

## МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ ЦИКЛОННОГО ПЫЛЕЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА АВИАЦИОННОГО ГТД

А. С. ГИШВАРОВ<sup>1</sup>, А. Х. РАХИМОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> kafedra.ad@mail.ru, <sup>2</sup> mr.abdusattor@list.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 22.04.2021

**Аннотация.** Рассматривается методика выбора оптимальной геометрии циклонного пылезащитного устройства (ПЗУ) авиационного двигателя. Методика включает следующие основные этапы: формирование исходных данных, выбор частных показателей эффективности ПЗУ и их нормирование, построение регрессионных уравнений связи вида «параметры эффективности ПЗУ – геометрические размеры ПЗУ», формирование обобщенной функции цели, определение множества Парето-оптимальных решений и выбор окончательного варианта оптимальной геометрии ПЗУ. Приводится численный пример выбора оптимальной геометрии циклонного ПЗУ.

**Ключевые слова:** пылезащитное устройство (ПЗУ); показатели эффективности; обобщенная функция цели; Парето-оптимальное множество; методика.

### ВВЕДЕНИЕ

Пылевая эрозия элементов проточной части авиационных 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 надежную работу двигателя вертолета. 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 к утонению передней и задней кромок, выработке поверхностей корыта, уменьшению значений хорды и максимальной толщины [3].

Такое повреждение лопаток компрессора ведет 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 подъемной силы;
- угла набегания, определяемого как угол между вектором скорости воздуха перед решеткой и касательной к средней линии профиля у передней кромки;
- угла отставания потока;
- угла поворота потока в решетке.

Увеличение угла набегания за счет 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 решетки с небольшими скоростями до и после повреждения поверхностей профиля лопатки сводятся к трем видам:

- а) профильные потери, связанные с образованием вторичных течений;

б) концевые потери, связанные с образованием пограничного слоя на стенках, ограничивающих канал решетки по высоте;

в) вторичные потери, связанные с возникновением протеканий в пограничном слое.

Увеличения 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 «запирания» [3].

Увеличения удельного расхода топлива и температуры газов за турбиной происходит за счет 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 определенную величину может способствовать возникновению помпажа у одних двигателей, в то время как у других этого явления при остальных одинаковых условиях не возникает. 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 авиационных двигателей, в которых для отделения пыли (песка) от воздуха используется их инерционность.

### АКТУАЛЬНОСТЬ

ПЗУ считается важнейшим элементом для сохранения работоспособности вертолетных двигателей при эксплуатации в условиях запыленного воздуха.

Оценка эрозии элементов газо-воздушного тракта ГТД является сложной задачей, поскольку зависит от многих факторов: от твердости и химического состава частиц пыли, от фракционного состава, концентрации песка, режима работы двигателя и др. Эффективность ПЗУ оценивается, как правило, двумя параметрами: степенью очистки воздуха и потерей давления в воздушном тракте ПЗУ. Поэтому разработка методики выбора оптимальной геометрии ПЗУ является сложной многокритериальной и многофакторной задачей [4].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является разработка метода выбора оптимальной геометрии ПЗУ с учетом многокритериальности и многофакторности решаемой задачи.

### МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ 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 только два показателя [6–8]:

- степень очистки воздуха –  $\eta$ , %;
- потеря давления в ПЗУ –  $\Delta P$ , Па.

В данной работе авторами введено в рассмотрение еще одного параметра эффективности – массы ПЗУ ( $M$ , кг), то есть выбор оптимальной геометрии ПЗУ  $X_{opt} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  проводится с учетом трех частных критериев эффективности:

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

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

Численные значения параметров  $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $M$  определяются моделированием двухфазного потока «воздух – частицы песка» с применением программного комплекса (ПК) Ansys Fluent. Область значений  $X = (x_1, x_2, \dots, x_k)$  задается в виде системы двухсторонних ограничений вида:

$$x_{\min i} \leq x_i \leq x_{\max i}; \quad i = \overline{1, k},$$

где  $x_{\max}$ ,  $x_{\min}$  – максимальное и минимальное значения  $i$ -го фактора.

