

## РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента

Петухова Іллі Івановича

на дисертаційну роботу Карпенка Артема Михайловича

на тему «Використання явища сепарації закрученого газового потоку за температурою для вдосконалення охолодження елементів ротора турбіни»,

яка представлена на здобуття ступеня доктора філософії

в галузі знань 14 Електрична інженерія

за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

### **Актуальність теми дисертації**

Підвищення максимальної температури термодинамічного циклу залишається одним із визначальних чинників зростання ефективності газотурбінних двигунів. Можливості розвитку в цьому напрямку обмежуються допустимими температурами елементів ротора турбіни. Розвиток відповідних матеріалів і захисних покриттів з метою підвищення їх робочої температури на сьогодні в значній мірі досяг своєї межі. Близькі до цього й схеми внутрішнього та плівкового охолодження лопаток турбін. Серед подальших варіантів інтенсифікації охолодження перспективним виглядає зниження температури охолодного повітря. Використання з цією метою теплообмінників має ряд обмежень, перш за все, за масогабаритними параметрами.

Тому актуальною є задача розробки альтернативних методів охолодження повітря. Саме така науково-практична задача вирішується в дисертаційній роботі на основі цільового використання ефекту Ранка у вже наявному в складі ГТД апараті супутнього закручування повітря.

### **Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни**

Матеріали, викладені в дисертації Карпенка Артема Михайловича, дозволяють зробити висновок про обґрунтованість і новизну її наукових результатів. Це забезпечено опрацюванням значної кількості наукових робіт вітчизняних і зарубіжних учених, використанням фундаментальних положень термодинаміки та газової динаміки, сучасних методів дослідження, зокрема, на основі тривимірного комп'ютерного моделювання.

Достовірність отриманих результатів доведено шляхом порівняння одержаних на основі розробленої CFD-моделі результатів розрахунків температурної сепарації обертового потоку з експериментальними даними, а також їхнім практичним використанням при проєктуванні нових і модернізації існуючих систем охолодження турбін ГТД розробки АТ «Івченко-Прогрес».

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

1. Уперше запропоновано метод супутнього закручування потоку охолодного повітря перед його потраплянням до каналів охолодження

робочих лопаток турбіни, який відрізняється використанням ефекту Ранка з примусовим розділенням обертової течії на гарячий і холодний потоки та їх спрямуванням у різні зони дискової порожнини. Холодна фракція підводиться до робочих лопаток, що забезпечує зниження температури охолодного повітря й може підвищувати ефективність охолодження лопаток.

2. Набуло подальшого розвитку уявлення щодо причин виникнення радіальної температурної сепарації в закручених потоках рідини. Аналітично та чисельно доведено, що визначальним механізмом є робота відцентрових сил інерції, тоді як внесок інших чинників (нестаціонарність, турбулентність, в'язкість, стисливість тощо) є величиною меншого порядку. Встановлено фактори, що зумовлюють радіальну сепарацію потоку за температурою: квадрат тангенціальної швидкості, кривизна ліній струму та зміна в радіальному напрямку суми кінетичних енергій від швидкостей, дотичних до поверхні струму. Отримані результати створюють можливість цілеспрямованої інтенсифікації температурної сепарації шляхом конструктивного впливу на параметри закрученого потоку.

3. Отримало подальший розвиток уявлення щодо фізичної природи динамічних газових сил, які діють на робочі лопатки турбіни. Установлено, що їх величина визначається не лише параметрами течії на виході з соплового апарата, а й роботою відцентрових сил у криволінійному русі, яка зумовлює енергетичну сепарацію: зростання повної ентальпії біля корита та зменшення – біля спинки лопатки. Виявлено, що такий нерівномірний розподіл повної ентальпії корелює з амплітудою нестаціонарних газових сил, причому амплітуда тим вища, чим більша кривизна лопатки й тангенціальна швидкість потоку. Урахування впливу криволінійного руху потоку при проєктуванні робочих лопаток турбін забезпечує більш точне прогнозування динамічних навантажень лопаток.

