

Г. Г. Еникеев

**КОМПЛЕКСНАЯ ЗАЩИТА ГАЗОТУРБИНОГО ДВИГАТЕЛЯ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩЕГОСЯ
В ЗАПЫЛЕННОЙ АТМОСФЕРЕ И МОРСКОЙ СРЕДЕ**

Запыленная атмосфера негативно воздействует на многие узлы газотурбинного двигателя (ГТД). Больше всех страдает компрессор, лопатки которого подвержены эрозионному износу. При определенных условиях возможны отложения пыли на лопатках компрессора, которые ведут также к ухудшению характеристик. В подшипниковые узлы, маслосистему и агрегаты двигателя может попадать пыль с воздухом для наддува лабиринтных уплотнений. Охлаждающий воздух тоже может содержать частицы пыли, которые осаждаются в охлаждающих каналах и могут закупорить их, что может привести к перегреву лопаток и диска турбины. Исследование и предотвращение уязвимостей узлов ГТД от воздействия пыли является важной и актуальной проблемой, решение которой позволит увеличить их ресурс. В статье показаны наиболее уязвимые узлы ГТД и предложен комплексный подход к их выявлению и предотвращению при эксплуатации в запыленной атмосфере. *Газотурбинный двигатель; уязвимость узлов двигателя; комплексный подход к защите*

Защита проточной части от воздействия загрязненной среды превратилась из косвенной проблемы в одну из важнейших при создании новых или конвертировании существующих ГТД, для условий эксплуатации в загрязненной атмосфере или морской среде. Анализ исследований и практических работ в области технологий проектирования газотурбинных двигателей показал, что разработчики вынуждены учитывать специфические условия работы и принимать ряд конструктивных и технологических мер для обеспечения работоспособности и увеличения срока службы ГТД [1]. В ЦКБ по СПК им. Р. Е. Алексеева, НТК им. Н. Д. Кузнецова, ОАО КПП «Авиамотор» [2, 3] при конвертировании авиационных ГТД НК-12, НК-86 для экранопланов «Орленок» и «Лунь» был внесен ряд конструктивных изменений для обеспечения работоспособности в морских условиях. Была выполнена замена магниевых сплавов на алюминиевые, стойкие против коррозии, были разработаны и использованы антикоррозионные покрытия лопаток турбины и компрессора. Была разработана и установлена на двигателях система промывки проточной части, что позволило восстанавливать исходные характеристики компрессора при засолении. Были разработаны с участием УАИ и испытаны роторные воздухоочистители, что позволило снизить темп засоления компрессора и увеличить время работы двигателей между промывками. При выполнении указанных работ ставилась задача учета негативных факторов воздействия морской среды на характеристики ГТД при конвертировании.

В ЦИАМ им. П. И. Баранова, ЛНПО им. Климова, ВИАМ проделана большая работа по исследованию влияния пыли на характеристики МГТД и разработке средств защиты [4]. При создании газотурбинного двигателя для вертолета приходится учитывать что воздух как рабочее тело может содержать определенную массовую долю рассредоточенной твердой фазы в виде пыли различного фракционного и химического состава, определенную массовую долю сосредоточенной и рассредоточенной воды, в том числе морской, определенную массовую долю сосредоточенной твердой фазы в виде мелких камней, кусочков льда, птиц.

Учитывать эти обстоятельства важно для малоразмерных газотурбинных двигателей, так как МГТД используются на летательных аппаратах, которые в основном имеют типовой полетный цикл малой длительности, то есть относительно большое время работы осуществляется вблизи земли.

Результатом работ явилось выполнение ряда конструкторских мероприятий на стадии проектирования: создание воздухоочистителей, препятствующих попаданию частиц на вход в двигатель; обеспечение характеристик компрессора с повышенными запасами газодинамической устойчивости; выполнение первой ступени компрессора с широкохордными рабочими лопатками; применение эрозионностойких покрытий на лопатках компрессора; очистка воздуха, направляемого в систему охлаждения для предотвращения перекрытия охлаждающих каналов пылью.

