

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ВЕРТОЛЕТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А. С. Гишваров¹, Р. Р. Аитов², А. М. Айтумбетов³

¹⁻³ gas-rb@mail.ru

¹ ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 4 декабря 2014

Аннотация. Проведено исследование эффективности пылезащитных устройств вертолетных газотурбинных двигателей (ГТД). На основе численного моделирования течения двухкомпонентного потока (воздух – пыль) проведена оценка эффективности различных вариантов конструкций пылезащитных устройств ГТД и даны сравнительные характеристики.

Ключевые слова: математическое моделирование; вертолетный ГТД; пылезащитное устройство, течение, двухкомпонентный поток.

Применение вертолетов в разных природно-климатических зонах имеет специфичную для данного вида летательных аппаратов проблему. Часто базирующийся на естественных площадках вертолет, взлетая и садясь, поднимает облако из пыли и песка. Двигатели засасывают поднятую пыль в проточную часть, и это сказывается на эксплуатационной надежности конструкции. В результате абразивной эрозии компрессор двигателя изнашивается до окончания назначенного ресурса [1].

Эрозия двухкомпонентным потоком – воздухом, содержащим твердые частицы, – опасна для двигателей вертолетов, базирующихся в большинстве случаев на грунтовых площадках, создающих пылевое облако высотой до 15 м, аппаратов вертикального взлета и посадки, вызывающих пылевое облако до 30 м и находящихся в нем в 3 раза (до 90 с) дольше, чем для двигателей вертолетов и самолетов, длительно рулящих по земле.

Абразивное воздействие пыли объясняется наличием частиц окиси кремния, дисперсность которых колеблется в пределах от 5 до 50 мкм, что обеспечивает их высокую проникаемость.

Пылевая эрозия элементов проточной части ГТД и отложения пыли вызывают такие отказы, как снижение мощности, недопустимый рост температуры газа перед турбиной, поломки ослабленных эрозией лопаток, помпаж. Вследствие больших относительных скоростей воздуха,

поступающего на лопатки, и больших окружных скоростей, столкновение их даже с мелкими твердыми частицами может приводить к значительному износу. В ряде случаев спекшаяся пыль забивает сопловые аппараты турбины, вызывая помпаж компрессора.

Попадание пыли в элементы автоматики двигателя ведет к сравнительно быстрому выходу их из строя, а засорение топливных, масляных и воздушных фильтров (входных и выходных жиклеров автоматов запуска и приемистости) приводит:

- к срыву запуска;
- к зависанию частоты вращения турбокомпрессора двигателя;
- к изменению вилки в частоте вращения левого и правого двигателей;
- к самопроизвольному уходу двигателя на режим малого газа;
- к увеличению температуры газа за турбиной двигателя и к срабатыванию соответствующих ограничителей.

Степень воздействия эрозии на характеристики двигателей зависит от массы пыли, попавшей в двигатель в процессе эксплуатации. Интенсивность эрозии зависит главным образом от твердости и химического состава частиц пыли, в меньшей степени зависит от фракционного состава этих частиц (известно что частицы размером до 20 мкм не вызывают значительной эрозии).

Первые ступени компрессора изнашиваются по всей высоте входной кромки, на последующих износ, вследствие сепарации частиц, интенсифицируется к периферии лопаток. Рабочие лопатки больше изнашиваются в средних и последних ступенях, направляющие – в первых ступенях. По другим наблюдениям, для вертолетных ГТД, больше изнашиваются рабочие лопатки первых ступеней, а направляющие – в районе отбора воздуха от компрессора. Задние кромки лопаток последних ступеней малых двигателей, имеющие толщину всего 50...120 мкм, могут оказаться разрезанными пылью.

В осевом компрессоре наиболее сильно изнашиваются рабочие лопатки (рис. 1).



Рис. 1. Изношенные рабочие лопатки осевого компрессора двигателя ТВ3-117

Износ этих лопаток происходит по входной кромке и корытцу, причем степень износа увеличивается от средних ступеней к последним с локализацией зоны износа на периферии лопаток (рис. 2).



Рис. 2. Характер предельного износа рабочих лопаток компрессора со 2-й по 8-ю ступени

Для защиты двигателей от повреждений частицами пыли используют пылезащитные устройства (ПЗУ). Например, установленные на вертолете Ми-24 двигатели ТВ3-117В имеют пылезащитные устройства, которые очищают воздух на 70...75 % и снижают износ лопаток компрессора в 2,5...3 раза.

На вертолетах серии Ми-8 установлены два комплекта ПЗУ инерционного грибкового типа (рис. 3).

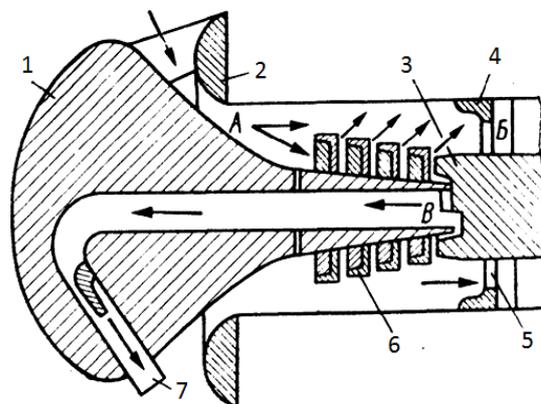


Рис. 3. Схема ПЗУ вертолета Ми-8

В конструкции ПЗУ предусмотрена противообледенительная система, которая выполнена смешанной: одна часть узлов обогревается горячим воздухом, отбираемым за компрессором двигателя, другая часть имеет электрообогрев.

Принцип действия ПЗУ заключается в следующем: в результате разрежения, создаваемого при работе двигателя, запыленный воздух проходит через входной кольцевой искривленный тоннель А, образованный задней частью обтекателя 2, коллекторной губой 3 и внешней обечайкой 4. При этом под действием центробежных сил частицы пыли прижимаются к поверхности обтекателя и, перемещаясь вместе с частью воздуха, попадают на вход сепаратора 6 в канал Б, представляющий собой пылевую ловушку. Большая часть запыленного воздуха, очистившись от пыли в первой ступени ПЗУ (искривленном тоннеле А), проходит по каналу Б, образованному внешней обечайкой 4 и сепаратором 6, на вход в двигатель. Меньшая часть запыленного воздуха, проходя через сепаратор 6, очищается в нем за счет поворота потока в криволинейных межкольцевых каналах, поступает в канал Б и далее на вход в двигатель. Наконец, наиболее запыленный воздух (пылевой концентрат) проходит в канал В и далее в трубопровод 7 вывода пыли. За счет разрежения, создаваемого эжектором 1, пылевой концентрат отсасывается и выбрасывается в атмосферу.

