

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

КИСЛЯК МИХАЙЛО ІВАНОВИЧ

УДК 629.735.036.34(043.3)

**МЕТОДИКА УДОСКОНАЛЕННЯ АКУСТИЧНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЕНТИЛЯТОРА ТУРБОРЕАКТИВНОГО
ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА**

Спеціальність 05.05.03 - Двигуни та енергетичні установки

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному авіаційному університеті Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник: доктор технічних наук,
Кравченко Ігор Федорович,
ДП «Івченко-Прогрес»,
Генеральний конструктор,
директор ДП «Івченко-Прогрес».

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
Дихановський Віктор Миколайович
Центральний науково-дослідний інститут озброєння та військової техніки Збройних Сил України, головний науковий співробітник;

кандидат технічних наук
Басов Юрій Федорович
ПАТ «Мотор Січ», головний конструктор.

Захист дисертації відбудеться 1 березня 2018 р. о 15 годині в аудиторії 1.131 на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.05 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058, м. Київ – 058, проспект Космонавта Комарова, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного авіаційного університету за адресою: 03058, м. Київ, проспект Космонавта Комарова, 1.

Автореферат розісланий «29» січня 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д26.062.05



К.В. Дорошенко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми дисертації. Інтенсивність використання авіаційної техніки впливає на екологічні аспекти її застосування, особливо на проблеми шуму. Так у відповідності до резолюції А16-3 Асамблеї ІКАО (Монреаль) проведена спеціальна нарада щодо авіаційного шуму в околицях аеродромів, та прийнято рекомендації щодо його зменшення.

Відомо ряд сучасних заходів щодо зменшення шуму, до яких відноситься вибір схеми двигуна, ступеня його двохконтурності, основних параметрів робочого процесу, а також розробка конструктивних заходів, що направлені на зменшення рівню шуму в місцях його утворення. Зазвичай зменшення шуму в джерелі досягається за рахунок погіршення інших характеристик газотурбінного двигуна (ГТД) (зменшення потужності, збільшення ваги, ускладнення схеми та інше), через що він потребує детальнішого вивчення.

Для турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД), з точки зору рівня шумової емісії, основний вклад вносить шум вентилятора. В середньо-строковій перспективі зменшення шуму вентилятора прогнозується за рахунок застосування модифікованих лопаток робочого колеса та спрямляючого апарату, а також за допомогою надвисокого ступеня двохконтурності. Однак профілювання лопатки вентилятора потребує значних часових та матеріальних витрат, а виконання перевірки її акустичних характеристик потребує виготовлення стенду та проведення наземних випробувань, що значно сповільнює роботу над вдосконаленням двигуна. Через надмірну вартість виготовлення дослідних зразків, виникає необхідність в створенні математичної моделі каналу для вивчення процесів, що дозволяє без значних часових витрат дослідити зміни потоку в каналі при інтеграції різних профілів та визначити їх вплив на шум, що випромінюється.

Таким чином, розробка методики удосконалення акустичних характеристик вентилятора ТРДД є актуальною науково-прикладною задачею, рішення якої дозволяє визначити аероакустичні характеристики вентилятора для удосконалення двигуна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Подана робота є складовою частиною досліджень, що проводяться в Національному авіаційному університеті та на ДП «Івченко-Прогрес» і спрямовані на розробку методики для дослідження аероакустичних характеристик вентилятора ТРДД.

Робота виконувалась в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи, що проводилась на кафедрі авіаційних двигунів Національного авіаційного університету з номером державної реєстрації: 0114U001601 за темою: №944-ДБ14 «Методологія управління вторинними течіями в ГТД» та науково-дослідної роботи, що виконана за замовленням ДП «Івченко-Прогрес»: «Математичне моделювання акустичних характеристик вентилятора ТРДД типу Д-18», Т/з №345/2017-18 від 30.11.2017 р.

Метою дослідження є розробка методики досліджень та модифікування лопаткових вінців вентилятора ТРДД за критерієм акустичної та аеродинамічної ефективності.

Задачі дослідження, вирішення яких необхідне для досягнення мети роботи, зведені до наступних:

- критичний аналіз джерел шуму двигуна та основних методів його зменшення;
- розробка математичної моделі вентилятора ТРДД;
- обґрунтування і визначення моделі турбулентності;
- розробка методики для визначення шуму вентилятора ТРДД;
- розробка методики аналізу впливу зміни форми лопаткового вінця на шумоутворення ступені вентилятора ТРДД;
- розробка рекомендацій щодо модифікування лопаткових вінців вентилятора.

Об'єктом дослідження є процес обтікання лопаткових вінців вентилятора ТРДД.

Предметом дослідження є аероакустичні характеристики вентилятора ТРДД.

Методи дослідження - сучасні теоретичні і експериментальні методи дослідження математичних моделей, що засновані на розв'язанні рівняння Нав'є-Стокса з використанням моделі турбулентної в'язкості, рівняння А. Праундмана, Фокс Вільямса – Хоукінгса, а також використані загальнонаукові методи дослідження: аналіз, синтез, аналогія, формалізація, абстрагування, узагальнення, системний аналіз, нагляд, опис, порівняння і математичне моделювання.

Достовірність отриманих результатів забезпечувалась застосуванням апробованих методів та моделей розрахунків та підтверджувалась задовільним узгодженням результатів чисельних та експериментальних досліджень.

