

ВІДГУК

офіційного опонента

на дисертаційну роботу **Шелковського Михайла Юрійовича**

«Підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів шляхом їх аеродинамічного удосконалення на основі аналізу просторової форми течії»,

що подана на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю

05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

1. Актуальність теми досліджень

На сьогоднішній день газотурбінні двигуни (ГТД) і установки знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості: електроенергетиці, авіаційному, та морському транспорті, нафтогазовій галузі. Визначальним фактором ефективності роботи ГТД, є якість проектування проточної частини осевого компресора і турбіни. Одним із резервів підвищення економічності ступенів компресорів є використання оптимального просторового профілювання їхніх лопаткових апаратів. Це дозволить суттєво скоротити витрати і підвищити ефективність процесів проектування і модернізації лопаткового апарату компресора на будь-якій стадії його життєвого циклу.

Таким чином, актуальність теми дослідження визначається, з одного боку, необхідністю аеродинамічного вдосконалювання лопаткових апаратів компресорів ГТД, а з іншого – можливістю ефективного розв'язання цього завдання за допомогою сучасних методів обчислювальної газодинаміки для розрахунку тривимірного в'язкого потоку в проточних частинах компресорів і застосування ефективних математичних методів оптимізації.

2. Відповідність дисертаційної роботи планам наукових досліджень

Тематика дисертаційної роботи відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів досліджень щодо реалізації державних програм за напрямами розвитку авіаційної промисловості та енергетичного машинобудування, затверджених постановами Кабінету Міністрів України № 311 від 2 квітня 2008 р., № 942 від 7 вересня 2011 р., № 429-218-р від 10 травня 2018 р. У дисертації використані результати досліджень, що виконані автором у рамках проектно-конструкторських робіт за програмами ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»: «Створення модельного компресора» (номер внутрішньої реєстрації теми № 60170), «Створення компресора двигуна UGT-5000» (номер внутрішньої реєстрації теми № 410), «Дослідження аеродинамічних характеристик напрямного апарата з тангенціальним нахилом лопаток» (номер внутрішньої реєстрації теми № 414), в яких запроваджені основні наукові напрацювання.

3. Загальна характеристика дисертації

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та завдання дослідження, викладено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, зазначено особистий внесок автора у роботи з співавторами, надана інформація про апробацію результатів досліджень.

У **першому розділі** відповідно до мети і завдань дисертаційної роботи формулюється уявлення про предмет дослідження. Дано аналіз стану і перспектив розвитку компресорів ГТД. Наведено досить докладний огляд робіт теоретичної та експериментальної спрямованості, щодо сучасних підходів у розробці компресорів ГТД. Виконано огляд й аналіз існуючих методів та основних напрямів аеродинамічного вдосконалювання лопаткових апаратів компресорів у тому числі просторового профілювання пера лопатки та застосування методів аеродинамічної оптимізації. Розглянуто методи визначення статистичних характеристик лопаткових вінців ступенів компресора. Намічено шляхи реалізації поставлених у дисертації завдань.

Другий розділ дисертації присвячено розрахунково-теоретичному аналізу формування вигляду компресора ГТД.

Виконано постановку задачі аеродинамічної оптимізації лопаткових вінців БОК шляхом комплексного варіювання форми профілів лопаток (тангенціального нахилу, парусності, з застосуванням «керованої» дифузорності, S-подібності профілів). Розроблена загальна формула для опису форми середньої лінії профілів лопаток, що дозволяє використовувати профілі нестандартної, у тому числі S-подібної форми при профілюванні лопаткових вінців. Запропоновано спосіб параметричного опису геометрії пера лопатки робочого колеса і напрямного апарата компресора, що дозволяють управляти їхньою просторовою формою за мінімальної кількості параметрів та оптимальна форма тангенціального нахилу пера лопатки напрямного апарата залежно від нерівномірності потоку по висоті лопатки на вході у вінець.

