

## **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»

#### **Актуальність теми дисертації, її зв'язок з науковими державними й галузевими програмами**

Найбільш дієвим засобом підвищення економічності газотурбінних двигунів (ГТД) є збільшення температури газу перед турбіною. Та сучасні ГТД вже мають високий рівень термодинамічної досконалості, а параметри їх робочого процесу практично наблизились до «термодинамічного насичення». За таких обставин у дисертаційній роботі вибрано інший напрямок поліпшення паливної економічності ГТД, а саме: подальше аеродинамічне удосконалення решіток лопаток компресорів. Запропоновано застосування нових підходів під час створення решіток лопаток, які дозволяють скористатися найвагомішими перевагами сучасних методів аналізу просторової течії, а сам процес проектування зазначених елементів проточних частин розглядається як процес оптимального проектування міжлопаткових каналів. Слід зазначити, що ефективність компресорів значно впливає не лише на паливну економічність, але й на питому тягу, масу й експлуатаційну надійність ГТД.

Комплексне поєднання у роботі експериментальних та теоретичних методів дослідження просторової течії дозволило одержати позитивні результати у процесі проектування компресорів, під час якого застосовувалися сучасні програмних комплексів та відомі ефективні підходи щодо «керуваної» дифузорності міжлопаткових каналів, а також послаблення перетікання у радіальному зазорі шляхом застосуванням парусності робочих лопаток та їх тангенціального нахилу одночасно з підгинанням кінців і нахилом лопаток напрямного апарата.

Враховуючи наведене вище можна стверджувати, що тема запропонованого дисертаційного дослідження, яка направлена на підвищення ефективності компресорів ГТД шляхом аеродинамічного удосконалення їх решіток лопаток відповідає сучасним вимогам і є актуальною.

Актуальність теми роботи підтверджується й тим, що вона відповідає переліку пріоритетних тематичних напрямів досліджень щодо реалізації державних програм за напрямками розвитку авіаційної промисловості та енергетичного машинобудування, затверджених постановами Кабінету Міністрів України №311 від 2 квітня 2008 р. і №942 від 7 вересня 2011 р. В дисертації використано результати досліджень автора, які було проведено в межах проектно-конструкторських робіт за програмами ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»: «Створення модельного компресора», «Створення компресора двигуна UGT-5000», «Дослідження аеродинамічних характеристик напрямного апарата з тангенціальним нахилом лопаток».

**Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність і новизна підтверджуються:**

достатньо докладним аналізом літературних джерел щодо сучасних підходів до створення ГТД у цілому та багатоступінчастих осьових компресорів зокрема, коректною постановкою мети і завдань дослідження;

використанням новітніх теоретичних та класичних експериментальних методів дослідження, програмних продуктів та комерційного програмного комплексу для моделювання в'язкої просторової течії ANSYS CFX, застосуванням сучасного математичного апарату щодо оцінки похибок вимірів та обробки результатів аеродинамічних експериментів;

суттєвим за обсягами співставленням отриманих теоретичних результатів з результатами інших дослідників та даними власних аеродинамічних експериментів, виконаних на лабораторних стендах НАКУ «ХАІ» та ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект»;

використанням загальноприйнятих правомірних припущень та обмежень, які забезпечують повторювальність отриманих теоретичних та експериментальних результатів з достатньою точністю;

чіткими і виваженими формулюваннями висновків за результатами теоретичних досліджень та фізичних експериментів.

Завдання дисертації відповідають об'єкту, предмету, меті та методам дослідження.

### **Наукова новизна результатів дослідження**

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.

Набув подальшого розвитку метод аеродинамічного проектування лопаткових вінців дозвукових осьових компресорів ГТД за рахунок комплексного варіювання дифузорністю міжлопаткових каналів, тангенціальним нахилом лопаток, їхньою парусністю, а також меридіональною формою лопаткових вінців на основі теорії планування експерименту з використанням нової параметричної моделі пера лопаток РК та НА.

Вперше досліджено та виявлено вплив складного тангенціального нахилу напрямних лопаток із потрійною зігнутістю та S - подібністю профілів на розподіл за їхньою висотою коефіцієнта втрат повного тиску, що на відміну від відомих раніше форм нахилу обумовлює послаблення вихрової течії біля кінцевих перетинів міжлопаткових каналів.

### **Практична значимість одержаних результатів дослідження.**

Практичне значення отриманих результатів дослідження полягає у розробці комплексного підходу до аеродинамічного удосконалення лопаткових

вінців багатоступінчастих осьових компресорів, на основі якого підвищений ККД лопаткових вінців ступенів до рівня 0,92...0,93. Достовірність цих даних підтверджена експериментальними дослідженнями здобувача, а також дослідженнями провідних закордонних компаній.

