

Г. Г. ЕНИКЕЕВ, Д. Д. БИКМЕТОВА

ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ВОЗДУХОЗАБОРНОМУ УСТРОЙСТВУ С ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ЭКРАНОПЛАНА

Проведен анализ требований к воздухозаборным устройствам с воздухоочистителем газотурбинного двигателя (ГТД) экраноплана, эксплуатирующегося в сложных морских условиях и запыленной атмосфере. Показано, что выбор параметров воздухозаборного устройства с воздухоочистителем является компромиссным. *Воздухозаборное устройство; воздухоочиститель; коэффициент эффективности; коэффициент восстановления полного давления; удельная производительность; удельный вес; неравномерность потока*

ВВЕДЕНИЕ

Разработка новых транспортных устройств, эксплуатирующихся в сложных условиях запыленной атмосферы и морской среды, делает актуальной задачу стабилизации характеристик и надежной работы их ГТД в течение заданного времени эксплуатации. По данной проблеме работы ведутся в двух направлениях: разработка материалов и покрытий, стойких против воздействия окружающей среды, и создание воздухозаборных устройств с воздухоочистителями [1]. Одной из наиболее важных задач рассматриваемой проблемы является обоснование требований к воздухозаборному устройству с воздухоочистителем с учетом всех факторов, влияющих на эксплуатационные характеристики ГТД. На экранопланах, из-за небольших скоростей полета, чаще всего устанавливаются турбореактивный двухконтурный двигатель (ТРДД) или турбовинтовой двигатель (ТВД) с лобовыми воздухозаборниками (экрanoпланы «КМ», «Орленок», «Лунь» разработки ЦКБ им. Р. Е. Алексеева, «Пеликан-Ультра» разработки корпорации «Боинг» [2]).

На экраноплане «Лунь» восемь ТРДД установлены на консолях: по четыре двигателя с левого и правого борта (рис. 1). Короткие лобовые воздухозаборные устройства обеспечивают подачу воздуха к компрессорам.

На экраноплане «Орленок» и проекте экраноплана «Пеликан» (рис. 2) используются ТВД с коротким каналом воздухозаборного устройства. Лобовые воздухозаборные устройства характеризуются большой удельной производительностью и ограниченными габаритами.

В ряде предприятий (ЦАГИ, ЦИАМ, НАСА и др.) проведены исследования воздухозаборных устройств ГТД для дозвуковых скоростей

полета, включая результаты экспериментальных и теоретических работ [3], и сформулированы требования к характеристикам воздухозаборных устройств: коэффициенту восстановления полного давления; распределению давления по обводам; неравномерности поля скоростей; удельной лобовой производительности и др.



Рис. 1. Экраноплан «Лунь» морского базирования, ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева



Рис. 2. Проект экраноплана «Пеликан» аэродромного базирования разработки авиастроительной корпорации «Боинг»

Эксплуатация транспортных средств в запыленной атмосфере и морской среде выдвинула новые требования к воздухозаборным устройствам, интегрированным с воздухоочистителями. Требования к конструкции воздухоза-

борного устройства с воздухоочистителем, независимо от его назначения, являются противоречивыми. С одной стороны, воздухозаборное устройство должно обеспечивать подачу воздуха к компрессору с минимальными потерями, минимальной радиальной и окружной неравномерностью на различных режимах полета транспортного средства. С другой стороны, воздухоочиститель должен обеспечивать защиту ГТД от попадания дисперсных частиц песка, капель воды. Кроме того, габариты и вес воздухозаборного устройства должны быть минимальными. Таким образом, видно, что не существует единственного интегрального показателя величины эффективности. Выбор оптимального решения зависит от условий эксплуатации, типа двигателя и типа транспортного средства и других факторов. Известно, что установки очистки воздуха успешно работают на стационарных газотурбинных установках (ГТУ). Для этих установок габариты играют второстепенную роль, а для ГТД транспортного применения воздухозаборное устройство с воздухоочистителем должно быть компактным, обеспечивая требуемую эффективность очистки. Таким образом, выбор оптимальных характеристик воздухозаборного устройства с воздухоочистителем является задачей по выбору компромиссного решения.

