

УДК 629.735.036.34:004.3'122(045)

М. И. КИСЛЯК¹, М. М. МИТРАХОВИЧ²¹ *Национальный авиационный университет, Киев, Украина*² *ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРО-АКУСТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛЯ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРДД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПЛЕКСА ANSYS

Модификация авиационных двигателей сложный процесс и такие направления как исследование эффективности профиля лопатки вентилятора с точки зрения аэро-акустических характеристик требует особенного подхода. Одним из таких подходов является использование программной среды, которая позволяет определять наиболее эффективный профиль с минимальными затратами. Данная методика значительно ускоряет работу проектировщика, позволяя за минимальные сроки предварительно определить параметры вентилятора и принять все необходимые меры по повышению его эффективности.

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

Введение

Современные авиакомпании ради цели конкурентоспособности надают преимущество самолетам, которые соответствуют параметрам сертификации 4-й главы ИКАО с максимальным запасом пролетного шума [1]. В последнее время экологические характеристики самолетов становятся решающим фактором для предприятий при проектировании планеров авиационных судов и их силовых установок. Через что для модификации элементов самолета выделяется огромное количество ресурсов и времени, однако для проведения предыдущих расчетов целесообразнее использовать математические модели, которые позволят в режиме реального времени проверять влияние изменений на работу ступени вентилятора. Таким образом использование специальных программ, которые позволяют моделировать процессы внутри двигателя является необходимым этапом при модификации летательного судна.

1. Постановка задачи

Известно, что двигатель несет существенный вклад в общий уровень шума [2] и на рис.1. изображено лепестковая шумограмма ТРДД, где 1- шум вентилятора, 2 – шум сопла двигателя, 3 – шум турбины, 4 – шум внутреннего контура. С нее видно, что основным источником шума является именно вентилятор двигателя, через что исследование направлено на изучение и уменьшения его шума.

К основным способам уменьшения шума вентилятора относят применение специальных шумопоглощающих конструкций, установленных на облицовке входного устройства или на лопатках статора и ротора. Другим способом снижения шуму

вентилятора является уменьшение источников его создания путем модификации профилей лопаток, режимов работы и др.

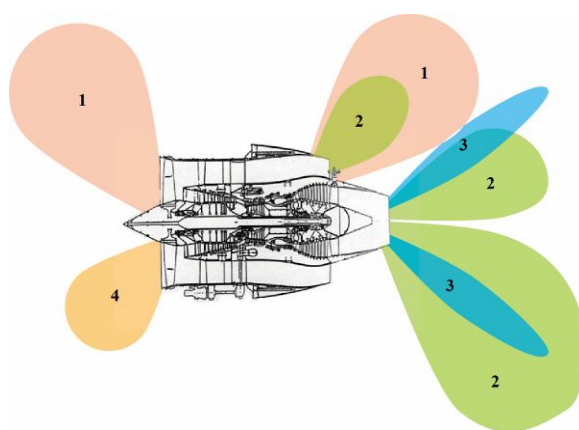


Рис. 1. Лепестковая шумограмма ТРДД

Однако изготовление опытных образцов лопаток требует огромных временных и ресурсных затрат, через что используется комплекс ANSYS, который позволяет с достаточной точностью моделировать характеристики двигателя [3]. В качестве опытного образца исследования использовано лопатку вентилятора ТРДД вместе с параметрами потока в ступени, которая представлена для исследования ГП «Ивченко-Прогресс» [4].

2. Решение поставленной задачи

Исследование разделено на несколько этапов: 1) формирование математической модели и проверка ее адекватности; 2) задание параметров расчетных моделей; 3) анализ предварительных результатов и модификация геометрии лопатки на их основе; 4) анализ полученных характеристик.

Математическая модель ступени вентилятора включает помимо основных уравнений неразрывности потока, также состоит из модели турбулентной вязкости и акустической модели. Основные этапы выбора описаны в статье [5], и в качестве наиболее подходящих выбрана модель SAS SST, которая наиболее точно описывает поток при нестационарном расчете и $k-\epsilon$ для стационарного. В качестве акустической модели использовано модель: broad band noise source model, которая используется для определения источников широкополосного шума, возникающих в канале с лопатками. К недостаткам данного метода можно отнести невозможность определения звуковых волн, отраженных от поверхностей в канале. Через что возникает необходимость в изучении только источников шума, а не его распространения.