Наукова новизна отриманих результатів:

– вперше розроблена математична модель для дослідження аероакустичної ефективності вентилятора ТРДД, що дозволяє здійснювати комплексну оцінку впливу геометричних параметрів лопаткового вінця на рівень шуму та аеродинамічні характеристики вентилятора;

– удосконалено метод комплексного дослідження аероакустичних характеристик вентилятора ТРДД із застосуванням запропонованого автором критерія аероакустичної ефективності вентилятора;

– запропоновано метод модифікації лопаткового вінця вентилятора для покращення його аероакустичних характеристик.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отриманий науково-методичний апарат дозволяє виконувати розрахунки аероакустичної ефективності вентилятора ТРДД. Даний науково-методичний апарат впроваджений на ДП «Івченко-Прогрес» (Акт реалізації про використання результатів досліджень від 30.11.2017).

Особистий внесок здобувача: основні положення теоретичних досліджень, створення математичної моделі ступені вентилятора для дослідження аероакустичних характеристик, та удосконалення геометрії лопаткових вінців для покращення характеристик вентилятора, обробка та аналіз результатів виконано автором особисто.

В опублікованих роботах особисто автором:

- проведено порівняння різних моделей турбулентності для розрахунку ступені вентилятора ТРДД [1];
- створено розрахункову модель вентилятора та проведено порівняння впливу розміру сітки на точність отримуваних результатів [2];
- розроблено методику модифікації лопаткового вінця ступені вентилятора ТРДД [3];
- запропоновано критерій оцінки акустичної емісії шуму вентилятора ТРДД [4];
- розроблено методику створення та дослідження ступені вентилятора ТРДД з використанням програмного комплексу ANSYS [5];
- створено моделі акустичних резонаторів та проведено аналіз отриманих даних [6];
- проведено чисельний експеримент із застосуванням різних моделей турбулентності [7];
- виконано аналіз отриманих даних та обрано оптимальні параметри сітки для подальших розрахунків [8, 9];
- опрацьовано спосіб визначення точності отримуваних результатів акустичних моделей [10];
- проаналізовано вплив зміни потоку в залежності від використаного методу [11];
- розроблено методику модифікування лопаткового вінця вентилятора [12].

Апробація роботи. Результати досліджень роботи доповідались на засіданнях кафедри авіаційних двигунів Навчально-наукового аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету (2014 ... 2017 роках); на наукових конференціях: XII Міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2015»; XV та XVI Міжнародні науково-практичні конференції молодих учених і студентів "Політ. Сучасні проблеми науки" (2015, 2016); VII Всесвітній конгрес «Авіація у XXI столітті» (2016); Міжнародна науково-практична конференція "Перспективи розвитку військової авіації. Кооперація підприємств авіаційної промисловості з іноземними компаніями - головний напрямок військово-технічного співробітництва та основа для створення нових зразків авіаційної техніки" (2016); XIII міжнародна науково-технічна конференція «АВІА-2017»; XXII Міжнародний конгрес двигателестроїтелів (2017).

Реалізація роботи: робота є складовою частиною досліджень, що проводяться в Національному авіаційному університеті та ДП «Івченко Прогрес» і спрямовані на розробку методики для дослідження акустичних та

аеродинамічних характеристик вентилятора ТРДД. Результати досліджень впроваджені на ДП «Івченко-Прогрес» при модернізації вентилятора ТРДД типу Д-18 (Акт реалізації від 30.12.2017).

Публікації: результатами дисертаційної роботи опубліковані у 5 наукових статтях в журналах, що належать до переліку фахових видань України з технічних наук, 2 з яких включені в міжнародні наукометричні бази, і у тезах 7 доповідей.

Обсяг і структура роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів та висновку, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг дисертації 119 сторінок, 78 рисунків, 7 таблиць та 2 додатки. Список використаних джерел складається з 47 найменувань на 4 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито стан наукової проблеми, її сутність, обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету і завдання дослідження; визначено об'єкт, предмет та методи дослідження; показано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, представлені результати апробації та особистого внеску здобувача.

У першому розділі проведено аналіз стану наукової проблеми щодо стану досліджень джерел шумоутворення та основних способів їх усунення, що опубліковані в роботах А. Г. Муніна, Е. Я. Юдіна, М. Д. Лайтхіла, Е. А. Непомнящего, В. І. Токарева, О. І. Запорожця, В. І. Зінченко, І. Г. Русакова та інших.

Аналіз опублікованих досліджень Ю. Д. Халецького відносно даної проблематики показав, що використання існуючих методів дослідження шуму не є ефективними з точки зору аеродинаміки, тому необхідна розробка методів, що дозволять виконувати дослідження модифікацій з урахуванням впливу на аеродинамічні характеристики двигуна.

З результатів порівняння та огляду сучасних методів зменшення рівню шуму літака, що представлені в роботах Е. Я. Юдіна, М. Д. Кузнецова та інш., виникає необхідність використання нових комплексних підходів, що застосовуватимуть різні методи засновані на визначенні та усуненні джерел акустичного збудження.

На базі проведеного дослідження перспективних способів пониження шумової емісії, на прикладі робіт А. А. Коротигіна, обрано: напрям дослідження проблемної зони вентилятора ТРДД, як головного джерела шуму та запропоновано шляхи його модифікації (рис. 1), обґрунтовано цілі та задачі дисертаційного дослідження, а також обрані методи за якими проведені дослідження.

