

УДК 621.438-762

Ю.А. ЗЕЛЁНЫЙ, Р.П. ПРИДОРЖНЫЙ, О.А. ПЕТРОВА, И.В. БЕРЕЖНАЯ*ГП «Ивченко – Прогресс», Запорожье, Украина*

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СНИЖЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК СА НА ИХ РАБОТОСПОСОБНОСТЬ

Рассмотрены результаты анализа наличия случаев снижения пропускной способности каналов охлаждения лопаток соплового аппарата ТВД в процессе длительной эксплуатации и их влияние на температурное состояние и работоспособность лопаток

лопатки соплового аппарата, каналы охлаждения, перфорация, продувка, температурное поле сечения профиля, повреждения, работоспособность, ресурс

Введение

Создание авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), отвечающих современным требованиям по ресурсу работы, особенно его горячей части, требует не только более совершенных методов проектирования, но и анализа его работоспособности и повреждаемости в течении ресурса с целью поиска резервов, направленных на повышение надежности. Одними из самых сложных и теплонапряженных узлов современного ГТД, являются лопатки соплового аппарата турбины высокого давления (ТВД), непосредственно воспринимающие высокую температуру газа на выходе из камеры сгорания и имеющие развитую систему конвективно-плечного охлаждения.

Анализ состояния сопловых лопаток двигателей, приходящих после эксплуатации в ремонт, ставит вопрос о возможности изменения проходных сечений охлаждающих каналов в процессе длительной работы в условиях эксплуатации, и снижению эффективности их охлаждения.

Целью настоящей работы является экспериментальная проверка возможности «засорения» и окисления поверхности перфорационных отверстий системы охлаждения лопаток СА и расчетная оценка влияния такого фактора на их температурное состояние и работоспособность.

1. Концепция исследований

Для охлаждения деталей и узлов ГТД, наиболее широкое применение находят открытые воздушные системы охлаждения в силу их простоты, надежности и специфики работы двигателя.

Отбор воздуха, необходимого для работы системы охлаждения, производится из компрессора и может содержать в своем составе как посторонние примеси из окружающей среды так и примеси от износа компрессорных уплотнений.

В силу воздействия ряда различных факторов (высокая температура, различная концентрация частиц, наличие в составе воздуха кислорода, технологические особенности изготовления лопаток, конструктивные особенности систем охлаждения и многих других), могут проявляться эффекты, приводящие к окислению и «засорению» поверхности каналов охлаждения лопаток. Внешний вид и анализ состояния отдельных лопаток СА, после их длительной работы, не исключает достоверности такого предположения. Как пример, на рис. 1 приведен внешний вид поврежденной лопатки СА ТВД.

Анализ показывает что, наиболее сильному налипанию посторонних частиц подвержены входные кромки и корыто лопаток. Система охлаждения лопаток настроена таким образом, что даже при силь-

ном внешнем налипании, воздух через перфорационные отверстия проходит. Но при этом возникает вопрос о снижении его расхода и снижении эффективности пленочного охлаждения, вследствие изменения качества защищаемой поверхности из-за налипания посторонних частиц на которой реализуется пленочное охлаждение. Количество и характер налипаний и окислений у разных двигателей и у разных лопаток в комплекте неодинаков.

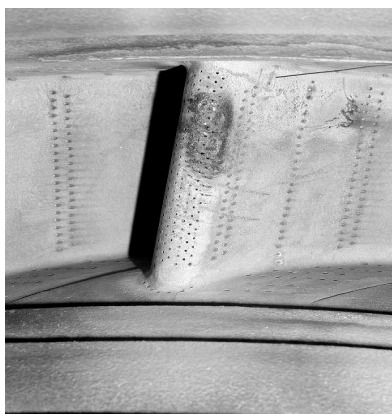


Рис. 1. Внешний вид лопатки СА ТВД с повреждением.

2. Содержание и результаты исследований

С целью выявления возможности окисления поверхности каналов перфорации («засорения») системы охлаждения лопаток и ее количественной оценки, были выполнены холодные продувки систем охлаждения комплектов лопаток сопловых аппаратов ТВД четырех двигателей с наработками от 4500 до 6300 часов в эксплуатации и пришедших в ремонт. Причем продувки выполнялись сразу после разборки двигателей (лопатки при этом не проходили анодную очистку и не промывались). Результаты продувок обрабатывались в виде гистограмм распределения приведенного расхода воздуха по передней и задней полостям охлаждения и сравнивались с результатами исходных продувок при их изготовлении. Результаты продувок передней и задней полостей лопаток приведены на рис. 2, 3 и табл. 1, где $G_{прив}$ – приведенный расход воздуха, $\text{см}^2 \cdot \text{К}^{0,5} \cdot \text{с}^{-1}$; $f(x)$ – плотность вероятности нормального распределения.

