

УДК 621.438-762

Ю.А. ЗЕЛЁНЫЙ, Р.П. ПРИДОРОЖНЫЙ, О.А. ПЕТРОВА

ГП «Ивченко – Прогресс», Запорожье, Украина

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОКРУЖНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЛОПАТОК СОПЛОВОГО АППАРАТА

Рассмотрены результаты анализа по оценке влияния величины окружной температурной неравномерности камеры сгорания на работоспособность лопаток соплового аппарата турбины ГТД.

камера сгорания, окружная неравномерность температурного поля, сопловой аппарат, температурное поле лопатки СА, повреждения, ресурс

Введение

Создание авиационных газотурбинных двигателей (ГТД), отвечающих современным требованиям по параметрам цикла и ресурсу работы, особенно его горячей части, требует не только более совершенных методов проектирования, но и дальнейшего поиска резервов, направленных на повышение надежности. Одними из самых сложных и теплонапряженных узлов ГТД, являются охлаждаемые лопатки соплового аппарата первой ступени турбины, непосредственно воспринимающие ее радиальную и окружную температурную неравномерность [1]. На начальных стадиях развития охлаждаемых лопаток, при сравнительно небольших уровнях температуры газа, величина окружной неравномерности температурного поля незначительно отражалась на теплонапряженном состоянии лопаток.

По мере роста температуры газа влияние окружной неравномерности температуры газа на работоспособность лопаток возрастает.

Анализ состояния сопловых лопаток двигателей, приходящих после эксплуатации в ремонт, подтверждает факт влияния окружной неравномерности температурного поля газа на работоспособность лопаток соплового аппарата.

Целью настоящей работы является расчетная

оценка и анализ влияния окружной неравномерности температурного поля газа камеры сгорания на работоспособность лопаток СА.

1. Концепция исследований

Окружная неравномерность температурного поля газа на выходе из камеры сгорания ГТД, есть отношение максимального подогрева среды в камере сгорания к среднемассовому подогреву и оценивается в безразмерном виде по формуле

$$\Theta_{к\epsilon \max} = (T_{\epsilon \max}^* - T_{\kappa}^*) / (T_{\epsilon \text{срм}}^* - T_{\kappa}^*),$$

где T_{κ}^* – полная температура воздуха за компрессором, К; $T_{\epsilon \text{срм}}^*$ – среднемассовая температура газа на выходе из камеры сгорания, К; $T_{\epsilon \max}^*$ – максимальная температура газа на выходе из камеры сгорания в i -м поясе по высоте.

Для существующих конструкций камер сгорания авиационных двигателей эта величина колеблется в пределах 1,4 (камеры разработки 60-х годов) ... 1,25 (современный уровень).

Для конструкций камер сгорания стационарных ГТД, имеющих большие габаритные размеры камер, величина колеблется в пределах 1,2...1,25.

В процессе конструирования двигателя, тепловой расчет лопаток СА проводится исходя из худших условий, на максимальную температуру газа, с

учетом окружной неравномерности температурного поля камеры сгорания. В зависимости от величины окружной неравномерности будет изменяться и максимальная температура газа на входе в лопатку, а следовательно, и ее теплонапряженное состояние. Изменение максимальной температуры газа на входе в СА турбины в зависимости от изменения величины окружной температурной неравномерности $\Theta_{kc \max}$, для рассматриваемых в настоящей работе двигателей, представлено в табл. 1.

Таблица 1

Изменение максимальной температуры газа от $\Theta_{kc \max}$, К

двиг	$\Theta_{kc \max}$					
	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45
А±44°		1823	1867	1911		
Б±32°				1477	1509	1541
В±41°	1589	1630	1671			
Г±40°		1849	1889	1928		

Как видно из табл. 1, изменение $\Theta_{kc \max}$ на ±0,05 от номинального значения, приводит к изменению максимальной температуры газа на выходе из камеры сгорания рассматриваемых двигателей, на величину порядка ±32...44°С от ее максимального (верхнего) значения.

2. Содержание и результаты исследований

Для оценки влияния окружной температурной неравномерности поля газа на температурное состояние металла лопаток СА, были выполнены двухмерные (2D) тепловые расчеты методом конечных элементов (МКЭ) температурных полей профиля пера охлаждаемых одно и двухполостных дефлекторных лопаток четырех двигателей, с идентификацией по результатам их термометрирования. Идентификация проводилась путем корректировки расчетных граничных условий, добиваясь сходимости

расчетных и экспериментальных результатов. Это позволяет получить численные тепловые модели лопаток СА. Пересчет температурных полей профиля лопаток на другие температуры газа, в зависимости от величины окружной неравномерности температурного поля камеры сгорания ($\Theta_{kc \max}$), проводилось по методике ЦИАМ, при условии:

$$\Theta_l = (T_c^* - T_l) / (T_c^* - T_k^*) = \text{const.}$$

В геометрически подобных системах, при одинаковых безразмерных количествах воздуха и близких значениях критерия Био(Bi), безразмерные (относительные) температуры Θ_l , составленные из температур, характеризующих данный тепловой процесс: наибольшей температуре в процессе (в данном случае температуре газа), температуре пера лопатки (T_l) и наименьшей температуре (в данном случае температуре охлаждающего воздуха T_k^*), одинаковы, т.е. $\Theta_l = \text{const.}$

Пересчетом получены плоские (2D) температурные поля лопаток СА при различных окружных неравномерностях температурного поля газа ($\Theta_{kc \max}$) с отличием от номинального на ±0,05.