*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 [9–11]. В результате операции нормирования и приведения к единой шкале измерения все частные критерии эффективности приобретают безразмерный вид с диапазоном изменения от 0 до 1:

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

Критерии эффективности вида (2) можно преобразовать к виду, при котором эффективность параметров  $\eta$ ,  $\Delta P$  и  $M$  многокритериальность по принципу чем больше значения показателя, тем выше его эффективность в виде:

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

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

Представление критериев в виде (3) удобно для выбора оптимальной геометрии ПЗУ с применением обобщенной целевой функции аддитивного вида [8, 9]:

$$\Phi_{\Sigma}(X) = \max \sum_{i=1}^3 \Phi_i^H(X) = \max \left\{ \eta_i^H(X) + \left[ 1 - \frac{\Delta P_i(X)}{\Delta P_{\text{баз.}}(X)} \right] \cdot 100 + \left[ 1 - \frac{M_i(X)}{M_{\text{баз.}}(X)} \right] \cdot 100 \right\}. \quad (4)$$



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

При увеличении угла закрутки  $\alpha$  возрастают тангенциальные скорости воздуха и твердых частиц. Вследствие этого увеличиваются центробежные силы и радиальные скорости частиц. Ввиду того, что центробежная сила пропорциональна  $v^2$  ( $v$  – скорость твердых частиц), степень очистки  $\eta$  находится в обратной зависимости от  $\text{tg}^2\alpha$ . Однако, увеличение угла закрутки  $\alpha$  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 твердых частиц, что ведет 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  $\eta$ , так как при этом меньшая часть траекторий твердых 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 ( $\eta$ , %), потерей давления в ПЗУ ( $\Delta P$ , Па) и массой ПЗУ ( $M$ , кг) [1–3].

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 регрессии ( $\eta$ ,  $\Delta P$ ,  $M$ ) =  $f(x_1, x_2, \dots, x_k)$  проводилось по данным центрального композиционного плана, включающего 25 экспериментов (опытов) (табл. 1) [4].

Таблица 1

Матрица плана и результаты эксперимента

№ опыта	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
	( $\alpha$ , град.)	( $D_A$ , мм)	( $d$ , мм)	( $D$ , мм)	( $\eta$ , %)	( $\Delta P$ , Па)	( $M$ , кг)
1	–1	–1	1	1	91,5	581	0,0117
2	1	–1	–1	1	95,7	621	0,0148
3	–1	1	–1	1	89,5	535	0,0139
...	...	...	...	...	...	...	...
23	1	–1	–1	–1	93,0	609	0,0162
24	–1	1	–1	–1	97,9	653	0,0181
25	0	0	0	0	98,3	709	0,0201

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  $\eta$  по уравнению (7) равна 1,35 %);

$$\Delta P = 629,84 - 737,88x_1 - 772,68x_2 - 372,7x_3 + 1275,5x_1x_2 + 1441,28x_1x_3 + 1252,68x_1x_4 + 1103,2x_2x_4 - 1172,2x_3x_4 + 1750,6x_3^2; \quad (8)$$

(погрешность оценки  $\Delta P$  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  $\alpha$ ,  $D_A$ ,  $d$  и  $D$  уравнения регрессии имеют вид:

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

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

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

Результаты выбора параметров ПЗУ приведены в табл. 2, где под № 1 приведены данные исходного ПЗУ, а под (№ 2 ... № 5) 4 – Парето-оптимальных значений.

Оценка эффективности выбора оптимальной геометрии проводилась по формуле:

$$\delta = \frac{|P_{\text{исх.}} - P|}{P_{\text{исх.}}} \cdot 100 \quad \%$$

где  $P_{\text{исх.}}$  – исходное значение показателя;  $P$  – текущее значение показателя.