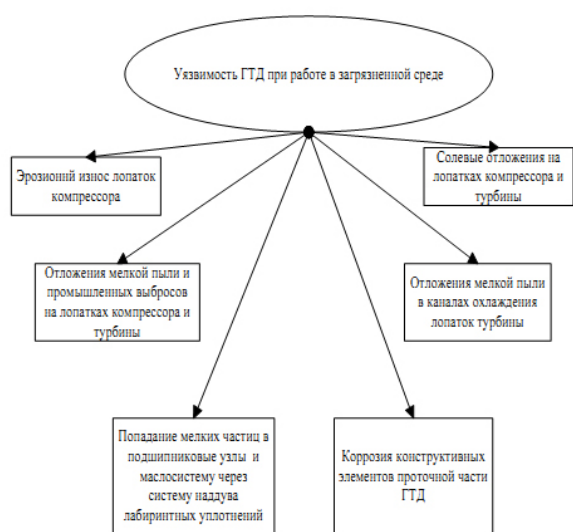


Рис.1. Уязвимость отдельных узлов и систем ГТД

Сформировался новый подход к проблеме обеспечения работоспособности ГТД в запыленной атмосфере и морской среде, который заключается в учете уязвимостей при проектировании следующего поколения двигателей и модернизации существующих (рис.1). Рассматривая узлы и системы ГТД в отдельности, важно дать прогноз изменения их характеристик при попадании твердых частиц и капель в проточную часть и принять меры на стадии проектирования для уменьшения негативных последствий. Для этого необходимо совершенствовать методы защиты проточной части двигателя.

1. МЕТОД КОМБИНИРОВАННОЙ ЗАЩИТЫ ГТД ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ДИСПЕРСНЫХ ЧАСТИЦ

Метод комбинированной защиты заключается в использовании нескольких конструктивных и технологических решений для снижения уязвимости ГТД при эксплуатации в запыленной атмосфере или морской среде. Такими конструктивными и технологическими решениями являются:

- установка воздухоочистительного устройства на входе или непосредственно в проточной части ГТД;
- нанесение покрытий стойких к эрозии и коррозии на рабочие и направляющие лопатки компрессора и турбины;
- установка воздухоочистителя тонкой очистки на линии подачи воздуха в охлаждаемые ло-

патки турбины и подшипниковые опоры;

- установка на двигатель датчиков изменения параметров двигателя в результате воздействия запыленной атмосферы и морской среды;
- установка на двигатель системы промывки проточной части.

Критерием оценки комбинированной защиты ГТД может служить время достижения предельного состояния двигателя, когда его эксплуатация невозможна. Например:

- ограничение предельной температуры газов перед турбиной;
- износ лопаток первой ступени компрессора;
- достижение критического значения газодинамической устойчивости компрессора;
- достижение предельной концентрации твердых частиц в масле и др.

На стадии проектирования двигателя или во время эксплуатации необходимо иметь методику оценки эффективности того или иного варианта комплексной защиты ГТД.

В настоящей работе приведена методика оценки эффективности комплексной защиты по двум конструктивным и технологическим мероприятиям:

- установка на входе воздухоочистителя;
- нанесение на поверхность лопаток наноструктурированного многослойного покрытия с предварительной их обработкой электроплазменной полировкой и ионной имплантацией ионами азота.

В основу методики были положены подходы, изложенные в работе [7].

В методике критерием достижения критического состояния двигателя принят полный эрозионный износ покрытия лопаток первой ступени компрессора, из-за которого происходит съем двигателя с эксплуатации. Методика разработана для МГТД вертолетов.

1.1. Распределения дисперсного потока в проточной части ГТД

Многочисленные исследования движения дисперсного потока в проточной части ГТД и механизма эрозионного износа лопаток компрессора показали наличие неравномерности распределения частиц в радиальном направлении по высоте лопаток [5, 6, 8, 9].

Картина распределения концентрации дисперсных частиц по радиусу в проточной части

многоступенчатого компрессора показана на рис. 2 [5]. В результате взаимодействия частиц с поверхностью рабочих и направляющих лопаток компрессора по мере продвижения потока по тракту компрессора частицы концентрируются на периферии.

