксид вуглецю (CO₂) у діапазоні, наближеному до його критичної точки, а також вибору та вдосконаленню рівняння стану реального газу. У дослідженні розглядається проблема моделювання процесів стискання CO₂ у відцентровому компресорі, який відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності надкритичних циклів (S-CO₂). Такі цикли знаходять застосування в різних енергетичних системах, зокрема в сонячній, геотермальній, викопній енергетиці, на атомних електростанціях та в системах рекуперації тепла. Відомо, що робочий процес компресора відбувається в умовах, коли теплофізичні властивості CO₂ є надзвичайно чутливими до змін тиску та температури, що ускладнює математичне моделювання та підвищує вимоги до точності обчислень. Аналіз різних рівнянь стану реального газу показав, що більшість з них не забезпечують достатньої точності під час розрахунків для циклів S-CO₂, особливо в безпосередній близькості до критичної точки. Деякі рівняння також містять значну кількість емпіричних коефіцієнтів, що обмежує їх універсальність. Таким чином, дисертаційна робота спрямована на вирішення науково-практичного завдання – розробку методів точного моделювання процесів у енергетичних установках, що працюють з використанням CO₂, та вибір або модифікацію рівняння стану, яке забезпечить високу точність опису параметрів робочого тіла в області критичних параметрів. Сукупність зазначених обставин свідчить про беззаперечну актуальність рецензованого дисертаційного дослідження.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним дослідженням за напрямом підвищення ефективності роботи енергетичного обладнання з метою запобігання негативного впливу на атмосферу, виникненню надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що передбачає аналіз і прогнозування екологічних

ризиків, які ґрунтуються на результатах стратегічного екологічного оцінювання наслідків впливу на навколишнє середовище, а також комплексного моніторингу стану навколишнього природного середовища згідно з «Національним планом дій з охорони навколишнього природного середовища на період до 2025 року» і відповідає вимогам Закону України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року», який набув чинності 31 березня 2019 року.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотацій (українською та англійською мовами), вступу, шістьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Структура дисертації Воробійової Г. С. не викликає заперечень. Виклад змісту дисертації науково лаконічний, логічний та зрозумілий.

У *вступі* обґрунтовано зовнішній контекст, актуальність теми, визначено мету дисертації, завдання, об'єкт і предмет дослідження, використані для цього методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичну значущість отриманих результатів, визначено особистий внесок здобувачки під час виконання дисертаційного дослідження, наведено перелік наукових публікацій здобувачки за темою дисертації, надано відомості щодо апробації отриманих результатів та їх впровадження у наукову та практичну діяльність, встановлено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

У *першому розділі* проаналізовано ступінь наукової розробленості теми дослідження. Проведений аналіз предметної області та методів моделювання тривимірної течії у компресорі надкритичних циклів CO_2 дозволив зробити такі висновки: технологія циклу S-CO_2 адаптована для різних джерел тепла, а ефективність системи визначається оптимальним поєднанням робочих параметрів; критичним елементом в системі є компресор, який працює поблизу критичної точки CO_2 , де теплофізичні властивості газу особливо чутливі до змін тиску і температури; важливим є точне моделювання фазових переходів і роботи компресора в цих умовах; рівняння стану реального газу для опису фазових переходів і мінімізації похибки в S-CO_2 циклах потребує модифікації. Визначено проблему моделювання потоку у двофазному та рідкому станах CO_2 , що потребує вирішення таких завдань: 1D/2D моделювання відцентрового компресора в надкритичному циклі CO_2 для підвищення ефективності; оцінювання можливості 3D моделювання потоку в компресорі за різних режимів роботи; розроблення або модифікація рівняння стану реального газу для підвищення точності моделі; інтеграція розробленої моделі рівняння стану в програмний пакет FEA AxCFD™.

У *другому розділі* досліджується модифіковане обладнання для реалізації конденсаційного циклу Брайтона S-CO_2 із доданим теплообмінником між виходом компресора та входом до дросельного клапана. Модифікація дозволила

забезпечити подачу 50 кВт теплової енергії CO_2 , а вторинний контур підключити до водяного циклу. В одному з експериментальних варіантів компресор працював із рідким CO_2 , що забезпечувало високу густину робочого тіла на вході. Після стискання вздовж майже ізоентропної лінії CO_2 проходив через клапан, де відбувалося ізоентальпійне падіння тиску з потраплянням у двофазну область перед охолодженням. Виявлено, що рівняння стану Анг'є-Редліха-Квонга не здатне коректно описати всі фазові переходи CO_2 у проведених експериментах. Тому для подальших обчислювальних експериментів необхідно модифікувати рівняння стану, можливо, із використанням масштабної теорії та емпіричних методів визначення термодинамічних параметрів. Також представлено перелік вимірювальних приладів, що застосовувалися для реєстрації значень параметрів компресора.