Преимуществом данного метода является то, что при его помощи можно определить источники шума, а низкие требования к мощности компьютера позволяют проводить расчеты с большими расчетными областями. Поэтому именно данная модель используется в данной работе.

Первым этапом является построение геометрии ступени вентилятора, сформированной из рабочих лопаток ротора и лопаток статора (внешнего и внутреннего контуров), наглядно представлена на рис. 2.

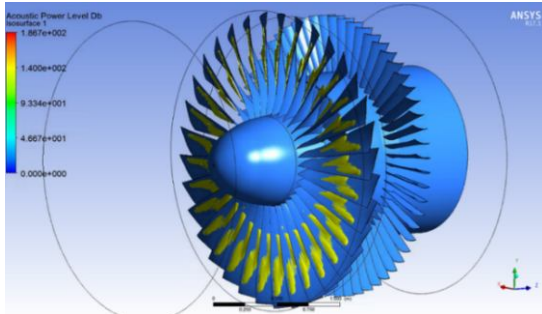


Рис. 2. Модель ступени вентилятора ТРДД

Также, для анализа генерации акустических возмущений в работе приведена иллюстрация источников шума в проточном канале двигателя. На

рис.3. показаны линии тока в канале, а также максимальные акустические пульсации на поверхности лопатки.

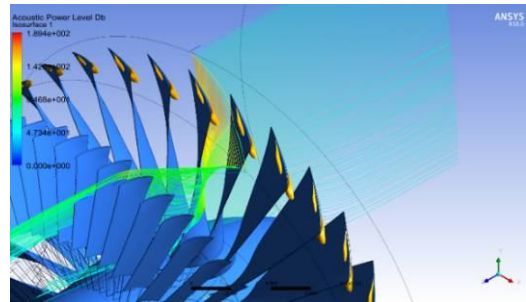


Рис. 3. Источники максимальных акустических пульсаций 160 дБ

Поскольку данные пульсации размещены на корневом сечении лопатки, то модификации профиля, с точки зрения акустических характеристик, проводится именно для этого сечения.

Для определения влияния наклона корневого сечения на характеристики ступени, сделано расчет моделей с разными углами наклона профилей, а именно наклон в сторону входа на 5 и 2,5 градуса, а также наклон в сторону выхода (рис. 4).

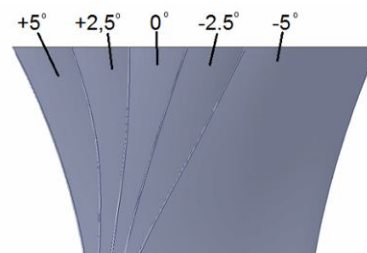


Рис. 4. Углы наклона кромочного сечения профиля

Моделирование проводится для всех профилей при одинаковых условиях, что позволяет учитывать влияние именно формы профиля. Таким образом, все модели имеют одинаковые входные условия и расход по контурам, однако отличаются по всем остальным параметрам. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты исследований

Параметры в сечениях		Угол наклона профиля				
		-5	-2,5	0	2,5	5
Вход в ступень	P	19,08	23,84	35,03	36,62	45,78
	T	290,2	290,	290,1	290,1	290,0
	G	473,0	471,0	468,1	467,0	464,8
Выход внешний контур	P	13931	14398	12634	13348	12332
	T	306,8	308,0	308,6	309,4	310,3
	G	391,8	391,8	391,8	391,8	391,8
Выход внутренний контур	P	8963	8548	7347	7209	6509
	T	300,4	300,6	300,7	300,9	301,1
	G	58,49	58,49	58,49	58,49	58,49

Используя результаты моделирования можно определить основные параметры ступени [6]:

КПД компрессора:

$$\eta_k = \frac{L_{sk}}{L_k},$$

где L_{sk} – изоэнтропийная работа сжатия, которая определяется из уравнения:

$$L_{sk} = \frac{k}{k-1} RT_0 \left(\left(\frac{P_2^*}{P_0^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right),$$

где $k=1,4$ – показатель адиабаты; T_0^* – температура газа на входе в компрессор, К; P_0^* – полное давление газа на входе в компрессор, Па; P_2^* – полное давление газа на выходе с компрессора, Па; $R=287$ Дж/кг·К – универсальная газовая постоянная.

Значение давления и температуры известны и используются в качестве граничных условий на входе.

