

ВІДГУК

офіційного опонента Герасименка Володимира Петровича
на дисертаційну роботу
Темченка Сергія Олександровича
**«Обернена аеродинамічна задача для оптимального
проектування кільцевих дифузورних каналів турбомашин»**,
подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук
за спеціальністю 05.05.16 – турбомашини та турбоустановки

Актуальність теми

Широке застосування дифузорних каналів в турбомашинах різного призначення: транспортних газотурбінних двигунах (ГТД), парових і газових енергетичних установках та інших паро-газо-повітряних системах пояснюється деякими їх перевагами. У більшості випадків дифузори являють собою прості перетворювачі енергії в течіях з підвищенням тиску за рахунок пониження кінетичної енергії. Зокрема таке перетворення енергії у дифузорних вихідних пристроях ГТД і установок підвищує їхнє ККД за рахунок зменшення втрат кінетичної енергії вихідних газів. Розміщення дифузорних каналів за турбінами забезпечує зростання їхньої роботи на величину зменшення втрат згаданої кінетичної енергії, що відбувається шляхом перерозширення газів у турбіні за наявності за нею дифузорного каналу. Але з іншого боку позитивний градієнт тиску течії у дифузорних каналах, як відомо, може призводити до відривних явищ з пониженням коефіцієнту відновлення тиску. Для запобігання таких втрат повного тиску звичайно здійснюють оптимальне проектування дифузорів. Таким чином оптимальне проектування геометричних форм вихідних кільцевих дифузорів в турбомашинах шляхом розв'язання оберненої аеродинамічної задачі є актуальною проблемою. Окрім затурбінних вихідних патрубків така ж проблема існує для міжтурбінних перехідників в енергетичних ГТУ з вільною турбіною та авіаційних двоконтурних двигунів особливо з великими ступенями двоконтурності.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих в дисертаційній роботі Темченка Сергія Олександровича базується на аналізі літературних джерел за даною проблемою, кваліфікованій постановці

мети і задач дослідження, на використанні фундаментальних законів гідрогазодинаміки та деяких положень математичної фізики для розв'язання некоректних обернених задач, а також експериментальних методів дослідження газодинамічних характеристик турбін і їх елементів. Отримані розрахункові результати течії у перерізах кільцевих дифузорів порівнювалися з даними експериментальних і лабораторних досліджень, а CFD-програми піддавалися верифікації. Оптимізація здійснювалась застосуванням відомих математичних методів, що зарекомендували себе при розв'язанні багатопараметричних аеродинамічних задач з отримання оптимальних геометричних форм.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується коректністю постановок аеродинамічних задач, застосуванням перевірених розрахункових програмних комплексів та експериментальних методів зі стандартизованим обладнанням, а також задовільною збіжністю результатів розрахунку параметрів і характеристик течії у дифузорах з експериментальними даними.

До основних нових наукових результатів дисертації слід віднести наступне:

– вперше запропоновано метод розв'язання прямих і обернених (гібридних) аеродинамічних задач для вісесиметричної течії у кільцевих каналах міжтурбінних перехідників та вихідних пристроїв турбомашин, що має однакову точність в обох напрямках задачі;

– для кільцевих дифузорів пряму і обернену задачі вперше розділено на необхідне число окремих підзадач, що можуть розв'язуватися у будь-якій послідовності і одночасно, завдяки чому здійснюється послідовний контроль течії і форми каналу по ділянках, а тому спрощується процедура визначення оптимальної конструкції за формою дифузора чи перехідника зі скороченням часу проектування;

– оптимізація проектування удосконалена розв'язанням оберненої задачі шляхом запобігання відриву течії у кільцевих дифузорних каналах з потрібним загальним ступенем розширення дифузора та обмеженими радіальними і осьовими габаритами.

Значимість отриманих результатів для науки і практичного використання.

Одержані результати мають практичне значення, а саме: розроблений метод розв'язання прямої і оберненої задач для кільцевих дифузорові доведений до практичної реалізації (методики).

Програмний комплекс передбачає можливість оптимального проектування з запобіганням відриву течії у дифузоровому кільцевому міжтурбінному переходнику.

Результати досліджень запроваджені ПАТ «Турбоатом», а також у навчальному процесі НТУ «ХП».

Повнота викладення результатів досліджень в опублікованих працях

Основні матеріали дисертаційної роботи висвітлені у 14 публікаціях, з яких 7 тез на науково-технічних конференціях та 7 статей у наукових фахових виданнях, що входять до наукометричних баз даних.

