

**Рішення**  
**разової спеціалізованої вченої ради**  
**про присудження ступеня доктора філософії**

Здобувачка ступеня доктора філософії **Воробйова Ганна Сергіївна**, 1991 року народження, громадянка України, освіта вища: у 2014 році закінчила Національний аерокосмічний університет ім. М.С. Жуковського «ХАІ» і отримала повну вищу освіту за спеціальністю «Авіаційні двигуни та енергетичні установки» та здобула кваліфікацію наукового співробітника. Є фізичною особою-підприємцем. Виконала акредитовану освітньо-наукову програму «Енергетичне машинобудування».

Разова спеціалізована вчена рада утворена наказом Національного аерокосмічного університету імені М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків, від 19 березня 2025 року № 137 у складі (без змін)

голови разової

спеціалізованої вченої ради – Гакала Павла Григоровича, доктора технічних наук, доцента, професора кафедри Аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут».

рецензентів –

Петухова Іллі Івановича, кандидата технічних наук, доцента кафедри аерокосмічної теплотехніки Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

Скоба Юрія Олексійовича, доктора технічних наук, професора кафедри математичного моделювання та штучного інтелекту Національного аерокосмічного університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут»;

офіційних опонентів –

Ганжі Антона Миколайовича, доктора технічних наук, професора кафедри теплотехніки та енергоефективних технологій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;

Мальчевського Валентина Павловича, доктора технічних наук, доцента, професора кафедри Суднових енергетичних установок та технічної експлуатації Одеського національного морського університету.

на засіданні «07» травня 2025 року прийняла рішення про присудження ступеня доктора філософії з галузі знань 14 Електрична інженерія Воробйовій Ганні Сергіївні на підставі публічного захисту дисертації «Модифікація рівняння стану реального газу для моделювання робочих процесів у відцентровому компресорі поблизу критичної точки CO<sub>2</sub>» за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Дисертацію виконано в Національному аерокосмічному університету ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Міністерство освіти і науки України, м. Харків.

Науковий керівник: Долматов Дмитро Анатолійович, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ».

Дисертацію подано у вигляді спеціально підготовленого рукопису, у якому відображено нові науково обгрунтовані результати проведених здобувачкою досліджень, що виконують конкретне наукове завдання і мають вагоме значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертація виконана державною мовою і відповідає встановленим МОН вимогам щодо оформлення дисертації. Обсяг основного тексту є достатнім для

розкриття теми в межах галузі 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування. Таким чином, у дисертації дотримано вимоги п. 6 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами).

Здобувачка має 12 наукових праць за темою дисертації, з них: сім – статті у періодичних наукових фахових виданнях України та зарубіжних видань, п'ять – тези доповідей на науково-практичних конференціях, серед яких найбільш значимими є такі:

1. Vorobiova, H., Dolmatov, D., Fesenko, K., Sysoiev, I., Dehtiarov, O., & Ivashchenko, M. (2024). Effect Detection Of Using A Modified Redlich-Kwongaungier 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>
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>
3. Vorobieva H.S. (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>
4. Воробйова, Г. С. (2024). Огляд і бібліометричне дослідження надкритичних енергетичних циклів CO<sub>2</sub>. Поточний стан досліджень і розробок. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, 2024, №3(195). <https://doi.org/10.32620/aktt.2024.3.07>.

У дискусії взяли участь голова та члени разової спеціалізованої вченої ради та висловили зауваження:

Рецензент Ілля Петухов

1. Текст пунктів наукової новизни роботи, наведений в анотації (с. 6...7), дещо відрізняється від такого на с. 31 у розділі «ВСТУП».

2. Не зовсім зрозуміло:

- про яке «...масштабове рівняння...» йдеться на с. 4;
- що визначає термін «змішана фаза» на с. 5;
- що визначає термін «...обчислювальна здатність...» на с. 25;
- паралельне використання термінів «...молярного об'єму...» та «...питомого об'єму...» на с. 30;
- що визначає термін «...термодинамічних переходів рідини...» на с. 46;
- що визначає термін «витрати» у розділі 3, наприклад «Надкритичні витрати числа Маха...» на с. 94;

3. Лінія рівноваги пар-конденсована фаза на діаграмі «Тиск-Температура» чистої речовини на рис. 4.1 у потрібній точці повинна мати зміну нахилу дотичної. Не досить зрозумілі умови поділу стану на рідкий та газовий на с. 119: «При будь-яких тисках нижче тиску насиченої пари або сублімації та заданої температури речовина знаходиться в однофазному газовому стані. При будь-якій температурі вище критичної та будь-яких тисках речовина знаходиться в однофазному стані. Приймаючи умовно, що в усій цій області стан речовини є газовим, при будь-яких тисках вище критичної ізотерми це є умовною межею, що розділяє рідкий та газовий стани речовин». Ці умови доречно проілюструвати на рис. 4.1.