ПЗУ включается в работу при подаче к эжектору сжатого воздуха, забираемого за компрессором двигателя. Потери мощности двигателя при включенном ПЗУ составляют 5...6 %, при выключенном – 2...3 %.

На рис. 4 показан вертолет Ми-8Т, оборудованный инерционным циклонным ПЗУ Pall Centrisep компании Pall Corporation.



а



б

Рис. 4. Вертолет Ми-8Т, оборудованный ПЗУ Pall Centrisep (а); общий вид инерционного циклонного воздухоочистителя (б)

В данном ПЗУ загрязненный воздух попадает в циклоны его панелей, где ему придается вихревое движение при помощи вихревых трубок, набранных в панели. Центробежная сила отбрасывает частицы пыли и капли воды по направлению к стенкам вихревых трубок. Далее они попадают во внутреннюю полость мультициклонной панели (рис. 5), откуда удаляются при помощи вентиляторов пылеотсоса. Очищенный воздух направляется по центру трубок на вход в маршевые двигатели.

Преимущества ПЗУ Pall Centrisep перед другими следующие:

- степень очистки воздуха достигает 93 %;
- не требуется противообледенительная система ПЗУ;
- не требуется отбирать воздух из-за компрессора двигателя;
- за счет перемешивания различных фракций входного потока сведено к минимуму влияние выхлопных и пороховых газов.

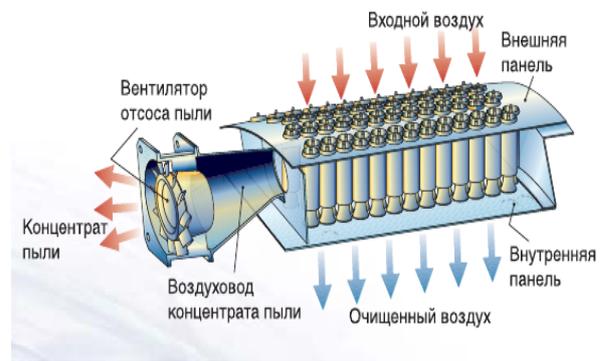


Рис. 5. Схема воздухоочистителя Pall Centrisep

Принцип работы циклона показан на рис. 6.

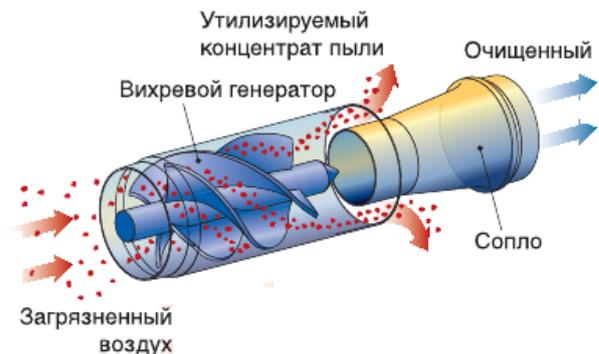


Рис. 6. Элемент циклонного воздухоочистителя

Недостатки ПЗУ Pall Centrisep следующие:

- закрыт люк выхода к силовой установке вертолета;
- усложнен доступ к двигателям;
- большая по сравнению со стандартным ПЗУ масса – 68 кг;
- закрутка потока повышает гидравлическое сопротивление.

На вертолете Ми-8 применяется также другое ПЗУ – инерционный жалюзийный воздухоочиститель конусного типа (рис. 7).

Воздух, входящий в воздушный фильтр, резко изменяет направление своего движения, проходя через щели жалюзи, и находящиеся в воздухе частицы пыли, вследствие инертности, продолжают двигаться в прежнем направлении и попадают в пылеуловитель, который соединен с патрубком, через который производится удаление пыли.

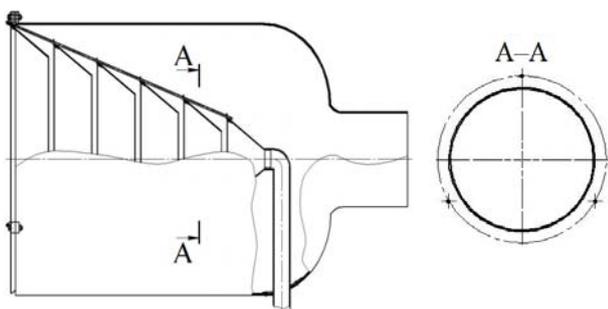


Рис. 7. Схема инерционного жалюзийного воздухоочистителя конусного типа

Преимущества такого ПЗУ следующие:

- простота конструкции;
- относительно малый вес;
- высокая степень контролепригодности.

Недостатки ПЗУ сводятся к следующему:

- требуется установка противообледенительной системы;
- относительно малая степень очистки (75...89 %);
- требуется забор воздуха из компрессора двигателя;
- большие габаритные размеры.

ОАО «Рыбинские моторы» разработало и совместно с ЦАГИ провело стендовые пылевые испытания двигателя РД-600 с ПЗУ, которое выполнено в виде модуля, расположенного в колене плоского воздухозаборника вертолета Ка-60. ПЗУ состоит из двух поворотных участков: разгонного и основного. На разгонном участке частицы песка и пыли разгоняются до скорости, близкой к скорости воздушного потока. Сам поток разворачивается на 25° и на основном участке течения еще на 67° . Под действием центробежных сил посторонние частицы направляются в пылесборник, откуда вместе с частью воздуха, составляющей 15...20 % от расхода воздуха через двигатель, отсасываются двумя эжекторами. Основной поток воздуха направляется в двигатель.