Оцінка змісту дисертації та автореферату

Дисертаційна робота Темченка Сергія Олександровича складається із вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел інформації та 2 додатків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі досліджень, наукову новизну та практичне значення одержаних результатів, наведено загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** зроблено огляд та аналіз опублікованих у літературі методів аеродинамічних розрахунків внутрішніх аеродинамічних гібридних задач в турбомашиних та методів оптимального проектування елементів їх проточних частин, зокрема у кільцевих каналах міжтурбінних переходників та затурбінних вихідних патрубків, що визначає особливості організації обчислювального процесу оптимального проектування як розв'язання оберненої аеродинамічної задачі, у якій знаходять геометричні форми каналів для реалізації розрахункової течії.

У **другому розділі** поставлена пряма краєва математична вісесиметрична задача аеродинаміки кільцевого каналу у вигляді системи диференціальних рівнянь та граничних умов. Метод розв'язання розроблено для аналітичних функцій дійсних змінних, що звичайно розповсюджені у задачах нелінійного програмування. У прямій задачі граничні умови задані двома аналітичними функціями, що описують

зміни радіусів у осьовому напрямку кільцевого каналу, що обмежують розрахункову область течії. Проточна частина турбомашини розглядається як осьовий кільцевий канал, що складається з ділянок двох типів: вільних ділянок (зазорів) і ділянок, зайнятих решітками лопаток. Розрахунок течії виконується в торцевих перерізах зазорів. Метод розроблено для проектування багатоступінчатих відсіків турбомашин спільно з перехідними або вихідними кільцевими дифузюрними пристроями.

При цьому вважається робоча рідина – досконалий та ідеальний газ за відсутності в'язкості та енергообміну з твердими тілами – лопатками, а саме: повна ентальпія, ентропія і коефіцієнт ізоентропи уздовж лінії течії є незмінними, а течія сталою у часі. Для опису руху вибрана нерухома циліндрична система координат. Система рівнянь при цьому складається для довільної лінії течії у вигляді законів: збереження енергії – незмінності повної ентальпії; процес ізоентропійний для досконалого та ідеального газу; рівняння нерозривності; збереження кількості руху у вигляді трьох проекцій на координатні осі. Замість звичайної у інших публікаціях безрозмірної функції течії Ψ запропоновано функцію масової витрати $G(z, r) = m \Psi(z, r)$. Розв'язання задачі здійснюють у меридіональній площині кільцевого дифузора з двома координатами z – подовжньою і r – радіальною. Функція $\Psi(z, r)$ безперервна, двічі диференціюється та змінюється в інтервалі $[0, 1]$. Тобто ця функція визначає розподіл масової витрати уздовж довільної кривої, яка сполучає будь яку точку на внутрішньому (втулочному) радіусі R_H в меридіональному перерізі каналу з будь-якою точкою на зовнішньому радіусі R_T :

$$\Psi(z, r) = \frac{\bar{F}(z, r) + x(z, r) \bar{F}(z, r)}{1 + x(z, r) \bar{F}(z, r)}, \text{ де відносна площа перерізу шару дорівнює}$$

$$\bar{F}(z, r) = (r^2 - R_H^2) / (R_T^2 - R_H^2) \text{ в інтервалі } 0 \leq \bar{F}(z, r) \leq 1.$$

Подібні перетворення уже раніше відомі в турбінобудуванні.

Проекції рівнянь кількості руху у осьовому і радіальному напрямках зведені до одного рівняння, яке є однією із форм радіальної рівноваги. Введено замикаюче співвідношення – розподіл вздовж переріза кута закрутки потоку, що дозволило звести систему шести вихідних рівнянь, вище зазначеної системи рівнянь (законів), до еквівалентної системи двох рівнянь.

У другому розділі додатково також здійснене теоретичне обґрунтування

можливості викладеного підходу для розв'язання прямої аеродинамічної задачі шляхом аналітичного дослідження. Зокрема на прикладі розв'язання задачі у формі Коші з застосуванням нелінійного програмування.

Прийнятна точність розрахункових результатів підтверджувалася їх зіставленням з експериментальними даними випробувань осьової повітряної турбіни на кафедрі турбінобудування інших наукових працівників.

У третьому розділі розглянуто постановку та шляхи розв'язання прямої аеродинамічної задачі для кільцевих осерадіальних каналів, а також оберненої аеродинамічної задачі для кільцевих осьових каналів, виконано порівняння результатів розрахунків течії у вихідному дифузорі компресора з результатами лабораторних експериментальних досліджень цього пристрою, наведеними у одному із джерел інформації.

