

## **РЕЦЕНЗІЯ**

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**

Прогрес у розвитку газотурбінних двигунів нерозривно поєднаний із зростанням температури газу на вході в турбіну, що призводить до росту теплових навантажень на деталі турбін (особливо на робочі лопатки). Не дивлячись на суттєвий розвиток матеріалів та захисних покриттів, історично приріст температури перед турбіною значною мірою досягався завдяки розвитку схем внутрішнього (конвекційного) та зовнішнього (плівкового) охолодження лопаток. Разом із тим сучасні методи вдосконалення каналів охолодження вже перебувають на межі технологічних можливостей виготовлення деталей. Розвиток адитивних технологій може покращити ситуацію, проте наразі проблема існує. У цьому контексті особливого наукового та прикладного значення набуває пошук альтернативних підходів до охолодження турбін. І одним з них може бути зниження температури охолодного повітря перед його підведенням до робочих лопаток. Таке зниження температури можна реалізувати шляхом використання теплообмінників (але це призведе до ускладнення конструкції, зростання маси, габаритів двигуна та втрат тиску). Також можна охолодити повітря використовуючи ефект Ранка, який дозволяє сепарувати потік на дві фракції – холодну і гарячу, і подавати до каналів охолодження робочих лопаток лише холодну фракцію.

Через те що ефект Ранка реалізується тільки у закручених потоках, його застосування в апараті супутнього закручування турбіни виглядає природним, оскільки головною функцією апарата якраз і є надання потоку колового руху у напрямку обертання ротору турбіни.

Зазначена проблема є особливо актуальною для авіаційних і енергетичних ГТД, у яких подальше зростання ефективності безпосередньо залежить від вирішення задачі теплового захисту лопаток. Дисертаційна робота Карпенка Артема Михайловича, яка присвячена дослідженню явища сепарації закрученого газового потоку за температурою та розробці науково обґрунтованих методів його практичного застосування у системах охолодження турбін, є своєчасною та відповідає актуальним потребам вітчизняного авіадвигунобудування.

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

Мета і завдання дослідження сформульовані логічно та узгоджено й базуються на аналізі сучасного стану проблеми охолодження елементів ротора турбіни. Запропонований підхід до використання температурної сепарації закрученого потоку в системі підведення охолодного повітря до робочих лопаток є логічно вмотивованим з урахуванням обмежень традиційних методів охолодження.

Обґрунтованість наукових результатів дисертації забезпечується комплексним використанням сучасних методів дослідження, що поєднують аналітичний підхід, CFD-моделювання та інженерні розрахунки процесів температурної сепарації в закручених потоках рідини. У роботі виконано валідацію CFD-моделі, на основі якої обґрунтовано вибір стаціонарного RANS-підходу із застосуванням моделі турбулентності  $k-\epsilon$  та відповідної структури розрахункової сітки, що забезпечує оптимальне співвідношення точності та обчислювальних витрат.

Отримані результати мають належне теоретичне підґрунтя: встановлені залежності між параметрами закрученого потоку та розподілом повної температури узгоджуються з положеннями газодинаміки криволінійного руху та не суперечать відомим науковим уявленням, а уточнюють їх. Використані припущення та спрощення є типовими для задач даного класу і не впливають на коректність отриманих результатів.

Практична обґрунтованість результатів підтверджується їх безпосереднім використанням при формуванні інженерних рішень, що забезпечують зниження температури охолодного повітря та збільшення ресурсу робочих лопаток.

У сукупності це свідчить про достатній рівень обґрунтованості отриманих результатів.

Достовірність наукових результатів дисертації підтверджується використанням сучасних апробованих методів чисельного моделювання та аналізу газодинамічних процесів, а також валідацією CFD-моделі для дослідження температурної сепарації в закручених потоках. Результати дослідження мають фізично обґрунтований характер і узгоджуються з теоретичними положеннями механіки рідини та газу.