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВОЗДУХОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА С РОТОРНЫМ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ

Под эффективностью в данном случае понимается способность устройства препятствовать попаданию в проточную часть двигателя дисперсных частиц и посторонних предметов. Количественно эффективность воздухозаборного устройства с воздухоочистителем оценивается коэффициентом, определяемым по формуле:

$$\psi = 1 - \frac{\sum_1^k \dot{m}_{k1}}{\sum_1^k \dot{m}_{k0}},$$

где \dot{m}_{k0} – массовый расход дисперсной фазы k -й фракции через площадь сечения нормально к поверхностям тока в невозмущенной области перед воздухозаборным устройством; \dot{m}_{k1} – массовый расход дисперсной фазы k -й фракции в сечении перед компрессором.

Коэффициент ψ зависит от следующих факторов: аэродинамической и конструктивной схемы роторного воздухоочистителя; геометрии рабочей решетки роторного воздухоочистителя

и воздухозаборного устройства; функции распределения дисперсных частиц по размерам; физических свойств дисперсных частиц; кинематики потока и режима обтекания. Коэффициент эффективности ψ зависит от следующих критериев:

$$\psi = f(u/v_i, V_\infty/v_i, Re, Stk, We, d/D_{\text{вх}}, L/D_{\text{вх}}, b/t, h/b, \theta),$$

где u/v_i – отношение переносной и абсолютной скоростей на среднем радиусе рабочего колеса воздухоочистителя; V_∞/v_i – отношение скорости полета к скорости воздуха на среднем диаметре на входе в компрессор; Re – число Рейнольдса; Stk – число Стокса; We – число Вебера; $d/D_{\text{вх}}$ – масштабный фактор; отношение диаметра частицы к диаметру входа в компрессор; $L/D_{\text{вх}}$ – относительная длина воздухозаборного устройства; b/t – плотность решетки рабочего колеса воздухоочистителя; h/b – относительная высота лопаток; θ – угол изгиба средней линии профиля рабочего колеса воздухоочистителя.

Формулы для расчета коэффициента эффективности различных схем воздухозаборных устройств с воздухоочистителем приведены в работе [4].

Определение требуемой величины коэффициента эффективности является основной задачей проектирования воздухозаборного устройства с воздухоочистителем. Платой за увеличение коэффициента эффективности является ухудшение других характеристик воздухозаборного устройства с воздухоочистителем, и поэтому, в случае отсутствия пыли или капель морской воды, воздухоочиститель не требуется и необходимо рассматривать только характеристики воздухозаборного устройства.

Для оценки негативного влияния пыли, морской воды и других посторонних предметов, поступающих в двигатель, можно повреждения условно разделить на четыре категории: крупные повреждения; эрозионный износ; отложения и коррозия. При этом основной задачей проблемы является предупреждение эрозионного износа. В результате проведенных исследований выявлено, что в определенных условиях другие эффекты имеют большее значение, чем абразивный износ. Например, при эксплуатации ГТД в морских условиях происходит отложение морской соли на лопатках компрессора, что ведет к существенному ухудшению характеристик компрессора и других узлов двигателя.

КРУПНЫЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ

Значительные повреждения происходят при попадании в двигатель с засасываемым воздухом крупных предметов, таких как болты, гайки, камни, лед, птицы и т.п. Повреждения от указанных предметов могут быть столь значительными, что ГТД в доли секунды выходит из строя. Очевидно, что один небольшой камень может причинить большее повреждение, чем значительное количество мелкой пыли. Хотя защита от крупных предметов не может специально рассматриваться как часть общей задачи, решаемой воздухоочистителем, тем не менее, при конструировании воздухозаборного устройства с воздухоочистителем данный фактор необходимо учитывать. Например, лопадки роторного воздухоочистителя в модульной схеме воздухозаборного устройства могут быть выполнены таким образом, что при ударе крупного предмета они подвергаются направленному разрушению, не причиняя значительных повреждений компрессору.

ЭРОЗИОННЫЙ ИЗНОС ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА И ТУРБИНЫ

Лопатки компрессора, диффузор, сопловой аппарат, турбинные лопатки и другие компоненты двигателя, омываемые дисперсным потоком с высокой относительной скоростью, подвержены эрозии, которая ведет к снижению КПД компрессора и турбины, рассогласованию их работы, перегреву за счет уменьшения КПД компрессора, расхода воздуха, снижению прочности деталей. В итоге снижаются надежность и ресурс ГТД.

