

ВИСНОВОК

про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації *Даценко Вадима Анатолійовича* на тему «Метод визначення впливу абразивного зносу проточної частини компресора на характеристики газотурбінного двигуна за допомогою його математичної моделі», представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування

На засіданні кафедри теорії авіаційних двигунів за участі:

Кіслова Олега Володимировича, к.т.н., доцента, завідувача кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Бойко Людмили Георгіївни, д.т.н., професора, професора кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Фесенко Ксенії Володимирівни, к.т.н., доцента, доцента кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Шевченко Михайла Анатолійовича, PhD, доцента, доцента кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Дегтярьова Олега Дмитровича, ст. викладача кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Кононенко Миколи Васильовича, ст. викладача кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Піжанкової Наталії Володимирівни, ст. викладача кафедри теорії авіаційних двигунів «ХАІ»;

Спіфанова Сергія Валерійовича, д.т.н., професора, завідувача кафедри конструкції авіаційних двигунів «ХАІ»

Гакала Павла Григоровича, д.т.н., професора, професора кафедри аерокосмічної теплотехніки «ХАІ»;

Куріна Максима Олександровича, к.т.н., доцента, професора кафедри технологій виробництва авіаційних двигунів «ХАІ»

відбулася публічна презентація дисертаційної роботи *Даценко Вадима Анатолійовича* на тему «Метод визначення впливу абразивного зносу проточної частини компресора на характеристики газотурбінного двигуна за допомогою його математичної моделі».

На підставі обговорення змісту презентації дисертаційної роботи ухвалено такий висновок про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів дисертації (результати голосування – одноголосно).

1. Актуальність теми дослідження

Робота газотурбінного двигуна в умовах запиленої атмосфери призводить до зношування елементів проточної частини і, як наслідок, до погіршення його параметрів і характеристик. Збільшується питома витрата палива та зменшується питома потужність двигуна. Для підтримки одного й того ж рівня потужності збільшується температура газу перед турбіною. Крім

цього, знос лопаток призводить до зміщення робочих режимів компресора у бік менших витрат і зміщення межі області стійкої роботи, що, в свою чергу, викликає зниження запасу газодинамічної стійкості компресора.

Найбільшому зношуванню від пилу піддаються вертолітні ГТД, що працюють на малих висотах в найбільш запиленій атмосфері, а також ГТД, що встановлені на бронетанковій техніці. При експлуатації ГТД у таких несприятливих умовах сильнішому зносу піддається компресор, а особливо його лопатки.

Ерозійне зношування елементів проточної частини ГТД висуває цілий ряд проблем перед двигунобудуванням. Головною проблемою є запобігання зношування або його суттєва затримка без помітного погіршення характеристик ГТД. Що стосується лопаток ГТД, це завдання вирішується різними способами - застосуванням зносостійких матеріалів, напилення на лопатки спеціального твердосплавного покриття, розробкою пилозахисних пристроїв, спеціальним профільуванням та іншими шляхами.

Другою, не менш важливою проблемою, є проблема надійного контролю зношування елементів проточної частини ГТД з ув'язкою степені зношування вузлів та зміною їх характеристик.

Для контролю степені зношування можуть застосовуватися різні індикатори зношування. Однак, ще немає індикаторів зносу, що добре відображають зношування лопаток робочих коліс і направляючих апаратів компресора, а також вони не дозволяють оцінити вплив зміни характеристики компресора на параметри двигуна.

Широкого поширення набули роботи, пов'язані з розробкою методів прогнозування впливу абразивного зношування. Дані роботи можна розділити на дві категорії: експериментальні методи дослідження погіршення параметрів компресора та двигуна загалом та методи математичного моделювання впливу ерозії на ці параметри. На сьогоднішній час застосування знаходять математичні моделі різного рівня складності. Вони дозволяють оперативно проводити розрахункові оцінки впливу відхилення геометричних параметрів проточної частини від номінальних значень на характеристики окремих вузлів та двигуна загалом, а також не вимагають значних фінансових витрат порівняно з експериментом.