Удельная работа на валу компрессора равна:

$$L_k = \frac{N}{G},$$

Мощность на валу компрессора определяется из уравнения

$$N = M_{кр} \frac{\pi n}{30},$$

где n – частота вращения ротора компрессора, об/мин.

Зависимость η (КПД) ступени и рабочего колеса от φ (угла наклона лопатки вентилятора) представлена на рис. 5.

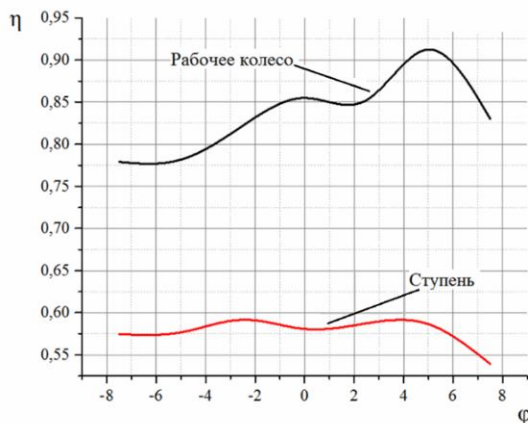


Рис. 5. Зависимость КПД ступени и рабочего колеса от угла наклона лопатки вентилятора

Анализ зависимости (рис. 5.) показывает, что при наклоне профиля в сторону входа в канал, увеличивается КПД рабочего колеса, но почти не изменяется КПД ступени в целом. Это говорит о том, что

изменение наклона не влияет на ступень и разброс значений находится в рамках погрешности.

Данный показатель несет лишь косвенную характеристику вентилятора и нуждается в дополнительном анализе при помощи определения потерь полного давления для внешнего и внутреннего контура двигателя

$$\sigma = \frac{P_1}{P_2}.$$

Зависимость σ (потерь полного давления) для внешнего и внутреннего контура двигателя от φ представлена на рис. 6.

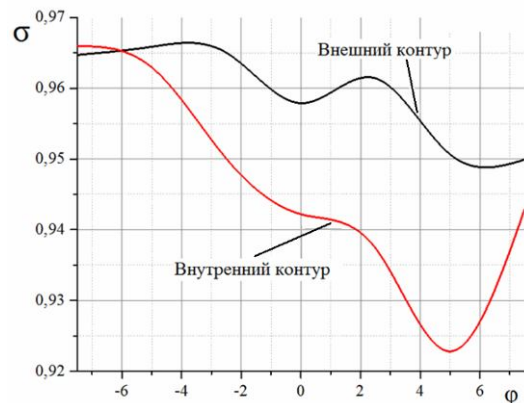


Рис. 6. Зависимость потерь полного давления для внешнего и внутреннего контура двигателя от угла наклона лопатки вентилятора

Анализ зависимости (рис. 6.) показывает, что наименьшие потери будут при использовании профиля, который наклонен в сторону сопла. Это вызвано более рациональным углом входа в статор внутреннего и внешнего контура. Также уменьшаются потери на вихреобразование.

На рис. 7. представлены зависимости π (степени повышения давления) рабочего колеса и ступени от угла наклона лопатки вентилятора.

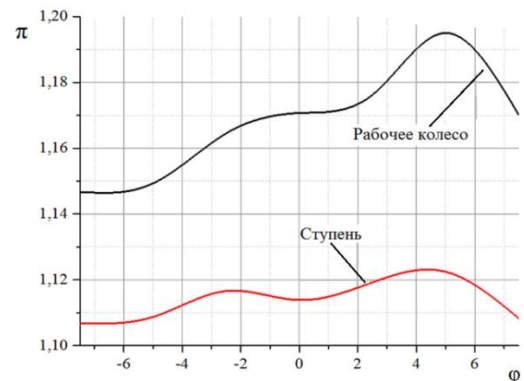


Рис. 7. Зависимости степени повышения давления рабочего колеса и ступени от угла наклона лопатки вентилятора

Данный график показывает, что наиболее эффективным с точки зрения повышения давления будет профиль, наклоненный на 5 градусов в сторону сопла. Однако нужно принять к сведению, что данный параметр зависит лишь от перепада давлений, поэтому нужно также следить за давлением на входе в компрессор и внешний контур (рис. 8).