### **Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності**

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Карпенка Артема Михайловича повністю відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 142 - Енергетичне машинобудування. Дисертаційна робота є завершеною науковою працею, а її результати свідчать про вагомий особистий внесок здобувача у науковий напрям CFD-моделювання закручених течій з температурною сепарацією потоку та використання визначених факторів для вдосконалення системи охолодження елементів ротора турбіни ГТД.

Можна зробити висновок, що дисертаційна робота Карпенка Артема Михайловича є результатом самостійних досліджень здобувача й не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати та тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

## **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою з використанням класичного академічного стилю викладення матеріалів наукових досліджень і відповідної фахової термінології. Розділи роботи логічно пов'язані між собою та розкривають головні наукові результати автора. Викладені в роботі наукові та практичні положення достатньо обґрунтовані.

Дисертація складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків і списків використаних джерел до кожного розділу, загальних висновків і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 167 сторінок, з них 163 сторінка основного тексту, 52 рисунки за текстом, 6 таблиць за текстом і 3 додатки на 4 сторінках. Списки використаних джерел до кожного розділу сумарно викладені по тексту на 25 сторінках.

У **вступі** автором обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, сформульовано мету й завдання дослідження, а також наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про публікації та апробацію результатів дисертаційної роботи, особистий внесок автора.

У **першому розділі** проаналізовано стан і етапи формування систем охолодження деталей турбін, зазначено, що на сьогодні саме їх розвиток, а не прогрес у матеріалах забезпечує основний приріст температури на вході до турбіни. Водночас підкреслено поступове вичерпання потенціалу внутрішнього та плівкового охолодження лопаток турбін і необхідність пошуку альтернативних рішень, зокрема способів зниження температури охолодного повітря. Серед таких розглянуто потенціал застосування вихрового ефекту Ранка, можливості використання вже наявних елементів ГТД для його ефективної реалізації. Виходячи з виконаного аналізу сформульовано мету та основні завдання дисертаційного дослідження.

У **другому розділі** досліджено явища сепарації закрученого газового потоку за температурою для вдосконалення охолодження елементів ротора турбіни. Обґрунтовано вибір моделі турбулентності та параметрів розрахункової сітки. Виконано верифікацію CFD-моделі шляхом порівняння результатів чисельного аналізу з експериментальними даними.

У **третьому розділі** виконано комплексне CFD-моделювання та аналітичний аналіз рівнянь збереження для ідеального газу, що обертається. Виявлено основні чинники, що визначають перерозподіл повної температури в напрямку, нормальному до вихрового руху газу. Обґрунтовано ключові фактори, вплив на які дозволяє підвищити ефективність температурної сепарації в обертовому потоці під час вдосконалення конструкції апарату супутнього закручування турбіни.

У **четвертому розділі** обґрунтовано можливість і практичну доцільність використання ефекту Ранка в системах підведення охолодного повітря до робочих лопаток турбіни з урахуванням конструктивних параметрів апарату супутнього закручування. Встановлено, що навіть за наявних геометричних обмежень модифікація елементів тангенціальної подачі повітря в камеру змішування апарату забезпечує потенційне зниження температури

охолодного повітря майже на 4 К. Проведене дослідження формує наукову базу для розвитку методів температурної сепарації потоку в системах охолодження турбін.

У **п'ятому розділі** визначено роль ефекту Ранка при течіях у турбомашинах. Результати CFD-моделювання засвідчують, що нестационарна аеродинамічна сила, яка діє на робочу лопатку турбіни, безпосередньо пов'язана з тангенціальним розподілом повної енергії в робочому колесі. Отримані результати дають базу для підвищення точності моделювання та оптимізації конструкцій турбін.

У **висновках** наведено підсумкові результати проведених у дисертації наукових досліджень, що узагальнюють висновки за кожним з її розділів.

У **додатках** наведено список публікацій автора за темою дисертаційної роботи, акти впровадження її результатів.

Дисертаційна робота оформлена відповідно до вимог, сформульованих у наказі МОН України від 12 січня 2017р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій».

### **Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях**

За матеріалами дисертації опубліковано 4 статті у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України. Окрім цього, результати роботи опубліковано в 3 тезах доповідей науково-технічних конференцій, одна з яких реферується в базі даних Scopus.

