УДК 539.3

Д.В. ИВЧЕНКО¹, П.К. ШТАНЬКО², Н.В. ИСАЕВ¹, И.Ю. ПАВЛОВ¹¹ГП ЗМКБ «Прогресс» имени академика А.Г. Ивченко, Украина²Запорожский национальный технический университет, Украина

ЭРОЗИОННАЯ ПРОЧНОСТЬ ДЕТАЛЕЙ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА ВЕРТОЛЕТНЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ ЗАПЫЛЕННОСТИ ВОЗДУХА. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ И ВОЗМОЖНЫЙ ПУТЬ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Рассмотрено современное состояние проблемы эрозионной прочности деталей газозвдушного тракта вертолетных газотурбинных двигателей при эксплуатации в условиях запыленности воздуха. Определен возможный путь ее решения и направления дальнейших исследований.

газоабразивная эрозия, прочность, детали газозвдушного тракта, вертолетный ГТД, запыленность воздуха, методы защиты, эксплуатация

Введение

Газабразивная эрозия деталей газозвдушного тракта (ГВТ) вертолетных газотурбинных двигателей (ГТД), возникающая при их эксплуатации в условиях запыленности воздуха, а также обеспечение защиты от вредного воздействия пыли и эрозионной прочности вертолетного ГТД и его деталей ГВТ является одной из основных и до сих пор нерешенных проблем.

1. Газабразивная эрозия деталей ГВТ вертолетных ГТД

Для вертолетов характерны полеты на небольшой высоте, сравнительно длительная работа вблизи земли, взлет и посадка с естественных площадок. В этих условиях в газотурбинные двигатели (ГТД) поступает воздух с частицами пыли, как в результате естественной запыленности воздуха вблизи земли, так и вследствие того, что потоки воздуха от несущего винта вертолета поднимают с поверхности земли твердые частицы, создающие вокруг вертолета пылевое облако с резко увеличенной концентрацией частиц пыли в воздухе [1]. Так, например, при работе ГТД ТВ2-117 вертолета Ми-8 на взлетном режиме над песчаной площадкой в газозвдушной тракт (ГВТ) каждого из них попадает около 3 кг пыли в минуту [2].

Двигаясь с большой скоростью по ГВТ ГТД (100 – 450 м/с), частицы пыли (размер частиц от 5 мкм до 1 мм) вызывают поверхностное повреждение и разрушение его деталей – газабразивную эрозию [3]. Газабразивная эрозия (в дальнейшем – эрозия) деталей ГВТ (рабочих лопаток и направляющих аппаратов компрессора, рабочих лопаток и сопловых аппаратов турбины, рабочих колец статора компрессора, жаровой трубы камеры сгорания) сопровождается уменьшением степени повышения давления в компрессоре и снижением КПД ГТД, что вызывает падение его мощности (более 10%), увеличение удельного расхода топлива (более 5%) [4 – 5] и приводит к снижению запасов газодинамической устойчивости компрессора (коэффициент запаса газодинамической устойчивости уменьшается более чем в 1,5 – 3,0 раза [4]) и возникновению его помпажа. Последствия помпажа могут привести к возникновению катастрофической ситуации для вертолета [6], а для военных вертолетов еще и к невыполнению боевой задачи. Причем, как свидетельствует опыт эксплуатации вертолетных ГТД, вероятность возникновения помпажа вследствие эрозии лопаток компрессора существует во всем диапазоне эксплуатационных частот вращения газогенератора ГТД [6].

Это приводит к невозможности или нецелесообразности дальнейшей эксплуатации ГТД, и требует

его досрочного съема и ремонта для восстановления характеристик. Так, например, во время боевых действий в Афганистане (1979 – 1989 гг.) ГТД ТВ2-117 "не вырабатывали и половины назначенного ресурса, а при их переборке обнаруживалось, что миниатюрные лопатки последних ступеней "съедены" эрозией почти на нет; досрочно приходилось снимать с эксплуатации более половины ГТД ТВ3-117, из них 39% – по эрозии лопаток и почти 15% – по помпажу" [7]; во время войны в Ираке (1990–1991 гг.) США приходилось снимать с эксплуатации ГТД Textron Lycoming T53-L-703 вертолетов Bell AH-1 «Huey Cobra» в среднем после 35 ч их наработки, как правило, по причине эрозии лопаток компрессоров, причем на этих вертолетах за время боевых действий по крайней мере один раз меняли ГТД [8]; по данным работ [9], [10] США во время боевых действий в Юго-Восточной Азии вынуждены были тратить в год 150 млн. долларов на досрочный съем и ремонт вертолетных ГТД вследствие эрозии их деталей.

