

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, доцента

**Мальчевського Валентина Павловича**

на дисертаційну роботу

**Воробйової Ганни Сергіївни**

на тему «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки  $\text{CO}_2$ »,

подану на здобуття наукового ступеня

доктора філософії за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

### **1. Актуальність теми.**

У роботі аналізуються проблеми моделювання процесів стискання  $\text{CO}_2$  у відцентровому компресорі, які здійснюються в безпосередній близькості до критичної точки. З'ясовано, що технологія надкритичного циклу ( $\text{S-CO}_2$ ) використовується майже для всіх існуючих джерел енергії, таких як сонячна, геотермальна, вкопна енергія, атомні електростанції та системи рекуперації відпрацьованого тепла. Відомо, що оптимальне поєднання умов роботи та обладнання визначають максимальну ефективність енергоустановок.

Ефективність компресору вирішальним чином впливає на цей показник. Але, як відомо, робочий процес компресора проходить поблизу критичної точки  $\text{CO}_2$ , де теплофізичні властивості дуже чутливі до змін тиску та температури. Це значно ускладнює математичне моделювання процесу стиснення і робить критично важливим достовірний опис параметрів стану робочого середовища.

Основним недоліком абсолютної більшості рівнянь стану реального газу є суттєве збільшення похибки розрахованих значень властивостей відносно експериментальних даних при наближенні критичної точки. Тому дисертаційна робота, яка вирішує науково-практичну задачу забезпечення моделювання робочих процесів у енергетичному обладнанні, яке

використовує діоксид вуглецю у якості робочого тіла, в області навколо критичної точки є **актуальною**.

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

Дисертаційна робота виконана на кафедрі конструкції авіаційних двигунів та енергетичних установок Національного аерокосмічного університету ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут». Робота проводилася відповідно до тематики наукових досліджень кафедри, розроблена математична модель інтегрована до складу програмного пакету AxCFDTM для 3D CFD розрахунків лопаткових машин.

## **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій та їх достовірність**

Ступінь обґрунтованості наукових положень дисертаційної роботи Воробйової Г.С. підтверджується порівняльним аналізом відхилень по густині при використанні кількох рівнянь стану реального газу у різних областях.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження базується на валідації результатів тривимірного розрахунку в програмному пакеті обчислювальної математики FEA 3D AxCFDTM з результатами серії експериментів, отриманими для відцентрового компресора циклу S-CO<sub>2</sub>.

## **4. Наукова новизна отриманих результатів**

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи Воробйової Г.С. полягає в удосконаленні методики розрахунку термодинамічних властивостей діоксиду вуглецю поблизу критичної точки та сформульована наступним чином:

- уперше розроблено масштабну поправку для рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, яка дозволяє знизити похибку розрахованих значень



докритичного тиску та питомого об'єму рідкої фази в двофазній області у порівнянні з експериментальними даними з 20-40 % до 3-15 % для тиску та з 6-25% до 0,5-1% для питомого об'єму при температурах 220-300K;

- вдосконалене рівняння стану діоксиду вуглецю дозволило суттєво підвищити точність чисельного моделювання термодинамічних процесів у енергетичному обладнанні, у характерному для цього обладнання діапазоні термічних параметрів.

## **5. Практичне значення виконаного дослідження**

Значимість отриманих в дисертаційному дослідженні результатів визначається успішним впровадженням та використанням отриманої математичної моделі у програмному забезпеченні AxSTREAM (SoftInWay Inc.).

Для науки і практичного використання значимим є запропонована масштабна поправка для рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, яка дозволяє збільшити точність визначення параметрів діоксиду вуглецю при здійсненні робочих процесів поблизу критичної точки.

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

Отримані наукові результати також можуть бути використані в науково-дослідних та проектних організаціях, конструкторських бюро, які виконують роботи з проектування та експериментального дослідження обладнання, робочим тілом якого є діоксид вуглецю.

## **6. Повнота викладу наукових положень, висновків і рекомендацій у наукових публікаціях за темою дисертації**

Основний зміст і положення дисертації викладено у 11 наукових працях, серед яких 6 статей у наукових спеціалізованих виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України (4 статті входять до

спеціалізованих наукометричних баз, 2 – Scopus), 4 тезах доповідей науково-технічних конференцій та в одній колективній монографії, що у сукупності відповідає діючим вимогам.

Наукові праці Воробйової Г.С. відповідають п. 8 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44, із змінами, внесеними відповідно до Постанови КМ України № 341 від 21.03.2022.

