

ВІДГУК

офіційного опонента Аннопольської Ірини Євгеніївни
на дисертаційну роботу

Темченка Сергія Олександровича

«ОБЕРНЕНА АЕРОДИНАМІЧНА ЗАДАЧА ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО
ПРОЕКТУВАННЯ КІЛЬЦЕВИХ ДИФУЗОРНИХ КАНАЛІВ ТУРБОМАШИН»,

що подана на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Актуальність теми дисертації. Найважливішою задачею теперішнього часу є вирішення проблем енергозбереження. Для парових і газових енергетичних турбін, газотурбінних транспортних установок та авіаційних турбореактивних двигунів це означає підвищення економічності і надійності роботи всіх основних елементів проточної частини турбомашини, зокрема перехідних і вихідних кільцевих дифузорних каналів.

При достатньо високому рівні ККД турбомашин, досягнутому до теперішнього часу, підвищення ефективності можливе тільки за умов використання в задачах оптимального проектування проточних частин турбомашин нових методів розрахунку течії, які дозволяють знаходити нові нетрадиційні технічні рішення.

Саме тому тема запропонованого дисертаційного дослідження, що направлене на розв'язання задач, пов'язаних з підвищенням ефективності такого енергоємного устаткування, як турбомашини, відповідає сучасним вимогам і є безперечно актуальною.

Актуальність роботи підтверджується також тим, що вона тісно пов'язана з виконанням комплексу досліджень, проведених на кафедрі турбінобудування Національного технічного університету «Харківський політехнічний університет» в межах держбюджетних НДР МОН України: «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості профілів соплових і робочих лопаток парових турбін ТЕС і АЕС» (ДР № 0109U002388, 2009-2010 рр.), «Розрахункові дослідження аеродинамічної досконалості елементів проточних частин парових і газових турбін» (ДР № 0111U002267, 2011-2012 рр.) та «Розрахункові та експериментальні дослідження з метою створення дифузорного пристрою для натурних випробувань кільцевих решіток турбін на надзвукових режимах» (ДР № 0113U000430, 2013-2014 рр.).

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертації, їх достовірність і новизна, повнота їх викладу в опублікованих працях. У дисертаційній роботі наукові положення і висновки засновані на глибокому аналізі опублікованих робіт, виконаних дослідниками в різні роки, і одержаних в дисертації теоретичних і практичних результатах. Коректно поставлені задачі і задовільна відповідність результатів розрахункових досліджень достовірним експериментальним даним, які одержані у відомих дослідницьких лабораторіях, підтвердили адекватність розроблених математичних моделей, що дозволяють одночасно розв'язувати задачу оптимального проектування кільцевих каналів і визначати параметри

течії в середині каналу. Сформульовані задачі відповідають об'єкту, предмету, меті і методам дослідження.

До основних нових наукових положень представленої дисертаційної роботи правомірно віднести:

– вперше запропоновано чисельний метод, який дозволяє розв'язувати пряму та обернену аеродинамічні задачі для вісесиметричної течії в кільцевих каналах з єдиної методологічної позиції при однаковій точності результатів;

– вперше пряму та обернену аеродинамічні задачі для кільцевих дифузورних каналів розділено на задане число окремих підзадач, незалежних одна від одної, які можна розв'язувати в будь-якій послідовності або одночасно, що забезпечує можливість контролю форми будь-якої ділянки каналу, який проектується, і дозволяє значно скоротити час проектування, а окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, які не вимагають зберігання істотних обсягів інформації;

– розроблено якісно нову постановку складних прямих та обернених аеродинамічних задач, яка забезпечила можливість суттєвого розпаралелювання розрахункових процесів, і як наслідок – поточний контроль будь-яких окремих ділянок каналу, що проектується, наприклад щодо міцності і технологічності, та дозволила значно скоротити час розв'язання прямої і оберненої аеродинамічних задач та задачі оптимального проектування кільцевого дифузора. Незалежні окремі підзадачі розв'язуються методами нелінійного програмування, при використуванні яких не вимагається зберігати інформацію про історію процесу оптимізаційного пошуку;

– вперше на основі оберненої аеродинамічної задачі розроблено методику оптимального проектування безвідривних кільцевих дифузорних каналів із заданими ступенем розширення, радіальним і осьовим габаритами.

