

Міністерство освіти і науки України  
Запорізький національний технічний університет

МОРГУН СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 539.3

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКТИВНО  
НЕОДНОРІДНИХ ЛОПАТОК ТУРБОМАШИН ПРИ ЇХ ВІБРАЦІЯХ

01.02.04 – Механіка деформівного твердого тіла

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Запоріжжя – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор **Каіров Олексій Сергійович**, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, професор кафедри інженерної механіки та технології машинобудування.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор **Воробйов Юрій Сергійович**, Інститут проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України, завідувач відділу нестационарних механічних процесів

доктор технічних наук, професор **Дзюба Анатолій Петрович**, Дніпропетровський національний університет ім. Олеса Гончара, завідувач кафедри обчислювальної механіки та міцності конструкцій

Захист відбудеться «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 17.052.01 у Запорізькому національному технічному університеті (69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ауд. 153).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Запорізького національного технічного університету (69063, м. Запоріжжя, вул. Жуковського, 64).

Автореферат розісланий «\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



О.А. Мітєєв

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Конструкції лопаткового апарата турбін та компресорів, піддаванні інтенсивним динамічним навантаженням, широко використовуються в газо- та паротурбобудуванні і відносяться до дуже відповідальних та високонавантажених вузлів турбомашин. Забезпечення віброміцності і високої надійності робочих лопаток з урахуванням вимог щодо зниження їх матеріалоємності має важливе значення для науки та народного господарства України. Тому дослідження коливань та напружено-деформованого стану лопаткового апарату займає важливе місце у вивченні динамічних процесів в деформованих системах протокової частини турбомашин.

В більшості випадків лопатковий апарат має неоднорідну структуру (наявність бандажних полиць, кутів закрутки, охолоджуючих отворів та каналів, стінки яких мають змінну товщину та кут нахилу до осі лопатки). Всі ці конструктивні особливості утворюють інерційну неоднорідність лопаток, викликають локальні збурення, значний перерозподіл полів напружень та впливають на динамічні характеристики та напружено-деформований стан лопаток. Врахування вказаних факторів суттєво ускладнює математичні моделі динамічної поведінки, потребує розробки нових ефективних методів розрахунку основних динамічних характеристик та пов'язано з подальшими дослідженнями власних і вимушених коливань, а також напружено-деформованого стану робочих лопаток турбомашин.

В зв'язку з усім вищезазначеним, задачі визначення напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин при їх вібраціях являють собою **актуальну задачу механіки деформівного твердого тіла**, яка має важливе наукове та господарське значення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана відповідно до плану наукових досліджень, проведених у Національному університеті кораблебудування ім. адм. Макарова за держбюджетними темами «Розробка методу експериментального визначення напружено-деформованого стану елементів високоефективних газотурбінних двигунів при резонансній вібрації» (номер державної реєстрації 0110U001323) та «Розробка математичних моделей і методів дослідження коливань та напружено-деформованого стану лопаткових та оболонкових елементів газотурбінних двигунів з урахуванням конструктивних та технологічних факторів» (номер державної реєстрації 0114U002009).

Дисертаційна робота є складовою частиною проведених за цими темами досліджень.

Тему дисертації затверджено на засіданні Вченої ради Національного університету кораблебудування ім. адм. Макарова 12 листопада 2010 року (протокол № 8) та скориговано 01 вересня 2014 року (протокол №7).

**Мета і задачі дослідження.** Мета роботи полягає у встановленні закономірностей впливу конструктивних неоднорідностей (наявність змінної товщини та закрутки пера лопатки, бандажних полиць різної конструкції, охолоджуючих каналів та отворів) на формування спектру власних частот і форм коливань, а також визначення динамічних напружень в охолоджуваних лопатках турбомашин з використанням розроблених тривимірних розрахункових моделей.

Реалізація поставленої мети роботи визначає такі **задачі дослідження**:

- постановка задач НДС, а також вільних та вимушених коливань складних конструктивно неоднорідних охолоджуваних лопаток турбомашин з використанням метода скінчених елементів;

- розробка розрахункових моделей і методик розв’язання задач аналізу спектру власних частот і форм коливань, а також визначення рівня динамічних напружень в охолоджуваних лопатках турбомашин, що дозволяють враховувати їх складну геометрію;

- підвищення точності дослідження напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин з використанням удосконалених чисельних методів, враховуючи нерівномірність розподілу інерційних, жорсткісних та геометричних властивостей лопаток;

- встановлення закономірностей впливу конструктивних неоднорідностей на НДС охолоджуваних лопаток турбомашин для різних типів граничних умов, чисельне дослідження збіжності отриманих рішень та адекватності розроблених математичних моделей;

- отримання експериментальних результатів, що дають змогу підтвердити адекватність та достовірність розробленої удосконаленої математичної моделі та розробити практичні рекомендації із забезпечення підвищення вібраційної міцності об’єктів дослідження.

*Об’єкт дослідження* – процеси зміни напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних лопаток турбомашин при їх вібраціях.

*Предмет дослідження* – вплив конструктивних неоднорідностей охолоджуваних лопаток турбомашин на їх напружено-деформований стан.

**Методи досліджень.** Для побудови математичної моделі динамічної поведінки охолоджуваних лопаток використовувалися методи математичного моделювання, що ґрунтуються на використанні методу скінчених елементів у тривимірній постановці та варіаційного принципу Лагранжа. Експериментальні дослідження виконано з використанням високоефективних методів голографічної інтерферометрії та тензометрування на спеціальних вібростендах. В роботі також використовувалися результати вітчизняних та

закордонних дослідників стосовно теоретичного та експериментального визначення основних динамічних характеристик елементів лопаткового апарату турбомашин.

**Наукова новизна результатів дисертаційної роботи.** У дисертації вирішена важлива наукова задача комплексного дослідження динамічної поведінки конструктивно-неоднорідних охолоджуваних робочих лопаток турбомашин.