Оптимизация геометрии проточной части ПЗУ на расчетном режиме работы двигателя позволила обеспечить следующие значения степени очистки воздуха (рис. 8):

- сепарация песка с размером частиц 600...850 мкм – 99,3 % ($G_{отс} = 10...20 \%$);
- сепарация кварцевой пыли с удельной поверхностью $1750 \text{ см}^2/\text{г}$ – 84 % ($G_{отс} = 20 \%$);
- сепарация сухого снега – 94,5 %.

Было проведено численное исследование данного ПЗУ с помощью программы Ansys CFX. Для этих целей была построена трехмер-

ная модель проточной части ПЗУ, установленного на двигателе РД-600.

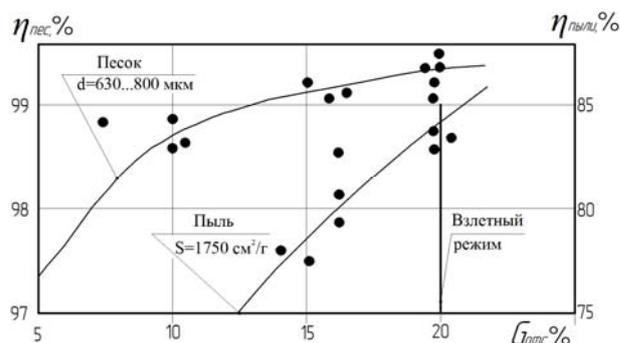


Рис. 8. Коэффициенты сепарации песка и пыли ПЗУ двигателя РД-600

Моделировались условия, соответствующие условиям стендовых пылевых испытаний:

- на входе в ступень скорость потока воздуха соответствовала $V_1 = 100 \text{ м/с}$;
- в ступень попадали частицы песка диаметром 600 мкм и кварцевой пыли с удельной поверхностью $1750 \text{ см}^2/\text{г}$.

Результаты моделирования показали высокую степень сходимости с экспериментальными данными: расхождение результатов составило 1,5...2 %. Положительный опыт численного моделирования позволил провести оптимизацию геометрии и исследование эффективности двух вариантов инерционного воздухоочистителя циклонного типа (рис. 9,10):

- с генератором завихрения воздуха;
- с тангенциальным входом воздуха.

В циклоне с генератором завихрения потока в проточную часть помещается завихритель, который сообщает частицам инерционную силу за счет спиралевидного движения дисперсного потока в этом завихрителе. В тангенциальном циклоне вход расположен перпендикулярно оси симметрии циклона, и инерционная сила сообщается потоку вследствие изменения направления движения.

Исследование проводилось при следующих условиях [2]:

- тип частиц – кварцевый песок (SiO_2); корунд (Al_2O_3); частицы асфальта и бетона;
- диаметр частиц – 5...100 мкм;
- расход воздуха через ПЗУ – 4,5...8,5 кг/с;

Из геометрических параметров для ПЗУ циклонного типа с генератором завихрения потока воздуха (рис. 11) в качестве варьируемых рассматривались следующие:

- длина циклона L ;

- диаметр входного отверстия D_1 ;
- угол закрутки генератора завихрения потока ($60^\circ \dots 90^\circ$).

Эффективность ПЗУ оценивалась двумя показателями:

- степенью очистки воздуха – η , %;
- потерей давления в ПЗУ – ΔP , мм вод.ст.

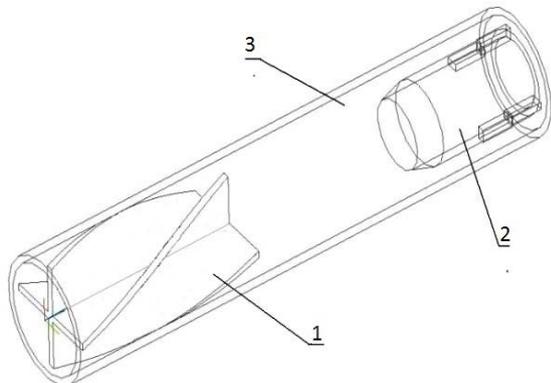


Рис. 9. Трехмерная модель ПЗУ циклонного типа с генератором завихрения потока:

1) генератор завихрения потока; 2) патрубок отвода очищенного воздуха; 3) корпус циклона

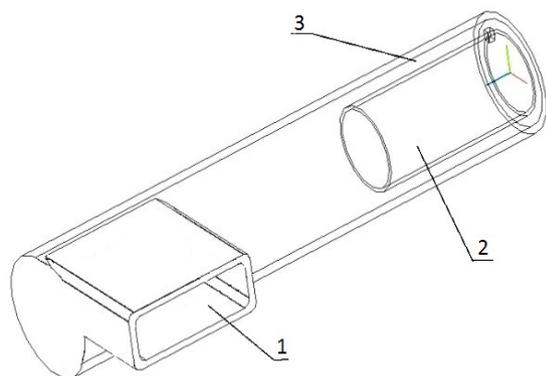


Рис. 10. Трехмерная модель ПЗУ циклонного типа с тангенциальным входом воздуха:

1) тангенциальный вход; 2) патрубок отвода очищенного воздуха; 3) корпус циклона

Исследование ПЗУ с генератором завихрения потока воздуха

На рис. 11 приведен чертеж инерционного воздухоочистителя циклонного типа с генератором завихрения потока [3]: где D_1 – диаметр входного отверстия, D_2 – диаметр патрубка отвода очищенного воздуха, L – длина циклона, l – длина патрубка отвода очищенного воздуха, α – угол закрутки генератора завихрения потока.

Угол α изменялся в интервале от 60° до 90° . Дискретные значения α при исследовании соответствовали углам 60, 75 и 90 градусов.

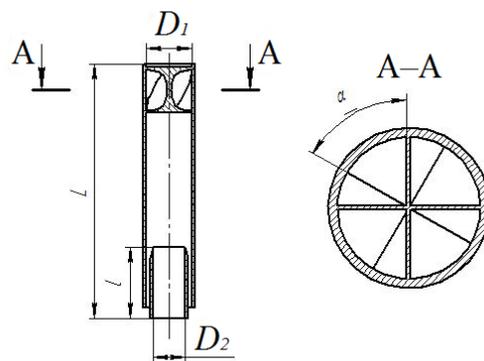


Рис. 11. Чертеж инерционного воздухоочистителя циклонного типа с генератором завихрения потока

При $\alpha = \text{const}$ и $\eta = \text{const}$ длина циклона является зависимостью величиной $L = F(l, D_1, D_2)$. Это значит, что при изменении параметра L для того, чтобы степень сепарации оставалась постоянной, необходимо менять величины l , D_1 и D_2 . Было установлено, что потери давления внутри циклона минимальны при $L = 80$ мм.