Таблица 2

Парето-оптимальные значения

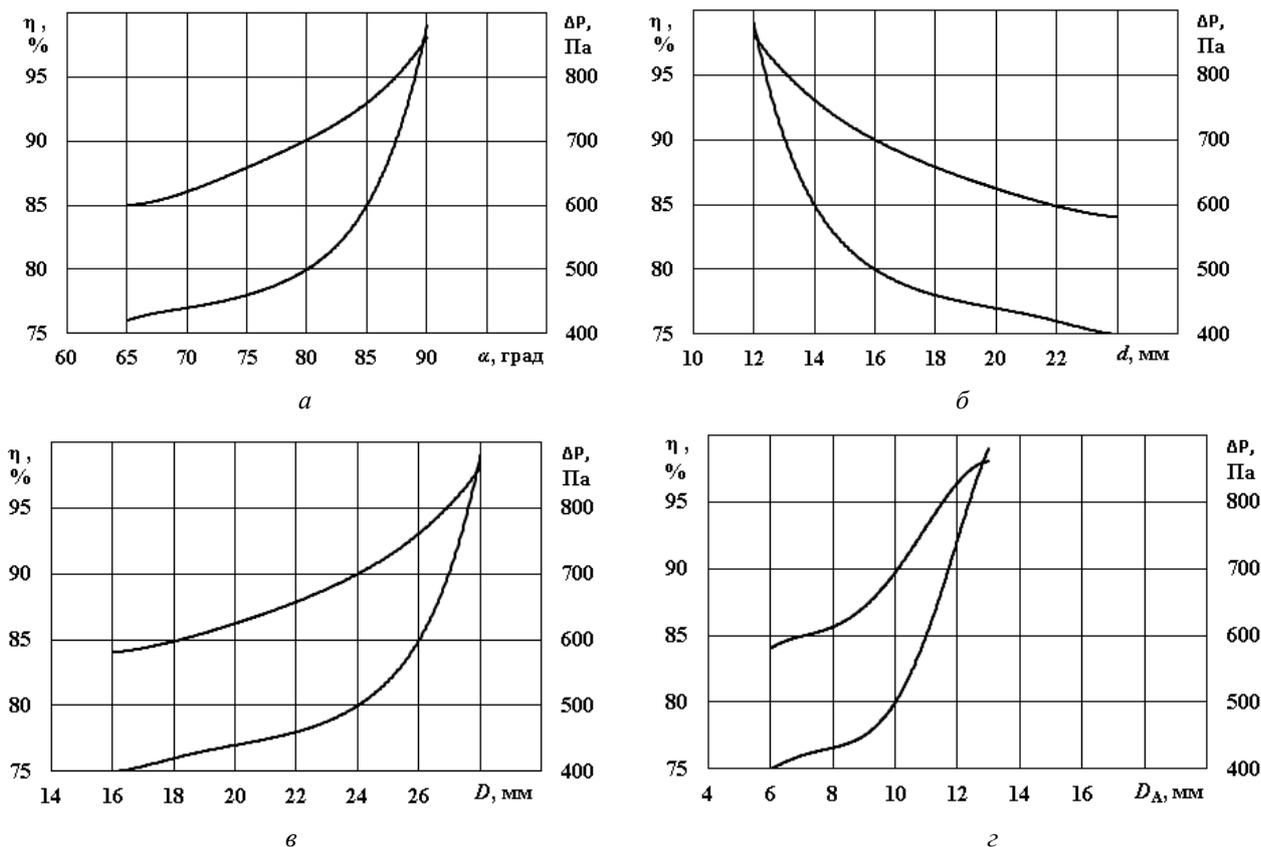
№ n/n	$\eta, \%$	$\Delta P, \text{Па}$	$M, \text{кг}$	$\delta_i$		
				$\delta_\eta$	$\delta_{\Delta P}$	$\delta_M$
1	94,5	630	0,0115	0	0	0
2	98,4	501	0,0138	+4,13	+20,4	-20,0
3	98,6	546	0,0132	+4,36	+13,2	-14,5
4	99,0	543	0,0159	+4,76	+13,7	-39,0
5	99,9	643	0,0173	+5,70	+2,2	-50,4

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

В качестве окончательного было выбрано ПЗУ № 2, которое по сравнению с исходным ПЗУ:

