

УДК 621.45.037

doi:10.20998/2413-4295.2017.32.21

МЕТОДИКА КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНИ ВЕНТИЛЯТОРА

М.И. КИСЛЯК

Кафедра авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, УКРАИНА
*email:kislyak_nau@ukr.net

АННОТАЦИЯ Современное двигателестроение тесно связано с учетом экологических параметров двигателей, которые позволяет их разработчикам быть конкурентоспособными и востребованными на мировом рынке [1]. Одним из направлений совершенствования пассажирских самолетов является разработка способов уменьшения шума силовой установки путем выбора рациональных способов снижения шума с использованием моделирования элементов вентилятора, как основного источника шума двигателя. Для количественной оценки влияния геометрии конструктивных элементов вентилятора предлагается методика оценки акустических характеристик ступени вентилятора с помощью коэффициента шумообразования.

Ключевые слова: ТРДД; двигатель; вентилятор; моделирование; лопатка; шум.

METHOD OF QUANTITATIVE ESTIMATION OF ACOUSTIC CHARACTERISTICS OF THE FAN STAGE

M.I. KISLYAK

Department of aircraft engines, National Aviation University, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT Modern engine manufacturing is closely connected with consideration of ecological parameters of engines, which allows their developers to be in great demand and be competitive on the world market [1]. One of the directions of improvement passenger airplanes is process development of noise reduction of power unit by the choice of the efficient methods of a noise decreasing, with using modeling process of fan structural elements, as a main source of engine noise. For quantitative impact assessment of structural elements geometry of the fan the assessment technique of a fan acoustic characteristics by means of noise formation coefficient is offered. Implemented blades modification for studying of geometry influence on indicators of fan acoustic characteristics is carried out. Results of calculations are given in a type of dependences which analysis allowed to define the modified blade with the lowest noise formation coefficient level. For this study the best profile was profile inclined by 5 degrees in the direction to the entrance section as has the best indicators in comparison with the others. For receiving a total characteristic, the efficiency of each modification is in addition calculated. Proceeding from the obtained data more effective is also the profile inclined by 5 degrees towards entrance section. The offered technique allows to estimate influence and quantitatively of a behavior mode and geometry on acoustic characteristics by means of noise formation coefficient.

Keywords: turbojet engine; engine; fan; simulation; blade; noise.

Введение

При рассмотрении проблем эмиссии шума ТРДД выделяют два проблемных, с точки зрения экологии, этапа полета: взлет и посадка, на которых необходимо иметь минимальный уровень излучаемого шума. На рис. 1. показаны основные источники шума летательного аппарата [2].

Заметно, что наибольший вклад в эмиссию шума вносит вентилятор двигателя, поэтому исследование направлено на изучение путей его уменьшения. Уменьшения шумовой эмиссии возможно при определении основных источников в ступени вентилятора и причин их появления. К основным причинам, которые влияют на образования шума относят турбулентное обтекание, периодические отрывные обтекания лопаток и турбулентная струя [3].

Цель работы

Определить источники генерации шума возможно с помощью математической модели вентилятора. Такая модель позволяет наглядно увидеть развитие акустических возмущений и определить параметры, которые влияют на ее изменение. Для сравнительной оценки влияния различных факторов на уровень шума необходимо определить количественный показатель этого влияния.

Изложение основного материала

Для изучения шумовых характеристик вентилятора используется программный комплекс ANSYS [4], который позволяет определить характеристики ступени вентилятора, такие как КПД, степень повышения давления.