Розроблено підхід до аеродинамічного проектування лопаткових вінців БОК з урахуванням 3D ефектів із застосуванням програмного комплексу Kompres 2.0 і пакету програм ANSYS CFX для розв'язання оберненої аеродинамічної задачі на основі уточнених статистичних залежностей із визначення кутів відставання і атаки, коефіцієнтів втрат, критеріїв зриву потоку.

У **третьому розділі** розглянуто методику експериментальних досліджень як окремих решіток та ступенів БОК так і у цілому проточної частини компресора. Представлено об'єкти досліджень (треступінчатий, шестиступінчатий та десятиступінчатий компресори), експериментальні стенди та розроблені автором схеми препарування стендів для випробувань спроектованих БОК і решіток профілів. Створено методику визначення параметрів потоку вздовж висоти проточної частини багатоступінчатого компресора за результатами його стендових експериментальних

досліджень. Наведено результати статистичного аналізу отриманих експериментальних даних.

У **четвертому розділі** автором представлено аналіз виконаних досліджень. Наведено результати експериментальних досліджень газодинамічних характеристик дозвукових компресорних решіток та отримані автором їх нові статистичні характеристики, особливістю яких є урахування тривимірної геометрії лопаток.

Подано результати просторового профілювання лопаткових вінців трьох випробуваних БОК. На основі експериментальних і розрахункових досліджень показана ефективність застосування запропонованої форми тангенціального нахилу лопаток прямого апарату. Отримали подальший розвиток співвідношення з визначення оптимальних кутів атаки, кутів відставання потоку, коефіцієнтів втрат повного тиску в решітках лопаток РК і НА осьового ступеня компресора. Показано, що застосування S-подібної форми середньої лінії профілю приводить до зменшення градієнта тиску на виході з міжлопаткового каналу та до зменшення кута відставання потоку. Розрахунковим і експериментальним шляхом встановлено, що за увігнутої сторони розрідження пера лопатки сумарний коефіцієнт втрат у лопатковому вінці РК (НА) зменшується на (8–10) %, а за випуклої сторони розрідження - збільшується на (20–40) %.

4. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Наукова новизна досліджень і результатів роботи полягає у наступному:

- удосконалено статистичні залежності для визначення оптимальних кутів атаки та відставання, ККД та складових втрат, критеріїв зриву потоку за фактором дифузорності, а також параметра дифузорності вхідної ділянки міжлопаткового каналу на режимах мінімуму коефіцієнта втрат, запирання та зриву, в яких на відміну від відомих раніше враховано просторову форму лопаток і тривимірність течії, що відіграє важливу роль у процесі проектування лопаткових вінців дозвукових осьових компресорів ГТД;

- одержав подальшого розвитку метод аеродинамічного проектування лопаткових вінців дозвукових осьових компресорів ГТД за рахунок просторового профілювання лопаткових вінців БОК з використанням моделей тривимірної течії в'язкого газу, запропонованої параметричної моделі пера лопаток РК та НА та сучасних методів оптимізації;

- вперше досліджено та виявлено вплив складного тангенціального нахилу напрямних лопаток із потрібною зігнутістю та S - подібністю профілів на розподіл за їхньою висотою коефіцієнта втрат повного тиску, що дозволяє послабити вихрові ефекти течії в периферійній зоні міжлопаткових каналів.

5. Обґрунтованість і достовірність результатів

Достовірність отриманих здобувачем результатів ґрунтується на:

- використанні фундаментальних законів газодинаміки і положень теорії математичного моделювання та коректному формулюванні математичної постановки задач планування експерименту та оптимізації;
- застосуванні математичних моделей, чисельних методів та програмних засобів, достатньо широко апробованих при розв’язанні задач дослідження течії в’язкого газу в проточних частинах лопаткових машин;
- якісним узгодженням результатів виконаних досліджень з даними, отриманими іншими авторами та експериментальними даними.