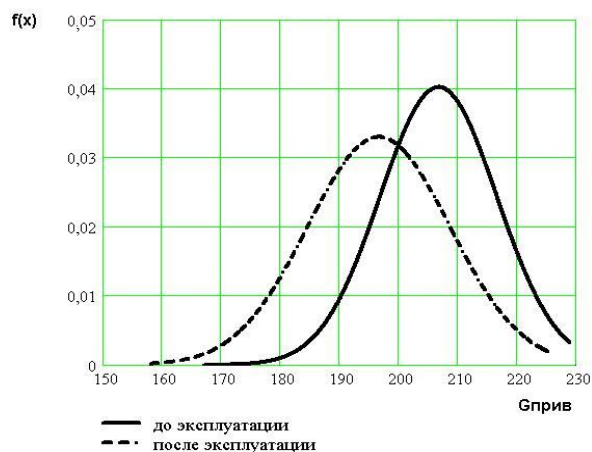


Рис. 2. Результаты продувок передней полости

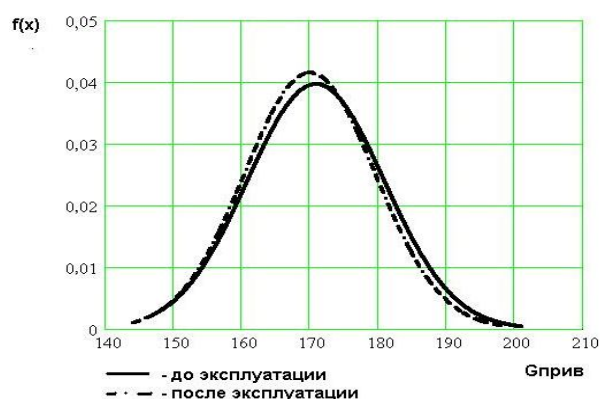


Рис. 3. Результаты продувок задней полости

Таблица 1

Результаты «холодных» продувок лопаток СА ТВД

№ к-т	Нара- ботка, ч	Пер. полость $G_{ср}$			Зад. полость $G_{ср}$		
		было	стало	ΔG	было	стало	ΔG
26	6225	209,6	201,2	8,1	167,1	169,9	2,8
25	4690	207,0	192,1	14,9	168,1	164,1	4,0
16	5082	206,5	192,3	14,2	181,0	178,8	2,2
18	4500	204,4	200,3	0,4	167,3	167,0	0,3

Анализ результатов «холодных» продувок указывает на то, что:

- имеют место случаи незначительного уменьшения расхода охлаждающего воздуха в процессе длительной эксплуатации;
- снижение приведенного расхода воздуха, при продувках после наработки, наблюдается в основном для передней полости;
- изменение приведенного расхода воздуха через заднюю полость незначительно (в пределах погреш-

ностей на продувку) но с тенденцией к его уменьшению;

– снижение средней величины приведенного расхода воздуха на лопатку у разных двигателей разное и составляет от 0 (практически без изменения) до 7,8% от среднего расхода.

Анализ результатов продувок по каждой отдельной лопатке (было/стало), показывает, что у отдельных лопаток одного комплекта расход воздуха и по передней полости, за время эксплуатации, практически не изменился, хотя воздействию подвергался весь комплект лопаток. Это указывает на то, что лопатки одного комплекта при работе подвержены различным воздействиям, способствующим снижению расхода охлаждающего воздуха. По результатам дефектации лопаток после наработки и их последующего ремонта, выявлено, что наибольшему воздействию «засорения» подвержены отверстия перфорации входных кромок, и связано это с наличием на входных кромках лопаток большого числа перфорационных отверстий малого диаметра, работающих на малом перепаде давлений с выдувом охлаждающего воздуха против потока газа, а также наличием в передней полости большого числа отверстий перфорации по сравнению с задней.

На основании результатов продувок были выполнены гидравлические расчеты с целью получения расходов охлаждающего воздуха по элементам профиля в системе полноразмерного двигателя (было/стало). При гидравлических расчетах вводилось допущение что воздействию «засорения» подвергались все лопатки комплекта одинаково.

По результатам гидравлического расчета максимальное уменьшение расхода охлаждающего воздуха на перо составляет 3...4% от исходного расхода, на входную кромку пера лопатки на 9...11% от исходного расхода через отверстия перфорации на входной кромке.

На основании гидравлических расчетов, методом конечных элементов (МКЭ), были выполнены тепловые (2D) расчеты температурного состояния пера лопатки. При тепловых расчетах, не учитывалось

дополнительное снижение эффективности пленочной защиты на поверхности с налипанием посторонних частиц из-за отсутствия таких экспериментальных данных.

Результатами расчетов показано, что при таком снижении расхода воздуха на лопатку, температура входной кромки (осредненная по всей высоте), увеличивается на величину порядка 6...11°C.