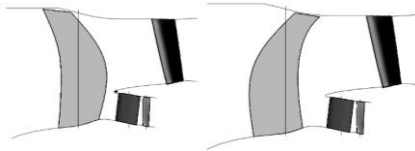


Рис. 1 Способи модифікації лопатки вентилятора

У другому розділі розглянуто методи, що використані в програмному комплексі, а також

розроблено та реалізовано геометричну модель вентилятора ТРДД, з урахуванням геометричних особливостей каналу, та профілів лопаткових венців, за допомогою програмного пакету SolidWorks, розрахункова схема якої наведена на рис. 2.

Геометрична модель вентилятора ТРДД складається з 33 лопаток вентилятора, 60 лопаток спрямляючого апарату зовнішнього контуру, 17 силових стоек та 132 лопатки спрямляючого апарату внутрішнього контуру.

Обрана схема моделі ступені вентилятора відповідає схемі прототипу двигуна ТРДД типу Д-18.

Розрахункова сітка має тетраедральну структуру, що заповнює весь об'єм, та примежовий шар з гексадричною структурою, що описує всі елементи області дослідження (рис. 3). Розмір сітки залежить від можливостей ЕОМ і задовольняє мінімальні вимоги, що необхідні для моделі турбулентності. Загальна кількість елементів розрахункової області складає $z = 7\,000\,000$.

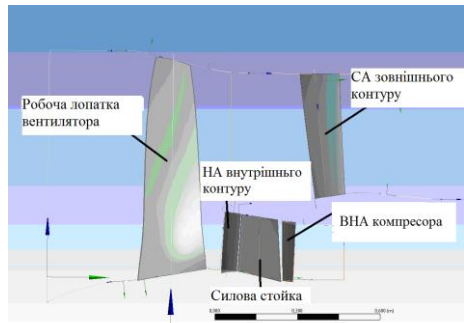


Рис. 2. Розрахункова схема

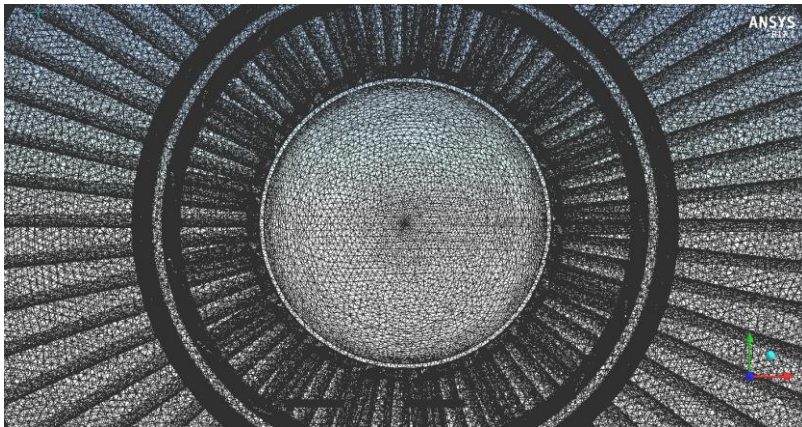


Рис. 3. Модель розрахункової сітки статора вентилятора

Математична модель вентилятора заснована на розв'язанні рівнянь турбулентної в'язкості. Обрано Scale-Adaptive Simulation (SAS) Shear Stress Transport (SST) модель турбулентності, що використовується для моделювання нестационарних турбулентних потоків, а також застосовується в поєднанні з більшістю базових unsteady Reynolds-averaged Navier Stokes (URANS) моделей турбулентності. SAS є однією з найбільш досконалих версій URANS моделі, що враховує не лише масштабну нестабільність, але й

приспосовуватися до вже розрахованих масштабів в динаміці і дозволяє розвивати турбулентний спектр лише в окремих регіонах.

Для визначення акустичних характеристик вентилятора ТРДД та джерел шуму на лопаткових вінцях (рис. 4) використовуються відомі методи і рівняння, що запропоновані М. Лайтхілом. Загальне рішення рівняння включає в себе три члени, що описують, відповідно, джерела монопольного, дипольного і квадрупольного типів, і складається з інтегралів за об'ємом рідини і на поверхні.

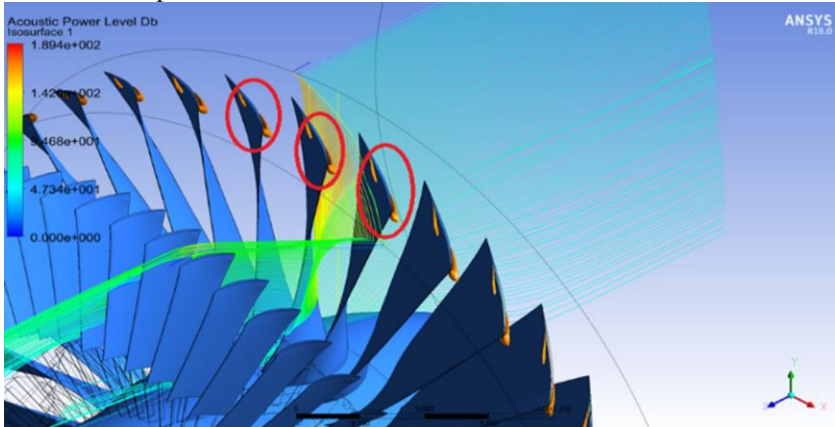


Рис. 4. Візуалізація джерела шуму на тілі лопатки

$$q = \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij} dV}{\gamma} + \frac{1}{4\pi c_0^2} \frac{\partial}{\partial x_j} \int_S \frac{\rho u_i u_n + p_i}{\gamma} dS + \frac{1}{4\pi c_0^2} \int_S \frac{\partial}{\partial t} (\rho u_n) \frac{dS}{r},$$

