

ОБОСНОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЫЛЕЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

© 2022

А. С. Гишваров

доктор технических наук, профессор кафедры авиационных двигателей;
Уфимский государственный авиационный технический университет;
kafedra.ad@mail.ru

А. Х. Рахимов

ст. преподаватель кафедры авиационных двигателей;
Уфимский государственный авиационный технический университет;
mr.abdusattor@list.ru

Пылезащитное устройство считается важнейшим элементом для сохранения работоспособности вертолётных двигателей при эксплуатации в условиях запылённого воздуха. Интенсивность эрозии элементов газовой проточной части газотурбинного двигателя зависит от многих факторов: от твёрдости и химического состава частиц пыли, от фракционного состава, концентрации песка, режима работы двигателя и др. Поэтому разработка методики выбора оптимальных значений параметров пылезащитного устройства является сложной многокритериальной и многофакторной задачей. В данной статье рассматривается методика выбора оптимальных значений геометрических размеров пылезащитного устройства авиационного газотурбинного двигателя. Методика включает шесть основных этапов. Выбор оптимальных значений геометрических параметров пылезащитного устройства проводится с учётом трёх частных критериев эффективности: степени очистки воздуха, потери давления в пылезащитном устройстве и массы на основе применения метода Парето. Рассматривается пример выбора оптимальных значений геометрических параметров циклонного пылезащитного устройства.

Пылезащитное устройство; показатели эффективности пылезащитного устройства; обобщённая функция цели; Парето-оптимальное множество

Цитирование: Гишваров А.С., Рахимов А.Х. Обоснование геометрических параметров пылезащитного устройства газотурбинного двигателя // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2022. Т. 21, № 2. С. 7-15. DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-7-15

Введение

Пылевая эрозия элементов проточной части авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и отложения пыли вызывают снижение мощности, недопустимый рост температуры газа перед турбиной, поломки ослабленных эрозией лопаток, помпаж и другие отказы. Попавшие в двигатель частицы пыли не только изменяют форму профилей лопаток, но и оседают во входной части компрессора, что затрудняет надёжную работу двигателя вертолёт. В результате налипания пыли на лопатках компрессора их собственная частота колебаний может уменьшиться на 45%, что приводит к недопустимому увеличению действующих в лопатках напряжений и к их обрыву [1; 2].

Эрозионный износ лопатки компрессора приводит также к утонению передней и задней кромок, выработке поверхностей корыта, уменьшению значений хорды и максимальной толщины. Такие повреждения лопаток компрессора ведут к изменению режима их обтекания и, соответственно, к изменению параметров, определяющих условия работы профиля в потоке:

- угла между средней геометрической скоростью и хордой профиля;
- коэффициента подъёмной силы;
- угла набегания, определяемого как угол между вектором скорости воздуха перед решёткой и касательной к средней линии профиля у передней кромки;
- угла отставания потока;
- угла поворота потока в решётке.

Увеличение угла набегания за счёт эрозионного износа входной кромки может приводить к росту местных скоростей на поверхности профиля и к появлению сверхзвуковых скоростей потока.

Гидравлические потери при движении воздуха через канал решётки с небольшими скоростями до и после повреждения поверхностей профиля лопатки сводятся к трём видам:

- 1) профильные потери, связанные с образованием вторичных течений;
- 2) концевые потери, связанные с образованием пограничного слоя на стенках, ограничивающих канал решётки по высоте;
- 3) вторичные потери, связанные с возникновением протеканий в пограничном слое.

Увеличение суммарных потерь полного давления, обусловленное ухудшением характеристик отдельных ступеней при эрозионном износе лопаток, приводит к падению напорности ступеней и уменьшению плотности воздуха по тракту компрессора. Происходит смещение характеристик в сторону меньших расходов, граница устойчивости смещается к рабочей линии. На границе помпажа при малых частотах вращения ротора работа первых ступеней компрессора неустойчива, а режим работы последних ступеней близок к режиму «запираания».

Увеличение удельного расхода топлива и температуры газов за турбиной происходит за счёт ухудшения аэродинамики проточной части вследствие увеличения радиальных зазоров между рабочими лопатками и корпусом компрессора, износа и шероховатости поверхности лопаток.

Снижение запаса газодинамической устойчивости из-за эрозионного износа на определённую величину может способствовать возникновению помпажа у двигателей. Одной из причин этого является разброс по характеристикам как новых, так и прошедших ремонт ГТД.