Наукові публікації здобувача містять опис наукових досліджень, проведених у рамках дисертаційного пошуку, аналіз сутності проблеми, методів і результатів проведених досліджень, а також обґрунтовані висновки. У наукових публікаціях здобувача не виявлено порушень принципів академічної доброчесності, висновки є оригінальними.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлено в наукових публікаціях здобувача.

### **Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи**

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Використання скорочення ТВТ як температури на вході в турбіну виглядає не досить доречним. За правило, так визначають турбіну високого тиску.
2. На с. 27 зазначено, що «*Набуло подальшого розвитку уявлення щодо причин виникнення радіальної температурної сепарації в закручених потоках рідини. Аналітично та чисельно доведено, що визначальним механізмом є робота відцентрових сил інерції, тоді як внесок інших чинників (нестационарність, турбулентність, в'язкість, стисливість тощо) є величиною меншого порядку.*» Чи були прямі розрахунки для середовищ із штучно прибраною, або суттєво заниженою в'язкістю, із суттєвою зміною стисливості?

3. З наведених у розділі 2 результатів не зрозуміло, чи пов'язана зміна тангенціальної швидкості за радіусом при витіканні потоку із сопла у вихрової камери з профілем швидкості на його зрізі?

4. У розділі 1 на с. 46 зазначено: «З твердження про те, що сепарація за температурою у вихровій трубі виникає внаслідок стиснення та розширення робочого середовища, випливає, що стисливість речовини є ключовою умовою для виникнення температурної сепарації. Водночас, теоретичні та експериментальні дослідження інтенсивного обертового потоку нестисливої рідини [87, 88] показали, що температурна сепарація можлива навіть без суттєвих змін тиску.» На с. 53 «Таким чином, стисливість газів виключається як необхідна умова температурної сепарації, оскільки енергетичне розділення спостерігається в усіх типах робочих середовищ.» Твердження про незначний вклад стисливості видаються помилковими. Якщо рідина нестислива, то її температура може змінитися тільки внаслідок підведення теплоти ззовні або за рахунок дисипацій. Ефекти дисипацій дають змогу тільки збільшити температуру відносно вихідної. Тертя обертового потоку на поверхні циліндру як раз визначає збільшення температури в зовнішній частині. Зменшення повної ентальпії внаслідок виконання роботи можливе лише для стисливого середовища.

5. Твердження «На підставі проведених досліджень встановлено, що перерозподіл повної енергії (а, відповідно, й повної температури) в напрямку, нормальному до вихрового руху газу (ефект Ранка), зумовлений наступними факторами:...» на с. 117 не зовсім точне. Прямий зв'язок повної енергії та температури можна розглядати тільки для калорично досконалого ідеального газу, коли ентальпія не залежить від тиску.

6. Виглядає доцільним конкретизувати методику співставлення розглянутих методів охолодження. Наприклад, базовий з більшою температурою та повним тиском забезпечує більшу швидкість повітря і, відповідно, більший коефіцієнт тепловіддачі при внутрішньому охолодженні.

7. Не зовсім зрозуміло:

- який розмір визначає « $d$  - діаметр конуса-регулятора...» на с. 19;
- використання терміну «Індекси» на с. 20.

Наведені зауваження не є визначальними, вони зумовлені складністю досліджених автором питань і не впливають на високу позитивну оцінку дисертаційної роботи в цілому.

### **Висновок про дисертаційну роботу**

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Карпенка Артема Михайловича на тему «Використання явища сепарації закрученого газового потоку за температурою для вдосконалення охолодження елементів ротора турбіни», виконана на актуальну тему та на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності. Дисертаційна робота є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. За

актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною дисертаційна робота повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п.6 – 9 «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 р. №44.

Здобувач Карпенко Артем Михайлович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

**Рецензент:**

Кандидат технічних наук, доцент,  
доцент кафедри аерокосмічної теплотехніки  
Національного аерокосмічного університету  
«Харківський авіаційний інститут»

Ілля Петухов