Математичний апарат, який використовується, дозволив здобувачу здійснити оптимальне проектування короткого дифузорного кільцевого каналу, осьовий габарит якого за умови прямолінійних меридіональних окреслень однозначно призвів би до відривного характеру течії у ньому. Цей результат є, поза сумнівом, науковою новизною, оскільки вперше теоретично визначено кількісні характеристики параметрів ядра потоку у дифузорі та пов'язану з ними геометрію меридіональних окреслень каналу, які забезпечили безвідривний характер течії.

Науково обгрунтовані результати та висновки, завершеність і логічна побудова роботи, дозволяють зробити висновок, що дисертаційна робота виконана на достатньому науково-технічному рівні.

Основні положення і результати досліджень за темою дисертації докладалися на 7 міжнародних та 3 всеукраїнських науково-технічних конференціях. Матеріали дисертації відображені в 14 наукових публікаціях, з них 7 – у наукових фахових виданнях України: 5 статей статей індексуються наукометричною базою Google Академія та мають h-індекс 3, 2 – у виданнях, що входять до наукометричної бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA), 7 – у матеріалах конференцій (1 входить до наукометричної бази Google Академія). В цих наукових публікаціях достатньо повно висловлені

наукові положення дисертаційної роботи.

Оцінка змісту дисертації та автореферату. Дисертаційна робота складається зі вступу, 5 розділів, висновку, списку використаних джерел інформації, 2 додатків. Повний обсяг дисертації складає 147 сторінок, серед них 36 рисунків за текстом і 2 рисунка на 2 окремих сторінках, 2 таблиці за текстом, списку використаних джерел інформації з 138 найменувань на 17 сторінках, 2 додатків на 2 сторінках.

У додатках представлені акти впровадження основних результатів роботи на підприємстві ПАТ «Турбоатом» і в навчальному процесі НТУ «ХПІ».

Дисертаційна робота є закінченою науково-дослідною роботою, яка викладена технічно грамотною мовою з використанням сучасної технічної термінології. Оформлення дисертації відповідає діючим вимогам нормативних документів.

У **вступі** викладено загальну характеристику роботи. Сформульовано і обгрунтовано мету та завдання досліджень, їх об'єкт, предмет і методи досліджень. Наведено наукову новизну роботи та практичне значення одержаних результатів, особистий внесок претендента, апробація роботи, публікації за темою дисертації. Структура вступу відповідає рекомендаціям нормативних документів.

У **першому розділі** широко представлено і достатньо глибоко опрацьовано інформацію, що стосується сучасного стану як питань розвитку методів проектування, аеродинамічного розрахунку і оптимізації кільцевих дифузорів турбомашин, так і питань постановки та методів розв'язання прямих та обернених аеродинамічних задач.

Висвітлено основні проблеми проектування кільцевих дифузорів турбомашини, створення їх аеродинамічно довершених форм. У число розглянутих методів побудови форми меридіональних окреслень каналів включено методи розв'язування прямої і оберненої аеродинамічних задач у двохвимірному, квазітрьохвимірному та трьохвимірному просторах. Відмічено, що сучасні CFD-програми можна розділити за типом аеродинамічних задач, які розв'язуються, тільки умовно, а саме: у них не реалізований підхід до розв'язання оберненої задачі, заснований на розв'язанні рівнянь газової динаміки за умови, що початковими даними є параметри потоку, а невідомими величинами – присутні в рівняннях геометричні параметри каналу.

Докладно охарактеризовані методи розв'язання обернених задач на основі інтегральних та диференціальних методів розрахунку примежового шару. Оскільки потік через реальний дифузорний канал турбомашини є тривимірним, нестационарним і в'язким, то обернену задачу за таких умов важко реалізувати, а іноді і неможливо. З цієї причини приймається ряд допущень, які дозволяють задачу зробити такою, що можна знайти розв'язок. Відмічено, що найширше використовуються два допущення: рух передбачається сталим і рідина вважається ідеальною. Відмічено, що відносно мала кількість робіт присвячена розробці методів не ітераційного, а безпосереднього розв'язання оберненої задачі для дифузорів в межах трьохвимірної течії.

Виконано аналіз, який дозволив здобувачу достатньо обґрунтовано зробити висновок про актуальність теми дисертаційних досліджень і сформулювати мету та задачі досліджень.