При эрозионном износе элементов конструкции двухконтурных двигателей с увеличением наработки также ухудшается их газодинамическая устойчивость. Наблюдается смещение линии рабочих режимов высокого давления, смещение напорных ветвей по расходу воздуха, изменение границы устойчивой работы. Например, изменение КПД компрессора или турбины каскада высокого давления двигателя типа Д-30КУ на 1% вызывает смещение линии рабочих режимов на 0,72%.

Поэтому на практике используются пылезащитные устройства (ПЗУ) авиационных двигателей, в которых для отделения пыли (песка) от воздуха используется их инерционность.

Целью данной работы является разработка методики выбора оптимальных значений геометрических параметров ПЗУ с учётом многокритериальности и многофакторности решаемой задачи.

Методика выбора параметров ПЗУ

Методика включает шесть основных этапов.

Этап 1. Формирование исходных данных. На данном этапе проводится:

- обоснование программного обеспечения, используемого для моделирования двухфазного потока «воздух – частицы песка». При этом рассматриваются Лагранжевый, Эйлеровый и комбинированный методы [5];
- выбор режима работы двигателя;
- задание характеристик песка (количества, скорости, диаметра частиц и др.), области определения геометрических размеров ПЗУ и др.

Этап 2. Выбор частных параметров и критериев эффективности ПЗУ. На практике в качестве частных параметров эффективности рассматриваются два показателя [1; 2]:

- степень очистки воздуха – η , %;
- потеря давления в ПЗУ – Δp , Па.

В данной работе авторами вводится ещё один параметр эффективности – масса ПЗУ (M , кг). Таким образом, выбор оптимальных значений геометрических параметров ПЗУ $X_{opt} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ проводится с учётом трёх критериев эффективности:

$$\begin{aligned}\Phi_1(X) &= \eta_{opt}(X) = \max \eta_i(X); \\ \Phi_2(X) &= \Delta p_{opt}(X) = \min \Delta p_i(X); \\ \Phi_3(X) &= M_{opt}(X) = \min M_i(X),\end{aligned}\tag{1}$$

где $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ – вектор геометрических параметров ПЗУ.

Значения параметров η , Δp и M определяются моделированием двухфазного потока «воздух – частицы песка» с применением программного комплекса (ПК) *Ansys Fluent* для ПЗУ с различной геометрией. Область значений $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$ задаётся в виде системы двухсторонних ограничений $x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}$; $i = \overline{1, k}$.

Этап 3. Нормирование частных параметров и критериев эффективности ПЗУ. При нормировании вместо «натурального» параметра вводится его отношение к некоторой нормирующей величине, измеряемой в тех же единицах, что и сам параметр [7 – 9]. В результате операции нормирования и приведения к единой шкале все частные критерии эффективности приобретают безразмерный вид с диапазоном измерения от 0 до 1:

$$\begin{aligned}\Phi_1^H(X) &= \eta_{opt}^H(X) = \max \eta_i(X) \in 0 \dots 1; \\ \Phi_2^H(X) &= \Delta p_{opt}^H(X) = \min \Delta p_i(X) \in 0 \dots 1; \\ \Phi_3^H(X) &= M_{opt}^H(X) = \min M_i(X) \in 0 \dots 1.\end{aligned}\tag{2}$$

Критерии эффективности вида (2) можно преобразовать к виду, по которому эффективность ПЗУ будет тем выше, чем больше значение показателя (в %):

$$\begin{aligned}\Phi_1^H(X) &= \max \eta_i(X) \in (0 \dots 100) \%; \\ \Phi_2^H(X) &= \max \left[1 - \frac{\Delta p_i(X)}{\Delta p_{\text{баз}}(X)} \right] 100 \in (0 \dots 100) \%; \\ \Phi_3^H(X) &= \max \left[1 - \frac{M_i(X)}{M_{\text{баз}}(X)} \right] 100 \in (0 \dots 100) \%,\end{aligned}\tag{3}$$

где $\Delta p_{\text{баз}}$ и $M_{\text{баз}}$ – базовые значения показателей Δp и M , соответствующие наиболее желательным значениям, к которым необходимо стремиться.