У *третьому розділі* відтворено відцентровий компресор у системі 1D AxSTREAM® за даними Sandia National Laboratories, використовуючи табличний флюїд CO_2 (NIST RefPROP). Порівняння з експериментом показало похибку менш ніж 5% для ступеня підвищення тиску та ККД. Для 3D AxCFD™ сформовано модель робочого тіла на основі рівняння стану Анг'є-Редліха-Квонга, яка точно описує CO_2 у надкритичній і газовій областях (похибка <1%), але є менш точною для рідкої (>30%), двофазної (>15%) і навколокритичної (>20%) областей. Підтверджено, що оригінальне рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є придатним для моделювання потоку в компресорі без фазових переходів у надкритичному стані. Розроблено псевдорівноважний метод розрахунку характеристик компресора в 3D AxCFD™. Проведене порівняння розрахунків у системах 3D AxCFD™ та 1D AxSTREAM® з експериментальними даними показало збіг менш ніж 5% для ступеня підвищення тиску та ККД. Виявлено, що модель рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є не може точно описати фазові переходи в навколокритичній області, хоча забезпечує похибку не більше 5% під час розрахунків параметрів потоку в компресорі.

У *четвертому розділі* розроблено модифіковане рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, що описує всю робочу область CO_2 , включаючи надкритичний, газовий, двофазний і рідкий стани. Визначено граничні умови для його використання, зокрема температуру, густину та емпіричні коефіцієнти. Виявлено, що модифіковане рівняння знижує похибку визначення тиску в широкому діапазоні температур, особливо в рідкій області (220–300 K) та двофазній області (216,6–304,12 K). Показано, що метод Лі-Кеслера забезпечує точність визначення тиску насиченої пари (відхилення <5%), а метод Ямади-Ганна покращує розрахунок об'ємів газової та рідкої фаз (похибка <3%). Виявлено, що запропонована математична модель дозволяє з високою точністю визначати ступінь сухості CO_2 у двофазному стані (відхилення <5%),

забезпечуючи її придатність у діапазоні температур 220–300 К. Також розроблені масштабні коефіцієнти для точного переходу через лінію насичення. Отримана модель є простою у використанні, знижує обчислювальні витрати й придатна для розв'язання задач обчислювальної гідродинаміки. Визначено оптимальну математичну модель для області критичної точки, яка покращує точність розрахунків і буде впроваджена під час 1D- та 3D-моделювання в AxCFD™.

У *п'ятому розділі* представлено розробку консольного додатку на C++ для одновимірного розрахунку термодинамічних параметрів реального газу. Показано, що рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є забезпечує точність <1% у газовій області. Виявлено, що у двофазному стані тиск насиченої пари (метод Лі-Кеслера) визначається з похибкою <1%, а ступінь сухості – 1–6%, яка зростає з наближенням до фази чистої рідини. Отримано, що масштабна поправка в коефіцієнті $A(T)$ знизилася похибку для рідини з 70–90% до 1–6% при 296 К та до 46% при 303 К, що є критичним поблизу точки 304,13 К.

У *шостому розділі* показано імпортування моделі компресора з 1D AxSTREAM® в 3D AxCFD™ для моделювання фазових переходів CO₂. Виявлено проблеми збіжності розрахунків через зміну фаз поблизу критичної точки. Показано, що вхідні граничні умови, розташовані біля лінії насичення, вихідні є близькими до критичної температури. Використано рівняння Лі-Кеслера для визначення тиску насиченої пари. Виявлено значні флуктуації параметрів, що знижує стабільність розрахунків. Показано, що результати обчислень задовільно збігаються з експериментальними даними, що підтверджує доцільність використання модифікованого рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є для моделювання фазових переходів.

Висновки цілком відповідають сформульованим завданням дослідження та є стислим висвітленням одержаних здобувачкою результатів.

Текст не містить запозичень, на які не було б посилань на першоджерела.

Найважливіші наукові результати, що містяться в дисертації. Серед найбільш значущих наукових результатів, що мають наукову новизну, можна виокремити такі.

1. *Уперше* розроблено масштабну поправку для рівняння Редліха-Квонга-Анг'є, що описує стан діоксиду 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 діоксиду 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.

3.3 використанням зазначених масштабних поправок *вдосконалено* математичну модель, яка описує термодинамічні параметри стану CO_2 в усьому діапазоні, включаючи двофазну та надкритичну області, використання якої суттєво підвищує точність чисельного моделювання термодинамічних процесів у відповідному енергетичному обладнанні.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації. Аналіз двох анотацій, тексту дисертації та змісту фахових публікацій дисертантки дає мені змогу зробити висновок про достатню наукову обґрунтованість та достовірність результатів, отриманих у результаті проведеного дослідження. Усі наукові положення, висновки та рекомендації належним чином обґрунтовані та підкріплені теоретичними положеннями. Вони відповідають меті та завданням дисертаційної роботи, що забезпечується адекватністю вибраних для дослідження методів. Вірогідність наукових результатів та висновків дисертаційної роботи забезпечується достатнім рівнем апробації та високим рівнем наукових видань, в яких опубліковано результати дисертаційного дослідження.