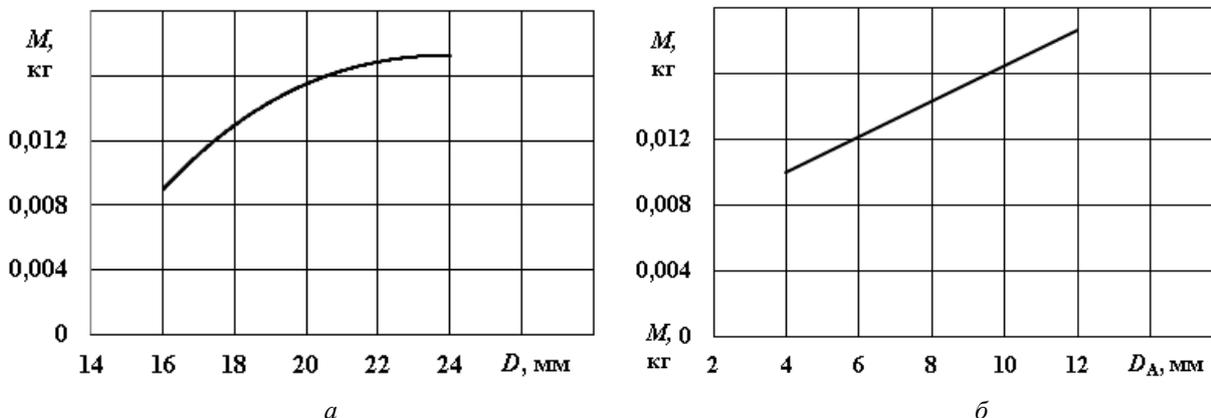
- на 4,1 % имеет лучший показатель по параметру  $\eta$ ;
- на 20 % имеет лучший показатель по параметру  $\Delta P$ ;
- но на 20 % уступает исходному ПЗУ по параметру  $M$ .

При этом оптимальные значения геометрии ПЗУ следующие:  $\alpha_{\text{opt}} = 90^\circ$ ;  $D_{\text{Aopt}} = 6 \text{ мм}$ ;  $d_{\text{opt}} = 15 \text{ мм}$ ;  $D_{\text{opt}} = 25 \text{ мм}$ .



**Рис. 2.** Влияние на степень очистки и потери давления ПЗУ:

*a* – угла закрутки  $\alpha$ ; *б* – внутреннего диаметра центральной трубки  $d$ ; *в* – внутреннего диаметра корпуса циклона  $D$ ; *г* – внешнего диаметра центрального обтекателя  $D_A$



**Рис. 3.** Влияние на массу ПЗУ:

*a* – внешнего диаметра центрального обтекателя  $D_A$ ; *б* – внутреннего диаметра корпуса циклона  $D$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Полимерные** композиционные материалы для изготовления пылезащитного устройства перспективного вертолетного двигателя / Г. Ф. Железина [и др.] // *Авиационные материалы и технологии*. 2018. № 1 (50). С. 58–63. [ G. F. Zhelezina, et al., "Polymer composite materials for the manufacture of a dustproof device for a promising helicopter engine", (in Russian), in *Aviacionnye materialy i tehnologii*, no. 1 (50), pp. 58-63, 2018. ]
2. **Рысин Л. С.** Еще раз о пыли // *Журнал «Двигатель»*. 2009. № 2. [Электронный ресурс]. URL: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html> (дата обращения 15.04.2021) [ L. S. Rysin (2021, Apr. 15), "One more time about dust" [Online], (in Russian), in *zhurnal "Dvigatel"*, no. 2, 2009. Available: <http://engine.aviaport.ru/issues/65/page10.html> ]
3. **Основы** конструирования, производства и эксплуатации авиационных газотурбинных двигателей и энергетических установок в системе CALS технологий. Кн. 3: Эксплуатация и надежность ГТД и ЭУ / Н. Н. Сиротин [и др.]. М.: Наука, 2012. 616 с. [ N. N. Sirotnin, et al., *Fundamentals of design, production and operation of aircraft gas turbine engines and power plants in the CALS technology system. Book. 3: Operation and reliability of the gas turbine engine and power plant*, (in Russian). Moscow: Nauka, 2012. ]