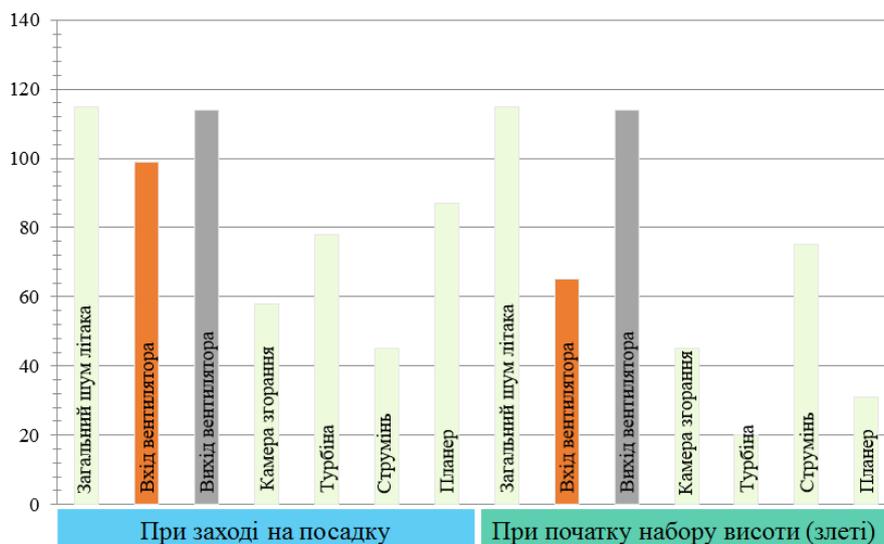


Рис.1 - Вклад элементов самолета в общий уровень шума.

Расчет данных характеристик производится в несколько этапов: подготовки геометрии проточной части, построения расчетной сетки, которая соответствует минимальным требованиям программы, выбора модели турбулентной вязкости, выбор акустической модели, определение исходных и граничных условий, собственно расчета и методики обработки результатов исследования [5, 6]. Данный алгоритм расчёта используется при каждой модификации геометрии ступени вентилятора.

Данная модель использует уравнение Лайтхилла,

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

где T_{ij} - тензор напряжения, который представляет собой разницу между напряжением в потоке и напряжениями в однородной среде в состоянии спокойствия; p_i - величина аэродинамической нагрузки со стороны потока на плоскость S в направлении x_i ; u_η - составная скорость потока вблизи стенок.

Уравнение Лайтхилла, с использованием уравнений Навье-Стокса, позволяет определять характеристики шума потока [7].

Для определения широкополосного шума используют метод основанный на работе Праундмена для определения акустической мощности генерируемой изотонно турбулентностью без основного течения [8]

$$P_A = \alpha \rho_0 \left(\frac{u^3}{l} \right) \frac{u^5}{a_0^5}, \quad (2)$$

где u – турбулентная скорость; l – длина; a_0 – скорость звука; α – константа.

Определение акустической силы определяется с использованием зависимости:

$$L_p = 100 \log \left(\frac{P_A}{P_{ref}} \right), \quad (3)$$

где P_{ref} – эталонная акустическая мощность.

Использование данного подхода в среде ANSYS позволяет определять зоны шумообразования в расчетной области рис.2. [9]. Из анализа результатов моделирования можно сделать вывод, что основными источниками шумового излучения являются кромочные сечения лопатки вентилятора. Источники шума вызваны срывным обтеканием профиля и образованием вихревых зон, которые загромаждают межлопаточный канал. Уменьшение или устранение данных зон возможно с помощью профилирования лопаток вентилятора.

Проверка адекватности результатов моделирования проводится их сравнением с данными эксперимента (см. таблицу 1) [10].

Таблица 1 – Сравнение результатов моделирования

Параметр	Эксперимент	Модель	Отклонение
$n_{вент}$, об/хв	2202	2202	0%
$G_{конт1}$, КГ/С	391,828	394,056	0,569%
$G_{конт2}$, КГ/С	58,49	58,7244	0,4%
$P_{1конт}$, Па	119200	116545	2,227%
$P_{2конт}$, Па	113700	111886	1,595%
$T_{1конт}$, К	305	301,252	1,229%
$T_{2конт}$, К	296,1	294,369	0,585%

Максимальное отклонение результатов моделирования от экспериментальных данных составляет не более 2,3%, что позволяет утверждать о адекватности и точности предложенной модели

Для сравнения эффективности влияния профилирования лопаток на снижение акустических характеристик вентилятора ТРДД предлагается ввести коэффициент шумообразования – ξ , который характеризует отношение объема вихревой зоны к объему проточной части:

$$\xi = \frac{V_{вз}}{V_{пч}}, \quad (4)$$

где $V_{вз}$ – объем вихревой зоны; $V_{пч}$ - объем проточной части.