Эрозия ведет к необратимым изменениям проточной части двигателя и зависит от нескольких параметров: наработки в запыленной атмосфере; эффективного размера дисперсных частиц; скорости и угла соударения частиц; минералогического состава пыли; материала лопаток и покрытий.

Износ поверхности из-за ударов частиц является сложной функцией параметров частиц и поверхности соударения. В этом случае характеристика износа определяется как сложная функция параметров частицы и поверхности соударения.

Скорость эрозии определяется по формуле

$$R = EN \cdot m_p,$$

где m_p – масса ударяющейся частицы; N – число частиц в группе; E – массовая эрозия (отношение массы эродируемого материала мишени к массе соударяющихся с ней частиц).

Почти все используемые соотношения эмпирические и для количественной оценки эрозии необходим тщательный подбор моделей и параметров.

Наиболее распространенными являются модель Финни (Finnie) [4] и модель Табакова–Гранта [6].

В модели Финни для большей части металлов [4] массовая эрозия выражается соотношением

$$E = kV_p^n f(\gamma),$$

где k – коэффициент, зависящий от модуля упругости материала мишени и плотности частицы; V_p^n – функция скорости соударения частицы о мишень; n – постоянная, зависящая от материала мишени (для металла $n = 2, 3 \dots 2, 5$); γ – угол соударения (рад); $f(\gamma)$ – безразмерная функция от угла соударения.

По данным работы [5] принимается по умолчанию $n = 2$ и

$$f(\gamma) = \begin{cases} \frac{1}{3} \cos^2 \gamma, \operatorname{tg} \gamma > \frac{1}{3}; \\ f(\gamma) = \sin(2\gamma) - 3 \sin^2 \gamma, \operatorname{tg} \gamma \leq \frac{1}{3}. \end{cases}$$

В модели Табакова – Гранта величина массовой эрозии записывается в виде [6]:

$$E = k_1 f(\gamma) \left(\frac{V_p}{V_1} \right)^2 \cos^2 \gamma [1 - R_T^2] + f(V_{PN}),$$

где $f(\gamma) = [1 + k_2 k_{12} \sin(\frac{\pi}{2\gamma_0})]^2$; $R_T = 1 - \frac{V_p}{V_3} \sin \gamma$;

$$f(V_{PN}) = \left(\frac{V_p}{V_2} \sin \gamma \right)^4; k_2 = \begin{cases} 1, 0 - \text{если } \gamma \leq 2\gamma_0; \\ 0, 0 - \text{если } \gamma > 2\gamma_0, \end{cases}$$

где γ_0 – угол соударения при максимальной эрозии (рад); параметры k_{12} , k_2 , V_1 , V_2 , V_3 , γ_0 зависят от свойств материала частиц, а также от физических и механических свойств поверхности.

Нанесение защитных покрытий на лопатки компрессора, стойких к воздействию твердых частиц, снижает эрозионный износ в 5...10 раз, что необходимо учитывать при комплексном подходе к решению проблемы защиты двигателя и выбора параметров воздухоочистителя.

Исследования показывают, что абразивный износ для пыли данного минералогического состава и частиц данного размера пропорционален весу прошедшей через двигатель пыли. Износ также увеличивается с увеличением размеров дисперсных частиц.

Воздухоочиститель ГТД, удаляя частицы пыли, вызывающие значительную эрозию, защищает ГТД от абразивного износа. Очевидно, что тонкая пыль будет проходить через такой

воздухоочиститель, и если она не вызывает значительного эрозионного износа, следовательно, такой воздухоочиститель отвечает своему назначению.

На стадии проектирования желательно иметь сведения о степени подверженности эрозионному износу различных типов двигателей. Среди узлов двигателя наиболее подвержены эрозионному износу компрессор двигателя и его компоненты. Осевой компрессор более чувствителен к эрозии, чем центробежный, так как характеристики осевого компрессора в большей степени зависят от профиля лопаток. Кроме того, осевой компрессор имеет сравнительно небольшие и тонкие лопатки, особенно на последних ступенях. Поэтому даже незначительное снятие металла с пера лопатки искажает ее аэродинамический профиль, что ведет к полному износу лопатки и к резкому падению КПД компрессора. Продвигаясь по тракту компрессора, в результате удара о лопатки и отражения, частицы пыли концентрируются на периферии в зоне вершин рабочих лопаток и комлей лопаток статора, что в еще большей мере способствует эрозии в этой зоне.