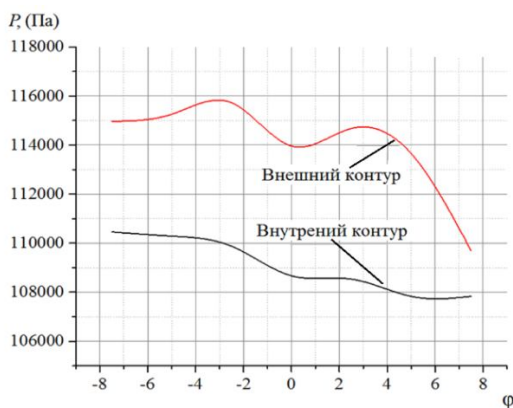


Рис. 8. Давление на выходе с контуров в зависимости от угла наклона лопатки вентилятора

Как видно с рис. 8, давление на входе в компрессор имеет большее значение при наклоне профиля в сторону сопла.

Для оценки влияния угла наклона на источники генерации шума с углами наклона 2,5°, 0°, -2,5°, -5° (рис. 9-10) введем понятие объемного коэффициента

$$\xi = \frac{V_{\text{зоны}}}{V_{\text{вент}}},$$

где $V_{\text{зоны}}$ - объем источника акустических волн; $V_{\text{вент}}$ - объем расчетной зоны вентилятора.

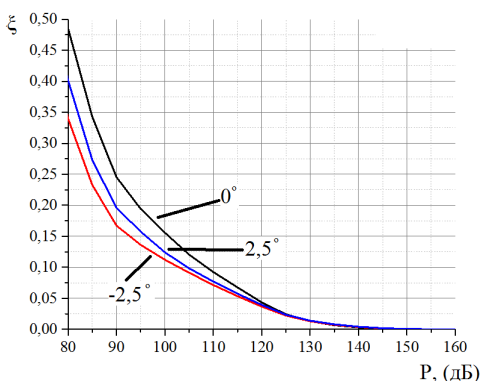


Рис. 9. Зависимость изменения объемного коэффициента от акустического давления при углах наклона -2,5°, 0°, 2,5°

Исходя с данного графика (рис.9.) видно, что минимальное шумовое излучение будет при наклоне лопатки в сторону сопла двигателя, но для определения зависимости наклона и подтверждения уменьшения объемного коэффициента, дополнительно введен график с углом наклона -5° (рис.10)/

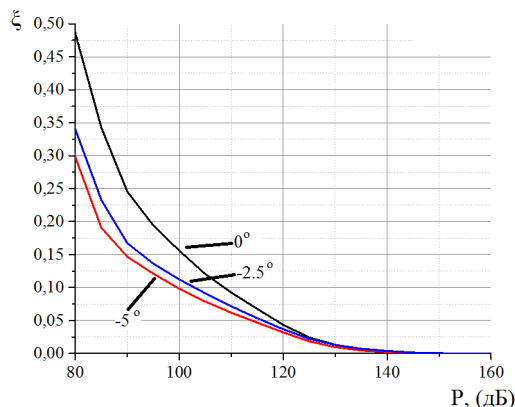


Рис. 10. Зависимость изменения объемного коэффициента от акустического давления при углах наклона -5°, -2,5°, 0°

Заметно, что увеличение угла наклона в сторону сопла уменьшает источники генерации шума, но незначительно, в сравнении с -2,5°.

Заключение

Используя все полученные данные о эффективности работы ступени вентилятора видно, что максимальное ККД и степень сжатия в ступени имеют профили при наклоне в сторону входного аппарата, но по таким параметрам как сигма потерь, и уменьшения объемного коэффициента эффективными являются профили наклоненные в сторону сопла. Оптимальным профилем, который имеет хорошие показатели объемного коэффициента и ККД, является профиль с углом наклона -2,5°. Поэтому с точки зрения повышения аэроакустических характеристик данной ступени профиль рабочей лопатки вентилятора нужно наклонить на 2,5° в сторону сопла, что повысит давления на входе в компрессор и уменьшит источники генерации шума.

Литература

1. Халецкий, Ю. Д. ИКАО : новый стандарт на шум самолетов гражданской авиации [Текст] / Ю. Д. Халецкий // Двигатель. - 2014. - №2 (92). - С. 8-11.
2. Халецкий, Ю. Д. Экологические проблемы авиации [Текст] / Ю. Д. Халецкий. - М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. - 504 с.
3. Басов, К. А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К. А. Басов. - М. : ДМК Пресс, 2014. - 640 с.
4. Основные направления уменьшения шума воздушных судов [Текст] : техн. справка / ГП «Ивченко-Прогресс» ; рук. Хусточка А. Н. ; исполнил Попуга А. И. - К., 2017. - 18 с. - Т/с № 186/2013-18Т серии 3М.
5. 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 // Технологічні системи. – 2015. – № 3 (72). – С. 62–67.