Представление критериев в виде (3) удобно для выбора оптимальных геометрических параметров ПЗУ в виде обобщённой целевой функции аддитивного вида [8; 9]:

$$0 \leq a_i \leq 1; \sum_{i=1}^3 a_i = 1.$$

Этап 6. Экспертно или используя дополнительный количественный критерий, назначаемый исследователем (разработчиком) ПЗУ, выбирается окончательный вариант геометрии ПЗУ из множества Парето-оптимальных значений.

Пример определения оптимальных значений геометрических параметров циклонного ПЗУ

Принципиальная схема циклонного ПЗУ приведена на рис. 1.

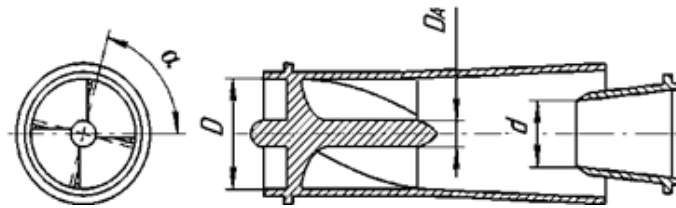


Рис. 1. Принципиальная схема циклонного пылезакладного устройства

Сепарация пыли в циклонах и их гидравлическое сопротивление зависят от основных конструктивных параметров, к которым относятся угол закрутки лопаточного аппарата α , диаметр корпуса циклона D и ряд линейных размеров, характеризующихся относительными величинами (отнесёнными к диаметру D): внутренним диаметром центральной трубки d , внешним диаметром центрального обтекателя D_A и др.

При увеличении угла закрутки α возрастают тангенциальные скорости воздуха и твёрдых частиц. Вследствие этого увеличиваются центробежные силы и радиальные скорости частиц. Ввиду того, что центробежная сила пропорциональна v^2 (v – скорость твёрдых частиц), степень очистки η находится в обратной зависимости от $\operatorname{tg}^2 \alpha$. Однако увеличение угла закрутки α приводит к увеличению турбулентности потока внутри циклона, что, в свою очередь, приводит к потерям давления за циклоном.

С увеличением диаметра корпуса D при постоянном расходе воздуха уменьшаются осевые скорости воздуха и твёрдых частиц, что ведёт к пропорциональному увеличению продолжительности пребывания частиц в поле центробежных сил и способствует сепарации. Однако при этом уменьшается тангенциальная скорость воздуха, влияющая на силы инерции.

Уменьшение диаметра центральной трубки d приводит к уменьшению степени очистки воздуха η , так как при этом меньшая часть траекторий твёрдых частиц заканчивается в пределах входного сечения трубки. Это приводит к значительному уменьшению поступающего в ГТД воздуха и потерям давления на выходе из циклона.

В процессе исследования эффективность ПЗУ оценивалась степенью очистки воздуха (η , %), потерей давления в ПЗУ (Δp , Па) и массой ПЗУ (M , кг) [2].

Область определения параметров ПЗУ соответствовала следующим ограничениям:

- угол закрутки лопаточного аппарата $60^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$;
- внешний диаметр центрального обтекателя $6 \leq D_A \leq 12$ мм;
- внутренний диаметр центральной трубки $18 \leq d \leq 24$ мм;
- внутренний диаметр внешней трубки $16 \leq D \leq 30$ мм.

Построение уравнений регрессий $(\eta, \Delta p, M) = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$ проводилось по данным центрального композиционного плана, включающего 25 экспериментов (опытов) [10].

В кодированных значениях переменных x_1, x_2, \dots, x_k уравнения регрессии имеют вид:

$$\eta = 94,1 - 1,37x_4 - 0,56x_1x_2 + 2,823x_1x_3 + 0,8x_1x_4 + 0,8x_2x_3x_4 - 2,88x_2x_4 + 3,7x_1^2 - 3,4x_2^2 - 0,87x_3^2; \quad (7)$$

(погрешность оценки η по уравнению (7) равна 1,35%);

$$\Delta p = 629 - 737,88x_1 - 772,68x_2 - 372,7x_3 + 1275,5x_1x_2 + 11441,28x_1x_3 + 1252,68x_1x_4 + 1103,2x_2x_4 - 1172,2x_3x_4 + 1750,6x_3^2; \quad (8)$$

(погрешность оценки Δp по уравнению (8) равна 1,43%);

$$M = 9856,68 + 157,848x_2 + 4434,316x_4 - 30,283x_3x_4 + 645,6x_4^2; \quad (9)$$

(погрешность оценки M по уравнению (9) равна 0,5%).