ОТЛОЖЕНИЯ МЕЛКОЙ ПЫЛИ И СОЛЕЙ МОРСКОЙ ВОДЫ НА ЭЛЕМЕНТАХ КОНСТРУКЦИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГТД

Отложения пыли уменьшают проходную площадь межлопаточных каналов, т.е. расход воздуха. Кроме того, откладываясь неравномерно по поверхности лопаток, отложения искажают профиль и снижают КПД компрессора.

Отложение солей на поверхности лопаток компрессора является основной причиной ухудшения характеристик ГТД. Отложения также могут снизить теплопроводность, привести к перегреву направляющих и рабочих лопаток, дисбалансу, потере мощности и к коррозии. В качестве примера на рис. 3 приведены изменения параметров турбовинтового двигателя от времени работы в условиях подачи на вход распыленной морской воды. За короткий промежуток времени параметры двигателя ухудшаются на 5...10%.

В горячих зонах двигателя (камере сгорания, сопловых и рабочих лопатках турбины) пылевые и солевые отложения могут оплавляться, покрывая горячие поверхности хрупким стекловидным налетом. Образование такого налета изучено недостаточно, и можно предположить, что на указанный процесс влияет множество факторов, прежде всего температура перед турбиной, конструкция проточной части и т.д. Если в конструкции сопловых и рабочих

лопаток двигателя используется перфорация для охлаждения, то существует опасность, что стекловидный налет может перекрыть её и подача охлаждающего воздуха прекратится, что приведет к перегреву лопаток.

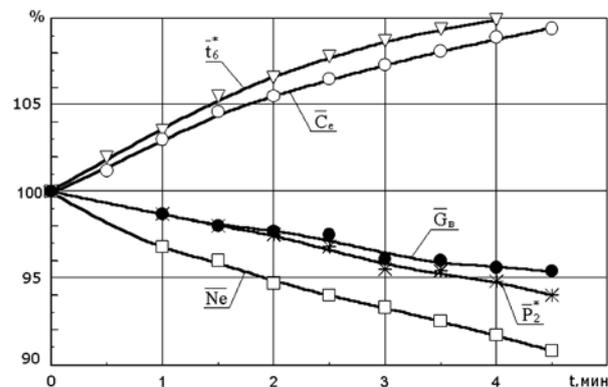


Рис. 3. Изменение по времени параметров ТВД НК12 при подаче на вход распыленной морской воды с водностью $\mu = 3\%$ и соленостью $S = 35\%$: t_6^* – относительная заторможенная температура газов за турбиной; C_ϵ – относительный удельный расход топлива; \bar{G}_ϵ – относительный расход воздуха; \bar{P}_2^* – относительное заторможенное давление за компрессором; \bar{N}_ϵ – относительная удельная мощность

Отложения пыли или соли могут наблюдаться и во внутренних каналах охлаждаемых лопаток турбин, что ведет к уменьшению сечения охлаждающих каналов или к полному их закупориванию, что, в конечном итоге, приведет к перегреву материала лопаток, снижению его прочностных свойств, снижению надежности и ресурса. Необходимо отметить, что при отложениях солей или мелкой пыли характеристика компрессора перестает быть стабильной, она меняется во времени, при этом снижается КПД компрессора, расход воздуха, мощность или тяга, и при этом растут температура газа перед турбиной и удельный расход топлива и снижается запас устойчивости по помпажу. Характер указанных изменений зависит также от закона регулирования двигателя. При достижении критических значений параметров останавливают двигатель и промывают проточную часть до восстановления значений исходных параметров с применением специальных технологий. После такой очистки от отложений параметры двигателя полностью восстанавливаются до номинальных значений. Однако в некоторых случаях промывка затруднительна или даже невозможна, что приводит к необходимости удалять из засасываемого воздуха такие специфические загрязнители, как морская вода,

тонкая пыль, сажа, масляный туман и тому подобное, поскольку они являются источником отложений. Такая очистка, очевидно, оправдана в том случае, если ухудшение параметров газотурбинного двигателя будет минимальным.