Новизна роботи і отриманих результатів полягає в наступному:

- в розробці уточненої математичної моделі охолоджуваних лопаток турбомашин на основі методу скінчених елементів у тривимірній постановці (МСЕ), що повною мірою враховує конструктивні особливості пера та охолоджуючої порожнини лопатки;

- в підвищенні точності дослідження напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток на основі МСЕ, враховуючи нерівномірності розподілу їх інерційних, жорсткісних та геометричних характеристик;

- в встановленні розподілу полів динамічних напружень в лопатках, зумовлених наявністю конструктивно неоднорідної системи охолоджуючих каналів та отворів,

- в розробці уточнених методик експериментального дослідження методом голографічної інтерферометрії частот і форм коливань, а також напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин методом тензометрування;

- в отриманні експериментальних результатів, які характеризують вплив конструктивних неоднорідностей на напружено-деформований стан досліджуваних лопаток.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в вирішенні практичних задач розрахунку лопаткового апарату турбомашин та доведенні рішень до конкретних чисельних результатів в широкому діапазоні геометричних, фізико-механічних та амплітудно-частотних параметрів конструкцій; у отриманні інформації кількісного та якісного характеру, яка дає можливість оцінити межі застосування результатів, отриманих з використанням прикладних теорій і розроблених методик.

Розроблені розрахункові методики та програми використовуються в ДП НВКГ «Зоря» – «Машпроект» (м. Миколаїв) та в ВАТ «УкрНДІ ТСМ» (м. Миколаїв) при розрахунках основних динамічних характеристик та визначенні оптимальних геометричних і конструктивних параметрів лопаткового апарату газотурбінних двигунів. Це дозволило підвищити якість проектування та надійність конструкцій, скоротити витрати на виконання конструкторських та пошукових експериментальних робіт.

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні положення й результати дисертаційної роботи отримані здобувачем самостійно та опубліковані в роботах [1 – 18].

У наукових працях, опублікованих у співавторстві, з питань, що стосуються теми дослідження, здобувачу належать: у роботах [2, 5, 9, 14, 15, 18] – постановка задач, математичне моделювання коливань та динамічної поведінки конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин, методи визначення їх основних динамічних характеристик та узагальнення чисельних результатів досліджень. У роботах [3, 6, 7, 8, 13, 16, 17] здобувачеві належить аналіз отриманих результатів досліджень власних коливань робочих лопаток турбомашин, постановка і вирішення задач про вимушені коливання та напружено-деформований стан вінців робочих лопаток турбомашин, дослідження впливу різних конструктивних особливостей пера охолоджуваних лопаток на їх напружено-деформований стан. У роботах [1, 4, 11, 12] – розробка методики проведення експерименту та аналіз отриманих результатів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на: II Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Україна, Ялта, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко, 2010); XVI Міжнародному симпозиумі «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» ім. А. Г. Горшкова (Російська федерація, Москва, МАІ, 2010); Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Україна, Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2011); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми прикладної механіки та міцності конструкцій» (Україна, Запоріжжя, Інститут механіки ім. С.П. Тимошенко, 2012); II Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Україна, Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2012); V Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення» (Україна, Первомайськ, Первомайський політехнічний інститут Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2013); IV Міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивна техніка, технологія і інженерна освіта» (Україна, Севастополь, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», 2013), XVIII Міжнародному конгресі двигунобудівників (Україна, Харків – Рибаче, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», 2013), VI Міжнародній науково-технічній конференції «Суднова енергетика: стан та проблеми» (Україна, Миколаїв, Національний університет

кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2013); V Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми динаміки та міцності в турбомашинобудуванні» (Україна, Київ, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренко НАН України, 2014); III Міжнародній науково-технічній конференції «Актуальні проблеми інженерної механіки» (Україна, Миколаїв, Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2014); Міжнародній науково-технічній конференції «Сучасний стан та проблеми двигунобудування» (Укрвіна, Миколаїв, національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, 2014).

**Публікації.** Основні результати за темою дисертації викладено в 18 опублікованих роботах – 9 статтях у провідних фахових виданнях [1 – 9], 4 з яких включено до міжнародних науко метричних баз даних [6 – 9], та 9 тезах доповідей і збірниках праць наукових конференцій [10 – 18].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертації складає 157 сторінок друкованого тексту, в тому числі основного тексту – 107 сторінок, 25 ілюстрацій, 5 таблиць, 9 додатків на 48 сторінках; список використаних джерел складається з 101 найменування на 10 сторінках.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність теми дослідження, формулюються мета та завдання роботи, визначаються об'єкт, предмет та методи досліджень, висвітлюються наукова новизна та практичне значення отриманих результатів, а також особистий внесок автора в роботах, виконаних у співавторстві, наводиться апробація результатів дисертації та кількість публікацій, виконаних за темою дисертаційної роботи.

В **першому розділі** наведено аналітичний огляд публікацій за иеомою дисертації, а саме: існуючих засобів моделювання лопаткового апарату турбомашин, результатів дослідження та засобів урахування різних видів розсіювання енергії під час коливань робочих лопаток турбомашин, а також існуючих теоретичних та експериментальних методів для дослідження амплітуд та частот вимушених коливань лопаток та їхнього напружено-деформованого стану. До теперішнього часу лопатки розглядалися або в якості тонких пластини чи оболонки, або в якості тонкостінних, природно-закручених стрижнів, що виконують згинні, крутні або згинно-крутні коливання. Цьому підходу присвячено роботи Б.Ф. Шорра, І.А. Биргера, А.А. Іноземцева, Г.Ю. Джанелідзе, В.К. Дондошанського, В.В. Новожилова,