В натуральных единицах измерения параметров α , D_A , d и D уравнения регрессии имеют вид:

$$\eta = 104,7 - 1,02D - 1,035\alpha D_A + 1,89\alpha d + 0,01\alpha D + 56,98D_A d + 0,91D_A D - 0,006\alpha^2 + 76,27D_A^2 - 150,051d^2, \%;$$

$$\Delta p = 12230,3 - 20,32\alpha - 1681,15D_A - 26355,87d + 21,18\alpha D_A + 12,56\alpha d + 0,45\alpha D + 36,44D_A D - 41,1dD + 15424,07d^2, \text{ Па};$$

$$M = 1861,5 + 3124,5D_A + 167,8D + 44,1dD + 6,87D^2, \text{ кг}.$$

Результаты выбора параметров ПЗУ приведены в таблице, где под № 1 приведены результаты исходного ПЗУ, с которым проводилось сравнение ПЗУ с Парето-оптимальными значениями геометрических параметров (варианты № 2 ... № 5).

Оценка эффективности выбора проводилась по формуле:

$$\delta = \frac{|p_{\text{исх}} - p|}{p_{\text{исх}}} 100, \%,$$

где $p_{\text{исх}}$ – исходное значение показателя; p – текущее значение показателя.

Таблица. Значения Парето-оптимальных решений

№	$\eta, \%$	$\Delta p, Па$	$M, кг$	δ_i		
				δ_η	$\delta_{\Delta p}$	δ_M
1	94,5	630	0,0115	0	0	0
2	98,4	501	0,0138	+4,13	+20,4	-20,4
3	98,6	546	0,0132	+4,36	+13,2	-14,5
4	99,0	543	0,0159	+4,76	+13,7	-39,0
5	99,9	643	0,0173	+5,70	+2,2	-50,4

Примечание: «-» – показатель эффективности ПЗУ ухудшается; «+» – показатель эффективности ПЗУ улучшается.

В качестве окончательного было выбрано ПЗУ под №2, которое по сравнению с исходным ПЗУ на 4,13% имеет лучший показатель по параметру η , на 20% имеет лучший показатель по параметру Δp , но на 20% уступает исходному ПЗУ по параметру M . Оптимальные значения геометрических параметров ПЗУ следующие: $\alpha_{opt} = 90^\circ$, $D_{Aopt} = 6 \text{ мм}$; $d_{opt} = 15 \text{ мм}$; $D_{opt} = 25 \text{ мм}$.

Библиографический список

1. Степанов Г.Ю., Зицер И.М. Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986. 181 с.
2. Гишваров А.С., Аитов Р.Р., Айтумбетов А.М. Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолётных газотурбинных двигателей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19, № 2 (68). С. 100-110.
3. Рахимов А.Х., Салимзянова А.А. Исследование влияния геометрии вертолётного пылезащитного устройства на его эффективность // Материалы XI Всероссийской молодёжной научной конференции «Мавлютовские чтения». Т. 1. Уфа: УГАТУ, 2017. С. 62-67.
4. Железина Г.Ф., Соловьёва Н.А., Макрушин К.В., Рысин Л.С. Полимерные композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолётного двигателя // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 58-63. DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63
5. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Курова И.В. Лагранжев подход к моделированию турбулентных течений газозвеси в приложении к проблемам внутренней газодинамики РДТТ // Сб. трудов шестой Всероссийской конференции «Внутрикамерные процессы и горение в установках на твёрдом топливе и ствольных системах» (8-10 сентября 2008 г., Санкт-Петербург, Россия). Ижевск: ИПМ УрО РАН, 2008. С. 320-332.
6. Рысин Л.С. Ещё раз о пыли // Двигатель. 2009. № 5 (65). <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html>
7. Ларичев О.И. Теория и метод принятия решений. М.: Логос, 2006. 392 с.
8. Мушкин Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990. 208 с.

9. Гишваров А.С. Совмещённые ресурсные испытания технических систем. Уфа: АН РБ, Гилем, 2002. 268 с.

10. Гишваров А.С., Рахимов А.Х. Планирование эксперимента при исследовании авиационных двигателей и энергетических установок: уч. пособие. Уфа: УГАТУ, 2019. 243 с.