де T_{ij} – тензор напружень, що представляє собою різницю між напругою в потоці і напруженнями в однорідного середовища, що перебуває в стані спокою;

p_i – величина аеродинамічного навантаження, що діє з боку потоку на поверхню S в напрямку x_i ;

u_n – нормальна до поверхні складова швидкості потоку поблизу поверхні.

Розрахунок моделі виконано на: стаціонарному та нестаціонарному режимі розрахунку. Акустична модель шуму вентилятора є сукупністю двох моделей: на стаціонарному режимі – Broadband noise source model (BNS), що розраховує шум в об'ємній складовій, та дозволяє визначити основні джерела ширококутового шуму.

Формула визначення рівня акустичного тиску:

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l}\right) \frac{u^5}{a_0^5},$$

де u – турбулентна швидкість;

l – просторова довжина;

a_0 – швидкість звуку в середовищі;
 α – константа,
та рівня акустичної потужності:

$$L_p = 10 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right),$$

де P_{ref} – еталонна акустична потужність ($P_{ref} = 10^{-12}$ Вт/м³).

На нестационарному режимі – Ffowcs Williams-Hawkins (FW-H) модель, що загальному вигляді являє собою неоднорідне хвильове рівняння, отримане шляхом поєднання рівняння нерозривності і рівнянням Нав'є-Стокса:

$$\frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \nabla^2 p = \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \{T_{ij} H(f)\} - \frac{\partial}{\partial x^2} \{[\rho_j n_j + \rho u_i (u_n - v_n)] \delta(f)\} + \frac{\partial}{\partial t} \{[\rho_0 v_n + \rho (u_n - v_n)] \delta(f)\}$$

де u_i – швидкість потоку в напрямку x_i ;

u_n – швидкість потоку в напрямку нормалі до площини $f = 0$;

v_i – швидкість поверхні в напрямку x_i ;

v_n – швидкість поверхні в напрямку нормалі до площини $f = 0$;

∇ – оператор, що є частковою похідною за всіма напрямками обраної системи координат ($\nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$);

$\delta(f)$ – дельта-функція Дірака (це одинична імпульсна, узагальнена функція, що дозволяє записати дію в точці, а також просторову густину фізичних величин (маса, заряд, інтенсивність джерела тепла, сила і т. д.), що зосереджені або прикладені до однієї точки);

$H(f)$ – функція Хевісайда (це одинична ступінчата функція, або функція одиничного скачка. Вона дорівнює нулю при від'ємних значеннях аргументу і одиниці для додатних. В нулі дана функція невизначена, через це її зазвичай визначають як довільне ціле число);

p' – звуковий тиск в дальньому полі ($p' = p - p_0$);

f – позначає введену математичну поверхню що «інтегрована» в проблему зовнішнього потоку ($f > 0$) в безмежному просторі, що полегшує використання узагальненої теорії функції і функції Гріна в вільному просторі.

Дане рівняння дозволяє визначати акустичні характеристики в віддалених точках та порівняти отримані результати з результатами експерименту (рис. 5).

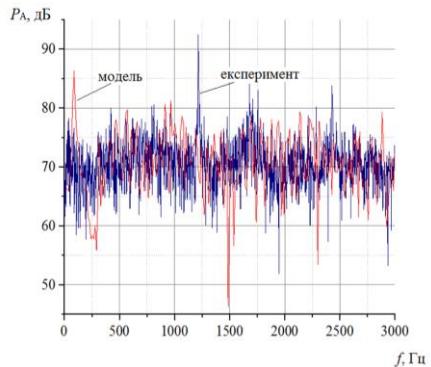


Рис. 5. Залежність рівня акустичного тиску від частоти

Проведено перевірку адекватності і точності математичної моделі шляхом порівняння отриманих результатів з експериментальними даними ДП «Івченко – Прогрес».

Аналіз даних, що наведені в таблиці 1. показує розбіжність в точності розрахунку між внутрішнім та зовнішнім контуром, що виникає в наслідок недосконалості розрахункової сітки. Оскільки в внутрішньому контурі кількість лопаток значно більше, а розміри проточної частини менші, то густина сітки більша в порівнянні з зовнішнім контуром.

Порівняння акустичних характеристик моделі та експерименту за допомогою середньо інтегрального значення дає похибку 3,2 %.