Проте, існуючі підходи до оцінки впливу ерозійного зношування на параметри газотурбінного двигуна здебільшого ґрунтуються на використанні одновимірних методів розрахунку термогазодинамічних параметрів вузлів або на застосуванні поправкових коефіцієнтів до номінальних характеристик елементів, які зазнали зносу. Однак повноцінних математичних моделей, що забезпечують прямий розрахунок термогазодинамічних параметрів вузлів в одновимірній постановці з урахуванням абразивного зношування, нині практично не існує. Моделі, які реалізують підхід з використанням поправкових коефіцієнтів, характеризуються обмеженістю – вони дозволяють врахувати лише загальний ефект зносу, без урахування просторової нерівномірності пошкоджень та зміни локальних геометричних параметрів. Хоча такі моделі спрощують розрахунок, вони суттєво знижують його

точність. Одновимірні підходи до моделювання лопаткових машин також мають істотне обмеження: оскільки зношування переважно відбувається у периферійній області проточної частини, розрахунок за середнім радіусом не дозволяє адекватно відобразити вплив ерозійних змін на робочі параметри вузлів.

Окремим напрямом досліджень є математичне моделювання впливу ерозійного зношування безпосередньо на термогазодинамічні параметри компресора, що реалізується як в межах одновимірного підходу (на основі розрахунків за середнім радіусом), так і за допомогою методів просторового моделювання течії. Проте такі дослідження зосереджені виключно на компресорі й не враховують вплив ерозійного зносу на параметри газотурбінного двигуна в цілому, що обмежує їх використання для аналізу його працездатності.

Тому науково-технічна задача розробки методу визначення впливу абразивного зношування на термогазодинамічні параметри та характеристики газотурбінного двигуна під час його експлуатації в умовах запиленої атмосфери є актуальною.

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

В основу дисертаційного дослідження покладено результати робіт, які проводилися автором на кафедрі теорії авіаційних двигунів Національного аерокосмічного університету «Харківський авіаційний інститут» у рамках держбюджетних тем: «Розробка та удосконалення методів математичного моделювання газотурбінних двигунів, турбомашин та турбоустановок різного призначення» №ДР 0118U001842, 2020 р.; «Математичне моделювання газодинамічних процесів та характеристик повітряно-реактивних двигунів, газотурбінних приводів та їх елементів» №ДР 0121U108283, 2023 р.

3. Наукова новизна отриманих результатів

У дисертації вперше одержані такі нові наукові результати:

1. Уперше для розрахункового визначення впливу абразивного зношування проточної частини компресора на характеристики турбовального двигуна, запропоновано метод, оснований на повузловій нелінійній математичній моделі двигуна, що спирається на двовимірний опис багатоступеневого осьового компресора.

2. Набула подальшого розвитку методика визначення геометричних параметрів лопаткових вінців осьового компресора на різних радіусах за обмеженим масивом експериментальних даних про змінення хорди лопаток на середньому радіусі та периферії внаслідок абразивного зносу.

3. Удосконалено метод розрахунку термогазодинамічних параметрів і характеристик осьового багатоступеневого компресора в двовимірній постановці шляхом урахування зміни шорсткості поверхонь лопаток і використання уточнених напівемпіричних залежностей для визначення втрат повного тиску і кута відставання потоку.

Практичне значення результатів роботи

1. Розроблений метод розрахункового аналізу впливу абразивного зношування проточної частини компресора на характеристики турбовального газотурбінного двигуна та відповідний комплекс програм може бути використаний для обґрунтування інженерних рішень під час визначення технічного стану двигунів, прогнозування зміни їх експлуатаційних характеристик, оцінки запасів газодинамічної стійкості та прогнозування зростання експлуатаційних витрат, зокрема внаслідок збільшення питомої витрати палива й зменшення питомої потужності.