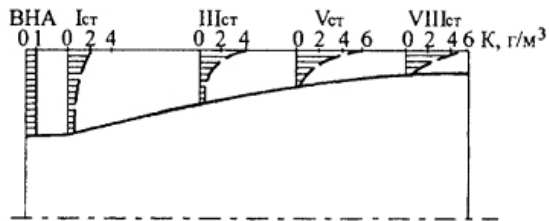


Рис. 2. Радиальная неравномерность твердой дисперсной фазы в многоступенчатом осевом компрессоре ГТД [5]

На первой ступени компрессора показано равномерное распределение концентрации частиц по высоте. Такое распределение наблюдается при наличии на входе прямого канала и отсутствии воздухоочистителя. Равномерное распределение можно принять в некоторых расчетных моделях для упрощения решения задачи.

Установка некоторых типов воздухоочистителей, например роторного, и организация криволинейных пространственных каналов перед компрессором двигателя, как показали расчеты и эксперимент [1], вызывает неравномерное распределение концентрации частиц по радиусу и на первой ступени компрессора.

Необходимо отметить, что наряду с перераспределением концентрации по радиусу, в силу особенностей движения частиц разных размеров, меняется по радиусу и функция распределения частиц по размерам.

На эрозионном стенде НИИ СХ ГТД, УГАТУ были проведены испытания нескольких рабочих лопаток 3-й ступени осевого компрессора вертолетного двигателя ВК 2500. Испытания проводились в два этапа. На первом этапе испытывалась лопатка из титанового сплава ВТ-8 без противозерозионного покрытия.

Целью испытаний было визуальное изучение процесса эрозии и количественная оценка изменения веса лопатки. Испытания проводились при следующих условиях: скорость частиц составляла около 100 м/с; в качестве абразива использовался песок ГМ; средний угол атаки частиц 15°. Песок подавался циклами по 0,7 и 1 кг,

после чего проводилось взвешивание и визуальный осмотр лопатки.



Рис. 3. Эрозионный износ рабочей лопатки компрессора 3 ступени без противозерозионного покрытия

На рис. 3 показаны результаты испытаний. Наблюдался сильный эрозионный износ корытца, передней и задней кромок лопатки. На спинке лопатки был замечен незначительный износ в районе передней кромки. На фотографии хорошо видно, что износ произошел неравномерно, что объясняется разницей концентрации частиц по высоте. Сильно изменилась шероховатость поверхности лопатки в зоне эрозионного износа и стала существенно больше исходной. Существует переходная зона с меньшей шероховатостью между областью сильного износа и неизношенной поверхностью лопатки.

1.2. Сравнительные эрозионные испытания рабочих лопаток 3-й ступени компрессора МГТД ВК 2500К

На эрозионном стенде были проведены сравнительные испытания на эрозионную стойкость рабочих лопаток 3-й ступени осевого компрессора вертолетного двигателя ВК 2500.

Целью проведения испытаний было исследование эрозионного износа лопаток с противозерозионными покрытиями, выполненным по технологиям, которые отрабатывались на образцах размером 15Ч20 мм. В реальных условиях удар частиц о лопатку происходит с разными углами по длине хорды и по высоте, в силу особенностей геометрии пера лопатки и траекторий частиц разных размеров.

После каждого цикла испытаний лопатки фотографировались с целью визуального наблюдения

за износом поверхности и взвешивались на весах с целью определения их веса.

Исходное состояние лопаток до абразивного воздействия частиц изображено на рис. 4.

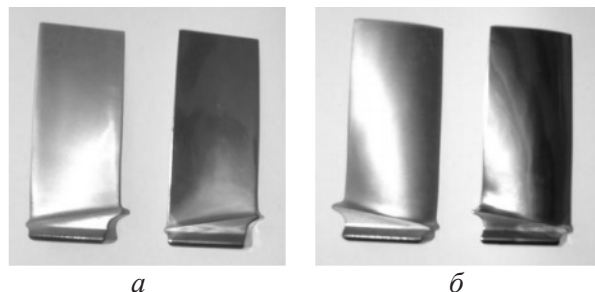


Рис. 4. Исходное состояние поверхности лопаток: *a* – корытце лопатки; *б* – спинка лопатки; слева – лопатка с покрытием; справа – без покрытия

На поверхность лопатки (на фотографии лопатка изображена слева) было нанесено наноструктурированное многослойное вакуумное ионно-плазменное покрытие на основе нитридов ванадия и титана, разработанное кафедрой технологии машиностроения УГАТУ.