JUSTIFICATION OF GEOMETRIC PARAMETERS OF THE ENGINE AIR PARTICLE SEPARATOR

© 2022

A. S. Gishvarov

Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Aircraft Engines;
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;
kafedra.ad@mail.ru

A. Kh. Rakhimov

Senior Lecturer, Department of Aircraft Engines;
Ufa State Aviation Technical University, Ufa, Russian Federation;
mr.abdusattor@list.ru

The Engine Air Particle Separator is considered to be the most important element for maintaining the performance of helicopter engines when operating in dusty air conditions. The intensity of erosion of the elements of the gas-air passage of the gas turbine engine depends on many factors: on the hardness and chemical composition of dust particles, on the fractional composition, sand concentration, engine operating condition etc. Therefore, the development of a method for selecting the optimal values of the Engine Air Particle Separator parameters is a complex multi-criteria and multi-factor task. The present document addresses the selection method of optimal values (geometric dimensions) of the Engine Air Particle Separator parameters in aviation gas turbine engines. The methodology includes six main steps. The choice of optimal values of the Engine Air Particle Separator geometrical parameters is accomplished taking into account three partial criteria for the Engine Air Particle Separator efficiency: the degree of air purification, pressure loss and mass. The Engine Air Particle Separator parameters are selected using the Pareto method. An example of choosing the optimal values of the geometric parameters of a cyclone Engine Air Particle Separator is considered.

Particle separator; optimal parameters of a dust protection device; generalized target function; Pareto optimal set

Citation: Gishvarov A.S., Rakhimov A.Kh. Justification of geometric parameters of the engine air particle separator. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2022. V. 21, no. 2. P. 7-15.
DOI: 10.18287/2541-7533-2022-21-2-7-15

References

1. Stepanov G.Yu., Zitser I.M. *Inertsionnye vozdukhochistiteli* [Inertial air cleaner]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986. 181 p.
2. Gishvarov A.S., Aitov R.R., Aytumbetov A.M. Study the effectiveness of the dust devices. *Vestnik UGATU*. 2015. V. 19, no 2 (68). P. 100-110. (In Russ.)
3. Rakhimov A.Kh., Salimzyanova A.A. Issledovanie vliyaniya geometrii vertoletnogo pylezashchitnogo ustroystva na ego effektivnost'. *Materialy XI Vserossiyskiy molodezhnoy nauchnoy konferentsii «Mavlyutovskie Chteniya»*. V. 1. Ufa: UGATU Publ., 2017. P. 62-67. (In Russ.)
4. Zhelezina G.F., Solovieva N.A., Makrushin K.V., Rysin L.S. Polymer composite materials for manufacturing engine air particle separation of advanced helicopter engine. *Aviation Materials and Technologies*. 2018. No. 1 (50). P. 58-63. (In Russ.). DOI: 10.18577/2071-9140-2018-0-1-58-63
5. Volkov K.N., Emel'yanov V.N., Kurova I.V. Lagranzhev podkhod k modelirovaniyu turbulentnykh techeniy gazovzvesi v prilozhenii k problemam vnutrenney gazodinamiki

RDTT. *Sb. trudov shestoy Vserossiyskoy konferentsii «Vnutrikamernye Protsessy i Gorenie v Ustanovkakh na Tverdom Toplive i Stvol'nykh Sistemakh»* (September, 8-10, 2018, Saint-Petersburg, Russia). Izhevsk: IPM UrO RAN Publ., 2008. P. 320-332. (In Russ.)

6. Rysin L.S. Once more about dust. *Engine*. 2009. No. 5 (65). (In Russ.). Available at: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html>

7. Larichev O.I. *Teoriya i metod prinyatiya resheniy* [Theory and method of decision making]. Moscow: Logos Publ., 2006. 392 p.

8. Mushkin E., Myuller P. *Metody prinyatiya tekhnicheskikh resheniy* [Techniques for making technical decisions]. Moscow: Mir Publ., 1990. 208 p.

9. Gishvarov A.S. *Sovmeshchennye resursnye ispytaniya tekhnicheskikh sistem* [Combined life cycle tests of technical systems]. Ufa: AN RB, Gilem Publ., 2002. 268 p.

10. Gishvarov A.S., Rakhimov A.Kh. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok: uch. posobie* [Planning an experiment in the study of aircraft engines and power plants]. Ufa: UGATU Publ., 2019. 243 p.