Газотурбинные двигатели, оснащенные теплообменниками, имеют аналогичные проблемы. В частности, закупорка каналов теплообменника может привести к пережогу турбинных лопаток, а тонкая пыль может попасть и в подшипниковые опоры двигателя и существенно снизить их надежность и ресурс. Таким образом, очищать воздух необходимо не только от той пыли, которая вызывает эрозию, но и от капель морской воды и тонкой пыли, образующих отложения в двигателе. В ряде случаев указанные требования могут быть технически нереализуемыми, так как это ведет к неоправданному росту габаритов и веса воздухозаборного устройства с воздухоочистителем.

КОРРОЗИЯ

Коррозия прежде всего наблюдается при эксплуатации ГТД в морских условиях. Частицы соли и капли морской воды, проникая вместе с воздухом в проточную часть и взаимодействуя с материалом конструкции двигателя, вызывают коррозию, что приводит к снижению его надежности и ресурса. В холодной части двигателя наиболее подвержены разрушению детали из магниевых сплавов и конструкционных сталей, а в горячей – детали из жаропрочных сплавов на никелевой основе, которые подвергаются интенсивной высокотемпературной коррозии, вызванной наличием в воздухе натриевых солей и серы, содержащейся в продуктах сгорания топлива. Поэтому одним из основных требований к покрытиям, наряду с эрозионной стойкостью, является коррозионная стойкость.

ТРЕБОВАНИЯ К КОЭФФИЦИЕНТУ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУХОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА С ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ

Коэффициент эффективности является одним из основных параметров воздухозаборного устройства с воздухоочистителем. У современных инерционных воздухоочистителей коэффициент эффективности находится в пределах 90...95 % на стандартной грубой пыли и капель с среднемассовым диаметром 60...200 мкм. Для экранопланов морского базирования величину коэффициента эффективности определяют с учетом типа двигателя и конструктивной схемы воздухозаборного устройства с воздухоочистителем, его веса и габаритов, длительности пребывания в условиях морской среды. Т.е. оты-

скивается компромиссное решение между значением коэффициента эффективности и величиной коэффициента восстановления полного давления. Например, при эксплуатации экраноплана на крейсерском режиме полета попадание капель морской воды незначительно и деградация характеристик ГТД идет медленно, но при взлете и посадке в воздухозаборное устройство двигателя попадает большое количество капель морской воды, что вызывает быстрое ухудшение характеристик двигателя. В зависимости от соотношения времени крейсерского полета и режима взлета и посадки определяют оптимальное соотношение между коэффициентами, оптимизируя удельный расход топлива или дальность полета.

Дальность полета вычисляется по следующему уравнению:

$$L = \frac{Vk}{C_R} \lg \frac{Q_H}{Q_K},$$

где V – скорость полета; k – коэффициент аэродинамического качества; C_R – удельный расход топлива; Q_H , Q_K – начальная и конечная масса летательного аппарата.

Влияние основных характеристик воздухоочистителя – эффективности влагоудаления и потерь давления на дальность полета можно оценить по относительному уменьшению дальности в зависимости от водности потока, поступающего в двигатель, и времени работы двигателя на стартовых режимах:

$$\Delta \bar{L} = \frac{L_0 - L}{L_0},$$

где L – дальность полета; L_0 – дальность полета при нулевой водности.

В зависимости от времени работы на стартовых режимах, эффективности воздухоочистителя и значения коэффициента восстановления полного давления наблюдается экстремум на графиках удельного расхода топлива и относительной дальности полета (рис. 4, рис. 5).

ТРЕБОВАНИЯ К НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

На входе в компрессор допускается некоторая неравномерность поля скоростей и пульсация давления. Превышение допустимых значений неравномерности приводит к неустойчивой работе компрессора.

Для получения высоких значений коэффициента эффективности корректируется исходная геометрия канала воздухозаборного устройства и устанавливаются лопаточные аппараты роторного воздухоочистителя, что вызывает изменения радиальной и окружной неравномер-

ности потока перед входом в компрессор. Критерием оценки неравномерности поля скоростей является относительная приведенная скорость $\bar{\lambda}_{\min}$ по минимальному значению приведенной скорости:

$$\bar{\lambda}_{\min} = \frac{\lambda_{k\min}}{\lambda_{cp}}$$

где $\lambda_{k\min}$ – минимальное значение приведенной скорости; λ_{cp} – среднее значение приведенной скорости в сечении перед компрессором.