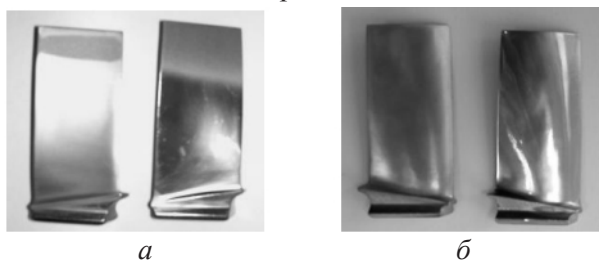


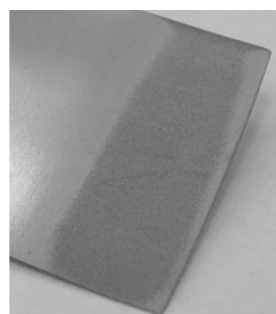
Рис. 5. Состояние поверхности корытца лопаток после подачи в бункер установки электрокорунда белого F280 в количестве 3,5 кг: *a* – корытце лопатки; *б* – спинка лопатки; слева – лопатка с покрытием; справа – без покрытия

На рис. 5 приведены фотографии изменения поверхности лопатки в результате эрозийного износа. Износу подвержена поверхность корыта. Спинка лопатки не изношена. Износ поверхности лопатки с покрытием произошел менее интенсивно, чем поверхность лопатки без покрытия.

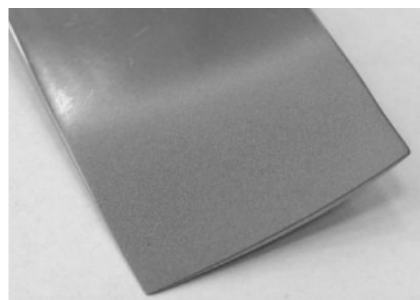
Фрагмент торцевой части лопаток показан на рис. 6. На фотографии видно, что в зоне с повышенной концентрацией частиц покрытие почти полностью разрушено. В переходной зоне покрытие только начало разрушаться.

В процессе испытаний с точностью до шестого знака производилось взвешивание лопаток, что позволило построить количественные зависимости износа от времени абразивного

воздействия и суммарного количества абразива, поданного в бункер установки.



a



б

Рис. 6. Фрагмент корытца лопаток после подачи в бункер установки электрокорунда белого F280 в количестве 4,2 кг: *a* – лопатка с покрытием; *б* – лопатка без покрытия

Графики зависимости уноса материала лопаток от массы электрокорунда белого, поданного в бункер баллистической установки и времени воздействия приведены на рис. 7–8.

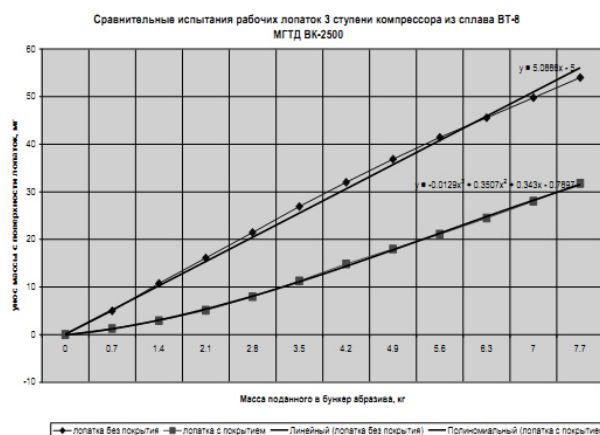


Рис. 7. Графики зависимости уноса массы с поверхности лопаток от массы поданного в бункер установки абразива

эрозии рабочей лопатки компрессора без покрытия происходит более интенсивно, чем с покрытием. Многослойное противозерозионное покрытие существенно снижает эрозию поверхности лопатки. Характер изменения уноса массы

от времени воздействия или массы абразива в исследованном диапазоне изменения параметров нелинейный на начальном участке графика, что объясняется постепенным износом многослойного покрытия. По мере износа покрытия слабая нелинейность изменения уноса массы от времени воздействия и количества абразива переходит в линейную зависимость.