Течение реального воздуха в каналах ПЗУ циклонного типа пространственное и неустановившееся и не поддается полному теоретическому анализу. Поэтому расчет проводился при следующих предположениях [4]: пренебрегали сжимаемостью и вязкостью газа, а также турбулентностью течения, т. е. рассматривали установившееся (осредненное по времени) безвихревое движение идеальной (невязкой) жидкости постоянной плотности.

Суммарный массовый расход воздуха принимался равным 8,4 и 4,5 кг/с при равномерном распределении статического давления, что соответствовало расходу воздуха через двигатель ТВ3-117 на взлетном режиме и на малом газе вертолета Ми-8 [5]. Скорость набегающего потока (на бесконечности) соответствовала 100 км/ч; температура воздуха на входе – 15°C .

Рассматривались частицы диаметром 5, 20, 50, 70 и 100 мкм. Плотность частиц при этом была следующей:

- для частиц кварца (SiO_2) – 2600 кг/м^3 ;
- для частиц корунда (Al_2O_3) – 3990 кг/м^3 ;
- для частиц бетона – 2200 кг/м^3 ;
- для частиц асфальта – 1100 кг/м^3 .

Результаты расчетов для частиц кварца приведены в табл. 1 и графически показаны на рис. 12, 13 и 14, для частиц бетона – в табл. 2 и на рис. 15, для частиц асфальта – в табл. 3 и на рис. 16, для частиц корунда – в табл. 4 и на рис. 17.



а

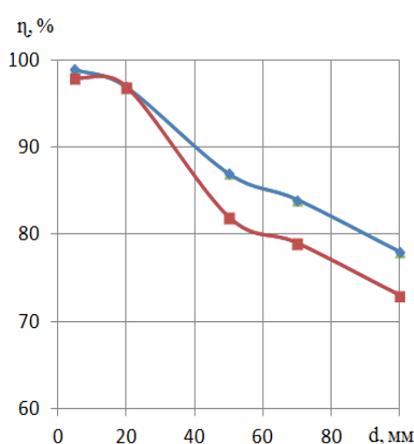


б

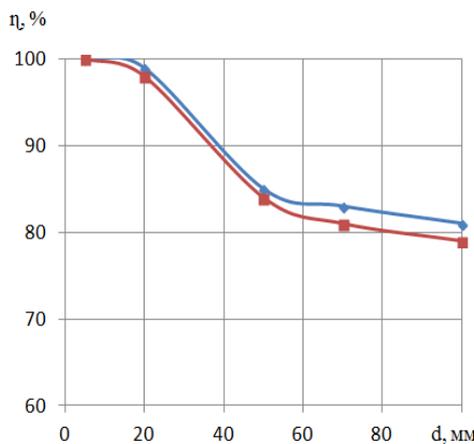
Рис. 12. Траектории движения частиц кварца при $G_{\text{возд}} = 8,5 \text{ кг/с}$ и $\alpha = 75^\circ$: а) $d_p = 5 \text{ мкм}$, б) $d_p = 100 \text{ мкм}$

Таблица 1
Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц кварца (SiO_2)

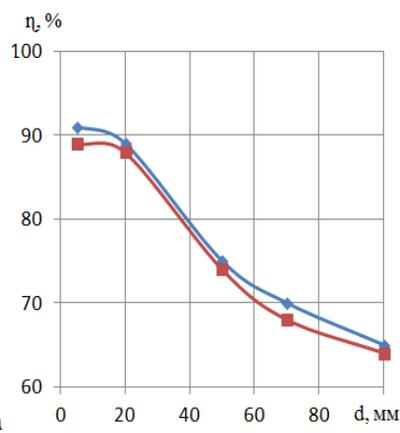
d_p , мкм	Режим работы двигателя					
	$G_{\text{возд}} = 4,5 \text{ кг/с}$			$G_{\text{возд}} = 8,5 \text{ кг/с}$		
	Угол поворота			Угол поворота		
	60°	75°	90°	60°	75°	90°
5	98	100	89	99	100	91
20	97	98	88	97	99	89
50	82	84	74	87	85	75
70	79	81	68	84	83	70
100	73	79	64	78	81	65



а



б



в

Рис. 13. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размера частиц кварца d_p , расхода воздуха $G_{\text{возд}}$ ($\square - G_{\text{возд}} = 4,5 \text{ кг/с}$, $\diamond - G_{\text{возд}} = 8,5 \text{ кг/с}$) и угла закрутки генератора α : а) $\alpha = 60^\circ$, б) $\alpha = 75^\circ$, в) $\alpha = 90^\circ$

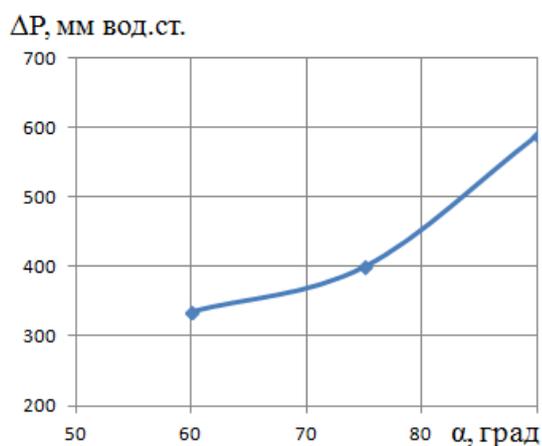


Рис. 14. Зависимость потери давления в ПЗУ от угла закрутки генератора

Таблица 2
Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц бетона

d_p , мкм	Режим работы двигателя					
	$G_{\text{возд}} = 4,5 \text{ кг/с}$			$G_{\text{возд}} = 8,5 \text{ кг/с}$		
	Угол поворота			Угол поворота		
	60°	75°	90°	60°	75°	90°
5	99	100	100	100	100	100
20	98	99	95	100	100	98
50	86	83	80	91	89	87
70	82	80	70	85	83	80
100	80	77	59	80	75	70