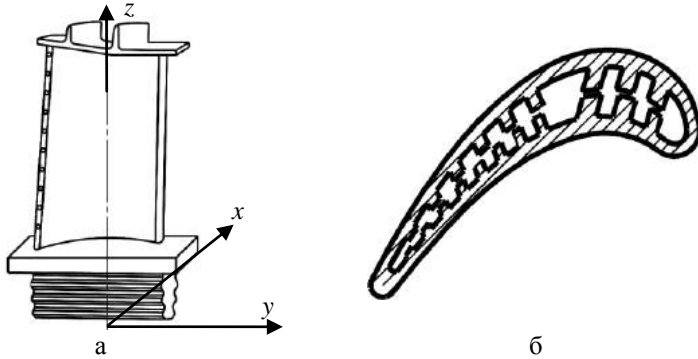
А.П. Філіппова, А.Г. Костюка та інших. Більш широкі можливості для моделювання як окремих лопаток, так і їх систем, надає підхід, що ґрунтується на методі скінчених елементів (МСЕ). Основні положення цього методу викладені в роботах Ю.С. Воробйова, О. Зенкевича, Б. Айронса, С. Ахмада, В.А. Постнова, С.З. Копелева та інших. В роботах Ю.С. Воробйова, М. Олсона, Г. Ліндберга, С.І. Богомоллова, С.А. В'юнова, А.П. Зіньковського, Л.Б. Гецова, А.В. Шереметева, С.Б. Кулішова, А.Н. Скрицького, D.J. Ewins, J.S. Rao, S. Janeki, R. Rzadkowski розглянуто питання моделювання робочих лопаток на основі різних типів скінчених елементів. Наголошується, що якісно новим етапом в розрахунку та проектуванні елементів лопаткового апарату турбомашин стала можливість розробки та використання сімейства криволінійних параметричних елементів, що дають змогу моделювати об'єкти дуже складної геометрії. Вивчення явища розсіювання енергії при коливаннях механічних систем має велике практичне значення, тому що демпфірування зменшує рівень динамічних напруг. Питанням дослідження демпфірування в системах робочих лопаток та розробкам методики розрахунку його параметрів для найбільш розповсюджених в турбобудуванні типів хвостовиків та бандажних полиць присвячені роботи Р.Л. Зайдельмана, С.А. В'юнова, С.З. Копелева, В.В. Матвєєва, Г.С. Самойловича, К.Н. Боришанського, А.Г. Костюка та інших. Розробці методів розрахунку та дослідження вимушених коливань та напружено-деформованого стану робочих лопаток турбоагрегатів присвячені роботи Ю.С. Воробйова, А.Г. Костюка, Н.Г. Медведева, Г.С. Самойловича, К.Н. Боришанського, А.П. Зіньковського та інших. Експериментальне визначення частот та форм коливань лопаток турбомашин представлено в літературі на основі праць А.А. Яковлева, В.А. Фрідмана, Н.Н. Давиденко, В.М. Гріна, В.В. Москвітїна та інших.

На базі виконаного аналізу робіт обґрунтована необхідність проведення досліджень в обраній області механіки деформівного твердого тіла, сформульовані наукова задача та основні задачі дослідження. Наукова задача поставлена вперше і відповідає пріоритетному напрямку наукових досліджень Міністерства освіти і науки України.

**Другий розділ** присвячено розгляду основних розрішуючих рівнянь, що дозволяють побудувати узагальнені математичні моделі коливань та напружено-деформованого стану лопаток турбомашин. Нижче на рис. 1 зображено тривимірну модель робочої охолоджуваної лопатки турбіни в декартовій системі координат та її поперечний перетин.

Виходячи з того, що вирішення поставлених задач дослідження буде проводитися методом скінчених елементів, узагальнене рівняння руху лопаток при коливаннях одержується за допомогою варіаційного принципу Лагранжа (1):





а – тривимірна модель охолоджуваної лопатки турбіни; б – поперечний перетин лопатки

Рисунок 1 – Робоча лопатка турбіни в декартовій системі координат.

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) = 0 \quad (1)$$

$$i = (1, \dots, n),$$

де  $L = \Pi - T$  – функція Лагранжа;

$\Pi$  – потенційна енергія деформації кінцевого елемента;

$T$  – кінетична енергія коливань елемента;

$q_i$  – узагальнена координата  $i$ -го вузла;

$n$  – число вузлів елемента.

Потенційна енергія деформації скінченного елемента ( $\Pi$ ):

$$\Pi = \frac{1}{2} \iiint_V \{\varepsilon\}^T D_\sigma \{\varepsilon\} dV = \frac{1}{2} \iiint_V [B]^T D [B] dV = \frac{1}{2} (\{\delta\}^T [K] \{\delta\}), \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – матриця деформацій скінченного елемента ( $\{\varepsilon\} = [B] \{\delta\}$ );

$[B]$  – матриця градієнтів елемента ( $[B] = D_\varepsilon [N]$ );

$[N]$  – матриця функцій форми (положення вузлів) елемента;

$D_\sigma$  – диференційний оператор;

$\{\delta\}$  – вектор узагальнених переміщень вузлів елемента;

$D$  – матриця пружності.

$[K]$  – матриця жорсткості елемента;

$V$  – об'єм елемента.

Кінетична енергія ( $T$ ) визначається так (3):

$$T = \frac{1}{2} \iiint_V \rho \{\delta\}^T [B]^T [N]^T [B][N] \{\delta\} dV = \frac{1}{2} (\{\delta\}^T [M] \{\delta\}), \quad (3)$$

де  $\rho$  – густина матеріалу лопатки;

$[M]$  – матриця мас скінченного елемента.

Матриця напружень кінцевого елемента має вигляд (4):

$$\{\sigma\} = D(\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_0\}), \quad (4)$$

де  $\varepsilon_0$  – матриця теплових деформацій розглядаємого скінченного елемента ( $\{\varepsilon_0\} = \{\alpha^T T^e \ \alpha^T T^e \ \alpha^T T^e \ 0 \ 0 \ 0\}^T$ );

$\alpha^T$  – коефіцієнт температурного розширення матеріалу;

$T^e$  – температура матеріалу в межах елемента.

У **третьому розділі** досліджуються вільні коливання робочих лопаток турбомашин. Розглянуто питання побудови математичної моделі та алгоритму розрахунку частот і форм коливань зазначених вище конструкцій. Моделювання ведеться за допомогою тривимірних скінчених елементів. Для побудови уточненої математичної моделі коливань лопаток розроблено спеціальний суперпараметричний криволінійний скінчений елемент, що має вісім вузлів на середній поверхні (по п'ять ступенів вільності в кожному вузлі). Він має властивості як криволінійного оболонкового елемента (моделювання пера лопатки), так і криволінійного перехідного (моделювання переходів з пера в бандажну полицю та в хвостовик лопатки). Тривимірна модель отримується по правилам методу скінчених елементів з моделей складових частин, таких як перо, бандажна полиця або демпферний зв'язок та хвостовик. Рівняння власних коливань всієї моделі з використанням формул (1 – 3) можуть бути записані наступним чином (5):

$$[M_{IJ}] \{\ddot{\delta}_I\} + [K_{IJ}] \{\delta_I\} = 0 \quad (5)$$

$$(I, J = 1, \dots, N),$$

де  $N$  – число ступенів вільності моделі.