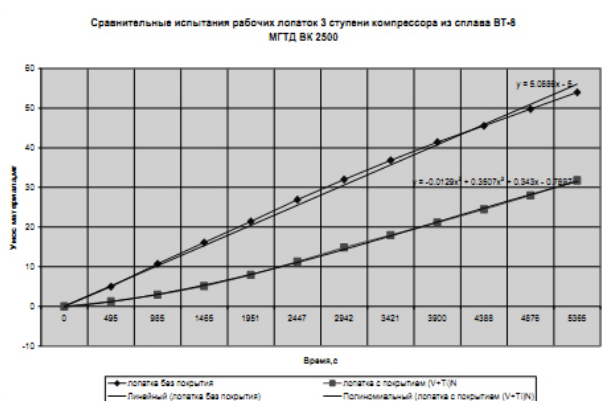


Рис. 8. Графики зависимости уноса массы с поверхности лопаток от времени воздействия абразива

Относительный износ лопатки характеризуется коэффициентом относительной эрозионной стойкости ξ , который вычисляется по формуле

$$\xi = \frac{\Delta m_{\text{э}}}{\Delta m_{\text{и}}}, \quad (1)$$

где $\Delta m_{\text{э}}$ – унос вещества с поверхности эталонного образца без покрытия; $\Delta m_{\text{и}}$ – унос массы вещества с поверхности образца с покрытием.

Зависимость относительной эрозионной стойкости от времени наработки или от количества поданного абразива показана на графике рис. 9.

1.3. Оценка эффективности комплексной защиты газотурбинного двигателя с помощью воздухоочистителя и нанесения эрозионностойких покрытий на лопатки компрессора

Одной из задач при разработке комплексных средств защиты от пылевой эрозии является оценка эффективности выполненных мероприятий, и вклад каждого из них в продление времени достижения предельного состояния ГТД.

В настоящей работе при разработке методики расчета вклада каждого из мероприятий по защите ГТД от пылевой эрозии использовались подходы, изложенные в работе [7]. При разра-

ботке новых типов воздухоочистителей и эрозионностойких покрытий необходимо не только сравнивать их между собой, но и проводить оценку их эффективности при совместном их использовании. Ниже рассмотрены основные положения методики применительно к компрессору двигателя ВК 2500К, аналогу двигателя ТВ3-117. При этом в качестве допущения принято, что время наработки компрессора до снятия с эксплуатации определяется по износу лопаток рабочего колеса первой ступени.

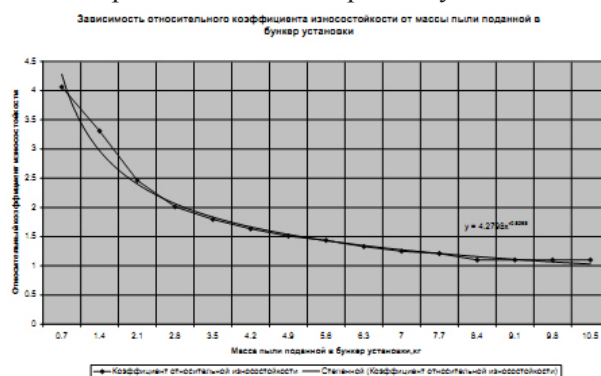


Рис. 9. График зависимости относительного коэффициента износостойкости от массы пыли, поданной в бункер установки

В методике используются характеристики воздухоочистителя и защитного покрытия. Характеристика воздухоочистителя – зависимость степени очистки ψ от размера частиц песка при заданной скорости в воздухозаборнике. Характеристика защитного покрытия – зависимость массы пыли, необходимой для полного износа покрытия $\Delta m_{\text{п}}$, от размера частиц при заданных параметрах пылевого потока и частоты вращения ротора компрессора. В качестве параметра, характеризующего эффективность рассматриваемой системы защиты, используется относительное время наработки:

$$\frac{\tau_{\text{эо+n}}}{\tau_0} = \frac{\tau_{\text{эо+n}}}{\tau_0}, \quad (2)$$

где $\tau_{\text{эо+n}}$ – время наработки компрессора до снятия с эксплуатации при использовании воздухоочистителя и эрозионностойкого покрытия; τ_0 – аналогичный параметр для компрессора без защитных мероприятий. В качестве критерия предельного состояния компрессора принято предельное изменение массы лопаток в результате эрозионного износа рабочего колеса первой ступени компрессора Δm_A .