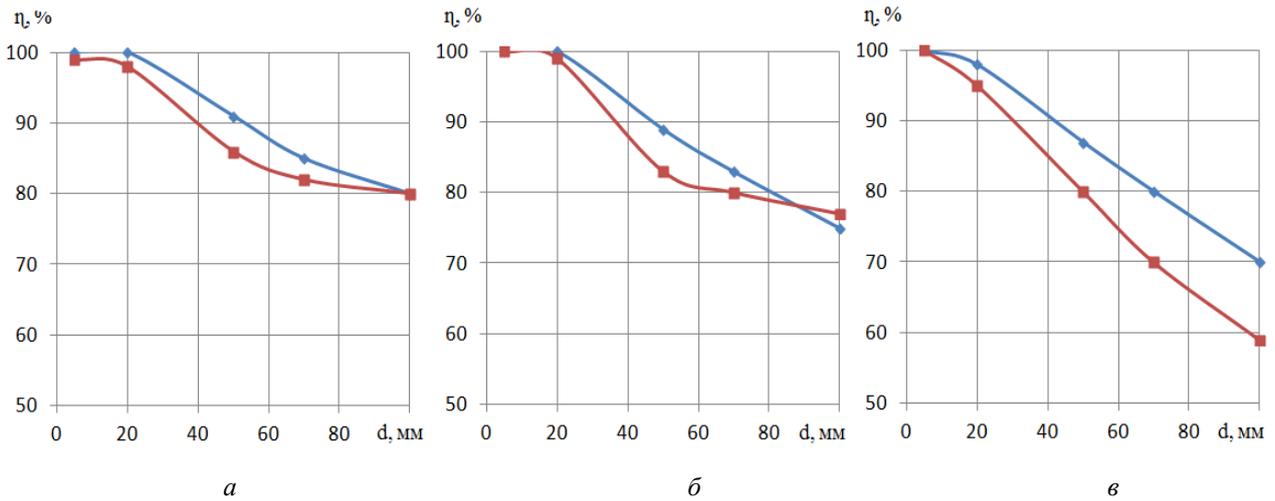


Рис. 15. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размера частиц бетона $d_{ч}$, расхода воздуха $G_{воз}$ ($\square - G_{воз} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{воз} = 8,5$ кг/с) и угла закрутки генератора α : а) $\alpha = 60^\circ$, б) $\alpha = 75^\circ$, в) $\alpha = 90^\circ$

Таблица 3

Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц асфальта

$d_{ч}$, мкм	Режим работы двигателя					
	$G_{воз} = 4,5$ кг/с			$G_{воз} = 8,5$ кг/с		
	Угол поворота			Угол поворота		
	60°	75°	90°	60°	75°	90°
5	100	100	100	100	100	100
20	99	99	97	100	100	100
50	90	87	81	93	92	88
70	87	83	70	90	89	78
100	84	80	60	85	82	74

Таблица 4

Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц корунда

$d_{ч}$, мкм	Режим работы двигателя					
	$G_{воз} = 4,5$ кг/с			$G_{воз} = 8,5$ кг/с		
	Угол поворота			Угол поворота		
	60°	75°	90°	60°	75°	90°
5	100	100	100	100	100	100
20	97	97	98	98	99	99
50	80	91	91	87	95	88
70	73	80	82	83	89	85
100	69	72	79	79	84	81

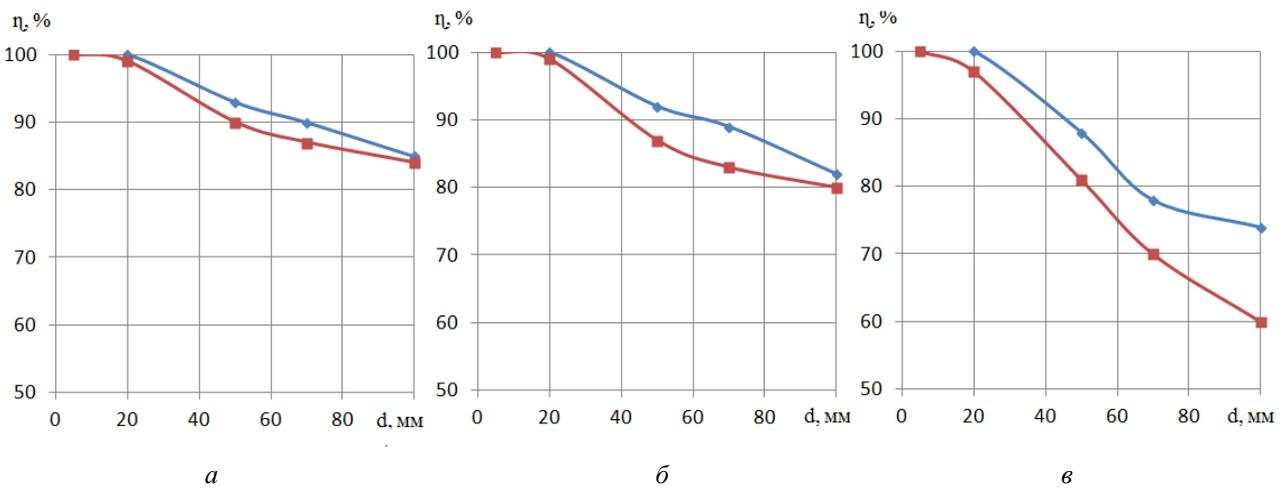


Рис. 16. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размера частиц асфальта $d_{ч}$, расхода воздуха $G_{воз}$ ($\square - G_{воз} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{воз} = 8,5$ кг/с) и угла закрутки генератора α : а) $\alpha = 60^\circ$, б) $\alpha = 75^\circ$, в) $\alpha = 90^\circ$