Для розв'язання прямої задачі у осерадіальних дифузорах запропоновано перетворення систем координат, що враховують поворот каналу із осьового напрямку у радіальний у меридіональній площині. Розроблено розрахункову схему, відповідно до якої граничні умови прямої задачі задаються у повернутій системі координат, а розрахунок течії виконується у нерухомій циліндричній системі координат. Поворот каналу із осьового напрямку у радіальний призводить і до повороту течії від осьового напрямку до радіального в меридіональній площині, що звичайно викликає додаткові інерційні сили на течію через такий поворот. У цьому випадку радіальну складову цих сил слід враховувати додатково до відцентрових сил, що виникають через наявність колової швидкості течії C_u , а саме C_u^2/r . Тому використовується закон кількості руху в трьох проекціях А вибір рівняння $C_u \cdot r = const$, що справедливе для циліндричної системи координат (z, r, φ) у енергоізольованому процесі згідно закону збереження моменту кількості руху, є обґрунтованим. Запропоноване перетворення нерухомої циліндричної системи координат r і z у нерухому повернуту ортогональну прямолінійну систему координат m і n не є переходом до природної системи координат, коли додатково необхідно враховувати радіальну складову інерційних сил у напрямку r через поворот течії в меридіональній площині із осьового до радіального напрямку. Тобто рівняння законів збереження кількості руху, що записані для абсолютної системи координат з енергоізольованим

процесом, потребують перетворень для змішаної системи координат, де необхідно враховувати не лише зв'язок між новими (природними) і старими (циліндричними) координатами, а і швидкість зміни цих координат (переносну швидкість), одночасно із існуванням парадоксу Даламбера, що має місце при перетвореннях систем координат без урахування сил в'язкості.

У оберненій задачі необхідно визначити геометричні форми внутрішньої і зовнішньої стінок меридіонального перерізу, що забезпечують задані граничні умови – параметри течії у цьому перерізі у вигляді подовжньої лінії течії та швидкості уздовж цієї лінії. Цікавою пропозицією можна вважати схему розв'язання оберненої аеродинамічної задачі для осьового кільцевого каналу, як двох незалежних підзадач у вигляді задаваної множини задач Коші з запропонованою цільовою функцією. Обернена задача не лише розділена на дві незалежні підзадачі, а й кожна підзадача складається із незалежних одна від одної окремих задач (у перерізах $z = const$), які можна розв'язувати у будь-якій послідовності, незважаючи на належність до першої чи другої підзадач, або одночасно.

Тестова перевірка результатів розрахунків з експериментальними даними випробувань конічного дифузора компресора підтвердила прийнятну точність розрахунків зазначеним способом.

У четвертому розділі викладено методику оптимального проектування дифузорних каналів на основі розв'язання оберненої аеродинамічної задачі та здійснено оптимальне проектування осьового кільцевого дифузора за умов обмеження габаритів дифузора. Оптимізація базувалася на принципі «керованої» дифузорності, або на використанні цільової функції задачі – мінімального коефіцієнту повних втрат у дифузорі. Втрати оцінюються на основі зміни величини локального еквівалентного кута розширення, який змінювався вздовж дифузора за принципом «керованої» дифузорності. Спроектовано безвідривний короткий дифузор з криволінійними окресленнями меридіонального перерізу, який має низький коефіцієнт внутрішніх втрат завдяки оптимальному характеру подовжньої зміни локального ступеню розширення, а отже і локального еквівалентного кута розкриття. Обмеження задачі оптимізації на величину еквівалентного кута

розкриття у вихідному перерізі дифузора дозволило забезпечити відсутність відриву течії при низькому рівні втрат з вихідною швидкістю.

У п'ятому розділі наведені результати верифікації CFD-програм розв'язання прямих задач для кільцевих дифузоров та зіставлення досліджених характеристик розробленого оптимального кільцевого дифузора у широкому діапазоні режимів роботи з загальновідомими прикладами експериментальних даних для дифузорних каналів. Установлено, що при осьовому вході потоку в дифузори коефіцієнти повних витрат безвідривного дифузора довжиною $l=1,0$ м, передвідривного з $l=0,65$ м і оптимального з $l=0,5$ м майже не відрізняються між собою, але менші на 16% відносно дифузора-прототипа довжиною $l=0,5$ м. Тоді як при наявності закрутки течії на вході з кутом 40 град. коефіцієнт повних втрат оптимального дифузора в 1,4 рази менший, ніж передвідривного дифузора і майже у 2 рази менший ніж у дифузора-прототипу. Числа Маха течії в діапазоні $M=0,1 \dots 0,45$ майже не впливають на коефіцієнт повних втрат оптимального дифузора за компресорами та газовими турбінами.