Для определения относительного времени наработки $\overline{\tau}_{\text{го}+n}$ рассмотрим зависимость потери массы лопаток рабочего колеса первой ступени компрессора в результате износа Δm_A от массы поступившей во входное устройство пыли m_n (рис. 10). Как показали исследования (рис. 8), для лопаток без защитных мероприятий эта зависимость практически линейная. Установка воздухоочистителя приводит к уменьшению расхода и изменению дисперсного состава поступающей в двигатель пыли, что обуславливает изменение наклона зависимости $\Delta m_A = f(m_n)$. Использование эрозионностойкого покрытия сдвигает рассматриваемую зависимость вправо на величину Δm_n , характерную для полного износа покрытия.

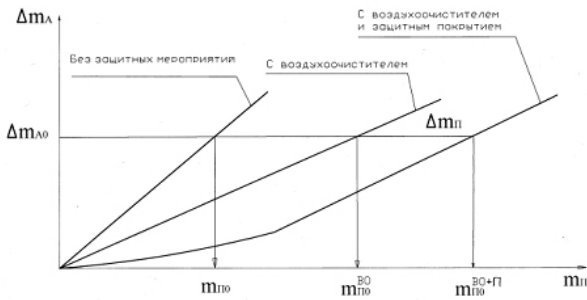


Рис. 10. Схема расчета эффективности комплексной защиты ГТД

Допуская неизменным уменьшение массы лопаток рабочего колеса первой ступени, при котором производится снятие двигателя с эксплуатации при постоянной подаче пыли на вход – Δm_{A0} , получаем, что за счет постановки воздухоочистителя масса пыли, вызывающей износ Δm_{n0} , возрастает с Δm_{n0} до $\Delta m_{n0}^{\text{го}}$, а при использовании воздухоочистителя и эрозионностойкого покрытия – до $\Delta m_{n0}^{\text{го}} + \Delta m_{n0}$. Исходя из пропорциональности массы поступающей во входное устройство пыли и времени наработки двигателя, величину $\overline{\tau}_{\text{го}+n}$ можно записать в виде

$$\overline{\tau}_{\text{го}+n} = \frac{m_{n0}^{\text{го}+n}}{m_{n0}} = \frac{m_{n0}^{\text{го}} + \Delta m_n}{m_{n0}} = \frac{m_{n0}^{\text{го}}}{m_{n0}} + \frac{\Delta m_n}{m_{n0}}. \quad (3)$$

Отношение $\overline{\tau}_{\text{го}} = \frac{m_{n0}^{\text{го}}}{m_{n0}}$ определяет, во сколько раз возрастает время наработки ступени за счет применения воздухоочистителя, а $\overline{\tau}_n = \frac{\Delta m_n}{m_{n0}}$ – на сколько это время увеличивается в результате применения эрозионностойкого покрытия.

Определим величины $\overline{\tau}_{\text{го}}$ и $\overline{\tau}_n$. Величина $\overline{\tau}_{\text{го}}$ определяется выражением

$$\overline{\tau}_{\text{го}} = \frac{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j^{100} g_j}{\sum_{j=1}^n \varepsilon_j^{100} g_j (1 - \psi_j)}. \quad (4)$$

Числитель этого выражения пропорционален уменьшению массы лопаток при отсутствии воздухоочистителя, а знаменатель – этому же параметру при наличии воздухоочистителя. Выражение $(1 - \psi_j)$ учитывает изменение массы j -й фракции пыли при прохождении воздухоочистителя. Массовая доля j -й фракции g_j определяется для заданной функции распределения частиц по размерам по формуле

$$g_j = m_j / \sum_{j=1}^n m_j. \quad (5)$$

В случае если пыль отличается от стандартной или другой, на которой проводились испытания воздухоочистителя, то вводится поправка ε_j^{100} – абразивная способность j -й фракции относительно пыли со средним размером частиц, например, $d_3 = 100$ мкм, которую можно определить для конкретного случая по графику рис. 11 [7].

Нахождение относительного времени увеличения наработки двигателя с лопатками с эрозионностойким покрытием осуществляется следующим образом. Вычисляется величина условной интенсивности износа покрытия толщиной δ фракцией пыли j , массой Δm_j по формуле

$$\delta_j = \frac{\delta}{K_{\text{э}j} \cdot \Delta m_{\text{э}j}} \cdot \Delta m_j, \quad (6)$$

где $K_{\text{э}j}$ – коэффициент, учитывающий распределение пыли по высоте лопатки h ; $\Delta m_{\text{э}j}$ – экспериментально определенное значение массы j -й фракции пыли, необходимой для полного износа покрытия. Для эрозионностойких покрытий [7] первой ступени компрессора двигателя ТВЗ-117 можно определить величину $\Delta m_{\text{э}j}$ по графикам рис. 12. Коэффициент $K_{\text{э}j}$ составляет 2,96 при равномерном распределении пыли на входе в ступень и 1,0 при высоте запыленной зоны в концевых сечениях лопаток 0,28.