## 7. Структура та обсяг дисертаційної роботи

Дисертаційна робота Воробйової Г.С. складається із вступу, переліку умовних позначень, шести розділів, висновків, шести додатків та списку використаних джерел: вступ – 25 джерел; 1 розділ – 57 джерел; 2 розділ – 4 джерела; 3 розділ – 10 джерел; 4 розділ – 25 джерел; 5 розділ – 10 джерел; 6 розділ – 2 джерела.

Основна частина дисертації викладена на 178 сторінках тексту, містить 117 рисунків і 14 таблиць.

У **вступі** визначена актуальність дисертаційного дослідження, показаний її зв'язок з науковими напрямками кафедри, сформульовані мета та задачі дослідження, наведені наукова новизна та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок здобувачки, апробація роботи, публікації, структура та обсяг дисертації.

У **першому** розділі виконано огляд літературних джерел, в яких проаналізовано області застосування надкритичних циклів  $\text{CO}_2$  в енергетичному машинобудуванні та описані основні рівняння стану для розрахунку теплофізичних властивостей діоксиду вуглецю.

Виконаний огляд показав, що спектр застосування як прямих, так і обернених циклів  $\text{S-CO}_2$  досить широкий. Для їх ефективного використання



необхідне оптимальне поєднання умов роботи, обладнання, робочої рідини та схеми циклу. У роботі відзначено, що при проектуванні вказаних циклів важлива наявність точних значень термодинамічних властивостей діоксиду вуглецю на вході в компресор.

Розглянуті основні рівняння стану, які дозволяють досить точно описувати термодинамічну поведінку діоксиду вуглецю у широкій області температури та тиску. Проте зазначено, що не одне з розглянутих рівнянь не дає можливості отримати точних значень термодинамічних властивостей  $\text{CO}_2$  у області поблизу критичної точки. Оскільки параметри робочого тіла компресора досить часто знаходяться у безпосередньої близькості до критичної точки, то вказана проблема потребує вирішення.

У **другому** розділі описано компресорний цикл S- $\text{CO}_2$ , розроблений у Sandia National Laboratories та вимірювальні прилади, необхідні для проведення експериментального дослідження.

У ході проведення експериментів показано, що у ряді випадків, у процесі реалізації циклу робоче тіло переходить із стану рідини в область перегрітої пари поблизу критичної точки. Автором роботи зазначено, що рівняння стану Анг'є-Редліха-Квонга, яке вибране у якості базового, не може точно описати термодинамічні параметри  $\text{CO}_2$  у вказаній області і для подальших розрахунків необхідно його модифікувати.

У **третьому** розділі виконано відтворення досліджуваного відцентрового компресора у середовищі для моделювання 1D AxSTREAM. Дані про компресор отримано зі звіту Sandia National Laboratories, а властивості робочого тіла взяті з автоматизованої системи розрахунку теплофізичних властивостей речовин NIST RefPROP. Сформовано опис властивостей робочого тіла для подальшого розрахунку у програмі 3D AxCFD<sup>TM</sup>, яка використовує як основу рівняння стану Анг'є-Редліха-Квонга.

Порівняльний аналіз характеристик, отриманих із розрахунків у програмному середовищі 3D AxCFD з експериментальними даними та з характеристиками, розрахованими у 1D AxSTREAM показав, що дана модель

добре описує властивості робочого тіла в надкритичній та газовій областях (похибка менше 1 %), але недостатньо точна для рідкої (більше 30 %), двофазної (більше 15 %) та навколокритичної (більше 20 %) областей.

На підставі виконаного порівняльного аналізу встановлено, що математична модель на базі рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є при розрахунках параметрів потоку компресора неспроможна моделювати фазовий перехід від рідкого стану до надкритичного або від двофазного стану до надкритичного в області, наближеної до критичної точки, з похибкою, яка не перевищує 5 %.

У **четвертому** розділі розроблено модифіковане рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є, в яке було введено масштабні поправки до коефіцієнта рівняння  $A(T)$ . Це дозволило істотно знизити похибку при визначенні тиску в широкому діапазоні температур у порівнянні з немодифікованим рівнянням стану.

Автором зазначено, що запропонована в роботі математична модель для визначення ступеня сухості в області двофазного стану  $\text{CO}_2$  на основі модифікованого рівняння стану Редліха-Квонга-Анг'є та методу Ямади-Ганна, дозволяє отримати значення об'ємів газової та рідкої фаз у температурному діапазоні 220 – 300 К (у тому числі і поблизу критичної точки) із похибкою, яка не перевищує 5 % з експериментальними даними.

У **п'ятому** розділі отримана математична модель була порівняна з експериментальними ізотермами для температурного діапазону від мінімальної температури до надкритичних умов роботи відцентрового компресора.