Частотне рівняння має вигляд (6):

$$[K_{IJ}] a_I - f^2 [M_{IJ}] a_I = 0 \quad (6)$$

де  $f$  – частота вільних коливань лопатки.

$a_I$  – амплітуди вільних коливань моделі лопатки ;

Рівняння (6) являє собою так звану узагальнену проблему власних значень, яка може бути зведена до визначення власних значень системи виду (7):

$$[A]x - \lambda[B]x = 0 \quad (7)$$

де  $[A]$  та  $[B]$  – симетричні матриці.

Чисельний алгоритм розв’язання даної задачі ґрунтується на використанні модифікованого для випадку стрічкових матриць методу Холецького та методу Хаусхольдера (8):

$$[B] = [L^{-1}][M][L^{-1}]^T; [A] = [K] = [L][L]^T \quad (8)$$

де  $[L]$  – нижня трикутна матриця з додатною діагоналлю в розкладі Холецького.

Для обґрунтування вірогідності і точності одержаних результатів побудований чисельний алгоритм відпрацьовувався на тестових задачах і досліджувався на практичну збіжність. Виконано співставлення частот коливань робочих лопаток компресора та турбіни, отриманих на основі розробленого алгоритму, з результатами розрахунку з використанням ліцензійного пакету розрахунково-прикладних програм ANSYS, наданого здобувачу відповідно до угоди Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова з ЗАТ “Cadfem-CIS” від 15.10.2010р, та експериментальними даними. Також проведено відпрацювання практичної збіжності отриманих чисельних результатів.

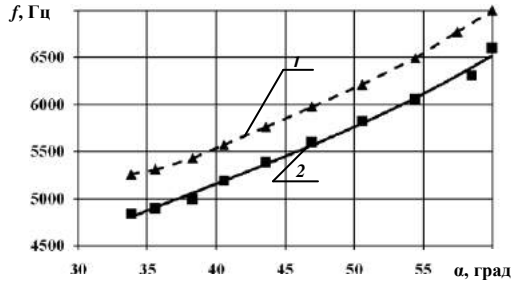
Виконано дослідження впливу геометричних параметрів лопаток, фізико-механічних властивостей матеріалу та температури газового потоку на частоту їх власних коливань.

Характер зміни частоти власних коливань охолоджуваної лопатки турбіни в залежності від діаметра охолоджуючих отворів по вихідній кромці вказано нижче. З аналізу табл. 1 зрозуміло, що зі зростанням діаметра охолоджуючих отворів загальна жорсткість всього пера лопатки зменшується, і, як наслідок, знижується і частота власних коливань конструктивно неоднорідної охолоджуваної робочої лопатки турбіни.

Таблиця 1 – Залежність частот коливань охолоджуваної лопатки турбіни від діаметра охолоджуючих отворів по вихідній кромці  $d$

Діаметр отворів $d$ , мм	Частота коливань $f$ , Гц	
	Розрахункові дані	Експеримент
0,2	2307	2008 – 2015
0,3	2301	2001 – 2006
0,5	2289	1991 – 1998

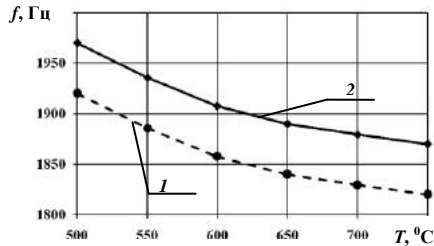
Навпаки, збільшення кута закрутки лопатки призводить до зростання жорсткості її пера, і, таким чином, підвищує частоту коливань лопатки. Ця залежність наведена на рис. 2.



1–розрахункова залежність; 2– розрахунок за допомогою ANSYS

Рисунок 2 – Залежність частот коливань від величини кута закрутки лопатки турбіни  $\alpha$ .

Також проведено дослідження впливу температури газового потоку на частоту власних коливань охолоджуваних лопаток турбомашин (рис. 3).



1–розрахункова залежність; 2– розрахунок за допомогою ANSYS

Рисунок 3 – Залежність частот власних коливань лопаток турбіни від температури газового потоку.

Визначено, що зі збільшенням температури потоку зменшуються частоти коливань, через зниження жорсткості конструкційних матеріалів, з яких виготовлено лопатки.

Крім того було досліджено вплив геометричних параметрів порожнини пера охолоджуваних лопаток на частоти їх коливань. Так залежність частоти власних коливань охолоджуваної лопатки турбіни від кута нахилу стінок каналів наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність частот коливань охолоджуваної лопатки турбіни від кута нахилу стінок охолоджуючих каналів  $\beta$  до вісі  $z$ .

Кут нахилу стінок каналів $\beta$ , град	Частота коливань $f$ , Гц	
	Розрахункові дані	Експеримент
0	2278	1980 – 1989
5	2296	1997 – 2005
10	2316	2009 – 2017
15	2313	2021 – 2030

У **четвертому розділі** розглянуто питання дослідження напружено-деформованого стану робочих лопаток турбомашин в потоці. Зазначається, що значний вплив на амплітудно-частотні характеристики коливань лопаток має демпфірування в місцях контакту бокових поверхонь бандажних полиць сусідніх лопаток. Приймається гіпотеза, що вихідна модель конструктивно неоднорідної робочої лопатки може бути побудована з певної кількості складових моделей, а саме: пера лопатки та його порожнини, бандажної полиці та хвостовика лопатки. Функція збуджуючої коливання газодинамічної сила може бути розкладена у тригонометричний ряд Фур'є. Рівняння вимушених коливань лопатки має вигляд (9):

$$[M] \left\{ \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right\} + [C] \left\{ \frac{d\delta}{dt} \right\} + [K] \{\delta\} = \{F\}, \quad (9)$$

де  $[M]$  – матриця мас лопатки;

$[K]$  – матриця жорсткості лопатки;

$[C]$  – матриця демпфірування лопатки;

$\{\delta\}$  – матриця-вектор узагальнених переміщень вузлів лопатки;

$\{F\}$  – матриця-вектор збуджуючих газодинамічних сил.