Температурное состояние профиля пера лопатки СА с исходной системой охлаждения и его изменение при уменьшенном расходе охлаждающего воздуха представлено на рис. 4.

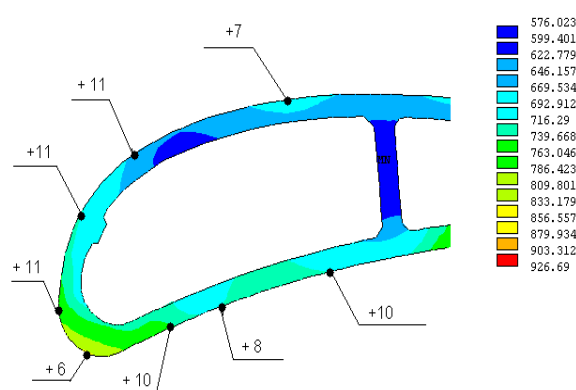


Рис. 4. Температурное состояние профиля пера лопатки СА с исходной системой охлаждения и его изменение при уменьшенном расходе охлаждающего воздуха

На основании тепловых расчетов были выполнены расчеты длительной статической прочности охлаждаемых лопаток СА. Выполненные расчеты позволяют оценить влияние уменьшения расхода воздуха на напряженно-деформированное состояние и ресурс лопатки в условиях эксплуатации двигателя.

Работоспособность лопаток зависит от большого числа факторов имеющих место в эксплуатации [1].

В данной работе учитывались только два фактора влияющие на работоспособность сопловой лопатки:

1. Изменение температурного состояния исследуемой лопатки вследствие снижения расхода воздуха.

2. Перераспределение термических напряжений вследствие изменения температурного состояния лопатки.

Следует при этом отметить, что входная кромка лопатки соплового аппарата является одним из тех мест, которое определяет её ресурс.

Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2
Результаты прочностных расчетов

Лопатка	T , °C	$\sigma_{экв}$, МПа	Относительный ресурс
Исходная	839	210	1
С уменьшенным расходом воздуха	844	230	0,4

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. «Засорение» перфорационных отверстий приводит к повышению температуры входной кромки лопатки.
2. Ухудшение охлаждения входной кромки приводит к увеличению перепада температур по сечению и, как результат, к увеличению уровня термических напряжений.
3. Следствием повышения уровня температур и напряженности лопатки является снижение ее ресурса.

Кроме того, повышение уровня температур и действующих напряжений приводит, как правило, к понижению циклической долговечности лопаток [2 – 4].

Одновременно с ростом температур на поверхности лопаток, возрастает интенсивность высокотемпературной газовой коррозии, которая приводит к существенному снижению сопротивления лопаток циклическим нагрузкам [2, 5].

Поэтому, снижение расхода охлаждающего воздуха вследствие «засорения» перфорационных отверстий, значительно снижает ресурс лопаток.

Ко всему вышеизложенному следует добавить, что представленные в настоящей работе расчеты носят оценочный характер и позволяют получить качественную оценку влияния снижения эффективности системы охлаждения, поскольку невозможно учесть всей той совокупности факторов, влияющих на теплонапряженное состояние лопаток СА и ин-

тенсивность воздействия каждого из них в течении ресурса.

Анализ результатов, выполненных выше оценок, показывает наличие такого воздействия и требует более тщательного подхода к вопросам проектирования, изготовления и эксплуатации лопаток СА высокотемпературных ГТД.

Заключение

Анализ полученных в настоящей работе результатов показывает, что в процессе длительной эксплуатации возможно изменение расхода воздуха в системе охлаждения лопаток СА, в сторону его уменьшения. Это приводит к снижению эффективности охлаждения и ухудшению их работоспособности. Выполненные экспериментальные работы и расчеты позволили получить качественную оценку этого влияния.

Литература

1. Трошено В.Т., Грязнов Б.А., Налимов Ю.С. Влияние технологических и эксплуатационных факторов на сопротивление усталости и живучесть рабочих лопаток ГТД // Вібрації в техніці та технологіях. – 2001. – № 5 (21). – С. 2-6.
2. Усталость жаропрочных сплавов и рабочих лопаток ГТД / Б.А. Грязнов, С.С. Городецкий, Ю.С. Налимов и др. – К.: Наук. думка, 1992. – 264 с.
3. Несущая способность рабочих лопаток ГТД при вибрационных нагружениях / В.Т. Трощенко, В.В. Матвеев, Б.А. Грязнов и др. – К.: Наук. думка, 1981. – 314 с.
4. Термопрочность деталей машин / И.А. Биргер, Б.Ф. Шорр, И.В. Демьянушко и др. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
5. Петухов А.Н. Сопротивление усталости деталей. – М.: Машиностроение, 1993. – 240 с.

Поступила в редакцию 30.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Д.Ф. Симбирский, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.