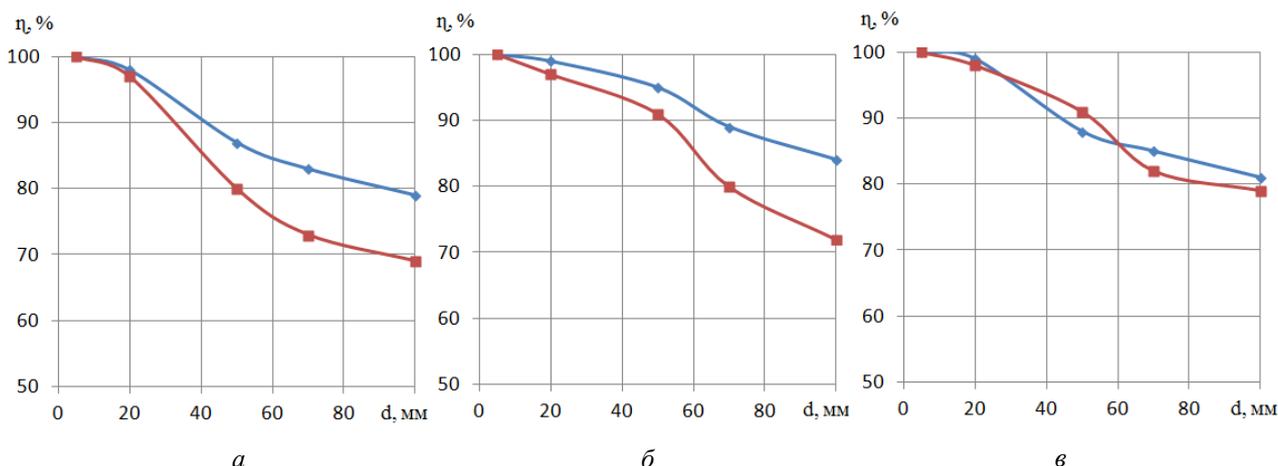


Рис. 17. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размера частиц корунда $d_{\text{ч}}$, расхода воздуха $G_{\text{воз}}$ ($\square - G_{\text{воз}} = 4,5 \text{ кг/с}$, $\diamond - G_{\text{воз}} = 8,5 \text{ кг/с}$) и угла закрутки генератора α : а) $\alpha = 60^\circ$, б) $\alpha = 75^\circ$, в) $\alpha = 90^\circ$

Было установлено что при приемлемом значении потери давления ПЗУ (402 мм вод. ст., 1,25 %) сепарация является наилучшей при угле закрутки генератора равном – 75° . При меньших углах закрутки генератора завихрения потока инерционных сил частиц недостаточно для попадания в патрубок отвода загрязненного воздуха, а при больших углах закрутки увеличивается турбулентность потока и движение внутри циклона становится беспорядочным.

Исследование ПЗУ с тангенциальным входом потока

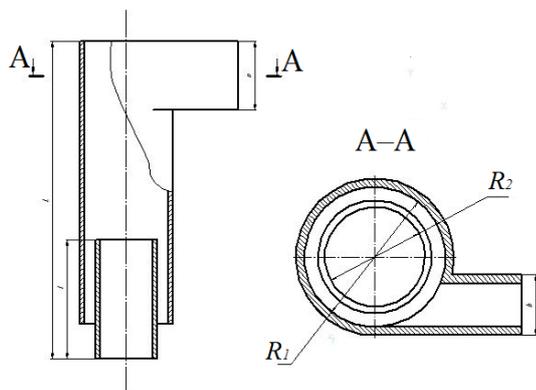


Рис. 18. Чертеж ПЗУ циклонного типа с тангенциальным входом потока

Чертеж инерционного ПЗУ циклонного типа с тангенциальным входом потока показан на рис. 18, где R_1 – радиус корпуса циклона; R_2 – радиус патрубка отвода очищенного воздуха; L – длина циклона; l – длина патрубка отвода очищенного воздуха; a – высота входного отверстия; b – ширина входного отверстия.

В процессе исследования варьировалась площадь тангенциального входа потока воздуха ($S = a \times b = \pi \times R_1^2$).

Траектория движения частиц корунда внутри циклона показана на рис. 19 ($d_{\text{ч}} = 20 \text{ мкм}$, $G_{\text{воз}} = 8,5 \text{ кг/с}$).

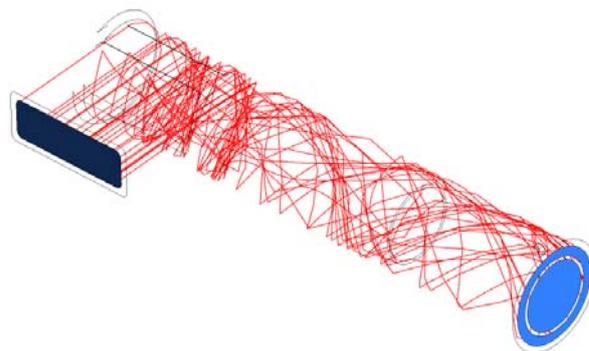


Рис. 19. Траектория движения частиц корунда ($d_{\text{ч}} = 20 \text{ мкм}$, $G_{\text{воз}} = 8,5 \text{ кг/с}$)

Результаты расчетов для кварцевого песка приведены в табл. 5 и показаны на рис. 20; для частиц бетона – в табл. 6 и на рис. 21; для частиц асфальта – в табл. 7 и на рис. 22; для частиц корунда – в табл. 8 и на рис. 23.

По результатам исследования видно, что степень очистки воздуха η увеличивается при увеличении площади входного сечения S . С другой стороны увеличение площади входного сечения приводит к увеличению массы циклона. Поэтому в качестве окончательного целесообразно выбрать циклон с площадью входного сечения $31,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$. При этом потери давления в ПЗУ составят 564 мм вод. ст. (3 %).