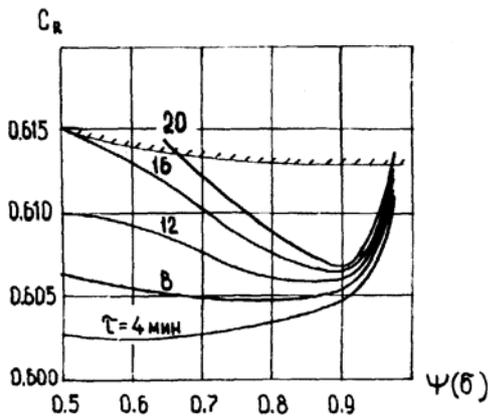


Рис. 4. Влияние эффективности воздухоочистителя и коэффициента восстановления полного давления на удельный расход топлива ТРДД для начальной водности $\mu_0 = 0,2$: заштрихованная область – ограничение по температуре газов перед турбиной; τ – время работы экраноплана на стартовых режимах; $\psi(\sigma)$ – коэффициент эффективности воздухоочистителя

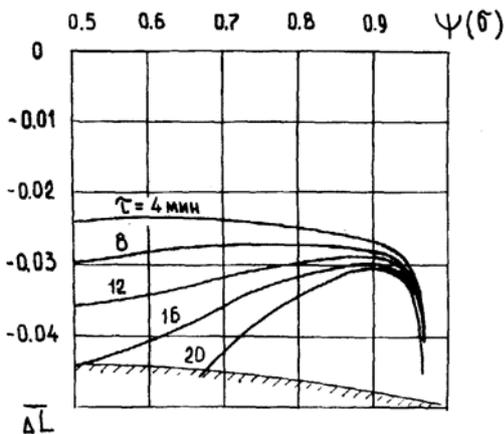


Рис. 5. Влияние эффективности воздухоочистителя и коэффициента восстановления полного давления на относительную дальность полета для начальной водности $\mu_0 = 0,2$: заштрихованная область – ограничение по температуре газов перед турбиной; τ – время работы экраноплана на стартовых режимах; $\psi(\sigma)$ – коэффициент эффективности воздухоочистителя

Осреднение приведенной скорости выполнено по методике, изложенной в работах [7, 8] для случая, когда требуется оценить работоспособность исходного потока газа и сохранить постоянной суммарную величину энтропии газа. В любом случае необходимо стремиться к тому, чтобы осредненный – одномерный поток сохранил суммарные характеристики неравномерного течения без изменения. Для определения с минимальными ошибками трех независимых параметров осредненного потока – полного давления p_{cp}^* , температуры торможения \bar{T}^* и приведенной скорости λ_{cp} – необходимо сохранить неизменными в исходном и осредненном потоках – расход газа G_1 , полную энергию E_1 , энтропию S_1 . Условия $G_1 = \text{const}$, $E_1 = \text{const}$, $S_1 = \text{const}$ обеспечиваются в процессе численного решения задачи с применением соответствующих уравнений (индекс 1 относится к непрерывному потоку газа). Так как массовая концентрация дисперсной фазы в потоке незначительна и составляет не более 3%, то влиянием частиц на поток можно пренебречь и рассматривать задачу осреднения для непрерывного потока отдельно, то есть для воздуха – условие сохранения энтропии, расхода и энергии.

Средние значения параметров определяются следующим путем [8]. Вычисляют суммарный расход газа по уравнению

$$G = \int_F dG = \int_F m \frac{p_k^* q(\lambda_k)}{\sqrt{T_k^*}} dF,$$

где $m = 0,0404 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}$ для воздуха; $q(\lambda_k)$ – газодинамическая функция в k -й точке поперечного сечения F ; \bar{T}_k^* – заторможенная температура в k -й точке поперечного сечения; λ_k – приведенная скорость в k -й точке поперечного сечения, определяемая по формуле

$$\lambda_k = \frac{v_k}{a_{kp}},$$

где v_k – скорость в k -й точке рассматриваемого сечения; a_{kp} – критическая скорость звука, определяемая по формуле

$$a_{kp} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_k^*}.$$

Для воздуха ($R = 287,3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$) критическая скорость звука определяется по формуле

$$a_{kp} = 18,3 \sqrt{T_k^*}.$$

Далее из уравнения энергии определяют температуру торможения [9]:

$$\bar{T}^* = \frac{E}{c_p G} = \frac{\int_F p_k^* \cdot q(\lambda_k) \sqrt{T_k^*} dF}{\int_F \frac{p_k^* q(\lambda_k)}{\sqrt{T_k^*}} dF},$$

где c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; $q(\lambda_k)$ – газодинамическая функция; p_k^* – заторможенное давление в k -й точке; T_k^* – заторможенная температура в k -й точке; F – площадь сечения.