У **другому розділі** представлено розроблений здобувачем метод розв'язання прямої задачі для вільних ділянок осьового кільцевого каналу при заданому розподілі вздовж перерізу каналу кута закрутки потоку. Метод призначений для визначення параметрів робочого тіла за решітками осьової турбомашини. Вважається, що осьовий кільцевий канал складається з ділянок двох типів: вільних ділянок і ділянок, зайнятих деякими пристроями, здатними змінювати кути закрутки потоку – решітками лопаток. Розрахунок течії виконується в перерізі зазора за решіткою. Робоче тіло приймається нев'язким та таким, що стискується. Течія має вісь симетрії, стала, ізоентропна та безвідривна. Повні ентальпія, ентропія і показник ізоентропи залишаються постійними уздовж лінії течії. Система координат – нерухома циліндрична. Пряма аеродинамічна задача розв'язується на меридіональній площині і сформульована як пряма краєва задача аерогідродинаміки. Вимагається знайти функцію, що задовольняє в заданому торцевому перерізі зазору системі диференціальних рівнянь, яка описує рух і перетворення енергії робочого тіла, а на кореневій і периферійній межах зазору – заданим умовам. Система рівнянь включає рівняння збереження енергії, процесу, нерозривності і дві проекції рівняння кількості руху на радіальний і осьовий напрями. Замикаюче систему співвідношення – зміна кута закрутки потоку уздовж перерізу. Всі граничні умови задані геометричними – це координати, нахил і кривизна меридіональних окреслень зазору. Запропонована формула для обчислення безрозмірної функції течії і її похідних. Детально описано метод розв'язання прямої задачі. Виконано порівняння результатів розрахунку течії в зазорах за решітками повітряної турбіни з даними експериментальних досліджень.

У **третьому розділі** запропоновані постановки та метод розв'язання прямої аеродинамічної задачі для кільцевих каналів, які складаються із ділянок трьох типів: осьової, радіальної та такої, що забезпечує повертання потоку з осьового напрямку на радіальний напрям, а також оберненої аеродинамічної задачі для кільцевих осьових каналів.

Пряма і обернена аеродинамічні задачі поставлені як краєві задачі аерогідродинаміки для заданих перерізів каналу. Для обох задач течія вважається такою, що має вісь симетрії. Рух та перетворення енергії у каналах описується системою шести рівнянь, серед яких рівняння збереження кількості руху представлено трьома проекціями на координатні напрями.

Для прямої задачі на меридіональній площині зроблено перехід від осьового і радіального координатних напрямів до нових нерухомих ортогональних прямолінійних напрямів, які можуть бути повернутими на кут $0 \dots 90$ градусів по відношенню до координатних напрямів, а початок нових напрямів лежить на осьовому координатному напрямі, але його можна й змістити в радіальному напрямі.

Для оберненої задачі всі граничні умови задаються аеродинамічними – це функції, що описують геометрію однієї із ліній течії та зміну швидкості потоку

вздовж цієї лінії течії. Для переріза каналу граничні умови – дві системи з трьох нелінійних алгеброїчних рівнянь відносно невідомих геометричних характеристик меж каналу. У дисертації доведено, що ці системи розв'язуються аналітично. Завдяки цьому ітераційний алгоритм розв'язання обернутої задачі в окремому перерізі, на відміну від алгоритму розв'язання прямої задачі, не має внутрішніх ітераційних процесів.

Наведено порівняння результатів розв'язання прямої задачі для течії у кільцевому осьовому дифузори з результатами його експериментальних досліджень.

У **четвертому розділі** описано алгоритм розв'язання задачі оптимального проектування осекільцевого дифузора за умов обмеження на ступінь розширення, осьовий і радіальній габарити та результати розв'язання задачі оптимального проектування для короткого дифузора.

Для порівняння точності розв'язків прямої і оберненої задач на прикладі кільцевого дифузора з прямолінійними обводами розробленим методом була вирішена пряма задача у 51 розрахункового перерізу. В результаті в кожному перерізі визначені параметри потоку, геометрія середньої лінії течії та розподіл швидкості уздовж середньої лінії течії – граничні умови оберненої задачі. Далі для цих же перерізів була розв'язана обернена задача. Похибка визначення координат меж каналу за допомогою оберненої задачі за граничних умов, одержаних із прямої задачі, не перевищила 0,32%.

Багаторічні експериментальні дослідження конічних і кільцевих дифузоров з прямолінійною віссю довели, що безвідривна течія робочого тіла в цих пристроях можлива тільки при певних співвідношеннях локального кута розкриття та ступіня розширення каналу вздовж дифузора, так звана крива Кляйна. Головний результат досліджень четвертого розділу дисертації – це відповідь на запитання про кількісне визначення оптимального розподілу вздовж каналу локального кута розкриття та ступіня розширення.