Запропоновано метод аеродинамічного проектування лопаткових вінців багатоступінчастих осьових компресорів, який ураховує ефекти просторової течії в компресорних решітках лопаток.

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

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

### **Повнота викладу матеріалів дисертації в опублікованих працях**

В опублікованих працях достатньо повно викладено основні результати теоретичних та експериментальних досліджень дисертаційної роботи. Структура і представлення матеріалу в дисертації та авторефераті відповідає нормативним вимогам до науково-технічних документів. Основні положення дисертації викладено в авторефераті у логічній послідовності, чітко і зрозуміло. Зміст автореферату є ідентичним до основних положень дисертації.

Основні результати дисертації представлено у 23 друкованих роботах, з яких 7 статей у спеціалізованих фахових виданнях України, що входять до переліку рекомендованих МОН, 3 статті в наукових періодичних виданнях інших держав, 2 патенти України на корисну модель, 5 публікацій у матеріалах міжнародного конгресу двигунобудівників, 1 публікація в матеріалах міжнародної конференції, 5 тез доповідей у збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

Основні положення, результати та висновки наукового дослідження доповідались автором, обговорювались та отримали позитивну оцінку на: IX, XI, XII, XIII, XV, XVIII Міжнародних конгресах двигунобудівників (с. Рибаче, 2004, 2006-2008, 2010, 2013); III - VI Міжнародних науково-технічних конференціях «Судова енергетика: стан та проблеми» (м. Миколаїв, 2007-2013); I - IV Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (м. Миколаїв, 2010-2016); XIII - XVI Міжнародних науково-технічних конференціях «Удосконалення турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання» (м. Харків, 2009-2017); II - IV Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні технології в газотурбобудуванні» (м. Алушта, 2010-2012), 8-ій Міжнародній конференції користувачів ANSYS «ACUM – 2010» (м. Москва, Росія, 2010 р.), науково-технічних конференціях ДП НВКГ «Зоря»-«Машпроект» (м. Миколаїв, 2004-2016).

У цілому, рівень і кількість публікацій та апробації матеріалів дисертації на конференціях повністю відповідають вимогам МОН України.

## **Оцінка змісту дисертаційної роботи**

Дисертаційна робота Шелковського Михайла Юрійовича складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 238 сторінок, у тому числі 151 сторінка основного тексту, 63 рисунка за текстом, 12 таблиць за текстом, список використаних джерел із 258 найменувань на 26 сторінках і 6 додатків на 34 сторінках.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено її зв'язок з науковими державними й галузевими програмами, сформульовано мету й задачі дослідження, указано об'єкт, предмет та методи дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено інформацію про публікації та апробацію роботи, а також про особистий внесок здобувача.

У першому розділі проведено огляд та аналіз науково-технічної інформації щодо сучасних підходів у проектуванні компресорів ГТД, які дозволили сформулювати задачі дослідження та обрати методи дослідження.

Другий розділ стосується формування вигляду багатоступінчастого осьового компресора. З цією метою розглянуті питання вибору програмного комплексу для розрахунків тривимірної в'язкої течії в компресорі, вибору моделі турбулентності та сіткового розбиття для чисельного аналізу тривимірної в'язкої течії, а також підходи до аеродинамічної оптимізації пера лопатки та методи математичного моделювання характеристик ступеня за умови варіювання геометрії лопаткових вінців.

У третьому розділі описано розроблені схеми препарування стендів для випробувань компресорів та решіток лопаток та методику визначення параметрів потоку вздовж висоти проточної частини багатоступінчастого компресора за результатами його стендових досліджень, а також оригінальний експериментальний стенд і методику для дослідження параметрів потоку в секторних решітках лопаток напрямного апарата компресора.

У четвертому розділі виконано аналіз результатів чисельних та фізичних аеродинамічних експериментів, який довів, що оптимальне профілювання лопаткових вінців шляхом комплексного варіювання тангенціального нахилу в лопатках напрямних апаратів, парусності робочих лопаток, оберненої S-подібності вихідних кромки периферійних перерізів робочих коліс та «керованої» дифузорності забезпечило досягнення ККД багатоступінчастих осьових компресорів на рівні 90-92% для гранично допустимих напорів і запасів за зривом потоку.

Висновки до окремих розділів та висновки за результатами всієї роботи сформульовані чітко та відповідають задачам дисертаційної роботи.