Визначено, що у двофазній області значення тиску насиченої пари, які отримані за методикою Лі-Кеслера, мають відхилення з експериментом від 1 до 6 %, різко зростаючи при наближенні до лінії насиченої рідини. Виявлено, що завдяки масштабній поправці у формулі коефіцієнта  $A(T)$  похибка при розрахунку значень тиску при значеннях температури поблизу критичної точки значно знизилася: з 70 – 90 % до 1 – 6 % у більшій частині області для 296 К та з 70 % до 46 % для 303 К.



У шостому розділі виконано моделювання потоку робочого тіла на вході у компресор з фазовими переходами навколо критичної точки при наступних умовах: у двофазному стані  $\text{CO}_2$  на вході до компресора та в рідкому стані на виході з компресору; у рідкому стані  $\text{CO}_2$  на вході до компресора та у надкритичному стані на виході з компресору.

У роботі встановлено, що у компресорі з рідкою фазою  $\text{CO}_2$  на вході в області критичної точки, через яку буде проходити зміна фази, спостерігаються значні флуктуації термодинамічних показників, таких як тиск, температура та густина. Це викликає труднощі у забезпеченні сталого розрахунку та у отриманні достовірних результатів.

Зазначено, що порівняння з експериментальними даними свідчить про те, що модифікація рівняння стану дозволяє доцільно використовувати його при моделюванні потоку робочого тіла з фазовими переходами з рідкого стану до двофазного або до надкритичного стану у області навколо критичної точки.

## **8. Зауваження та загальна оцінка дисертаційної роботи**

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Не зрозуміло, який саме недолік має рівняння стану Шпана і Вагнера (1996), що заважає його використання у 3D CFD моделюванні (стор. 3 роботи, останній абзац). Адже це рівняння забезпечує більш точні розрахунки термодинамічних властивостей, ніж кубічне.

2. У діаграмі на рис. 2 (стор. 27) автор порівнює різні типи рівнянь за значеннями максимальної величини відносної похибки за густиною. Але з діаграми не зрозуміло, для яких саме значень густини виконано це порівняння. Для об'єктивного порівняння необхідно використовувати однакові значення густини для всіх типів рівнянь.

3. Не зрозуміло, яким чином враховуються у CFD розрахунках втрати від дискового тертя і витоку робочого тіла через ущільнення робочого колеса, адже ці втрати мають вагомий вплив на структуру течії і характеристики ступені

4. Не зрозуміло, яким чином задаються граничні умови на вході у компресор (постійні по висоті каналу чи є розподіл від кореневого до периферійного перетину)?

5. Чому саме методи Лі-Кеслера та Піцлера було вибрано для розрахунку тиску у стані насичення?

6. Чи враховувався розподіл геометричного кута лопатки (blade metal angle) з входу до виходу при розробці моделі компресора у програмному середовищі AxSTREAM?

7. Є деякі термінологічні зауваження: термін “металевий кут лопатки” є некоректним перекладом з англomовного терміну. Краще використовувати термін “геометричний кут”. Термін “гiдравлічний коефіцієнт корисної дії” не вживається. Краще використовувати “Ізоентропний коефіцієнт корисної дії”.

8. Результати чисельного дослідження структури течії та сумарних характеристик були б більш інформативними, якби здобувачка провела порівняння своїх результатів розрахунку з результатами експерименту.

#### **9. Висновок про відповідність дисертації вимогам МОН України щодо присвоєння ступеня доктора філософії**

Дисертаційна робота Воробйової Ганни Сергіївни «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO<sub>2</sub>» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 142 – Енергетичне машинобудування. Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, яка вирішує важливу науково-технічну задачу з моделювання технічних процесів у енергоустановках при здійсненні робочого циклу поблизу критичної точки.

Дисертація «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO<sub>2</sub>» Воробйової Г.С. виконана із дотриманням принципів академічної доброчесності. Дисертаційна робота відповідає п. п. 5, 6, 7, 8 та 9 «Порядку



присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», згідно з постановою КМ України № 44 від 12.01.2022, із змінами, внесеними відповідно до Постанови КМ України № 341 від 21.03.2022, а її авторка, Воробйова Ганна Сергіївна, заслуговує присудження наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 142 – Енергетичне машинобудування.

**Офіційний опонент:**

Професор кафедри Суднові енергетичні  
установки та технічна експлуатація  
Одеського національного морського  
університету МОН України  
доктор технічних наук, доцент



Валентин МАЛЬЧЕВСЬКИЙ

Підпис д-ра техн. наук, доцента Мальчевського В.П. засвідчую:

Вчений секретар ОНМУ



Тетяна КОРОБКО