Рішення системи рівнянь (9) знаходиться за допомогою (10):

$$\delta_J = a_J^{(1)} \cos k\Omega t + a_J^{(2)} \sin k\Omega t \quad (10)$$

$$(J = 1, 2, \dots, n, k = 1, \dots, g),$$

де  $\Omega$  – частота вимушених коливань лопатки;

$g$  – число гармонік збуджуючої сили;

$n$  – число вузлів лопатки.

Індекси (1) і (2) позначають амплітуди при  $\cos k\Omega t$  та  $\sin k\Omega t$  відповідно.

Розрешуюча система рівнянь має вигляд (11):

$$\begin{aligned}
& \Lambda_{11}a_1^{(1)} + \Lambda_{10}a_0^{(1)} + \Lambda_{12}a_2^{(1)} + \Psi_{11}a_1^{(2)} + \Psi_{10}a_0^{(2)} + \Psi_{12}a_2^{(2)} = F_1^{(1)}; \\
& \Lambda_{01}a_1^{(1)} + \Lambda_{00}a_0^{(1)} + \Lambda_{02}a_2^{(1)} + \Psi_{01}a_1^{(2)} + \Psi_{00}a_0^{(2)} + \Psi_{02}a_2^{(2)} = F_0^{(1)}; \quad (11) \\
& \Lambda_{21}a_1^{(1)} + \Lambda_{20}a_0^{(1)} + \Lambda_{22}a_2^{(1)} + \Psi_{21}a_1^{(2)} + \Psi_{20}a_0^{(2)} + \Psi_{22}a_2^{(2)} = F_2^{(1)}; \\
& -\Psi_{11}a_1^{(1)} - \Psi_{10}a_0^{(1)} - \Psi_{12}a_2^{(1)} + \Lambda_{11}a_1^{(2)} + \Lambda_{10}a_0^{(2)} + \Lambda_{12}a_2^{(2)} = F_1^{(2)}; \\
& -\Psi_{01}a_1^{(1)} - \Psi_{00}a_0^{(1)} - \Psi_{02}a_2^{(1)} + \Lambda_{01}a_1^{(2)} + \Lambda_{00}a_0^{(2)} + \Lambda_{02}a_2^{(2)} = F_0^{(2)}; \\
& -\Psi_{21}a_1^{(1)} - \Psi_{20}a_0^{(1)} - \Psi_{22}a_2^{(1)} + \Lambda_{21}a_1^{(2)} + \Lambda_{20}a_0^{(2)} + \Lambda_{22}a_2^{(2)} = F_2^{(2)},
\end{aligned}$$

де  $\Lambda_{11}, \Lambda_{01}, \Lambda_{21}$  тощо – блоки динамічної матриці жорсткості;

$\Psi_{11}, \Psi_{01}, \Psi_{21}$ , тощо – блоки динамічної матриці демпфірування;

$a_1^{(1)}, a_0^{(1)}, a_2^{(1)}$  тощо – амплітуди вимушених коливань лівої межі, середньої частини та правої межі лопатки.

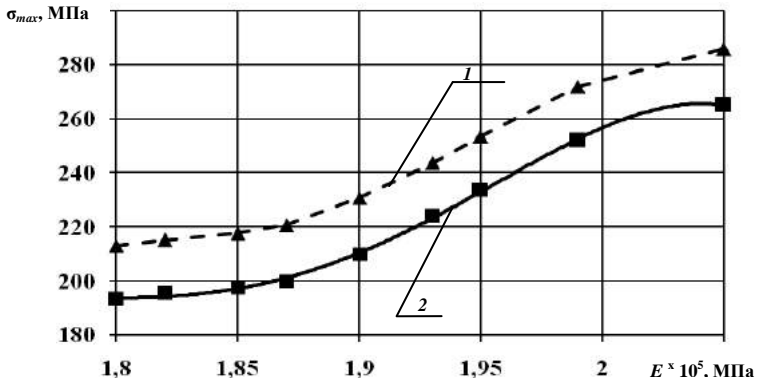
В системі рівнянь (11) відповідно до ступенів вільності лівої межі лопатки використовується індекс 1, середньої частини – індекс 0 та правої межі – індекс 2.

Результати розрахунку порівняно з отриманими методом комплексних амплітуд та за допомогою пакету програм ANSYS і виявлено добру збіжність. На основі розробленої математичної моделі проведено дослідження впливу кута виходу потоку з соплових каналів на амплітудно-частотні характеристики охолоджуваної робочої лопатки турбіни.

У другій частині розділу проводиться дослідження впливу геометричних характеристик конструктивно неоднорідних охолоджуваних лопаток і фізико-механічних властивостей матеріалу на їх напружено-деформований стан в потоці. Матриця динамічних напружень отримується на основі залежності (4).

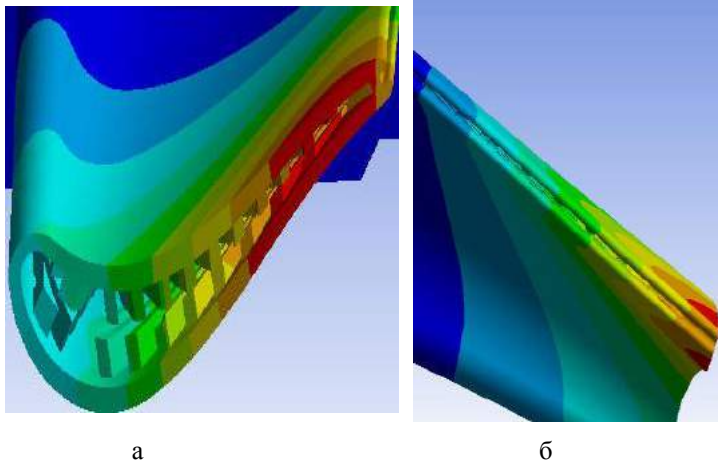
Розглянуто вплив фізико-механічних властивостей матеріалу лопаток на їх напружено-деформований стан. Нижче наведено характер залежності рівня максимальних динамічних напружень в охолоджуваних робочих лопатках газової турбіни від модуля Юнга матеріалу лопаток. Аналіз рис. 4 дає змогу зробити висновок, що збільшення модуля Юнга матеріалу лопаток підвищує їх жорсткість і саме тому рівень динамічних напружень, що виникають в них під дією газового потоку, збільшується.