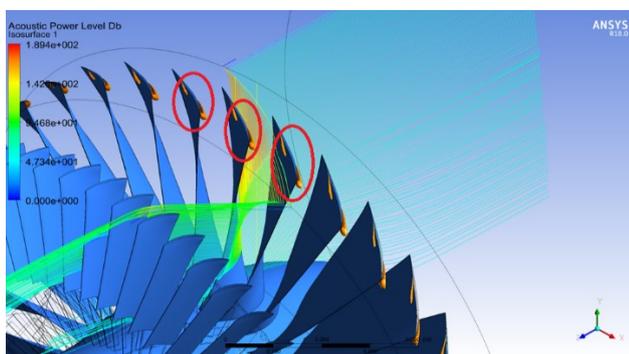


Рис. 2 – Источники акустического давления.

На рис. 3 показана зависимость изменения коэффициента шумообразования при максимальной и номинальной частоте вращения ротора.

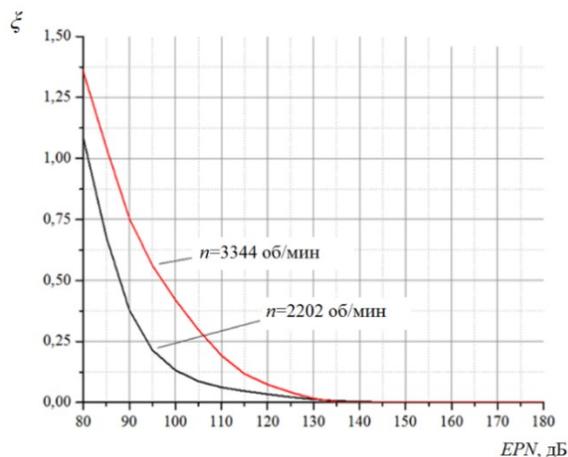


Рис. 3 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования при максимальной и номинальной частоте вращения ротора.

Модификация исходной лопатки вентилятора проводится изменением наклона кромочного сечения в направлении входа и выхода вентилятора, а также его поворота. Такая модификация может позволить уменьшить уровень шума, генерируемого лопаткой (рис. 4) [11,12].

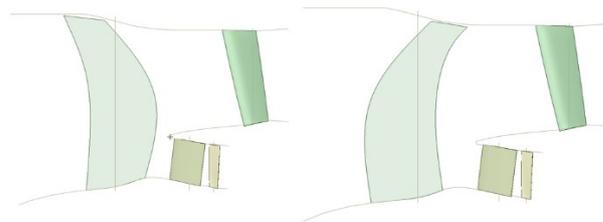


Рис.4 – Наклон сечения относительно центральной оси лопатки.

Модифицированные лопатки профилируются поворотом кромочного сечения на 5 градусов в обе стороны (рис. 5).

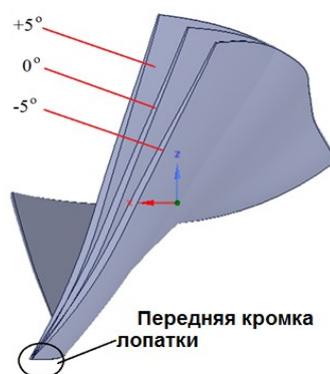


Рис. 5 - Схема поворота кромочного сечения лопатки

Обсуждение результатов

Зависимости коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки, наклоненной на 5 градусов в направлении выходного сечения и поворотом кромочного сечения на 5 градусов в обе стороны приведены на рис.6. Из приведенных зависимостей видно, что наиболее эффективным является модифицированная лопатка с поворотом на +5 градусов.

Зависимости коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки, наклоненной на 2,5 градуса в направлении выходного сечения и поворотом кромочного сечения на 5 градусов в обе стороны приведены на рис.7. Из приведенных зависимостей видно, что эффективным является модифицированная лопатка с поворотом кромочного сечения на +5 градусов и без его поворота.

Зависимости коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки, наклоненной на 2,5 градуса в направлении входного сечения и поворотом кромочного сечения на 5 градусов в обе стороны приведены на рис.8. Из приведенных зависимостей видно, что наиболее эффективным является модифицированная лопатка с поворотом на +5 градусов.