Условие постоянства энтропии в осредненном и действительном потоках записывается в виде [9]:

$$GR \ln \frac{(\bar{T}_{cp}^*)^{k-1}}{p_{cp}^*} = R \int_G \ln \frac{(T_k^*)^{k-1}}{p_k^*} dG. \quad (1)$$

В уравнение (1) входит только один неизвестный параметр – среднее полное давление p_{cp}^* . Для определения p_{cp}^* подставляем вместо dG его значение, подсчитанное по формуле

$$dG = m \frac{p_k^* q(\lambda_k)}{\sqrt{T_k^*}} dF,$$

а затем преобразуем уравнение к виду:

$$\ln p_{cp}^* = \frac{m}{G} \int_F \left(\ln p_k^* - \frac{k}{k-1} \ln \frac{T_k^*}{T^*} \right) \frac{p_k^* q(\lambda_k)}{\sqrt{T_k^*}} dF. \quad (2)$$

Температуру торможения T_k^* можно считать одинаковой во всех точках сечения входного устройства [10], т.е. $\bar{T}^* = T_k^*$. В этом случае уравнение (2) принимает вид:

$$\ln p_{cp}^* = \frac{1}{G} \int_G \ln p_k^* dG$$

Следовательно, среднее полное давление находится осреднением логарифма полного давления в исходном потоке по расходу.

Приведенную среднюю скорость потока находим из выражения для расхода газа:

$$q(\bar{\lambda}) = \frac{G \sqrt{\bar{T}^*}}{m p_{cp}^* F}.$$

Радиальная и окружная неравномерность приведенной скорости несущего потока в любой точке сечения входного устройства определяется по формулам

$$\bar{\lambda}_{r \min} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{cp}}; \bar{\lambda}_{\phi \min} = \frac{\lambda_k}{\lambda_{cp}}.$$

Неравномерность поля скоростей на входе в двигатель не должна превышать допустимого значения, приводящего к помпажу. Модельные испытания воздухозаборных устройств ТВД и ТРДД, выполненные в ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева и УГАТУ, показали, что неравномерность поля скоростей не превышает 10 %.

ТРЕБОВАНИЯ К КОЭФФИЦИЕНТУ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ

Коэффициент восстановления полного давления определяется по формуле

$$\sigma = \frac{p_{\infty}^*}{p_{cp}^*},$$

где σ – коэффициент восстановления полного давления; p_{∞}^* – полное давление в невозмущенной области; p_{cp}^* – полное давление перед компрессором.

Увеличение коэффициента эффективности при заданных габаритах достигается за счет увеличения густоты рабочей решетки и, следовательно, снижения коэффициента восстановления полного давления. Для воздухозаборного устройства без воздухоочистителя коэффициент восстановления полного давления обычно находится в пределах 0,97-0,98 [4]. Модельные исследования, проведенные в УГАТУ, показали, что самовращающийся воздухоочиститель снижает коэффициент восстановления полного давления на 2...3 %, а приводные воздухоочистители увеличивают на 2...4 %.

ЛОБОВАЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ВОЗДУХОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА С ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ

При проектировании новых ГТД наблюдается тенденция увеличения лобовой производительности, которая определяется по формуле

$$q = \frac{G_{в.прив}}{F_{лоб}},$$

где q – лобовая производительность, кг/с/м²; $G_{в.прив}$ – приведенный весовой расход воздуха; $F_{лоб}$ – площадь миделевого сечения, м².

Результаты анализа лобовой производительности для различных типов двигателей отечественного и зарубежного производства показали, что для современных ГТД величина лобовой производительности находится в пределах 80...185 кг/с/м². Такой же порядок величин должен быть и для лобового воздухозаборного устройства с роторным воздухоочистителем.