Таблиця 1

Параметр	Експеримент	Модель	Відхилення
$n_{\text{вент}}$ об/хв	2202	2202	0 %
$G_{\text{конт1}}$ КГ/С	391,828	394,056	0,6 %
$G_{\text{конт2}}$ КГ/С	58,49	58,7244	0,4 %
$P_{1\text{конт}}$ Па	119200	116545	2,2 %
$P_{2\text{конт}}$ Па	113700	111886	1,6 %
$T_{1\text{конт}}$ К	305	301,252	1,2 %
$T_{2\text{конт}}$ К	296,1	294,369	0,6 %

В третьому розділі розглянуто джерела утворення шуму на моделі лопатки вентилятора, визначено зони їх утворення та описано способи модифікації лопатки для дослідження зміни впливу цих зон. З розглянутих методів модифікації обрано метод, що заснований на нахилі периферійного перерізу в напрямку вхідного каналу, та сопла. Нахил лопатки виконується на 2,5; 5; 7,5 градусів в напрямку вхідного перерізу, та на -2,5; -5; -7,5 градусів в напрямку вихідного перерізу (рис. 6).

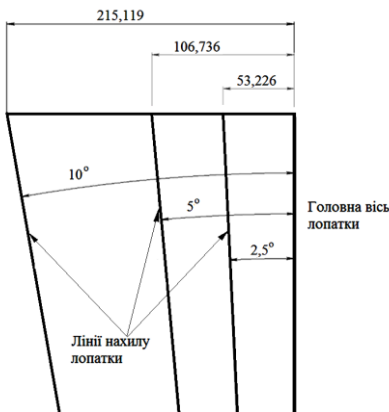


Рис. 6. Визначення координат кромкового перерізу

Вигин пера лопатки виконувався за її висотою за допомогою квадратичних залежностей, що при різних кутах нахилу мають різні коефіцієнти.

$$y_{10^\circ} = -0,0076x^2 + 3,9758x + 720;$$

$$y_{7,5^\circ} = -0,0235x^2 + 6,8816x + 720;$$

$$y_{5^\circ} = -0,0424x^2 + 9,2115x + 720;$$

$$y_{2,5^\circ} = -0,2324x^2 + 22,0436x + 720.$$

В результаті отримані модифіковані лопатки для визначення їх аероакустичних характеристик (рис. 7).

За результатами розрахунків модифікованих лопаток виконано аналіз впливу на джерела шумоутворення ступені вентилятора.

Порівняння акустичних характеристик вентилятора ТРДД пропонується оцінювати коефіцієнтом шумоутворення ξ , що показує, яка частка проточної частини вентилятора захащується вихровими зонами, що є джерелом шумоутворення

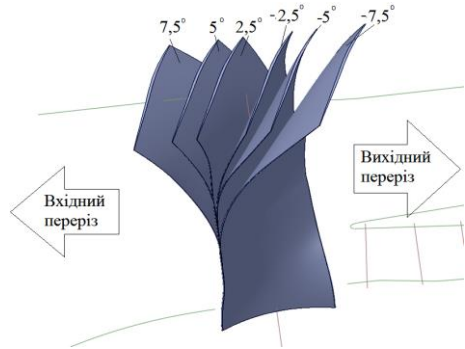


Рис. 7. Напрямки вигину пера лопатки

$$\xi = \frac{V_{\text{вз}}}{V_{\text{пч}}}$$

де $V_{\text{вз}}$ – об'єм вихрової зони; $V_{\text{пч}}$ – об'єм проточної частини.

Аналіз отриманих даних показує (рис. 8), що коефіцієнт шумоутворення змінюється при зміні частоти обертання ротора, що обумовлено зміною інтенсивності турбулентного відривного обтікання лопаткових вінців вентилятора.

Кількісна оцінка проводиться з врахуванням турбулентної кінетичної енергії та рівня акустичної потужності (рис. 9).

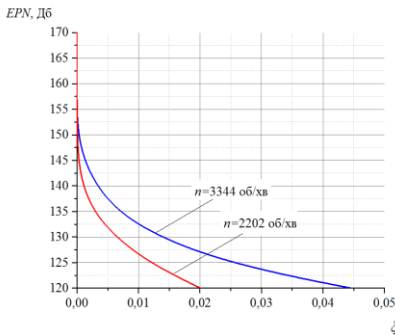


Рис. 8. Залежність рівня шуму від коефіцієнта шумоутворення при максимальному та номінальному режимі роботи

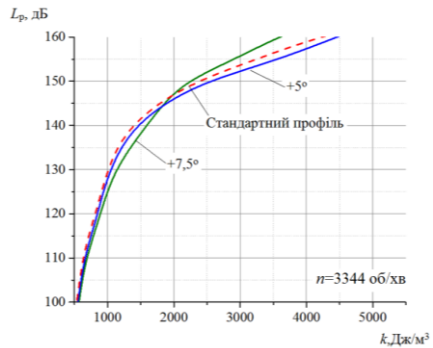


Рис. 9. Залежність рівня акустичної потужності від турбулентної кінетичної енергії для лопаток нахилених в напрямку до вхідного перерізу при максимальній частоті обертання

З результатів аналізу впливу рівня акустичної потужності на зміну турбулентної кінетичної енергії для модифікованих лопаток, що нахилені в

напрямку вихідного перерізу помітно збільшення турбулентної кінетичної енергії.

У випадку лопаток, що нахилені в напрямку до вхідного перерізу, енергія зростає, однак в модифікованому вінці, що нахилений на $7,5$ градусів помітне зменшення турбулентної кінетичної енергії, що говорить, про зменшення шумоутворення.

Для оцінки енергетичної складової шуму, що утворюється дипольним джерелом використовуємо максимальний акустичний тиск цього джерела – P_{Dip} та середнього акустичного тиску квадрупольного джерела – P_{Qav} .