Практична цінність і достовірність результатів додатково підтверджуються їх впровадженням в АТ «Івченко-Прогрес» при модернізації систем охолодження турбін газотурбінних двигунів, а також використанням у навчальному процесі Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут».

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 (нестационарність, 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 нестационарних газових сил, причому амплітуда тим вища, чим більша кривизна лопатки й тангенціальна швидкість потоку. Урахування впливу криволінійного руху потоку при проектуванні 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 Карпенка Артема Михайловича відповідає Стандарту вищої освіти за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування та напрямкам досліджень відповідної освітньо-наукової програми, а також завданням «Державної цільової науково-технічної програми розвитку авіаційної промисловості на 2021–2030 роки». Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність вагомego особистого внеску здобувача у дослідження газодинамічних та термодинамічних процесів у закручених потоках газових турбін.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, трьох додатків та списків використаних джерел до кожного розділу. Загальний обсяг роботи складає 167 сторінок, 52 рисунки, 6 таблиць, 222 найменування використаних джерел. Структура дисертації є послідовною, логічною та відповідає поставленій меті.

У **вступі** чітко сформульовано актуальність теми, мету та завдання дослідження, визначено об'єкт і предмет дослідження, описано методи дослідження, відображено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача і апробацію матеріалів.

У **першому розділі** проведено ґрунтовний критичний аналіз сучасного стану проблеми охолодження елементів турбін ГТД, включаючи еволюцію схем внутрішнього та зовнішнього охолодження лопаток з 1960-х рр. до сьогодення. Виконано детальний критичний огляд існуючих теорій вихрового ефекту Ранка, огляд CFD-методів для моделювання температурної сепарації у закручених потоках, а також встановлено відсутність у відкритій літературі досліджень застосування ефекту Ранка в системах підведення повітря до каналів охолодження робочих лопаток турбіни. Огляд носить систематичний і критичний характер, є підставою для обґрунтованого формулювання мети, постановки завдань та вибору методології подальшого дослідження.

**Другий розділ** присвячено методології дослідження та розробці і валідації CFD-моделі для розрахунку температурної сепарації в закручених потоках. Описано два розрахункові методи: внутрішній CFD-код АТ «Івченко-Прогрес» та комерційний Ansys CFX 2024 R2. Проведено детальне дослідження сіткової збіжності з визначенням показників GCI, порівняльний аналіз моделей турбулентності та валідацію моделі на основі даних експериментального дослідження вихрової труби Ранка.

**Третій розділ** містить результати CFD-моделювання закрученого потоку в кільцевому каналі та аналітичне дослідження причин температурної сепарації. Виконано порівняльний аналіз нев'язкої та в'язкої турбулентної течій, отримано рівняння для зміни повної питомої енергії в напрямку, нормальному до вихрового руху, встановлено чисельно-аналітичну відповідність між виникненням радіального градієнту ентальпії та роботою відцентрових сил. Проведено порівняння з результатами досліджень криволінійного руху К. Страховича та підтверджено узгодженість висновків.

У **четвертому розділі** представлено практичне застосування встановлених закономірностей: проведено CFD-аналіз базової конструкції АСЗ турбіни малогабаритного турбовального двигуна та її вдосконалення для забезпечення підведення більш холодного повітря до робочих лопаток; визначено конструктивні фактори, що обмежують ефективність температурної сепарації в АСЗ, та кількісно оцінено ефект запропонованих змін конструкції. Зроблено оцінку впливу зниження температури охолодного повітря на ресурс лопаток.

**П'ятий розділ** є концептуальним розширенням дослідження: встановлено взаємозв'язок між ефектом Ранка та рядом термогазодинамічних явищ у проточних частинах газових турбін – ефектом Еккерта–Вайза в закрайкових слідах, ефектом Керреброка–Миколайчика, радіальною сепарацією температури в турбінах. Встановлено зв'язок між динамічними навантаженнями, яких зазнають робочі

лопатки, та коловим розподілом повної енергії в робочому колесі турбіни. Розділ розкриває перспективний напрямок подальших досліджень.