ВЕС И ГАБАРИТЫ ВОЗДУХОЗАБОРНОГО УСТРОЙСТВА С ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕМ

Вес и габариты воздухозаборного устройства с воздухоочистителем являются важной величиной для транспортного устройства. Поэтому при выборе конструктивной схемы воздухозаборного устройства необходимо учитывать указанные факторы. Роторные самовращающиеся воздухоочистители имеют небольшие габариты и вписываются в канал лобового воздухозаборного устройства. Приводные воздухоочистители роторного типа размещаются между винтом и передним носком воздухозаборного устройства.

СТОЙКОСТЬ ПРОТИВ УДАРОВ, ВИБРАЦИИ, КОРРОЗИИ И ЭРОЗИИ

Воздухозаборные устройства с воздухоочистителем должны выдерживать удары и вибрации, определяющиеся условиями эксплуатации двигателя на транспортном средстве.

Так же как и другие элементы конструкции двигателя, воздухозаборное устройство с воздухоочистителем должно обладать коррозионной устойчивостью против широкого круга активных сред, таких как морская вода и атмосферное воздействие, а также обладать эрозийной стойкостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При формировании требований к воздухозаборному устройству ГТД при его эксплуатации в запыленных условиях и морской среде необходимо учитывать все факторы, влияющие на характеристики двигателя, и определять оптимальное соотношение между отдельными параметрами воздухоочистителя.

Стремление получить в воздухоочистителе 100 % очистку от дисперсных частиц не всегда оправдано. Если ухудшение характеристик двигателя от снижения коэффициента восстановления полного давления превалирует над выигрышем от высокого значения коэффициента эффективности воздухоочистителя, то уровень эффективности очистки можно снизить, увеличив при этом коэффициент восстановления полного давления.

Целесообразно использовать комбинированный подход к решению проблемы защиты от повреждений посторонними предметами, обеспечив не только очистку потока, но и применяя покрытия из эрозийно-стойких материалов и ограничившись установкой воздухоочистителя с высоким коэффициентом очистки крупных частиц, без значительного снижения коэффициента полного давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Березин Г. В., Сушенцов В. М.** Оценка эксплуатационной эффективности совместного применения пылезащитного устройства и защитного покрытия лопаток компрессора вертолетного ГТД // Конструкция двигателей ЛА, их прочность и надежность: тем. сб. науч. тр. / МАИ. М., 1991. С.18–24.
2. **Горшков А. Ф.** Летательный аппарат, вмещающий танковый батальон // Независимое военное обозрение. Выпуск 40 (400), 2004.
3. **Кюхеман Д., Вебер И.** Аэродинамика авиационных двигателей. М.: Изд-во иностр. лит., 1956. 388 с.
4. **Еникеев Г. Г.** Математическая модель расчета эффективности роторных воздухоочистителей ВРД // Авиационно-космическая техника и технология / ХАИ. Харьков, 2006, №7(33). С.33–37.
5. **Finnie.** Erosion of Surfaces by Solid Particles. Wear, 3:87–103, 1960.
6. **Grant G., Tabakoff W.,** Erosion Prediction in Turbomachinery Resulting from EnSolid Particles, Journal of Aircraft, Vol.12, № 56 May 1975.
7. **Hutchings, I. M.,** "Mechanical and metallurgical aspects of the erosion of metals", Proc. Conf. on Corrosion-Erosion of Coal Conversion System Materials, NACE (1979) 393.
8. **Седов Л. И., Черный Г. Г.** Об осреднении неравномерных потоков газа в каналах // Теоретическая гидромеханика: сб. ст. №12, вып. 4. М.: Оборонгиз, 1954.
9. **Абрамович Г. Н.** Прикладная газовая динамика в 2 ч. Ч. 1: учеб. руководство для втузов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1991. 600 с.
10. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей / Акимов В. М. и др.; под ред. С. М. Шляхтенко: учеб. для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 568 с.

ОБ АВТОРАХ

Еникеев Галей Гумерович, доц. каф. прикл. гидромех. Дипл. инж.-мех. по авиац. двиг. (УАИ, 1967). Канд. техн. наук по тепл. двиг. (УАИ, 1979). Иссл. в обл. механики многофазных сред.

Бикметова Диана Дамировна, студ. гр. ТЭ – 611 (УГАТУ, 2011). Иссл. в обл. эксплуатации ГТД.