Також проведено дослідження впливу конструктивних елементів порожнини охолоджуючих лопаток на рівень їх динамічних напружень. Нижче на рис. 5 наведено зони локалізації динамічних напружень для розглянутої охолоджуваної конструктивно неоднорідної робочої лопатки газової турбіни при коливаннях по першій згиній формі ( $\Omega = 1382$  Гц).



1 – розрахункова залежність; 2 – розрахунок з використанням ANSYS

Рисунок 4 – Залежність максимальних динамічних напружень в лопатках турбіни від модуля Юнга матеріалу лопаток.



а

б

а – вид з боку охолоджуючої порожнини; б – вид з боку вихідної кромки

Рисунок 5 – Зони локалізації напружень при першій згинній формі коливань охолоджуваної робочої лопатки турбіни.

**П'ятий розділ** присвячений експериментальним дослідженням резонансних коливань і напружено-деформованого стану робочих лопаток турбомашин. Розроблено методика проведення експериментів та обробки одержаних даних. Вібропереміщення конструкцій визначалися методом стробоголографічної інтерферометрії на універсальному вібростенді з

використанням спеціального вібровимірювального та оптичного обладнання. Це дозволяє підвищити точність результатів, розширити клас досліджуваних задач і види граничних умов. Дослідження проводилися як для охолоджуваних, так і для неохолоджуваних лопаток турбомашин. Зроблено аналіз впливу граничних умов та основних конструктивних параметрів пера на власні частоти і форми коливань лопаток. Для охолоджуваних лопаток турбомашин також досліджувався вплив на частоти і форми коливань лопатки основних геометричних характеристик порожнини пера, таких як охолоджуючі канали та отвори. Отримані дані підтверджують висновки, зроблені в розділі 3 на основі теоретичних досліджень.

Друга частина розділу присвячена експериментальному визначенню напружено-деформованого стану робочих лопаток турбомашин. Дослідження проводилися методом тензометрування на спеціальному вібраційному стенді. Значення експериментально отриманих напружень в місцях установки тензодатчиків на лопатці для кожної форми коливань визначаються за допомогою залежності (12):

$$U_i = 0,708 I_i S m \frac{\sigma_i R_k R_{mp}^i}{E(R_k + R_{mp}^i)}, \quad (12)$$

де  $U_i$  – електричний струм на  $i$ -ому тензорезисторі, мВ;

$I_i$  – сила току на вхідній клемі  $i$ -го тензорезистора, А;

$S$  – коефіцієнт тензочутливості;

$m$  – коефіцієнт підсилення сили току на тензометричному підсилювачі;

$\sigma_i$  – вібронапруження в місці установки  $i$ -го тензорезистора, МПа;

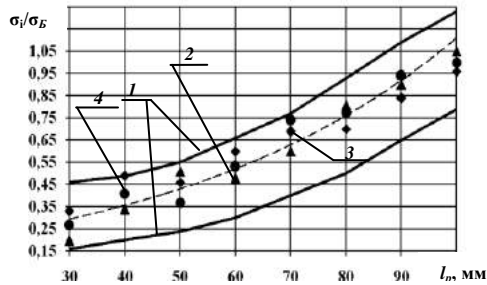
$E$  – модуль Юнга матеріалу лопатки, МПа;

$R_k$  – вхідний електричний спротив вимірювального каналу тензометричного підсилювача, Ом;

$R_{mp}^i$  – електричний опір  $i$ -го тензорезистора, Ом.

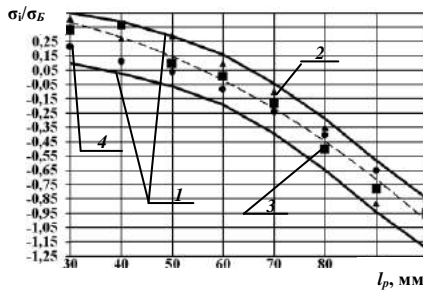
Експерименти проводились для трьох лопаток з однаковими геометричними характеристиками. Наведено графічні залежності розподілу відносних вібронапружень  $\sigma_i/\sigma_B$  по довжині пера неохолоджуваної робочої лопатки турбіни з боку спинки (рис. 6), а на рис. 7 – з боку вхідної кромки лопатки. Слід зазначити, що на рис. 6, 7 наведено наступні позначення:  $\sigma_i$  – напруження в місці установки  $i$ -го тензодатчика, МПа;  $\sigma_B$  – напруження в місці установки базового датчика, МПа;  $l_p$  – висота установки датчиків по перу лопатки, мм.





1 – довірчий інтервал; 2 – експериментальна залежність для лопатки №1; 3 – експериментальна залежність для лопатки №2; експериментальна залежність для лопатки №3.

Рисунок 6 – Розподіл відносних напружень по довжині пера лопатки турбіни з боку спинки. Форма коливань  $m=0$   $n=1$ .



1 – довірчий інтервал; 2 – експериментальна залежність для лопатки №1; 3 – експериментальна залежність для лопатки №2; 4 – експериментальна залежність для лопатки №3.

Рисунок 7 – Розподіл відносних напружень по довжині пера лопатки турбіни з боку вхідної кромки. Форма коливань  $m=0$   $n=1$ .

Виходячи з аналізу рис. 6 і рис. 7, зазначається, що найбільші напруження виникають по вихідній кромці та з боку спинки пера лопатки.