Оцінка впливу кута нахилу лопаткового вінця на максимальний акустичний тиск дипольного джерела наведено на рис. 10.

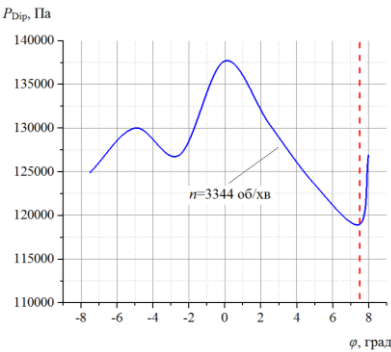


Рис. 10. Залежність максимального акустичного тиску дипольного джерела від кута нахилу профіля

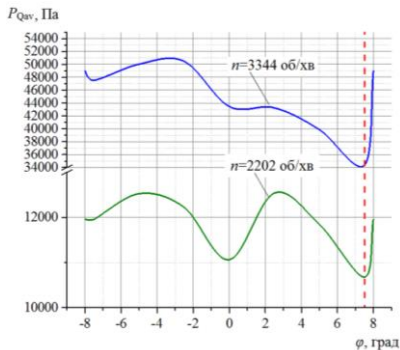


Рис. 11. Залежність тиску середнього значення квадрупольного джерела від кута нахилу профіля

Оцінка впливу кута нахилу лопаткового вінця на максимальний акустичний тиск дипольного джерела показує, що при нахилі лопатки на $7,5^\circ$ в напрямку вхідного перерізу збурення є мінімальними, і тому максимальне значення тиску дипольного джерела є також мінімальним.

Оцінка впливу кута нахилу лопаткового вінця та частоти обертання на середній акустичний тиск квадрупольного джерела наведено на рис. 11.

Якісна оцінка впливу нахилу лопаткового вінця здійснено з використанням коефіцієнта шумоутворення. Кількісна оцінка впливу нахилу лопаткового вінця здійснюється з використанням рівня акустичної потужності.

Оцінка впливу дипольного і квадрупольного джерел шуму здійснюється з використанням максимального акустичного тиску дипольного джерела та середнього акустичного тиску квадрупольного джерела.

Оцінка впливу кута нахилу лопаткового вінця на максимальний акустичний тиск дипольного джерела та середній акустичний тиск квадрупольного джерела показує, що при нахилі лопатки на $7,5^\circ$ в напрямку вхідного перерізу значення цих параметрів є мінімальними.

В четвертому розділі проведено дослідження лопаток вентилятора при їх модифікації для оцінки акустичних та аеродинамічних характеристик. Оцінка впливу кута нахилу лопаткового вінця на середній акустичний тиск квадрупольного джерела шуму, ККД ступені вентилятора та ККД робочого колеса наведено на рис.12. Визначено, що при нахилі лопатки на 7,5 градусів в напрямку до вхідного перерізу є найменшим значення середнього акустичного тиску квадрупольного джерела шуму, а ККД стає найоптимальнішим.

З результатів розрахунку помітно, що ефективне зменшення об'єму джерел шуму при номінальній частоті обертання мають лопатки з нахилом 7,5° в бік вхідного перерізу (рис. 13).

Аналіз отриманих результатів показує, що модифікована лопатка нахилена на 7,5 градусів в напрямку вхідного перерізу з точки зору аероакустичних характеристик має найкращі показники, оскільки дана лопатка дозволяє збільшити ККД на ступені на 1,13 %, ККД робочого колеса на 9,3 %, а також має найменші показники середнього акустичного тиску квадрупольного джерела шумо-утворення, та максимального акустичного тиску дипольного джерела шумоутворення.

ВИСНОВКИ

За результатами досліджень, що виконані в роботі:

1. Проведено аналіз джерел шумоутворення та аналіз основних методів визначення емісії шуму основних елементів ТРДД. Визначено причини і місця вихроутворення на лопаткових вінцях ступені вентилятора.

2. Розроблено математичну модель вентилятора, що складається з робочого колеса вентилятора, статора внутрішнього та зовнішнього контуру. Модель відповідає прототипу ТРДД типу Д-18. Розрахункова сітка максимально відповідає можливостям ЕОМ і складається з двох складових елементів: сітки ротора та сітки статора. Граничні умови розрахункової моделі відповідають умовам експериментальних досліджень, проведених на ДП «Івченко Прогрес». Проведено порівняння моделей турбулентної в'язкості шляхом співставлення результатів розрахунку при використанні LES, $k-\epsilon$, $k-\omega$, SAS SST з результатами експерименту. Обрано для розрахунків модель турбулентності SAS SST, що є найбільш адекватною і прийнятною для дослідження лопаткових вінців і краще описує прімежовий шар.

3. Проведено оцінку акустичних моделей та визначено межу їх застосування для визначення шуму ступені вентилятора. Для визначення

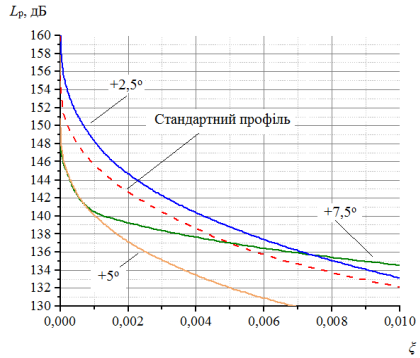


Рис. 13. Залежність рівня акустичної потужності від коефіцієнту шумоутворення для модифікованих лопаток при номінальній частоті обертання

джерел шумоутворення використовується BNS – модель, а для визначення частотних характеристик ступені вентилятора використовується FW-H – модель.