Величина Δm_j на входе в компрессор может быть определена через массу этой же фракции пыли на входе в Δm_{nj} и фракционный коэффици-

ент эффективности воздухоочистителя ψ_j по формуле

$$\Delta m_j = \Delta m_{nj} (1 - \psi_j). \quad (7)$$

Суммируя величины износов покрытия, называемых всеми фракциями пыли, исходя при этом из условия полного износа покрытия, получаем

$$\delta = \sum_{j=1}^n \frac{\delta \Delta m_{nj} (1 - \psi_j)}{K_{\epsilon_j} \Delta m_{j\epsilon}}. \quad (8)$$

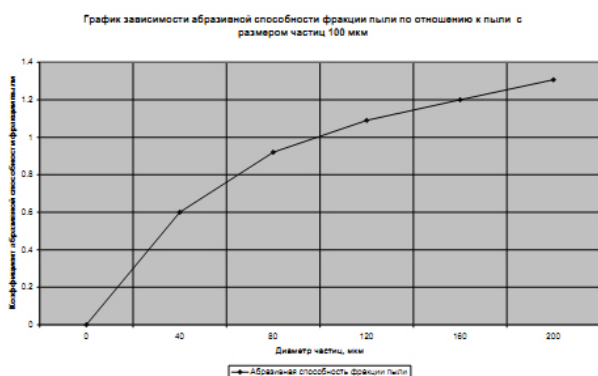


Рис. 11. График зависимости поправочного коэффициента ϵ_j^{100} от диаметра частиц пыли [7]

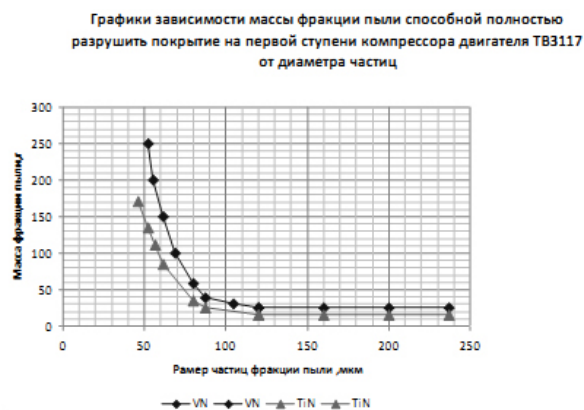


Рис. 12. Зависимость массы фракции пыли способной полностью разрушить покрытие от диаметра частиц пыли

Величину Δm_{nj} выразим в виде

$$\Delta m_{nj} = g_j \cdot \Delta m_n, \quad (9)$$

где Δm_n – масса полидисперсной пыли поступающая в воздухоочиститель, необходимая для полного износа покрытия толщиной δ ; g_j – массовая доля j -й фракции в этой пыли.

Тогда из выражения (8) после несложных преобразований получим

$$\Delta m_n = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{g_j (1 - \psi_j)}{K_{\epsilon_j} \Delta m_{j\epsilon}}}. \quad (10)$$

В итоге величина $\Delta \tau_n$ может быть определена по формуле

$$\Delta \tau_n = \frac{1}{m_{no} \sum_{j=1}^n \frac{g_j (1 - \psi_j)}{K_{\epsilon_j} \Delta m_{j\epsilon}}}. \quad (11)$$

Масса m_{no} полидисперсной пыли произвольного состава может быть определена с использованием результатов, полученных при испытаниях двигателя по формуле

$$m_{no} = m_{nou} \frac{\sum_{j=1}^n \epsilon_j^{100} g_{j\epsilon}}{\sum_{j=1}^n \epsilon_j^{100} g_j}, \quad (12)$$

где $m_{nou} \approx 7$ кг для двигателя ТВ3-117 [7], $g_{j\epsilon}$ – массовая доля j -й фракции пыли, использованной при испытании этого двигателя.