6. Мамиконов, А. Г. Теория Авиационных компрессоров и газовых турбин [Текст] / А. Г. Мамиконов, А. П. Ерохин, Г. И. Предтеченский ; под ред. И. И. Кулагина. – Л. : ЛКВВИА им. А. Ф. Можайского, 1961. – 422 с.

References

1. Khaletsky, Y. D. ICAO : novyj standart na shum samoletov grazhdanskoj aviacii [ICAO : a new standard for the noise of civil aviation aircraft]. *Dvigatel*, 2014, no. 2 (92), pp. 8-11.

2. Khaletsky, Y. D. *Jekologicheskie problemy aviacii* [Environmental problem of aviation]. Moscow, TORUS PRESS Publ., 2010. 504 p.

3. Basov, K. A. *ANSYS : spravochnyk pol'zovatelya* [ANSYS : user's guide]. Moscow, DMK Press Publ., 2014. 640 p.

4. Khustochka, A. N., Papuga, A. I. *Osnovnye napravlenija umen'shenija shuma vozdušnyh sudov* [The main directions of noise reduction of aircraft]. Technical reference, State Enterprise "Ivchenko-Progress", Kiev, 2013. 18 p. T/s no. 186/2013-18T series 3M.

5. Kislyak, M. I., Komarov, V. V., Mitrakhovich, M. M. *Vyznachennya ratsional'noyi modeli turbulentsi dlya otrymannya kharakterystyk stupeni ventilyatora os'ovoho kompresora hazot-binnoho dvyhuna z vykorystannyam prohramnoho kompleksu ANSYS* [Determination of rational model of turbulence for fan characterize the degree of axial compressor gas turbine engine using ANSYS software complex]. *Tehnologicheskie sistemy*, 2015, no. 3 (72), pp. 62–67.

6. Mamikonov, A. G., Erokhin, A. P., Predtechensky, G. I. *Teorija Aviacionnyh kompressorov i gazovyh turbin* [Theory of Aviation Compressors and Gas Turbines]. Leningrd, LKVVIA named A. F. Mozhaiskogo Publ., 1961. 422 p.

Поступила в редакцию 5.03.2017, рассмотрена на редколлегии 8.06.2017

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. авиационных двигателей Ю. М. Терещенко, Национальный авиационный университет «НАУ», Киев.

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРО-АКУСТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОФІЛЮ ЛОПАТКИ ВЕНТИЛЯТОРА ТРД З ВИКОРИСТАННЯМ КОМПЛЕКСУ ANSYS

М. І. Кисляк, М. М. Мітрахович

Модифікація авіаційних двигунів складний процес і такі напрямки як дослідження ефективності профілю лопатки вентилятора з точки зору аеро-акустичних характеристик вимагає особливого підходу до задачі. Одним з таких підходів є використання програмного середовища, що дозволить визначити найбільш ефективний профіль з мінімальними витратами. Дана методика значно прискорює роботу конструктора і дослідницького відділу, дозволяючи за мінімальні терміни попередньо дізнатися параметри роботи вентилятора і взяти всіх необхідних заходів щодо підвищення його ефективності.

Ключові слова: ТРД, двигун, вентилятор, моделювання, лопатка, шум.

INVESTIGATION OF AERO-ACOUSTIC EFFICIENCY OF THE FAN PROFILE OF THE TURBOJET ENGINE WITH THE USING ANSYS

M. I. Kislyak, M. M. Mitrakhovich

The modification of aircraft engines is a complex process and such directions as investigation of the efficiency of the profile of the fan blade from the point of view of aero-acoustic characteristics require a special approach to the problem. One such approach is the use of a software environment that will allow to determine the most effective profile with minimal costs. This technique significantly speeds up the designer and research department, allowing for a minimum period of preliminary investigation of the parameters of the fan and take all the necessary measures.

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

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

Митрахович Михаил Михайлович – д-р техн. наук, проф., заместитель директора ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: mmm777@gmail.com.

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

Mitrakhovich Mikhail Mikhailovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the State Enterprise "Ivchenko-Progress", Zaporozhye, Ukraine, e-mail: mmm777@gmail.com.