2. Отримані розрахункові дані щодо просторово-радіальних розподілів параметрів потоку в компресорі (кутів натікання, швидкостей, повної та статичної температури й тиски), а також кількісні показники зміни інтегральних характеристик компресора (ступеня підвищення тиску, ККД і запасів газодинамічної стійкості) дозволяють оцінювати вплив абразивного зношування на ефективність і стійкість роботи компресора, прогнозувати наближення граничних станів і визначати допустимі режими експлуатації.

Апробація/використання результатів дисертації

Основні результати роботи представлені на трьох всеукраїнських та трьох міжнародних конференціях:

1. Бойко Л. Г., Даценко В. А. Моделювання втрат у багатоступеневому осьовому компресорі. Всеукраїнська науково-технічна конференція «Інтегровані комп'ютерні технології в машинобудуванні» ІКТМ – 2018, тези доповідей, Харків 2018, с.65.

2. Бойко Л. Г., Даценко В. А. Математичне моделювання процесів у компресорі з використанням одно- та двовимірних підходів. XXVII міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2019, тези доповідей, Харків 2019, с. 240

3. Бойко Л. Г., Даценко В. А. Визначення дросельної характеристики турбовального ГТД на основі метода математичного моделювання з застосуванням одно- та двовимірних підходів до розрахунку параметрів компресора. XXIV міжнародний конгрес двигунобудівників, Харків 2019, с. 72.

4. Бойко Л. Г., Даценко В. А. Моделювання геометричних параметрів лопаточних вінців зношеного компресора. Тридцять друга всеукраїнська конференція “Нові технології в машинобудуванні”, Харків 2022, 47-50 стр.. DOI: 10.32620/NLTMB.22

5. Бойко Л.Г., Даценко В.А., Піжанкова Н.В. Особливості проектування високонапірних компресорів малорозмірних ГТД з урахуванням відбору повітря. Тридцять друга всеукраїнська конференція “Нові технології в машинобудуванні”, Харків 2022, с. 59. DOI: 10.32620/NLTMB.22

6. Даценко В.А. Оцінка впливу абразивного зношування компресора на характеристики турбовального газотурбінного двигуна. Інформаційні

технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХП». – 1882 с.

4. Дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертація В. А. Даценко є оригінальною роботою, виконана здобувачем самостійно й доброчесно, текст рукопису дисертаційної роботи не містить ознак академічного шахрайства. Роботу передано експерту для проведення науково-технічної експертизи щодо збігів з Internet-джерелами, про що буде надано відповідний звіт.

7. Перелік публікацій за темою дисертації із зазначенням особистого внеску здобувача.

За результатами досліджень опубліковано 5 наукових публікацій у наукових фахових виданнях затверджених за спеціальністю 142 МОН України, одна з них одноосібна, у тому числі:

- три статті у наукових фахових виданнях категорії «Б», Україна;
- дві статті у наукових фахових виданнях категорії «А» (Scopus), Україна.

Статті у виданнях, що реферуються у базі даних Scopus:

1. Devising a method for calculating the turboshaft gas turbine engine performance involving a blade-by-blade description of the multi-stage compressor in a two-dimensional setting / Бойко Л. Г., Даценко В. А, Дьомін О. Є, Піжанкова Н. В. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2021, №4 (8 (112)). С. 59–66. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.238538

Здобувачем розроблено метод розрахунку термогазодинамічних параметрів і характеристик турбовального газотурбінного двигуна. Особливістю даного методу є двовимірне повінцеве описання компресора в системі двигуна. В основу методу розрахунку покладено нелінійну математичну модель, що дозволяє описати сталі процеси, що відбуваються в окремих вузлах і в двигуні в цілому. Для побудови математичної моделі обраний модульний принцип, який передбачає створення системи взаємопов'язаних і узгоджених між собою моделей вузлів і їх елементів. Проведено верифікацію методу розрахунку шляхом зіставлення отриманих експлуатаційних характеристик з експериментальними даними.