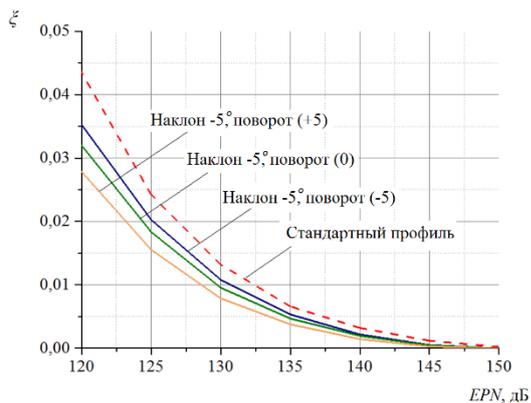


Рис. 6 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки наклоненной на -5° при частоте вращения 2202 об/мин.

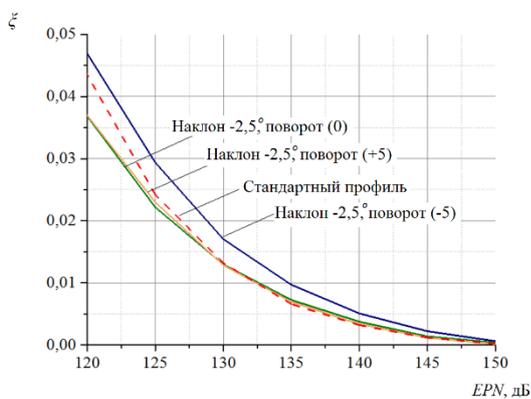


Рис. 7 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки наклоненной на $-2,5^\circ$ при частоте вращения 2202 об/мин.

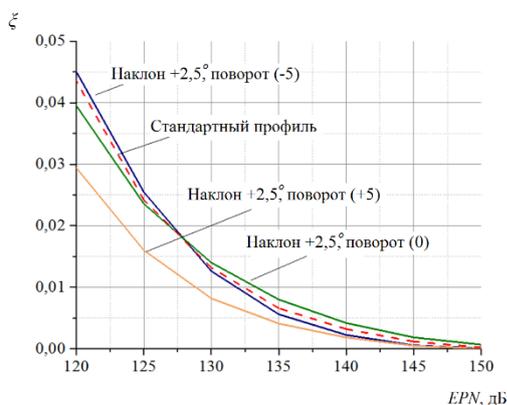


Рис. 8 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки наклоненной на $+2,5^\circ$ при частоте вращения 2202 об/мин.

Зависимости коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки, наклоненной на 5 градусов в направлении входного сечения и поворотом кромочного сечения на 5 градусов приведены на рис.9. Из приведенных зависимостей видно, что наиболее эффективным является модифицированная лопатка без поворота.

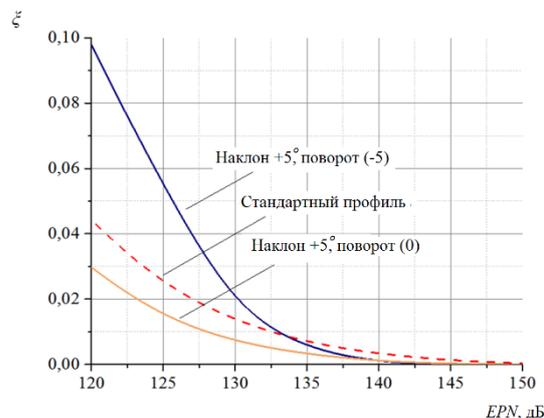


Рис. 9 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированной лопатки наклоненной на $+5^\circ$ при частоте вращения 2202 об/мин.

Анализ приведённых зависимостей (рис. 6-9.) показывает, что наименьший уровень коэффициента шумообразования, имеют модифицированные лопатки вентилятора, наклоненные на 5 градусов. Для сравнения все модифицированные лопатки с наилучшими показателями коэффициента шумообразования приведены на рис.10.