Таблица 5

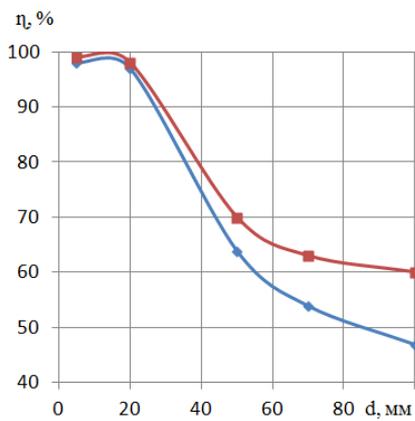
Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц кварцевого песка

$d_{ч}$, мкм	Режим работы двигателя			
	$G_{\text{воз}} = 4,5$ кг/с		$G_{\text{воз}} = 8,5$ кг/с	
	$S, 10^{-3} \text{ м}^2$		$S, 10^{-3} \text{ м}^2$	
	17,67	31,4	17,67	31,4
5	99	99	98	100
20	98	95	97	98
50	70	78	64	83
70	63	69	54	75
100	60	62	47	65

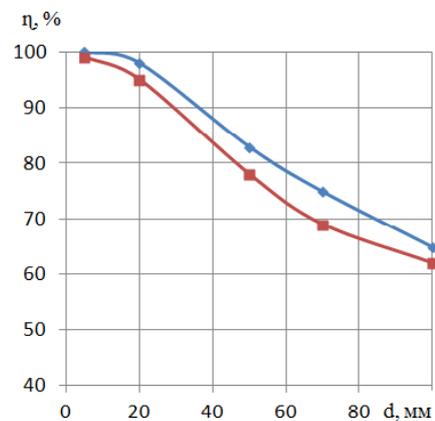
Таблица 6

Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц бетона

$d_{ч}$, мкм	Режим работы двигателя			
	$G_{\text{воз}} = 4,5$ кг/с		$G_{\text{воз}} = 8,5$ кг/с	
	$S, 10^{-3} \text{ м}^2$		$S, 10^{-3} \text{ м}^2$	
	17,67	31,4	17,67	31,4
5	93	99	92	96
20	84	87	81	85
50	67	73	60	64
70	59	65	52	53
100	50	53	44	48

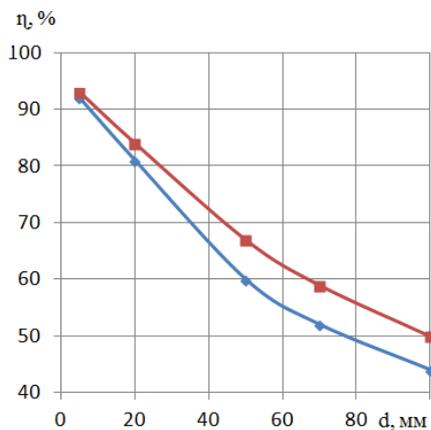


а

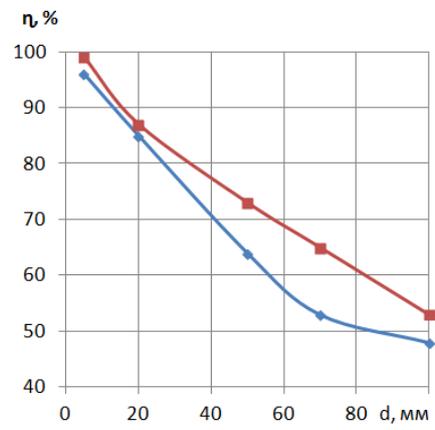


б

Рис. 20. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размеров частиц кварцевого песка, расхода воздуха $G_{\text{воз}}$ ($\square - G_{\text{в}} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{\text{в}} = 8,5$ кг/с) и площади входного сечения S :
а) $S = 17,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, б) $S = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$



а



б

Рис. 21. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размеров частиц бетона, расхода воздуха $G_{\text{воз}}$ ($\square - G_{\text{в}} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{\text{в}} = 8,5$ кг/с) и площади входного сечения S : а) $S = 17,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, б) $S = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

Таблица 7

Таблица 8

Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц асфальта

d_p , мкм	Режим работы двигателя			
	$G_{\text{воз}} = 4,5$ кг/с		$G_{\text{воз}} = 8,5$ кг/с	
	$S, 10^{-3} \text{ м}^2$		$S, 10^{-3} \text{ м}^2$	
	17,67	31,4	17,67	31,4
5	93	99	90	97
20	82	91	81	88
50	65	81	63	76
70	53	69	50	64
100	45	51	42	47

Степень очистки воздуха в ПЗУ от частиц корунда

d_p , мкм	Режим работы двигателя			
	$G_{\text{воз}} = 4,5$ кг/с		$G_{\text{воз}} = 8,5$ кг/с	
	$S, 10^{-3} \text{ м}^2$		$S, \text{ м}^2$	
	17,67	31,4	17,67	31,4
5	96	100	93	99
20	84	95	80	91
50	67	83	65	76
70	59	69	52	63
100	42	61	40	55

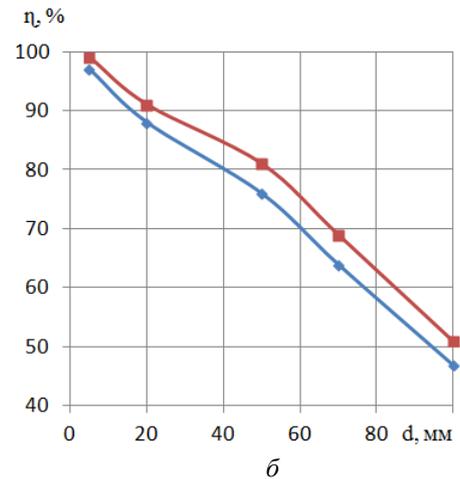
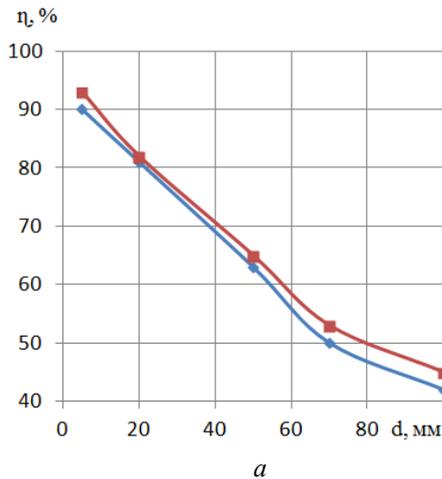


Рис. 22. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размеров частиц асфальта, расхода воздуха $G_{\text{воз}}$ ($\square - G_{\text{в}} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{\text{в}} = 8,5$ кг/с) и площади входного сечения S : а) $S = 17,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, б) $S = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