Таким образом, эрозия деталей ГВТ вертолетных ГТД приводит к значительному снижению надежности, ухудшению технико-экономических характеристик ГТД и вертолетов в целом, а также к снижению боеготовности вертолетов военного назначения.

2. Анализ эффективности существующих методов защиты деталей ГВТ от газообразивной эрозии

В настоящее время методами защиты деталей ГВТ вертолетных ГТД от эрозии являются:

- фильтрация воздуха от пыли поступающего в ГТД пылезащитным устройством (ПЗУ);
- нанесение на детали ГВТ эрозионностойких покрытий;
- проведение эксплуатационных мероприятий, направленных на уменьшение попадания пыли в ГТД.

Установка ПЗУ во входном устройстве ГТД для фильтрации воздуха от пыли создает дополнитель-

ное аэродинамическое сопротивление на входе (гидравлические потери существующих конструкций ПЗУ достигают до 200 мм. вод. ст.), что приводит к снижению эффективной мощности ГТД до 6 % и увеличению удельного расхода топлива до 2%. Кроме этого установка ПЗУ увеличивает массу силовой установки вертолета. Так, например, масса одного комплекта ПЗУ для ГТД ТВ2-117А вертолета Ми-8 составляет 25 кг, а сухая масса одного ГТД ТВ2-117А составляет 332 кг [11 – 12]. В настоящее время в основном применяются ПЗУ двух видов: инерционные и барьерные [2]. Инерционные ПЗУ существующих конструкций имеют степень очистки воздуха 70 – 78% и не обеспечивают достаточной защиты от эрозии деталей ГВТ. Для работы инерционных ПЗУ, как правило, требуется дополнительный отбор воздуха от компрессора, что также приводит к снижению эффективной мощности ГТД. Инерционные ПЗУ обеспечивают увеличение ресурса ГТД в условиях запыленности воздуха в 3,5 – 11,0 раз по данным ФГУП «Завод им. В.Я. Климова» и фирмы FDC/aerofilter. Барьерные ПЗУ имеют степень очистки воздуха 94,0 – 99,3% и обеспечивают надежную защиту деталей ГВТ от эрозии (увеличение ресурса ГТД в условиях запыленности воздуха в 24,5 – 32,0 раза по данным фирмы FDC/aerofilter), но требуют обязательного периодического обслуживания для очистки или замены фильтра, время между обслуживанием зависит от запыленности воздуха и для реальных условий составляет менее 100 ч, что приводит к существенному ухудшению эксплуатационных качеств вертолетов. Так, например, для замены 50 фильтров на военных вертолетах Bell OH-58D «Kiowa Warrior» во время войны в Ираке (2003 г.), пришлось на 48 ч прекратить их полеты [13].

Нанесение на детали ГВТ эрозионностойких покрытий диффузионными, детонационными или плазменными методами обеспечивает увеличение их эрозионной прочности (обеспечивается увеличение

ресурса ГТД в условиях запыленности воздуха в 1,2 – 12,0 раз) [14 – 16].

Проведение эксплуатационных мероприятий [12], направленных на уменьшение попадания пыли в ГТД, в целом не решает проблемы эрозии деталей ГВТ вертолетных ГТД, а лишь несколько снижает ее интенсивность. В отдельных случаях

применения вертолетов проведение эксплуатационных мероприятий затруднено или вообще невозможно.

Таким образом, существующие в настоящее время методы не обеспечивают достаточной защиты деталей ГВТ от эрозии (табл. 1) и (или) являются неэффективными.

Таблица 1

Обеспечение ресурса ГТД при эксплуатации в условиях запыленности воздуха (использование разных методов защиты деталей ГВТ от газообразивной эрозии)

Метод защиты	Коэффициент увеличения ресурса ГТД	Ресурс ГТД межремонтный, ч	
		Расчетный	Требуемый [17]
ПЗУ: – инерционное – барьерное	3,5 – 11,0 24,5 – 32,0	875 – 2750 6125 – 8000	4000 – 5000
Эрозионностойкие покрытия	1,2 ... 12,0	300 – 3000	
Эксплуатационные мероприятия	—	—	

Примечание – межремонтный ресурс ГТД при эксплуатации в условиях запыленности воздуха без применения методов защиты деталей ГВТ от газообразивной эрозии составляет от 50 до 500 ч (ориентировочно); принят 250 ч

3. Эрозионная прочность деталей ГВТ

Наиболее рациональным и конструктивным решением задачи защиты от эрозии деталей ГВТ является применение комплексного метода защиты, основанного на результатах оптимизации степени очистки ПЗУ и эрозионной прочности деталей ГВТ.