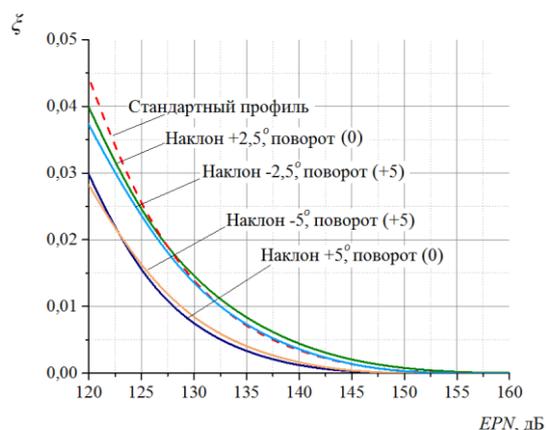


Рис. 10 – Зависимость изменения коэффициента шумообразования от акустического давления для модифицированных лопаток с наилучшими показателями.

Модифицированный профиль наклоненный на 5 градусов в направлении к входному сечению, имеет наилучшие показатели в сравнении с остальными. Для получения полной характеристики рассчитан КПД каждой модификации рис. 11. Исходя из полученных данных более эффективным также является профиль, наклоненный на 5 градусов в сторону входного сечения.

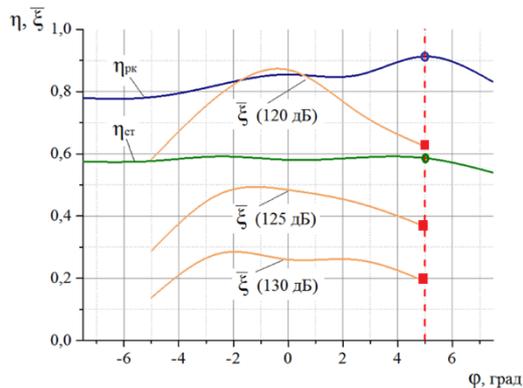


Рис. 11 – Зависимость изменение КПД ступени и рабочего колеса для модифицированных лопаток с частотой вращения ротора 2202 об/мин.

Выводы

Предложенная методика позволяет количественно оценивать влияние режима работы и геометрии ступени на акустические характеристики с помощью коэффициента шумообразования.

Список литературы

1. Халецкий, Ю. Д. ИКАО: новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации / Ю. Д. Халецкий. // *Двигатель. Научно-технический журнал*. – 2014. – С. 8–11.
2. Халецкий, Ю. Д. Экологические проблемы авиации / Ю. Д. Халецкий. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 504 с.
3. Мунин, А. Г. Авиационная акустика: В 2-х ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов / А. Г. Мунин, В. Ф. Самохин, Р. А. Шипов та ін. – М.: Машиностроение, 1986. – 248 с.
4. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: –ДМК Пресс, 2014 – 640с.
5. Кисляк, М. І. Исследование влияния параметров сетки на результаты CFD — расчётов ступени вентилятора ТРДД / М. І. Кисляк, В. В. Комаров, М. М. Мітрахович // *Технологические системы*. – 2016. – №3 (76). – С. 60–68. – с. 68.
6. Мітрахович, М. М. Визначення раціональної моделі турбулентності для отримання характеристик ступені вентилятора осьового компресора газотурбінного двигуна з використанням програмного комплексу ANSYS / М. М. Мітрахович, М. І. Кисляк, В. В. Комаров // *Технологические системы*. – 2015. – №3 (72). – С.62 – 67.
7. Lighthill, M. J. On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory / M. J. Lighthill // *Proc. R. Soc. Lond.* – 1952. – A211. – p. 564–587.

8. Horváth, C. Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan rotor cascades / C. Horváth, J. Vad // *14th International Conference on Fluid Flow Technologies*. – 2009. – pp. 682–689.
9. Proudman, I. The Generation of Noise by Isotropic Turbulence / I. Proudman // *Proc. Roy. Soc.* – 1952. – A:214:119. – 119-125.
10. Результаты акустических измерений шума двигателя Д18Т25 с элементами шумоглушения и смещенными дисками турбины вентилятора на ОС-1: Техническая справка / ДП "Івченко Прогрес"; рук. Мартыненко Л.И.; исполн. Попуга А.И., Запорожье – 2005. – 14 с. - Т/с № 243/2005-18Т.
11. Carolus, T. An aerodynamic design methodology for low pressure axial fans with integrated airfoil polar prediction / T. Carolus, R. Starzmann // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. – 2011. – Vancouver, Canada.
12. Bamberger, K. Optimization of axial fans with highly swept blades with respect to losses and noise reduction / K. Bamberger, T. Carolus // *Proceedings of the Fan2012*, Senlis, France, 2012.