По результатах досліджень проведено співставлення отриманих експериментальних даних з розрахунковими. Це дозволило підтвердити адекватність розроблених математичних моделей та алгоритмів розрахунку, вірогідність чисельних результатів і висновків, наведених у розділах 3 та 4 дисертації. Максимальне відхилення експериментально визначених напружень від розрахункових складає 15...17%, а частот коливань досягає 12...15%.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі на основі методу скінчених елементів розроблено підхід до визначення напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин при їх вібраціях. Отримано такі основні результати:

1. Проведено постановку задач НДС, а також власних та вимушених коливань охолоджуваних лопаток турбомашин з використанням методу скінчених елементів, що дозволило встановити вплив конструктивної неоднорідності лопаток на їх динамічні характеристики.

2. На основі спеціально розроблених тривимірних скінчених елементів отримано уточнені математичні моделі та методики вирішення задач аналізу спектра власних частот і форм коливань, а також визначення рівня динамічних навантажень в охолоджуваних та неохолоджуваних лопатках турбомашин, що дозволяє враховувати їх складну геометрію. Розглянуті задачі становлять важливу проблему механіки деформівного твердого тіла.

3. Отримали подальший розвиток ефективні чисельні методи вирішення задач дослідження вимушених коливань та напружено-деформівного стану охолоджуваних конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин. Розроблено універсальні розрахункові алгоритми та програми для ЕОМ з використанням модифікованого розкладу Холецького та методу Хаусгольдера. Проведено чисельне дослідження збіжності отриманих рішень та адекватності розроблених математичних моделей. Встановлено закономірності впливу різних типів граничних умов на НДС, а також частоти власних коливань як охолоджуваних, так і неохолоджуваних конструктивно неоднорідних лопаток турбомашин. Крім того, отримано експериментальні результати, які дозволили виявити ряд нових явищ, пов'язаних з дослідженням напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток, та характеризують вплив конструктивних неоднорідностей, в тому числі охолоджуючих каналів та отворів в порожнині пера лопаток на їх НДС.

4. Розроблено уточнену методику експериментального дослідження методом голографічної інтерферометрії частот і форм власних коливань лопаток, що дозволяє підвищити точність отриманих результатів та розширити клас досліджуваних задач. Експериментально підтверджено адекватність та достовірність розроблених математичних моделей власних коливань та НДС конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин.

5. Розроблені математичні моделі та методики розрахунку впроваджено на ряді провідних підприємств машинобудування України при проектуванні, доводці та монтажі газотурбінних двигунів. Це дозволило підвищити якість їх проектування, виключити необхідність виконання коштовних пошукових

робіт та експериментальних досліджень, скоротити витрати на конструкторські та випробувально-довідні роботи.

## ОСНОВНІ РОБОТИ, ОПУБЛІКОВАНІ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Моргун С.А. Экспериментальное исследование свободных колебаний лопаток газотурбинного двигателя / С.А. Моргун, А.С. Каиров // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2011. – Вип. 12. – С. 224-229.

2. Каиров А.С. Исследование собственных колебаний лопаток газотурбинного двигателя методом динамических суперэлементов / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Дніпропетровськ: Ліра, 2012. – Вип. 20. – С.176-182.

3. Каиров А.С. Исследование собственных колебаний лопаток турбомашин методом конечных элементов / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Збірник наукових праць НУК – Миколаїв, 2012. – №5-6. – С.76-80.

4. Каиров А.С. Экспериментальное исследование переменных вибронпряжений в рабочих лопатках турбомашин / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Міжнародний збірник наукових праць ДонНТУ – Донецьк, 2013. – Вип. 1,2 (45). – С.131-138.

5. Каиров А.С. Вынужденные колебания венца рабочих лопаток турбомашин с учетом демпфирования / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Вісник НТУ «ХП». «Динаміка і міцність машин». – Харків: Вид. центр НТУ «ХП», 2013. – №58. – С. 80-87.

6. Каиров А.С. Вынужденные колебания венцов рабочих лопаток турбомашин с замкнутыми на круг связями / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Вісник НТУУ «КП»: зб. наук. праць. Серія: Машинобудування. – Київ: НТУУ «КП». – 2013. – № 2 (68). – С. 128-133.

7. Каиров А.С. Исследование колебаний диска с венцом рабочих лопаток турбомашин как циклически симметричной системы в поле центробежных сил / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя: АТ «МОТОР СІЧ». – 2013. – №1. – С. 34-37.

8. Каиров А.С. Колебания и напряженно-деформированное состояние венцов рабочих лопаток турбомашин при нарушении циклической симметрии / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Авіаційно-космічна техніка і технологія. Науково-технічний журнал Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ» – Харків, 2013. – № 9 (106). – С.208-215.

9. Моргун С.А. Влияние геометрических параметров на частоты свободных колебаний рабочих лопаток турбомашин / С.А. Моргун // Вісник двигунобудування. – Запоріжжя: АТ «МОТОР СІЧ». – 2014. – №1. – С. 12-17.

10. Каиров А.С. Математическое моделирование и исследование вибронпряженности профиля пера лопатки компрессора газотурбинного двигателя / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред. Матеріали XVI Міжнар. симпозиума ім. А.Г. Горшкова, 15-19 лютого 2010 р. – Москва: МАІ. – 2010. – С. 55-57.

11. Каиров А.С. Экспериментальное исследование вибронпряженности пера лопатки компрессора газотурбинного двигателя / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Математичні проблеми технічної механіки. Тези доповідей на Міжнар. наук.-практ. конференції, 13-15 квітня 2011 р. – Дніпропетровськ: ДНУ ім. О. Гончара. – 2011. – С.145.

12. Моргун С.А. Экспериментальное исследование собственных частот и форм резонансных колебаний рабочих лопаток ГТД / С.А. Моргун, А.С. Каиров // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали Міжнар. наук.-техн. конференції, 25-26 жовтня 2011 р. – Миколаїв: НУК. – 2011. – С.39-41.

13. Каиров А.С. Исследование собственных колебаний лопаток газотурбинного двигателя методом конечных элементов / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Актуальні проблеми інженерної механіки: Матеріали II Міжнар. наук.-техн. конференції, 22-24 жовтня 2012 р. – Миколаїв: НУК. – 2012. – С.16-18.