Оценку эрозионной прочности деталей ГВТ можно провести путем специальных стендовых испытаний с забросом в ГВТ установленного из каких-либо соображений количества пыли определенного дисперсного и минералогического состава, как в составе полноразмерного ГТД [14], газогенератора ГТД или отдельных узлов ГТД (компрессора, турбины или отдельных ступеней) [18]. Кроме этого, оценку эрозионной прочности деталей ГВТ можно провести путем лабораторных испытаний их образцов в струе высокоскоростного воздушного (газового) потока, который содержит твердые частицы (пыль или ее искусственные заменители) [15].

Многообразие условий эксплуатации вертолет-

ных ГТД в условиях запыленности воздуха (условия заброса пыли в ГВТ, ее дисперсный и минералогический состав на поверхности земли в разных местах, концентрация и др.) сложно воспроизвести в стендовых испытаниях. Поэтому представляется актуальным расчетная оценка эрозионной прочности деталей ГВТ вертолетных ГТД, основанная на проведении междисциплинарных исследований для решения 3 основных научно-практических задач:

- 1) исследование динамики трехмерных течений воздуха (газа) с частицами пыли в ГВТ для определения траекторий и скорости движения частиц пыли с учетом их многочисленных взаимодействий (столкновений) с поверхностями деталей ГВТ;
- 2) исследование взаимодействия частиц пыли с поверхностями деталей ГВТ с целью определения их повреждения и разрушения в результате этого взаимодействия;
- 3) исследование механики эрозионного повреждения и разрушения деталей ГВТ.

Решению 1 задачи были посвящены исследования и работы Табакова (W. Tabakoff), Гусейна (M. Hussein), Хамеда (A. Hamed), И. Узбекова, В. Грибова [19 – 22] и других исследователей. Они провели экспериментальные исследования запыленного потока применительно к решеткам лопаток компрессора и турбины и составили уравнения трехмерного движения частиц пыли в межлопаточном канале с учетом их столкновения с поверхностями лопаток, разработана и программно реализована методика численного решения этих уравнений. Используемая в этих работах модель столкновения частиц пыли с поверхностями деталей ГВТ является эмпирической и требует своего дальнейшего развития или замены; необходима модель, которая бы определяла траектории движения и скорости частиц после столкновения с учетом различных параметров системы «частицы пыли-детали ГВТ» (траектории и скорости частиц до столкновения; их формы, размеров и масс; физико-механических характеристик частиц и деталей ГВТ и др.), а также учитывала возможное дробление (разрушение) частиц пыли в результате этих столкновений.

Решению 2 и 3 задач были посвящены исследования и работы Л.И. Погодаева, Л.И. Урбановича, Н.Ф. Морозова, Хатчингса (I. Hutchings), Рафа (A. Ruff), Шелдона (G. Sheldon), Баласабраманьяма (S. Balasubramaniam) [23 – 27] и других исследователей. Они провели экспериментальные исследования одиночных и многократных взаимодействий твердых частиц с хрупкими и пластически деформируемыми телами. Тем не менее они не дают возможности полного и адекватного математического описания системы «деталь ГВТ-частицы пыли» при различных вариантах их взаимодействия. Существующие в настоящее время теории и модели эрозии, которые условно можно разделить по типу рассматриваемых в них механизмах эрозии – механические,

теплофизические и комбинированные – носят, как правило, гипотетический характер.

Отсутствуют также критерии повреждения и разрушения детали ГВТ в результате этого взаимодействия, которые имели экспериментальное подтверждение, хотя работы в этом направлении ведутся уже сравнительно давно.

Таким образом, несмотря на проведенные исследования, до сих пор все закономерности процесса газоабразивной эрозии деталей ГВТ в результате еще до конца не поняты и не определены. Поэтому требуется проведение дальнейших исследований газоабразивной эрозии.

Заключение

Рассмотрено современное состояние проблемы эрозионной прочности деталей газоздушного тракта вертолетных ГТД при эксплуатации в условиях запыленности воздуха. Определен возможный путь ее решения и направления дальнейших исследований.