Таким чином, запропонований метод розв'язання прямих і обернених задач для оптимального проектування кільцевих дифузоров перехідних міжтурбінних патрубків і затурбінних вихідних пристроїв турбомашин дозволяє з задовільною точністю розраховувати як форму течії у кільцевих дифузорах для прямої аеродинамічної задачі, так і визначати оптимальні геометричні розміри кільцевих дифузоров для оберненої аеродинамічної задачі.

Автореферат повністю відповідає змісту дисертації.

По дисертаційній роботі можна зробити наступні зауваження:

1. Зважаючи на широке використання дифузоров у різних технічних виробках, а отже і наявність значної кількості друкованих праць за різними напрямками досліджень дифузоров у дисертаційній роботі обмежений огляд працями, лише пов'язаними з кільцевими дифузорними каналами, що звужує уявлення про можливі достатньо складні процеси у дифузорних каналах і, як наслідок, в роботі не ураховані деякі явища, а саме розвиток зриву течії у тому числі за нестационарних умов, які відбуваються через наявність лопаткових вінців компресорів і турбін на вході в кільцевий дифузор.

2. Важливим напрямком досліджень дифузорів, якому також присвячено велику кількість опублікованих праць, є розробка критеріїв дифузорності за зривом течії міжлопаткових компресорних решіток та лопаткових вінців, у яких підтверджений тривимірний характер зривних явищ. Серед цих праць висвітлені умови виникнення обертового зриву рухомих і нерухомих лопаткових вінців та навіть у конусних дифузорах, що також сприяє розвитку наших уявлень про нестационарні зривні процеси у дифузорних каналах. А тому з урахуванням тривимірності та нестационарності зривних явищ використання у задачі оптимізації локального еквівалентного кута розширення дифузора за методикою А.Ш. Дорфмана, як критерія оцінювання коефіцієнта повних втрат в дифузорі та зриву течії, особливо за наявності закрутки потоку, потребує додаткового обґрунтування у дисертаційній роботі.

3. Формули (1) в авторефераті та (2.1) у дисертації не являють собою рівняння збереження енергії, а визначають поняття повної ентальпії для загальмованої течії, яка у випадку енергоізолюваного процесу залишається незмінною.

4. Наявність у дисертації експериментальних досліджень потребує оцінювання точності вимірювань для висновків з перевірки адекватності розрахункових моделей.

5. Обмеження розрахункових досліджень з припущенням нев'язкого (ідеального) робочого тіла потребує виділення в оцінюванні похибки результатів за такого припущення.

6. У авторефераті і дисертації є не виправлені друкарські помилки: у авторефераті – на сторінці 5 (17 строчка зверху) у слові «передотривним»; на сторінці 7 (7 строчка зверху) у словах «циліндрова» і «окружний»; на сторінці 8 (2 строчка зверху) – « $0 \leq F(\theta, z) \leq 1$ »; на сторінці 10 (12 строчка знизу) – «за принципом критерію методу найменших квадратів».

7. В дисертації – на сторінці 7 (3 строчка зверху) пропущений прийменник «особенности течения кольцевых межвенцовых осевых зазоров»; на сторінці 25 (остання строчка) неправильне закінчення у слові «к двумерным»; на сторінці 98 (10 строчка зверху) зайвий прийменник «в».

Зроблені зауваження не знижують загальної цінності одержаних у дисертації наукових результатів.

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 завершеною науково-дослідною роботою, яка розв'язує важливу наукову задачу, виконана на високому науково-технічному рівні, відрізняється оригінальністю формулювання окремих проблем та їх вирішенням при оптимальному проектуванні кільцевих дифузорів міжтурбінних перехідників та газотурбінних осерадіальних патрубків. Робота являє собою подальший розвиток розв'язання прямих, обернених та гібридних аеродинамічних задач турбомашин.

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

Офіційний опонент

професор кафедри «Теорії авіаційних двигунів»

Національного аерокосмічного університету

ім. М.Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

доктор технічних наук, професор

Герасименко В.П.

Підпис Герасименка В.П. підтверджую

Вчений секретар Ради університету

«ХАІ», професор

Цепляєва Т.П.



Відомо надійшов
Вчений секретар спец.