Bibliography (transliterated)

1. Khaletsky, Y. D. ICAO: a new standard for the noise of civil aviation aircraft. *The engine. Scientific and technical journal*. 2014, 2 (92), 8-11.
2. Khaletsky, Y. D. Environmental problems of aviation. М.: TORUS PRESS, 2010. 504 p.
3. Munin, A. G., Samohin, V. F., Shipov, R. A. та in. Aeronautical acoustics: In 2 parts Part 1. Noise in the area of subsonic passenger aircraft and helicopters. М.: Mashinostroenie, 1986. 248 p.
4. Basov, K. A. ANSYS: Spravochnik polzovatelya. М.: ДМК Press, 2014. 640.
5. Kislyak, M. I., Komarov, V. V., Mitrahovich, M. M. Research of influence the mesh parameters for results CFD — calculation of fan stage turbofan. *Tehnologicheskie sistemy*. 2016, №3 (76), 60–68.
6. Mitrahovich, M. M., Kislyak, M. I., Komarov, V. V. Determination of rational model of turbulence for fan characterize the degree of axial compressor gas turbine engine using ANSYS software complex. *Tehnologicheskie sistemy*. 2015, №3 (72), 62–67.
7. Lighthill, M. J. On Sound Generated Aerodynamically I. General Theory. *Proc. R. Soc. Lond.* 1952, A211, 564–587.
8. Horváth, C., Vad, J. Broadband noise source model acoustical investigation on unskewed and skewed axial flow fan rotor cascades. *14th International Conference on Fluid Flow Technologies*. 2009, 682–689.
9. Proudman, I. The Generation of Noise by Isotropic Turbulence. *Proc. Roy. Soc.* 1952, A 214:119, 119-125.
10. Results of acoustic measurements of engine noise D18T25 with noise attenuation elements and displaced turbine blades on the OS-1 [Text]: Technical reference / DP "Ivchenko Progres"; head L.I. Martynenko performer A.I. Popuga // Zaporozhye, 2005, 14 with, Т / с № 243 / 2005-18Т.
11. Carolus, T., Starzmann, R. An aerodynamic design methodology for low pressure axial fans with integrated airfoil polar prediction. *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. 2011, Vancouver, Canada.
12. Bamberger, K., Carolus, T. Optimization of axial fans with highly swept blades with respect to losses and noise reduction *Proceedings of the Fan2012*, Senlis, France, 2012.

Сведения об авторах (About authors)

Кисляк Михаил Иванович - аспирант кафедры авиационных двигателей, Национальный авиационный университет, Киев, Украина, e-mail: kislyak_nau@ukr.net.

Kislyak Mikhail Ivanovich - postgraduate student of the Aviation Engines Department, National Aviation University, Kiev, Ukraine, e-mail: kislyak_nau@ukr.net.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кисляк, М. И. Методика количественной оценки акустических характеристик ступени вентилятора / **М. И. Кисляк** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2017. – № 32 (1254). – С. 133-138. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.21.

Please cite this article as:

Kislyak, M. I. Method of quantitative estimation of acoustic characteristics of the fan stage. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, **32** (1254), 133–138, doi:10.20998/2413-4295.2017.32.21.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Кисляк, М. І. Методика кількісної оцінки акустичних характеристик ступені вентилятора / **М. І. Кисляк** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, *Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2017– № 32 (1254). – С. 133-138. – doi:10.20998/2413-4295.2017.32.21.

АНОТАЦІЯ Сучасне двигунобудування тісно пов'язано з екологічними параметрами двигунів, що дозволяє їх розробникам бути конкурентоспроможними на світовому ринку. Одним із напрямів удосконалення пасажирських літаків є розробка способів зменшення шуму силової установки шляхом вибору раціональних напрямків зниження шуму з використанням моделювання впливу конструктивних елементів вентилятора, як основного джерела шуму двигуна. Для кількісної оцінки впливу геометрії конструктивних елементів вентилятора пропонується методика оцінки акустичних характеристик ступені вентилятора за допомогою коефіцієнта шумоутворення.

Ключові слова: ТРДД; двигун; вентилятор; моделювання; лопатка; шум.

Поступила (received) 08.09.2017