4. Розроблена методика визначення якісної та кількісної оцінки впливу нахилу лопаткового вінця вентилятора ТРДД на акустичний тиск квадрупольного та дипольного джерела шуму. Для якісної оцінки введено коефіцієнт шумоутворення, що характеризує відношення об'єму вихрової зони в лопатковому вінці до об'єму проточної частини. Кількісна оцінка виконується з використанням рівня акустичної потужності.

5. Розроблено методику аналізу впливу зміни форми лопаткового вінця на шумоутворення ступені шляхом дослідження впливу нахилу периферійного перерізу лопаток вентилятора в напрямку вхідного та вихідного каналу і поворотом периферійного перерізу.

6. За результатами аналізу аероакустичних характеристик ступеня вентилятора виконано порівняння модифікованих лопаток зі стандартними та запропоновано рекомендації щодо модифікування лопаткових вінців вентилятора ТРДД. За оцінкою якісних та кількісних характеристик шумоутворення, а також з врахуванням аеродинамічних характеристик вентилятора визначено модифіковану лопатку, що нахилена на 7,5 градусів в напрямку вхідного перерізу, оскільки вона має найменший середній акустичний тиск квадрупольного джерела шуму на номінальному та максимальному режимі роботи, та збільшує ККД ступені вентилятора на 1,13%, та ККД робочого колеса вентилятора на 9,3 %.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1. Кисляк М. І. Визначення раціональної моделі турбулентності для отримання характеристик ступені вентилятора осьового компресора газотурбінного двигуна з використанням програмного комплексу ANSYS [Текст] / М. І. Кисляк, В. В. Комаров, М. М. Мітрахович / Технологические системы. – 2015. – № 3 (72). – С. 62–67. **(ПІНЦ, Scientific Indexing Services, CiteFactor, ASI, InfoBase index)** *Здобувачем проведено порівняння різних моделей турбулентності для розрахунку ступені вентилятора ТРДД.*

2. Кисляк М. І. Исследование влияния параметров сетки на результаты CFD – расчётов ступени вентилятора ТРДД [Текст] / М. І. Кисляк, В. В. Комаров, М. М. Мітрахович / Технологические системы. – 2016. – № 3 (76). – С. 60–68. **(ПІНЦ, Scientific Indexing Services, CiteFactor, ASI, InfoBase index)** *Здобувачем створено розрахункову модель вентилятора та проведено порівняння впливу розміру сітки на точність отримуваних результатів.*

3. Кисляк М. И. Исследование аэроакустической эффективности профиля лопатки вентилятора ТРДД с использованием комплекса ANSYS / М. И. Кисляк, М. М. Митрахович. // научно-технический журнал «Авиационно-космическая техника и технология». – 2017. – С. 54–58. **(Index Copernicus, CiteFactor,**

WorldCat, Google Scholar) *Здобувачем описано методику модифікації лопаткового вінця ступені вентилятора ТРДД.*

4. Кисляк М. І. Методика количественной оценки акустических характеристик ступени вентилятора / М. І. Кисляк. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Х. : – 2017. – № 32 (1254). – С. 133–138. (**Index Copernicus, WorldCat, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**)

5. Кисляк М. І. Порівняння впливу змін середовища при дослідженні моделі вентилятора ТРДД з використанням алгоритмів, що ґрунтуються на рівняннях тиску та густини / М. І. Кисляк. // Науково-технічний журнал «Проблеми тертя та зношування». К. : – 2017. – № 3 (76). – С. 100–106. (**Index Copernicus, PИИЦ, EBSCO, WorldCat, Google Scholar**)

Матеріали доповідей

6. Кисляк М. І. Дослідження впливу форми акустичного резонатора на ефективність зменшення звуку двигуна, в середовищі ANSYS/ М. І. Кисляк, М. М. Мітрахович // XIV Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки», 2–3 квітня 2014. *Здобувачем створено моделі акустичних резонаторів та проведено аналіз отриманих даних.*

7. Кисляк М. І. Визначення раціональної моделі турбулентності при розрахунках обтікання лопаткового вінця компресора ГТД / М. І. Кисляк, М. М. Мітрахович // АВІА–2015: XII міжнародна науково-технічна конференція, 28–29 квітня 2015. – К. : НАУ, 2015. – Т. І. – С. 20.58.–20.61. *Здобувачем проведено чисельний експеримент із застосуванням різних моделей турбулентності.*

8. Кисляк М. І. Дослідження впливу густоти розрахункової сітки на результати моделювання ступені вентилятора ТРДД/ М. І. Кисляк, М. М. Мітрахович // Міжнародна науково-практична конференція «Перспективи розвитку військової авіації. Кооперація підприємств авіаційної промисловості з іноземними компаніями – головний напрямок військово-технічного співробітництва та основа для створення нових зразків авіаційної техніки», 13 жовтня 2016 р. – К. : Міжнародний виставковий центр, 2016. – С. 44–45. *Здобувачем виконано аналіз отриманих даних та обрано оптимальні параметри сітки для подальших розрахунків.*

9. Kislyak M. I., Study of the mesh parameters for results in CFD – calculation of fan stage turbofan / М. І. Kislyak // “Safety in Aviation and Space Technologies: the seventh world congress «Aviation in the XXI–st century», 19–21 вересня 2016 р. тези доп. – К. : НАУ, 2016. – Т. І. – С. 1.5.22.–1.5.26.