2. Бойко Л. Г., Даценко В. А Determining the influence of compressor flow path abrasive wear on the gas turbine engine characteristics. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, №2 (1 (122)), С. 12–24. doi: DOI: 10.15587/1729-4061.2023.275546

Здобувачем розроблено метод моделювання геометричних параметрів проточної частини та лопаткових вінців компресора, що зазнав абразивного зношування на основі наявних даних про зношування. Удосконалено метод розрахунку термогазодинамічних параметрів компресора. У вихідний метод внесено залежності для врахування шорсткості та радіального зазору. Виконано аналіз зміни термогазодинамічних параметрів та дросельної

характеристики двигуна при абразивному зносі проточної частини компресора.

Статті у наукових фахових виданнях категорії «Б»:

3. Бойко Л. Г., Даценко В. А., Піжанкова Н. В. Визначення дросельної характеристики турбовального ГТД на основі метода математичного моделювання з застосуванням одно- та двовимірних підходів до розрахунку параметрів компресора. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, 2019, №7/159, С. 21-30. DOI:10.32620/aktt.2019.7.03

Здобувачем проведено математичне моделювання параметрів турбувального ГТД на сталих режимах роботи, з використанням одновимірних і двовимірних підходів до моделювання параметрів компресора.

4. Даценко В. А., Дьомін О. Є., Піжанкова Н. В. Визначення положення границі області стійкої роботи осьового багатоступеневого компресора при виконанні розрахункових досліджень. *Авіаційно-космічна техніка та технологія*, 2020, № 6(166). С. 34-44 DOI:10.32620/aktt.2020.6.04

Здобувачем виконано комплексний аналіз критеріїв газодинамічної стійкості осьового компресора. Показано, що на етапі проектування для визначення межі стійкої роботи та оцінювання запасів газодинамічної стійкості ступенів і лопаткових вінців доцільно застосовувати фактор дифузорності та еквівалентний коефіцієнт дифузорності, визначені на середньому радіусі.

5. Даценко В. А. Виявлення впливу шорсткості та радіального зазору на характеристику осьового багатоступеневого компресора. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – 2024. – №3. – С. 51-58. DOI: 10.32620/aktt.2024.3.04

Виконано розрахунок характеристик компресора для різних рівнів шорсткості та радіального зазору, кількісно оцінено їх вплив на степінь підвищення повного тиску та ККД, а також встановлено закономірності зміщення напірних ліній і зниження ефективності компресора.

5. Висновок наукового керівника

Виконання індивідуального навчального плану, індивідуального плану наукової роботи, досягнення результатів навчання за відповідною науково-освітньою програмою та написання дисертації Даценко Вадимом Анатолійовичем вважаю успішним. Дисертаційна робота є результатом самостійного дослідження, завершеною науковою працею, яка містить наукову новизну. Вона виконана на високому науковому рівні та відповідає всім установленим вимогам до дисертацій на здобуття наукового ступеня доктора філософії, й може бути рекомендована до захисту, а її автор Даценко Вадим Анатолійович – до присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Отже, вважаємо, що дисертаційна робота Даценко Вадима Анатолійовича на тему «Метод визначення впливу абразивного зносу проточної частини компресора на характеристики газотурбінного двигуна за допомогою його математичної моделі», представлена на здобуття ступеня доктора філософії, відповідає вимогам Порядку присудження наукового ступеня доктора філософії (Постанова Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. №44). Відтак, вона може бути представлена до захисту в разовій спеціалізованій раді для присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 142 Енергетичне машинобудування.

Головуючий на засіданні
кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри теорії авіаційних двигунів
Національного аерокосмічного університету
«Харківський авіаційний інститут»

 Олег КИСЛОВ