6. Цінність наукових результатів для науки та практики

На основі розробленого автором комплексного підходу до аеродинамічного удосконалення лопаткових вінців багатоступінчатих осьових компресорів можливо підвищення ККД лопаткових вінців компресорних ступенів до рівня 0,92...0,93, а також ККД ГТД в цілому. Достовірність цих даних підтверджується узгодженням результатів CFD розрахунків з експериментальними дослідженнями, виконаними на сертифікованих стендах, а також аналогічними дослідженнями відомих закордонних компаній за кращими зарубіжними зразками.

За результатами досліджень на корисні моделі лопаток робочого колеса і напрямного апарата осьового компресора отримано патенти України № 106009 і № 114826.

Результати роботи впроваджено у практику проектування компресорів високого тиску ГТД, зокрема двигунів типу UGT-5000, ГТД-45(60) виробництва ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (акт впровадження від 10.04.2017).

7. Апробація результатів дисертації.

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися більш ніж на 20 науково-технічних конференціях, у тому числі міжнародних. Перелік конференцій наведено у розділі «Вступ» дисертації (стор. 33). В повному обсязі робота розглядалась та обговорювалась на засіданні НТПР Інституту проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України.

За результатами проведених у дисертаційній роботі досліджень автором опубліковано 23 роботи, 7 з яких у виданнях, зазначених у переліку наукових фахових видань України, де можуть бути опубліковані результати дисертаційних робіт з технічних наук. Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що основні результати дисертації знайшли достатньо повне відображення в наукових виданнях.

8. Оформлення дисертацій та автореферату

Дисертація і автореферат написано грамотно та з використанням сучасної наукової термінології. Зміст автореферату в повній мірі відображає основні положення дисертаційної роботи її структуру та отримані результати. Оформлення як дисертації так і автореферату відповідає державним стандартам і вимогам Атестаційної колегії МОН України до кандидатських дисертацій.

9. Зауваження по дисертаційній роботі

1. В роботі розглянуто досить багато об'єктів дослідження. Скорочення їх кількості дозволило б автору більш докладно розглянути проблему пошуку оптимального просторового профілювання лопаткових апаратів компресорів ГТУ.

2. У пункті 2 наукової новизни роботи вказано « набув подальшого розвитку метод аеродинамічного проектування ... з використанням нової параметричної моделі пера лопаток РК та НА». У чому новизна параметричної моделі, та чим вона істотно відрізняється від моделей розроблених раніше іншими дослідниками?

3. Такі просторові зміни форми пера лопатки як складний тангенціальний нахил, зміна кутів установки перерізів, управління парусністю лопатки в сукупності зі зміною геометрії перерізів (товщина, S-образність та ін.) потребують урахування і контролю обмежень на міцність в процесі проведення аеродинамічної оптимізації лопаток. Яким чином ці питання вирішуються в роботі (в першу чергу для робочих лопаток)?

4. У підрозділі 2.3.6 представлено критерій багаторежимної оптимізації окремих лопаткових вінців НА, рівняння (2.60). При цьому в роботі не зазначено, які умови накладаються на вагові коефіцієнти, і яким чином вони повинні вибиратися при проведенні оптимізаційних розрахунків.

5. У розділі 4 дисертації при аеродинамічній оптимізації ступенів БОК як критерій використовується інтегральний критерій (2.61). При цьому у всіх розглянутих випадках вагові коефіцієнти були такі $S_{21}=1$, $S_{22}=0$. Таким чином, оптимізація виконувалася тільки на номінальному режимі роботи компресора. Однак в умовах експлуатації компресор ГТУ повинен працювати в досить широкому діапазоні параметрів компресора на змінних (нерозрахункових) режимах. Чи будуть отримані оптимальні рішення достатньо хорошими при роботі компресора на режимах відмінних від номінального? У роботі про це нічого не сказано.