4. **Гишваров А. С.** Повышение эффективности многокритериального планирования многофакторного эксперимента. М: Машиностроение, 2014. 215 с. [ A. S. Gishvarov, *Improving the efficiency of multi-criteria planning of a multi-factor experiment, (in Russian)*. Moscow: Mashinostroenie, 2014. ]
5. **Волков К. Н., Емельянов В. Н., Курова И. В.** Лагранжев подход к моделированию турбулентных течений газозвеси в приложении к проблемам внутренней газодинамики РДТТ. Санкт-Петербург: «Военмех», 2008. С. 320–332. [ K. N. Volkov, V. N. Emel'ianov, I. V. Kurova, *Lagrangian approach to modeling turbulent flows of a gas suspension as applied to the problems of internal gas dynamics of solid propellants, (in Russian)*. St. Petersburg: "Voenmeh", 2008. ]
6. **Степанов Г. Ю., Зицер И. М.** Инерционные воздухоочистители. М.: Машиностроение, 1986. 184 с. [ G. Y. Stepanov, I. M. Zicer, *The inertial air cleaner, (in Russian)*. Moscow: Mashinostroenie, 1986. ]
7. **Гишваров А. С., Аитов Р. Р., Айтумбетов А. М.** Исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19, № 2 (68). С. 100–110. [ A. S. Gishvarov, R. R. Aitov, A. M. Aytumbetov, "Modeling and optimization features dustproof device helicopter turboprop", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 19, no. 2 (68), pp. 100-110, 2014. ]
8. **Гишваров А. С., Салимзянова А. А., Рахимов А. Х.** Исследование влияния геометрии вертолетного пылезащитного устройства на его эффективность // Мавлютовские чтения: материалы XI Всероссийский молодежной научной конференции УГАТУ. Уфа: УГАТУ, 2017. Т. 7. С. 62–67. [ A. S. Gishvarov, A. A. Salimzyanova, A. A. Rakhimov, "Investigation of the influence of the geometry of a helicopter dustproof device on its effectiveness", (in Russian), in *Mavlyutov Readings: Materials of the XI All-Russian Youth Scientific Conference UGATU*, 2017, vol. 7, pp. 62-67. ]
9. **Ларичев О. И.** Теория и метод принятия решений. М.: Логос, 2006. 392 с. [ O. I. Larichev, *Theory and method of decision making, (in Russian)*. Moscow: Logos, 2006. ]
10. **Мушкин Э., Мюллер П.** Методы принятия технических решений. М.: Мир, 1990. 208 с. [ E. Mushkin, P. Miuller, *Techniques for making technical decisions, (in Russian)*. Moscow: Mir, 1990. ]
11. **Гишваров А. С.** Совмещенные ресурсные испытания технических систем. Уфа: Гилем, 2002. 268 с. [ A. S. Gishvarov, *Combined life tests of technical systems, (in Russian)*. Ufa: Gilem, 2002. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ГИШВАРОВ Анас Саидович**, проф., зав. каф. авиац. двиг. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двиг. летательных аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса, испытаний и прогнозирования состояния техн. систем.

**РАХИМОВ Абдусаттор Хасанович**, асп. каф. авиационных двигателей. Дипл. маг. по авиастр. (УГАТУ, 2017). Иссл. в обл. надежности и ресурса авиац. двиг.

#### METADATA

**Title:** Study the effectiveness of the dust devices.

**Authors:** A. S. Gishvarov<sup>1</sup> A. H. Rahimov<sup>2</sup>

**Affiliation:** Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** <sup>1</sup> kafedra.ad@mail, <sup>2</sup> mr.abdusattor@list.ru.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 25, no. 4 (94), pp. 38-45, 2021. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The present document addresses the selection method of optimal values (geometric dimensions) of the Engine Air Particle Separator (EAPS) parameters in aviation gas turbine engines (GTE). The methodology includes six main steps. The choice of these optimal values is carried out taking into account three particular criteria for the EAPS efficiency: the degree of air purification, pressure loss and mass. The EAPS parameters are selected using the Pareto method.

**Key words:** particle separator; aircraft engine; method; optimal parameters.

**About authors:**

**GISHVAROV, Anas Saidovich**, Prof., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 1973). Dr. of Tech. Sci. (USATU, 1993).

**RAHIMOV, Abdusattor Hasanovich**, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Accident (USATU, 2017).