Литература

1. Гинзбург Л.Е., Никитин Е.И. Исследование запыленности воздуха вблизи вертолетов Ми-1 и Ми-4 в эксплуатационных условиях // Вертолетные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение. – 1966. – С. 145 – 162.
2. Кеба И.В. Летная эксплуатация вертолетных газотурбинных двигателей. – М.: Транспорт, 1976. – 279 с.
3. Володко А.М, Литвинов А.Л. Основы конструкции и технической эксплуатации одновинтовых вертолетов. – М.: Воениздат, 1986. – 200 с.
4. Исследование основных параметров и газодинамической устойчивости двигателя Д-136 № 225136501003, отработавшего в эксплуатации 900 часов. Технический отчет. – Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 1990. – 94 с.

5. Перельман Р.Г. Эрозионная прочность деталей двигателей и энергоустановок летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1980. – 245 с.
6. Володко А.М. Безопасность полетов вертолетов. – М.: Транспорт, 1981. – 224 с.
7. Марковский В.Ю. Жаркое небо Афганистана // Авиация и время. – 1996. – № 1.
8. Никольский М.В. Боевой вертолет АН-1 "Кобра". – М.: ООО "Астрель", 2002. – 144 с.
9. Genter K., Newhart I.E. Potential of Thin Sputtered Films as Erosion Resistant Projective Coatings // The Role of Cavitation in Mechanical Failures. – NBS SP-394. – 1974.
10. Mechanisms of Sand and Dust Erosion in Gas Turbine Engines. Ath. Smeltzer C. E. et al. – USAAVLABS Techn. Rep. 70–36, 1970.
11. Данилов В.А. Вертолет Ми-8: (устройство и техническое обслуживание). – М.: Транспорт, 1988. – 278 с.
12. Кеба И.В. Конструкция и летная эксплуатация вертолетного двигателя ТВ2-117А: Учебник. – К.: Выща шк., 1990. – 230 с.
13. Применение вертолетов в войне в Ираке // Авиация и космонавтика. – 2003. – № 9. – С. 43 – 44.
14. Испытания двигателя Д-136 с вбрасыванием пыли в проточную часть. Технический отчет. – Запорожье: ГП ЗМКБ «Прогресс» им. А.Г. Ивченко, 1994. – 115 с.
15. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. 1. / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье: ОАО «Мотор-Сич», 2003. – 396 с.
16. Методы современного ремонта и производства // Вертолет. – 1999. – № 3. – С. 21 – 26.
17. Скибин В., Понаморёв Б. Отечественные вертолетные двигатели: состояние и перспективы // Двигатель. – 2000. – № 1. – С. 7 – 8.
18. Шальман Ю.И. Износ и изменение параметров осевой и центробежной ступеней компрессора при работе на запыленном воздухе // Вертолетные газотурбинные двигатели. – М.: Машиностроение. – 1966. – С. 163 – 198.
19. Табаков. Эрозия компрессора и ухудшение характеристик турбомашин // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1988. – № 2. – С. 298 – 310.
20. Хамед. Динамика движения твердых частиц в венцах закрученных лопаток // Теоретические основы инженерных расчетов. – 1984. – № 3. – С. 86 – 92.
21. Узбеков И.И. Методы и исследования траекторий частиц пыли в сопловых аппаратах газовых турбин: Автореф. дис. к.т.н.: 0504.12 / Высшее техн. училище им. Н.Э. Баумана. – М., 1987. – 16 с.
22. Грибов В.А. Расчет течения газа с частицами в каналах пылезащитных устройств. Научно-технический отчет. – М.: ЦИАМ им. П.И. Баранова, 1989. – 28 с.
23. Погодаев Л.И., Сейтказинова К.К., Безюков В.О. Моделирование повреждаемости металлов при изнашивании и усталости на основе уравнений вязкоупругости // Трение, износ, смазка. – 2000. – № 1.
24. Урбанович Л.И., Крамченко Е.М. Экспериментальное исследование газообразивной эрозии стали и сплавов // Трение и износ. – 1999. – Т. 20.
25. Морозов Н.Ф. Математические вопросы механики разрушения // Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 8. – С. 117 – 122.
26. Эрозия / А. Эванс, А. Рафф, С. Видерхорн и др. / Под ред. К. Прис.: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – 464 с.
27. Balasubramaniyam. Computational modeling of brittle impact erosion mechanisms. Thesis. College of Engineering and Mineral Resources Of West Virginia University. West Virginia, 1998.

Поступила в редакцию 17.05.2004

Рецензент: канд. техн. наук, проф. В.С. Гавриш, Запорожская государственная инженерная академия, Запорожье.