6. Для розв'язання оптимізаційних задач автор використовує метод деформованого багатогранника Нелдера-Міда. Цей метод призначено для пошуку локального екстремуму. Однак в таких складних технічних системах як компресор ГТУ цільова функція, як правило, багатоекстремальна. У роботі не розглядаються підходи до пошуку глобального екстремуму.

7. Не наведено конкретні розміри різницевих сіток розглянутих об'єктів дослідження. Крім того кожне отримане в процесі оптимізації рішення необхідно було уточнити розрахунком на дрібній сітці. Це дозволило б більш адекватно представити картину структури потоку, вторинних течій, відривів тощо.

8. Вибір моделі турбулентності SST Ментера обґрунтовується автором мінімізацією нев'язки коефіцієнта втрат повного тиску $\delta(\zeta)$, (стор. 74, 75). З рис. 2.2 видно, що мінімум $\delta(\zeta)$ досягається при використанні різницевої сітки розміром трохи більше 2,0 млн елементів на один міжлопатковий канал вінця. Чому тоді за базове сіткове розбиття для виконання розрахунків тривимірної в'язкої течії обрана сітка з густотою 1,5 млн елементів (стор. 81).

9. У роботі не наведено витрати часу процесора на пошук оптимального рішення (час одного розрахунку цільової функції, час на пошук екстремуму, кількість кроків необхідних для пошуку екстремуму і т. д.).

10. В роботі не представлено, яким чином здійснюється інформаційний інтерфейс між компонентами програмних комплексів Kompress 2.0 і ANSYS CFX.

11. Є деякі зауваження щодо оформлення роботи:

- перелік умовних позначень в роботі не достатньо повний;
- в окремих місцях відсутній опис параметрів, наприклад, λ_{1u} , λ_{1w} в табл. 3.1, 3.2;
- зустрічається непослідовність викладу матеріалу. Так посилання на рис. 1.2 на стор. 34, а сам рисунок розташований на стор. 38;
- використовуються не зовсім коректні вирази:

а) «...використання прямого нахилу в НА за криволінійною твірною...», стор. 53;

б) «Рис. 2.12 – Параметрична модель пера лопатки робочого колеса (напрямого апарата) в меридіональній площині», стор. 96;

г) на стор. 87 при поясненні параметрів в рівняннях (2.31) – (2.34) «де K_s масив газодинамічних і геометричних параметрів, що характеризує просторову форму каналу вінця та тривимірну структуру течії (таблиця 2.1)». Проте K_s – це деяка підмножина параметрів з табл. 2.1, вибір якої залежить від об'єкта дослідження і поставленої задачі.

Наведені зауваження не впливають на високу загальну оцінку роботи і обумовлені широким колом проблем і завдань, порушених у дисертації, та їх складністю.

10. Загальний висновок по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Шелковського Михайла Юрійовича «Підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів шляхом їх аеродинамічного удосконалення на основі аналізу просторової форми течії» є завершеною науково-дослідною роботою, у якій на основі виконаних досліджень розв'язано ряд науково-

прикладних завдань пов'язаних з підвищенням ефективності компресорів ГТД шляхом удосконалення їх аеродинамічних характеристик, що у сукупності є значним досягненням для розвитку вітчизняного газотурбобудування.

За актуальністю, науковим рівнем і практичним значенням роботи, наявністю необхідної кількості й обсягу публікацій і повнотою відображення в них змісту досліджень дисертаційна робота відповідає вимогам пунктів 9, 11 та 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженому постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 року, а її автор, Шелковський Михайло Юрійович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник
відділу гідроаеромеханіки енергетичних машин
Інституту проблем машинобудування
ім. А. М. Підгорного НАН України



В. А. Яковлев

«12 » вересня 2019 р.

Підпис Яковлева В. А. засвідчує
Учений секретар ІПМаш НАН України
доктор технічних наук




К. В. Максименко-Шейко