Особистий внесок здобувачки. Наукові положення й усі результати, що викладені в дисертаційній роботі та винесені на захист, отримано особисто здобувачкою. Робота є завершеним науковим дослідженням, виконаним самостійно відповідно до мети та завдань. Авторка виконала аналіз існуючих методів моделювання параметрів термодинамічних властивостей реальних газів, брала безпосередню участь у розробці математичних моделей і алгоритмів розрахунків. Вона самостійно виконувала реалізацію математичної моделі в коді програмного пакету обчислювальної математики FEA AxCFD™, її верифікацію та валідацію на основі результатів серії експериментів, отриманих для відцентрового компресора, що працює в циклі S- CO_2 .

Апробація дисертації та публікації. Основні положення та результати дисертаційної роботи були в достатній мірі апробовані здобувачкою протягом усього терміну виконання дослідження на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях.

За темою дисертації опубліковано 11 наукових праць: 4 статті у наукових фахових періодичних виданнях України; 2 статті у виданнях, що входять до наукометричної бази Scopus; 4 тези доповідей на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних конференціях; 1 колективна монографія.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження. Практична значущість результатів дисертаційного дослідження полягає у тому, що основні науково-теоретичні положення та методико-прикладні рекомендації

можуть бути використані в науково-дослідних та проектних організаціях, конструкторських бюро, які виконують роботи з проектування та експериментального дослідження енергетичного обладнання, робочим тілом якого є діоксид вуглецю. Розроблена математична модель адекватно описує стан речовини в усіх фазах, використовуючи при цьому мінімально необхідну кількість емпіричних коефіцієнтів у стандартному рівнянні стану Редліха-Квонга-Анг'є, що дозволяє визначати параметри робочого тіла та розраховувати робочі процеси обладнання на діоксиді вуглецю за будь-яких умов роботи. Модель інтегровано до складу програмного пакету AxCFD™ для 3D CFD розрахунків лопаткових машин.

Дотримання академічної доброчесності. Аналіз дисертаційної роботи та публікацій автора не виявив порушень академічної доброчесності, елементів фальсифікації чи фабрикації тексту.

Зауваження щодо змісту дисертації. Після аналізу поданої дисертаційної роботи слід відзначити такі зауваження.

1. У тексті дисертації для назви речовини робочого тіла іноді використовується застаріле «двоокис вуглецю» замість сучасного «діоксид вуглецю».

2. У роботі використовується поняття «апробації» розробленої математичної моделі замість рекомендованого поняття «верифікації», що відповідає тестуванню працездатності моделі у вигляді реалізованого комп'ютерного застосунку (наприклад, установлення до єдиного розв'язку для обчислювальних сіток різної щільності, стійкість розв'язання до різних крайових умов, тощо).

3. Зустрічається в тексті ключовий термін «прикордонний шар» для визначення області потоку з проявами в'язкості. Правильно використовувати «пограничний» або «граничний» шар. Також замість терміну «втрати тиску» за рахунок неідеального характеру потоку в компресорі помилково використовується «витрати тиску», що якісно змінює сенс процесів зменшення тиску в міжлопатковому каналі турбомашини.

4. Під час огляду наявних моделей стану робочого тіла декілька разів відзначається їх великі обчислювальні витрати, але не надається ніякої порівняльної інформації про ресурси комп'ютера, які потрібні для використання розробленої моделі.

5. Під час валідації моделі шляхом порівняння експериментальних і розрахункових значень іноді використовуються якісні оцінки («добрий», «задовільний», «гарний» збіг) без наведення кількісної інформації про значення порівняльних критеріїв, що дещо знижує достовірність чисельного аналізу.

У цілому вказані зауваження не знижують наукової та практичної цінності отриманих результатів, а також не впливають на мою загальну високу оцінку рецензованого дисертаційного дослідження.

Загальні висновки. Дисертаційна робота Воробйової Ганни Сергіївни «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO_2 » є завершеним науковим дослідженням, що має наукову новизну і практичну значущість. Дисертаційна робота за актуальністю, змістом та повнотою викладу її результатів у наукових публікаціях, обсягом і оформленням цілком відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» (зі змінами) і Постанови Кабінету Міністрів України № 44 від 12.01.2022 р. «Про затвердження порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії».

Виходячи з цього, вважаю, що Воробйова Ганна Сергіївна заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 – «Енергетичне машинобудування» з галузі знань 14 – «Електрична інженерія».

Рецензент – доктор технічних наук, професор,
професор кафедри математичного
моделювання та штучного інтелекту
факультету систем управління літальних
апаратів Національного аерокосмічного
університету ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»



Юрій СКОБ

Підпис професора Скоба Ю. О.
засвідчую

Вчений секретар



Тетяна БОНДАРЄВА