14. Каиров А.С. Расчет напряженно-деформированного состояния хвостовиков лопаток турбомашин / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Сучасні проблеми двигунобудування: стан, ідеї, рішення. Матеріали V Всеукраїнській наук.-техн. конференції з міжнародною участю, 22-23 травня 2013 р. – Первомайськ: ППІ НУК. – 2012. – С.273-274.

15. Каиров А.С. Вынужденные колебания венцов рабочих лопаток турбомашин с замкнутыми на круг связями / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Прогрессивная техника, технология и инженерное образование: Матеріали XIV Международной науч.-техн. конференции, 25-28 червня 2013 р. – Севастополь: НТУУ «КПІ». – 2013, Ч.1. – С.9-10.

16. Каиров А.С. Исследование напряженно-деформированного состояния рабочих лопаток турбомашин при динамическом нагружении / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Суднова енергетика: стан та проблеми. Матеріали VI Міжнар. наук.-техн. конференції, 13-14 листопада 2013 р. – Миколаїв: НУК. – 2013. – С. 44-45.

17. Каиров А.С. Напряженно-деформированное состояние венцов рабочих лопаток турбомашин при вынужденных колебаниях / А.С. Каиров,

С.А. Моргун // Проблеми динаміки та міцності в турбомашинобудуванні. Тези доповідей V Міжнар. наук.-техн. конференції, 27-30 травня 2014 р. – Київ: Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренко НАН України. – 2014. – С.113-114.

18. Каиров А.С. Влияние геометрических характеристик на напряженно-деформированное состояние охлаждаемых лопаток турбомашин / А.С. Каиров, С.А. Моргун // Сучасний стан та проблеми двигунобудування. Матеріали Міжнар. наук.-техн. конференції, 19-21 листопада 2014 р. – Миколаїв: НУК. – 2014. – С. 279-282.

### АНОТАЦІЯ

Моргун С.О. Напружено-деформований стан конструктивно неоднорідних лопаток турбомашин при їх вібраціях. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.04 – механіка деформівного твердого тіла. – Запорізький національний технічний університет Міністерства освіти і науки України, Запоріжжя, 2015.

Дисертація присвячена визначенню параметрів напружено-деформованого стану конструктивно неоднорідних робочих лопаток турбомашин при їх вібраціях з використанням методу скінчених елементів. Розвинуті і теоретично обґрунтовані ефективні чисельні методи для розв'язання розглянутих в дисертації задач.

Досліджено вплив геометричних характеристик лопаток, фізико-механічних властивостей матеріалу, температури газового потоку на частоти та форми коливань і напружено-деформований стан робочих лопаток турбомашин. Достовірність та адекватність розроблених математичних моделей підтверджена співставленням результатів з даними, отриманими з використанням пакету програм ANSYS та експериментально.

**Ключові слова:** конструктивна неоднорідність, напружено-деформований стан, вібрації, метод скінчених елементів, лопатки турбомашин, частоти коливань.

### АННОТАЦИЯ

Моргун С.А. Напряженно-деформированное состояние конструктивно неоднородных лопаток турбомашин при их вибрациях. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела. – Запорожский национальный технический университет Министерства образования и науки Украины, Запорожье, 2015.

Диссертация посвящена определению параметров напряженно-деформированного состояния конструктивно неоднородных лопаток турбомашин при их вибрациях с использованием метода конечных элементов. Приведена постановка и обоснование задач динамического поведения рабочих лопаток турбомашин. Развита и теоретически обоснована эффективные численные методы для решения рассмотренных в диссертации задач. Построены уточненные математические модели свободных и вынужденных колебаний, а также напряженно-деформированного состояния, позволяющие адекватно описывать динамическое поведение конструктивно неоднородных рабочих лопаток. Уравнения движения лопаток получены с использованием вариационного принципа Лагранжа II рода. Выполнен анализ сходимости полученных решений.

Получены результаты количественного и качественного характера для лопаток с конструктивными неоднородностями, которые характеризуют особенности их поведения при вынужденных колебаниях, вызванных воздействием переменной газодинамической силы.

Исследовано влияние геометрических характеристик лопаток, физико-механических свойств материала, температуры газового потока на частоты и формы колебаний и напряженно-деформированное состояние рабочих лопаток турбомашин. Достоверность и адекватность разработанных математических моделей подтверждена сопоставлением полученных результатов с данными, полученными с использованием пакета программ ANSYS и экспериментальным путем.

Экспериментальные исследования частот и форм колебаний, как охлаждаемых, так и неохлаждаемых лопаток турбомашин проводились методом голографической интерферометрии. Параметры напряженно-деформированного состояния лопаток определялись на специальном вибровоздушном стенде с применением метода тензометрирования.

**Ключевые слова:** конструктивная неоднородность, напряженно-деформированное состояние, вибрации, метод конечных элементов, лопатки турбомашин, частоты колебаний.

## SUMMARY

Morgun S. O. Strain-deformed state of constructional non-homogeneous turbomachine blades under vibration load. – Manuscript.

Dissertation for a Candidate Degree in Engineering Sciences, Specialty 01.02.04. – Mechanics of the Deformed Solid. – Zaporizhzhya National Technical University, Zaporizhzhya, 2015.

The thesis is devoted to the non homogeneous cooled single turbine blades and strain-deformed state parameters under vibration load by means of finite elements method usage.

The effective numerical methods for the foregoing problems solution are also developed and theoretically approved.

The turbine blades geometrical characteristics, their material physical and mechanical state and the gas flow temperature influence on their oscillation forms and frequencies, and strain-deformed state has been researched. The results of the research have been adopted by the obtained results comparison with the ANSYS program package's solutions and experimental data.

**Key words:** constructional inhomogeneity, strain-deformed state, vibration load, finite elements method, turbine blades, oscillation frequencies.

Підписано до друку 25.08.2015р.  
Формат 60x84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс.  
Ум.-друк. арк. 0,75.  
Наклад 100 прим. Зам. №5147

---

Надруковано в КП «Миколаївська обласна друкарня»  
54010, м. Миколаїв, вул. Паризької Комуни, 3.  
Свідоцтво про внесення до державного реєстру  
ДК №1339 від 24.04.2003р.