Завершується дисертація **висновками**, у яких узагальнено результати, отримані автором згідно з проведеним дисертаційним дослідженням. Короткі висновки також присутні після кожного розділу.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено. Використання результатів інших вчених супроводжується відповідними посиланнями; посилання на літературні джерела є коректними. Усі результати, що виносяться автором на захист, отримані самостійно та відображені в опублікованих роботах. У роботах, виданих у співавторстві, чітко визначено особистий внесок здобувача.

### **Мова та стиль викладення результатів**

Дисертаційна робота написана українською мовою на високому науково-технічному рівні, з чіткою логічною структурою та використанням відповідної спеціалізованої термінології у галузі газової динаміки, термодинаміки та обчислювальної гідродинаміки. Матеріал викладено послідовно і доступно. Робота належним чином ілюстрована рисунками та таблицями, що суттєво сприяє сприйняттю результатів.

### **Оприлюднення результатів дисертаційної роботи**

Основний зміст дисертаційної роботи відображено у наступних наукових працях здобувача: 4 статтях у виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань України (журнал «Авіаційно-космічна техніка і технологія»), 1 статті (conference paper) у збірнику доповідей ASME Turbo Expo 2024 (London, UK, реферується в базі Scopus), 1 статті (conference paper) у збірнику доповідей ISABE 2024 (Toulouse, France) та 1 тезах доповіді на XXX Міжнародному конгресі двигунобудівників (Харків, 2025).

Публікації Карпенка Артема Михайловича відповідають сучасному науковому рівню, пройшли рецензування відповідно до вимог видань. Особистий внесок здобувача у публікаціях, виданих у співавторстві, є суттєвим і чітко визначеним. Публікації охоплюють усі основні результати дисертаційного дослідження. Апробація результатів здійснена на трьох міжнародних наукових конференціях, у тому числі на провідній конференції у галузі турбомашинобудування – ASME Turbo Expo 2024.

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

Відзначаючи загалом високий науковий рівень роботи, вважаю за необхідне висловити окремі зауваження:

1. Валідацію CFD-моделі виконано для класичної вихрової труби Ранка–Хільша круглого перерізу з протитечією, тоді як у роботі досліджується прямоточний апарат супутнього закручування кільцевого перерізу. Бажано було б

детальніше обґрунтувати коректність екстраполяції отриманих результатів валідації на зазначену конфігурацію.

2. У розрахунках апарата супутнього закручування стінки у розрахунковій області розглядались як адіабатичні. При цьому відсутня оцінка впливу теплового потоку (від стінок труби до повітря всередині вихрової труби) на сепарацію течії за температурою в АСЗ.

3. На стор. 115 у векторному виразі для швидкості  $C_T$  спостерігається некоректне відображення символів: замість позначення векторної величини (риска над символом) відображаються літери г. Ймовірно, це є технічною помилкою, що виникла під час конвертації файлу з формату Word у PDF.

4. Виявлено часткове дублювання опису розрахункової моделі: однакові фрагменти тексту наведено на стор. 89 (розділ 2.3.1) та стор. 122 (розділ 4.2). Доцільно було б уникнути повторення шляхом посилання на відповідний розділ або більш чіткого розмежування викладеного матеріалу.

5. В роботі не зазначено критерію збіжності ітераційного процесу CFD розрахунків, що є стандартною вимогою до CFD-досліджень.

6. У роботі використано стаціонарний RANS-підхід до моделювання течії у вихровій трубі. Було б цікаво почути думку здобувача щодо того, як врахування нестаціонарності течії могло б вплинути на точність розрахунку температурної сепарації.

Висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичне значення результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

### **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 високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого вирішує актуальну науково-прикладну задачу підвищення ефективності охолодження елементів ротора турбіни ГТД, що має суттєве значення для галузі знань 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною 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 теорії авіаційних двигунів  
Національного аерокосмічного  
університету  
«Харківський авіаційний інститут»

Ксенія ФЕСЕНКО