10. Кисляк М. І., Способи перевірки точності результатів при застосуванні акустичних моделей / М. І. Кисляк // XVII Міжнародна науково-практична конференція молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» 4–5 квітня 2017.

11. Кисляк М. І., Порівняння розрахункових алгоритмів, заснованих на рівняннях тиску та густини при дослідженні моделі вентилятора ТРДД / М. І. Кисляк // АВІА–2017: XIII міжнародна науково-технічна конференція, 19–21 квітня 2017 р. – К. : НАУ, 2017. – Т. I. – С. 20.26.–20.30.

12. Кисляк М. І. Исследование аэроакустической эффективности профиля лопатки вентилятора ТРДД с использованием комплекса ANSYS / М. І. Кисляк, М. М. Мітрахович // XXII Международный конгресс двигателестроителей, 4–9 сентября 2017 г. – Харьков – Николаев – Коблево. *Здобувачем описано методику модифікування лопаткового вінця вентилятора.*

АНОТАЦІЯ

Кисляк Михайло Іванович. «Методика удосконалення акустичних характеристик вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна». – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.03 – двигуни та енергетичні установки. – Національний авіаційний університет. – Київ, 2017.

Робота присвячена розробці методики удосконалення акустичних характеристик вентилятора турбореактивного двоконтурного двигуна.

У роботі виконано аналіз джерел шумоутворення та існуючих способів його зниження, визначена наукова новизна досліджень, мета і завдання дисертаційної роботи. Запропоновано метод дослідження з застосуванням математичної моделі, що дозволяє виконувати чисельну оцінку аероакустичним характеристикам лопатки вентилятора. На підставі використання даного методу виконано модифікації лопаток вентилятора та проведено порівняння з стандартним пером лопатки вентилятора.

У роботі проаналізовано результати розрахунку математичної моделі ступені вентилятора ТРДД, виконаних з метою визначення впливу форми лопатки на аероакустичні характеристики вентилятора. Виконано порівняння результатів експерименту проведеного ДП «Івченко Прогрес» з результатами моделювання, для визначення адекватності отримуваних даних.

З використанням даної методики дослідження аероакустичних даних розроблено рекомендації для покращення характеристик ступені вентилятора.

Ключові слова: вентилятор, шум, лопатка, турбореактивний двоконтурний двигун, моделювання.

АННОТАЦИЯ

Кисляк Михаил Иванович. «Методика совершенствования акустических характеристик вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя». – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.03 – двигатели и энергетические установки. – Национальный авиационный университет – Киев, 2017.

Работа посвящена разработке методики совершенствования акустических характеристик вентилятора турбореактивного двухконтурного двигателя.

В работе выполнен анализ источников шумообразования и существующих способов его снижения, определена научная новизна исследований, цель и задачи диссертационной работы. Предложен метод исследования с применением математической модели, позволяющей выполнять численную оценку аэроакустических характеристик лопатки вентилятора. На основании использования данного метода выполнены модификации лопатки вентилятора и проведено сравнение со стандартным пером лопатки вентилятора.

В работе проанализированы результаты расчета математической модели ступени вентилятора ТРДД, выполненных с целью определения влияния формы лопатки на аэроакустические характеристики вентилятора. Выполнено сравнение результатов эксперимента, проведенного ГП «Ивченко Прогресс» с результатами моделирования, для определения адекватности получаемых данных.

С использованием данной методики исследования аэроакустичних данных разработаны рекомендации для улучшения характеристик ступени вентилятора.

Ключевые слова: вентилятор, шум, лопатка, турбореактивный двухконтурный двигатель, моделирование.

ABSTRACT

Kyslyak M. I. «Method of improving the acoustic characteristics of the fan of turbofan engine». – Manuscript.

Thesis for obtaining Candidate of Engineering Sciences (Ph. D.) degree on specialty 05.05.03 – Power plants and engines. – National aviation university. – Kyiv, 2017.

Current research is dedicated to the improvement of acoustic characteristics of the turbofan engine fan parameters research.

During the research made an analysis of the noise sources and the methods of noise decreasing, determined scientific novelty, objective and task of scientific work. Suggested the researching method with appliance of mathematical model, which allows to implement numeral evaluation for aero-acoustic parameters of fan's blades. Based on the usage of current method, were made fan's blades modification and made a comparison with a standard fan's blade.

Was made an analysis of mathematical evaluation model results of the fan area in the turbojet engine, which made with the purpose of determination influence of the blade's form on aero-acoustic parameters of fan. In this work were made a comparison of the experiment results, which conducted by DP "Ivchenko Progress" with the results of modeling, for determination of data adequacy.

With the usage of current method of aero-acoustic data research, created recommendations for improving characteristics fan's area.

Keywords: fan, noise, blade, turbofan engine, modeling.

Підп. до друку 17.01.2018. Формат 60x84/16. Папір офс.
Офс. друк. Ум. друк. арк. 1,16. Обл.-вид. арк. 1,25.
Тираж 100 пр. Замовлення № -1.

Видавець і виготівник
Національний авіаційний університет
03680. Київ – 58, проспект Космонавта Комарова, 1

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 977 від 05.07.2002