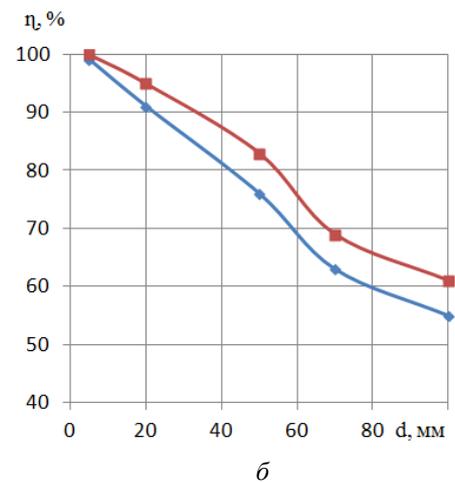
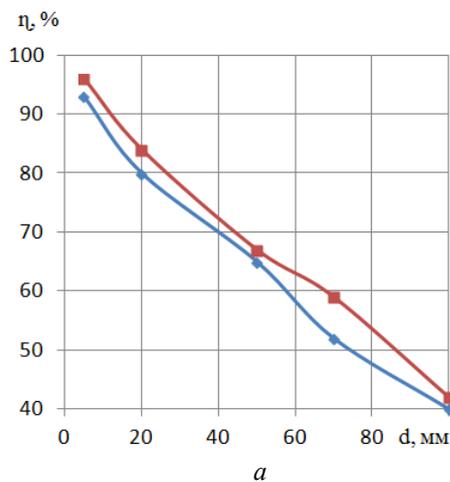


Рис. 23. Зависимость степени очистки воздуха в ПЗУ от размеров частиц корунда, расхода воздуха $G_{\text{воз}}$ ($\square - G_{\text{в}} = 4,5$ кг/с, $\diamond - G_{\text{в}} = 8,5$ кг/с) и площади входного сечения S : а) $S = 17,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$, б) $S = 31,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$

По результатам проведенного исследования двух вариантов ПЗУ циклонного типа, можно сделать следующие выводы (табл. 9) :

Таблица 9

Параметр		ПЗУ с генератором завихрения потока	ПЗУ с тангенциальным входом потока
Степень сепарации, %	максимальная	100	100
	минимальная	72	40
Потери давления, %		1,25	3

1. С увеличением диаметров частиц пыли в диапазоне от 5 до 100 мкм степень очистки в исследуемых ПЗУ уменьшается до 40 %, что является неприемлемым для газотурбинных двигателей, работающих в условиях запыленной атмосферы.

2. Для ПЗУ с генератором завихрения потока воздуха оптимальным является угол закрутки равный 75° . При этом степень очистки в зависимости от диаметра частиц варьируется от 72 % до 100 %.

3. Для ПЗУ с тангенциальным входом потока воздуха степень очистки зависит от площади входного сечения. Увеличение площади входного сечения ведет к увеличению массы ПЗУ. Увеличение площади на 2 % ведет к увеличению степени очистки на 1 %. При этом необходимо отметить, что входное сечение расположено перпендикулярно оси циклона, а это, в свою очередь, усложняет конструкцию и увеличивает массу ПЗУ.

4. В качестве окончательного был выбран инерционный воздухоочиститель с генератором завихрения потока. Угол закрутки равен 75° . Выбранное ПЗУ обеспечивает лучшую степень сепарирования пыли по сравнению с применяемым на вертолете Ми-8 ПЗУ грибкового типа. Значение степени очистки воздуха составляет 94 % для стандартного состава пыли при среднем диаметре частиц 30 мкм, в то время как у существующих ПЗУ 70...75 %. Однако платой за такой эффект является большая потеря давления воздуха на входе в компрессор. Преимуществом циклонного воздухоочистителя перед грибковым воздухоочистителем так же является отсутствие потребности в отборе воздуха из-за компрессора двигателя. Это ведет к уменьшению расхода топлива двигателем, следовательно, увеличивает экономичность эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гинзбург Л. Е., Никитин Е. И.** Исследование запыленного воздуха вблизи вертолетов Ми-1 и Ми-4 в эксплуатационных условиях. М.: Машиностроение, 1966. 145–165 с. [L. E. Ginzburg, E. I. Nikitin, *The study of dusty air near the Mi-1 and Mi-4 in an operational environment*, (in Russian). Moscow: Mashinostroenie, 1996.]
2. **Гишваров А. С., Аитов Р. Р., Айтүмбетов А. М.** Моделирование и оптимизация характеристик пылезащитного устройства вертолетного ТВД // Современные проблемы проектирования и эксплуатации авиационных двигателей: сб. науч. тр. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 58–62. [A. S. Gishvarov, R. R. Aitov, A. M. Aytumbetov, *Modeling and optimization features dustproof device helicopter turboprop*, (in Russian). Ufa: USATU, 2014.]
3. **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.]
4. **Самарский А. А., Михайлов А. П.** Математическое моделирование. Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001. 320 с. [A. A. Samarskii, A. P. Mihailov, *Mathematical modeling. Ideas. Methods. Examples*, (in Russian). Moscow: Fizmatlit, 2001.]
5. **Данилов В. А.** Вертолет Ми-8 (Устройство и техническое обслуживание). М.: Транспорт, 1988. 278 с. [V. A. Danilov, *The helicopter Mi-8 (Design and technical maintenance)*, (in Russian). Moscow: Transport, 1988.]

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. летательн. аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. надежности, ресурса и испытаний техн. систем.

АИТОВ Руфат Ринатович, асп. той же каф. Дипл. инж.-мех. по техн. экпл. авиац. двиг. (УГАТУ, 2013). Иссл. в обл. надежности, ресурса техн. систем.

АЙТҮМБЕТОВ Арман Маратович, студ. той же каф. Иссл. в обл. надежности ресурса техн. систем.

METADATA

Title: Study the effectiveness of the dust devices.

Authors: A. S. Gishvarov¹, R. R. Aitov², A. M. Aytumbetov³.

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: ad@mail.rb.ru.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU, vol. 19, no. 2 (68), pp. 100-110, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The study of the effectiveness of the dust devices helicopter gas turbine engines. Based on the numerical simulation of two-component flow assessed the effectiveness of various design options.

Key words: mathematic modeling; helicopter gas turbine engines; dust devices; flow; two-component flow.

About authors:

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

AITOV, Rufat Rinatovich, PhD Stud., Dept. of Aircraft Engines. Dipl. engineer (USATU, 2013).

AYTUMBETOV, Arman Maratovich, Stud., Dept. of Aircraft Engines.