## **Зауваження по дисертаційній роботі**

1. Стор. 46. Рис. 1.5. Серед перерахованих назв методів щодо розв'язання задач із використанням рівнянь кількості руху у формі Ейлера слід слово «струму» замінити на слово «течії».

2. Стор. 55. Рис. 1.7. На рисунку сегмента решітки соплових лопаток наведено лопатки, форму яких можна визначити як шаблевидна. Для решіток

таких за формою лопаток вплив тангенційного нахилу суттєво відрізняється від впливу нахилу на аеродинамічну ефективність решітки, лопатки якої мають зламану у кореня, але прямолінійну лінію укладання профілів, нахилену в тангенційній площині за напрямом обертання чи протилежним обертання напрямом.

3. Стор. 57. У першій публікації про метод Нелдера та Міда (Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization // The Computer Journal. 1965. Vol 7, no. 4. pp. 308–313.) автори методу назвали його симплекс-методом. На теперішній час (після появи відомої монографії Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / пер. с англ. И. М. Быховской и др. М.: Мир, 1975. 536с.) метод має загальновизнану назву, а саме: метод деформованого багатогранника Нелдера-Міда. Ефективність методу наближається до ефективності градієнтних методів, але він не вимагає визначення часткових похідних, що і забезпечило привабливість методу. Це метод безумовної мінімізації опуклих функцій. А симплекс-методи – назва методів лінійного програмування.

4. Про терміни «решітка профілів» та «решітка лопаток». Решітки профілів парових та газових турбін – двовимірні (прямі) решітки лопаток, які мають постійний вздовж висоти профіль. У таких решіток діаметр є безкінечно великим, а кривина меж каналів дорівнює нулю. Це не кільцеві решітки лопаток. Бажано було б більше уваги звертати на наведені відмінності під час використання цих термінів.

5. У підрозділі 2.2 слід було б навести витрати машинного часу на визначення однієї точки характеристики багатоступінчастого компресора (для одного режиму роботи) за прийнятою густиною сіткового розбиття 1,5 млн. елементів на один вінець.

6. У підрозділі 2.3 для аналітичних залежностей щодо визначення коефіцієнтів  $n_{PK}$ ,  $n_{HA}$ ,  $m_{PK}$ ,  $m_{HA}$  слід було б вказати величини границь діапазонів можливої зміни геометричних та газодинамічних параметрів вінців лопаток. Ці величини є бажаним доповненням до величин емпіричних коефіцієнтів, що наведені в таблицях Б.1-Б.27 додатку Б.

7. У підрозділі 2.4 словосполучення «спрощене моделювання» бажано було б замінити на термін «формальне макромоделювання», прийнятий у системному аналізі для визначення відносно простих математичних моделей – моделей, побудованих на основі статистики (результатів фізичного або чисельного експериментів) апроксимаційних залежностей типу «чорний ящик», а саме: формальний зв'язок між вхідними параметрами та відгуками на них.

8. Розділ 3 слід доповнити відомостями про геометричні та газодинамічні параметри ступенів багатоступінчатих осьових компресорів (БОК), які пройшли експериментальні випробування.

9. У підрозділі 4.4 дисертаційної роботи нема відомостей про прийнятий закон, за яким змінюється величина хорди від кореня до периферії лопаток робочих коліс десятиступінчастого та шестиступінчастого компресорів, якщо змінюється парусність лопаток.

### Загальний висновок

Дисертаційна робота Шелковського Михайла Юрійовича «Підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів шляхом їх аеродинамічного удосконалення на основі аналізу просторової форми течії» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. Вона є закінченою науково-дослідною роботою, в якій одержані нові науково обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що є значущими для розвитку компресоробудування. Дисертаційна робота і автореферат оформлені з дотриманням вимог, встановлених МОН України щодо кандидатських дисертацій.

Висловлені вище зауваження не знижують позитивного враження про дисертаційну роботу в цілому. Беручи до уваги актуальність теми дисертаційних досліджень, ступінь обґрунтованості результатів, наукову новизну та повноту викладу результатів в опублікованих працях здобувача, вважаю, що дисертація «Підвищення ефективності компресорів газотурбінних двигунів шляхом їх аеродинамічного удосконалення на основі аналізу просторової форми течії» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 № 567 щодо кандидатських дисертацій, а її автор, Шелковський Михайло Юрійович, заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент  
професор кафедри турбінобудування  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»,  
доктор технічних наук,  
старший науковий співробітник

В.П. Суботович