Итоговое выражение для определения увеличения времени наработки ступени за счет использования воздухоочистителя и эрозионно-стойких защитных покрытий имеет вид

$$\tau_{во+n} = \frac{\sum_{j=1}^n \epsilon_j^{100} g_j}{\sum_{j=1}^n \epsilon_j^{100} g_j (1 - \psi_j)} + \frac{1}{m_{no} \sum_{j=1}^n \frac{g_j (1 - \psi_j)}{K_{\epsilon_j} \Delta m_{j\epsilon}}}, \quad (13)$$

Как показали сравнительные испытания рабочих лопаток 3-й ступени компрессора двигателя ВК 2500К, результаты можно использовать в вышеприведенной методике оценки комплексной защиты компрессора от эрозионного воздействия пыли, что позволит упростить ее применение на стадии проектирования двигателя и разработки новых эрозионно-стойких покрытий.

ВЫВОДЫ

1. При разработке узлов вновь проектируемых или модернизируемых ГТД необходимо выявить их уязвимости при эксплуатации в запыленной атмосфере и морской среде и принять конструктивные и технологические решения по их снижению или полному исключению.

2. Разработка мероприятий по уменьшению негативного влияния запыленной атмосферы и

морской среды должна сопровождаться выбором критерия предельного состояния ГТД, по которому определяется вклад каждого из них в увеличение времени достижения критического состояния.

3. Эрозионные испытания лопаток компрессора вертолетного двигателя и образцов покрытий [10] показали, что износ многослойных покрытий зависит от химического состава, количества слоев и технологии их нанесения и др. и при оптимальном выборе параметров в несколько раз увеличит время достижения предельного состояния ГТД.

4. Предложенная методика оценки вклада конструктивных и технологических мероприятий по снижению уязвимости ГТД, эксплуатирующихся в запыленной атмосфере, позволяет осуществить комплексный подход к выбору их параметров при проектировании. На-пример, при заданном времени предельного состояния компрессора двигателя, можно снизить потребный коэффициент эффективности воздухоочистителя, повысив при этом эрозионную стойкость покрытия лопаток компрессора, что скажется на улучшении характеристик ГТД.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рысин Л. С.** Пыль как фактор, подлежащий анализу и учету при конструировании вертолетного двигателя // Двигатели XXI века: междунар. науч. конф. М., 2000. С.78–79.

2. **Гриценко Е. А., Данильченко В. П.** Двигатели семейства «НК» для экранопланов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. №2. С. 34–38.

3. **Гагай В. С.** Опыт внедрения конвертированных авиационных ГТД для экранопланов // Изв. вузов. Авиационная техника. 1998. №2. С. 85–90.

4. Малоразмерные газотурбинные и поршневые двигатели / Пономарев Б. А. // Научный вклад в создание авиационных двигателей. Кн. 1. М.: Машиностроение, 2000, С. 193–216.

5. Вертолетные газотурбинные двигатели/ под ред. В. А. Григорьева и Б. А. Пономарева. М.: Машиностроение, 2007. 490 с.

6. **Табакوف.** Эрозия компрессора и ухудшение характеристик турбомашин // Теоретические основы инженерных расчетов, 1988. №2. С. 298 – 311.

7. **Березин Г. В., Сушенцов В. М.** Оценка эксплуатационной эффективности совместного применения пылезащитного устройства и защитного покрытия лопаток компрессора вертолетного ГТД // Конструкция двигателей летательных аппаратов, их прочность и надежность: сб. науч. тр. М.: МАИ, 1992. С. 18–24

8. **Hussein M. F., and Tabakoff W.,** Computation and Plotting of Solid Particle Flow in Rotating Cascades, Computer and Fluids. 1974. V. 2. P. 1–15.

9. **Шальман Ю. И.** Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней компрессора на запыленном воздухе // Вертолетные газотурбинные двигатели. М.: Машиностроение, 1966. С. 163–199.

10. **Еникеев Г. Г., Смыслов А. М., Селиванов К. С., Дыбленко Ю. М., Гордеев В. Ю.** Сравнительные испытания материалов и покрытий на эрозионную стойкость // Мавлютовские чтения: Росс. науч. техн. конф.: сб. тр. Т. 5. Уфимс. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа: УГАТУ, 2011. С. 86–90.

ОБ АВТОРЕ

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