Виконано оптимальне проектування безвідривного дифузора малої довжини з криволінійними меридіональними окресленнями, який має низький коефіцієнт повних втрат. Введення обмеження на величину еквівалентного кута розкриття у вихідному перерізі дифузорового каналу дозволило забезпечити у результаті оптимального пошуку відсутність відриву примежового шару і, як наслідок, низький рівень втрат з вихідною швидкістю.

У **п'ятому розділі** наведені результати верифікації CFD-програми щодо розрахунків кільцевих дифузоров на основі загальновизнаних експериментальних даних (кривої Кляйна) і, таким чином, доведено достовірність результатів розрахунків характеристик дифузоров за допомогою CFD-програми.

Виконано розрахункові дослідження за допомогою CFD-програми в діапазонах чисел Маха та кутів закрутки потоку на вході, які характерні для вихідних дифузоров компресоров та енергетичних газових турбін, для кільцевих дифузоров традиційної форми та розробленого здобувачем оптимального дифузора, що підтвердило високу ефективність оптимального дифузора.

Висновки. У роботі вісім висновків, вони узагальнюють висновки за розділами та підсумовують результати дослідження в цілому. Всі вони в логічному порядку показують творчий шлях здобувача і його найвдаліші успіхи. За об'ємом і структурою представлена дисертаційна робота відповідає встановленим вимогам.

Структура представлення матеріалу в авторефераті відповідає існуючим вимогам. Основні положення дисертації викладено в авторефераті логічно, чітко і ясно. Розбіжностей між суттю дисертації і автореферату не виявлено. Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

Зауваження щодо дисертаційної роботи

1. Для розробленого методу розв'язання прямої та оберненої аеродинамічних задач автором використовується безрозмірна функція течії, яка наведена в розділах 2 та 3 дисертаційної роботи. Вона дозволяє прогнозувати розподіл витрат у кожному розрахунковому перерізі. Але в дисертації не наведені приклади розподілу безрозмірної функції течії в розрахункових перетинах досліджених кільцевих каналах.

2. У дисертаційному дослідженні багато разів розв'язувалися прямі та обернені аеродинамічні задачі для кільцевих каналів. Проте, ніде не вказано похибок визначення витрат робочого тіла через розрахункові перерізи.

3. У четвертому розділі дисертації достатньо детально описана блок-схема методики оптимального проектування кільцевих каналів на основі оберненої задачі, та не наведено загальної характеристики використаного методу оптимізації полімодалних функцій.

4. В дисертаційній роботі проведена оптимізація дифузора зі ступенем розширення 2 і осьовим габаритом 0,5м. Хотілося б з'ясувати, чому автор обмежився таким осьовим габаритом і чи можливо отримати безвідривний дифузор з меншим осьовим габаритом.

5. При проведенні верифікації CFD програми, що використовувалась у розрахунках, основну увагу звернуто на дифузори з різними осьовими габаритами та кутами розкриття, які мають ступінь розширення 2. У той же час дифузори, що використовуються у турбомашинах мають більш широкий діапазон ступенів розширення. Слід би було додати розрахункові дослідження для інших дифузорів.

6. Розрахунковим шляхом розроблено безвідривний дифузор зі складною формою внутрішнього та зовнішнього обводів та низьким рівнем коефіцієнта повних втрат, тому можна рекомендувати здобувачеві продовжити роботу, виконавши експериментальні дослідження нового дифузора.

Вказані недоліки не впливають на загальну позитивну оцінку виконаної роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Темченка Сергія Олександровича «Обернена аеродинамічна задача для оптимального проектування кільцевих дифузорних каналів турбомашин» за своїм змістом відповідає паспорту спеціальності 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки. Дисертація є закінченою науково-дослідною роботою, в якій одержані нові науково-обґрунтовані теоретичні та практичні результати, що в сукупності є значущими для розвитку турбінобудування.

Дисертаційна робота відповідає вимогам п. 9, 11, 12 «Порядку присудження наукових ступенів і присвоєння вченого звання старшого наукового співробітника» щодо кандидатських дисертацій, а здобувач Темченко Сергій Олександрович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки.

Офіційний опонент
старший науковий співробітник
відділу загальнотехнічних
досліджень в енергетиці
Інституту проблем машинобудування
ім. А.М. Підгорного НАН України,
кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник

І.Є. Аннопольська

Підпис к.т.н., с.н.с. Аннопольської І.Є. засвідчую.

Вчений секретар
ІПМаш НАН України
к.т.н., с.н.с.



Н.М. Курська



Відомо надійшов 15.10.2015
Вчений секретар спец. Д 64.050.11 Фудун Юрій А.О.