4. Не визначено, як розраховується ступінь вологості, яка використовується при аналізі фазового стану речовини та може бути меншою за нуль (с. 122).

5. Основна увага в роботі приділена білякритичній області стану. У той же час у пунктах наукової новизни кількісних показників підвищення точності розрахунків параметрів стану саме у цій області не наведено.

6. На с. 4 зазначено, що «Питомий об'єм рідкої фази визначався за емпіричним методом Ямади-Ганна». А на с. 6 сказано, що «...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...». Як корелюють між собою ці ствердження?

Рецензент Юрій Скоб

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 децю знижує достовірність чисельного аналізу.

Офіційний опонент Антон Ганжа

1. Незрозуміле речення на с.47: «Тиск зменшується лінійно (від 7.34 МПа до 7.42 МПа, перетинаючи критичне значення при  $x=16,6$  см у мікроканалі».

2. На T-S діаграмі рис. 2.4 показаний не весь цикл установки, яка приведена на рис. 2.1-2.3. Не ясно, чому на с. 65 згадується цикл Брайтона, який передбачає отримання корисної роботи, у той же час цикл в установці рис. 2.1-2.4 передбачає тільки витрати роботи у компресорі з подальшим дроселюванням. Щоб організувати процес дроселювання 2-3 на рис. 2.6, як сказано, «практично ізоентальпійним», напевно він повинен бути адіабатним.

3. Не ясно, чому на рис. 2.11 приведені шкали (температура-густина), але у тексті сказано, що на рисунку зображено сімейство ізоTERM, які повинні бути горизонтальними, а не мати вигляд ізобар.

4. З тексту до рис. 2.14 не ясно, як визначалася коректна точка виходу з дросельного клапану в циклі на T-S діаграмі.

5. Не зрозуміло, що мала на увазі авторка у тексті на с. 88 дисертації «На даний момент при розрахунку всіх компонентів відцентрових компресорів доступний тільки "фіксований коефіцієнт витрат". Значення загромождження каналу фіксоване, тому завдання межі для моделі загромождження та масштабного коефіцієнта не має сенсу».

6. Формула (4.6) не має пояснень щодо величини  $\omega$ . Тільки при подальшому ознайомленні з текстом можна здогадатися, що це «коефіцієнт ацентричності». Не зрозуміло, що мається на увазі під цією величиною.

7. У рівняннях (4.26), (4.31), (4.32), (4.35), (4.54) і (4.59) доцільно було б для зменшення похибок і облегшення інтерполяції використовувати відношення температури до критичного значення, а не абсолютну температуру.

8. На мою думку, назва пункту 4.2 «Адаптація виразів для розрахунку теплофізичних властивостей робочого тіла на основі прийнятої форми рівняння стану» є некоректною, тут розглядаються термодинамічні параметри стану ентальпія та ентропія, а не теплофізичні властивості.

9. З тексту розділу 4 не зрозуміло, як межі використання рівнянь для різних ділянок робочої області CO<sub>2</sub> (надкритичній, газовій, двофазній, рідкій, а також в околиці критичної точки). На початку розділу 5 наведено: «Завдяки умовам, які розділяють робочий діапазон CO<sub>2</sub>, солвер вибирає правильні рівняння для коректної фази робочого тіла», незрозумілі критерії вибору.

10. У таблиці 6.1 приведена густина на виході з компресора, яка практично дорівнює густині на вході, тоді про який фазовий перехід йдеться на с. 186.

11. На рисунках та схемах деколи немає пояснень наведених величин, елементів або не всі величини та лінії мають пояснення, що ускладнює читачеві ознайомлення з текстом. По



тексту зустрічаються описки та помилки в нумерації, різна термінологія для одних процесів (наприклад стиснення та стискання).

Офіційний опонент Валентин Мальчевський

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

2. У діаграмі на рис. 2 (с. 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 витoku робочого тіла через ущільнення робочого колеса, адже ці втрати мають вагомий вплив на структуру течії і характеристики ступеню.

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 та 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 «гідравлічний коефіцієнт корисної дії» не вживається. Краще використовувати «Ізоентропічний 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.

Результати відкритого голосування:

«За» 5 членів ради,

«Проти» - членів ради.

На підставі результатів відкритого голосування разова спеціалізована вчена рада присуджує Воробійовій Ганні Сергіївні ступінь доктора філософії з галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

Відеозапис трансляції захисту дисертації додається.

Окрема думка члена разової ради не надходила.

Голова разової спеціалізованої вченої ради

Павло ГАКАЛ

Підпис голови разової спеціалізованої  
вченої ради Павла ГАКАЛА засвідчую

Учений секретар Національного  
аерокосмічного університету  
ім. М. Є. Жуковського «Харківський  
авіаційний інститут»

Тетяна БОНДАРОВА