Температурные поля лопаток СА исследуемых двигателей при расчетной $\Theta_{kc \max}$, представлены на рис. 1 – 4, температурное состояние лопаток в характерных точках при различных $\Theta_{kc \max}$ представлены в табл. 2 – 5.

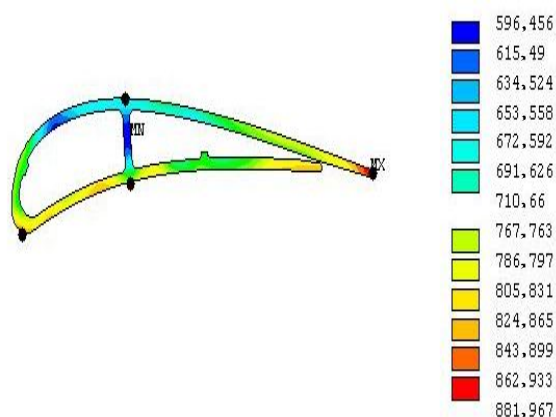


Рис. 1. Расчетно-экспериментальное температурное поле профиля лопатки СА ($\Theta_{kc \max}=1,3$ лопатка А)

Таблица 2

Температурное состояние лопатки А в характерных точках при различных $\Theta_{кc \max}$.

$\Theta_{кc \max}$	Вх.кр	Вых.кр	Кор	Сп-ка
1,30	867	882	771	678
1,25	851	866	759	670
1,35	881	898	783	687
$\pm 0,05$	$\approx \pm 15$	$\approx \pm 16$	$\approx \pm 12$	$\approx \pm 9$

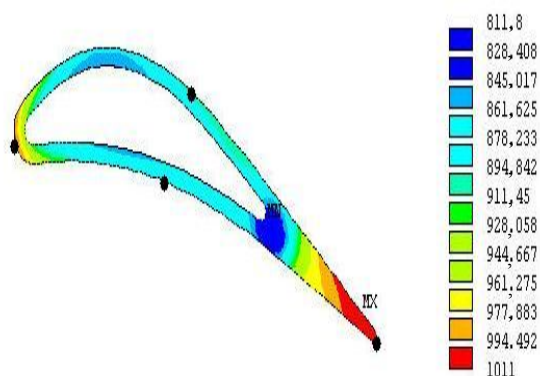


Рис. 2. Расчетно-экспериментальное температурное поле профиля лопатки СА ($\Theta_{кc \max}=1,4$ лопатка Б)

Таблица 3

Температурное состояние лопатки Б в характерных точках при различных $\Theta_{кc \max}$.

$\Theta_{кc \max}$	Вх.кр	Вых.кр	Кор	Сп-ка
1,40	994	1000	880	879
1,35	971	977	861	860
1,45	1018	1025	899	898
$\pm 0,05$	$\approx \pm 24$	$\approx \pm 25$	$\approx \pm 19$	$\approx \pm 19$

Таблица 4

Температурное состояние лопатки В в характерных точках при различных $\Theta_{кc \max}$.

$\Theta_{кc \max}$	Вх.кр	Вых.кр	Кор	Сп-ка
1,25	794	946	739	813
1,20	776	921	722	794
1,30	812	971	756	832
$\pm 0,05$	$\approx \pm 18$	$\approx \pm 25$	$\approx \pm 17$	$\approx \pm 19$

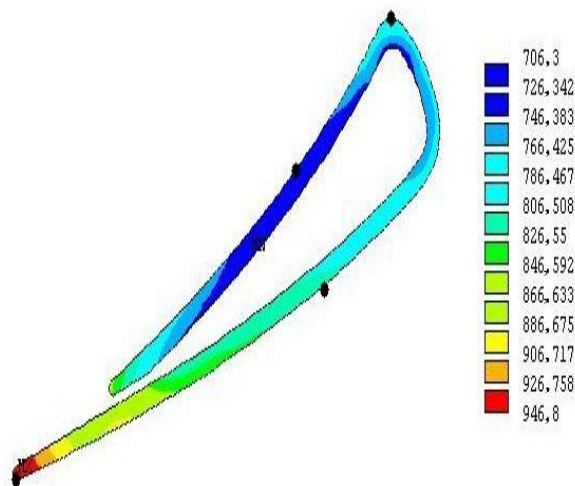


Рис.3. Расчетно-экспериментальное температурное поле профиля лопатки СА ($\Theta_{кc \max}=1,25$ лопатка В)

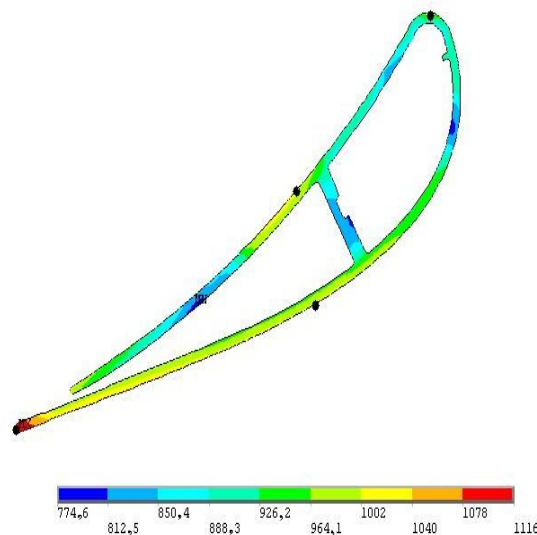


Рис. 4. Расчетно-экспериментальное температурное поле профиля лопатки СА ($\Theta_{кc \max}=1,3$ лопатка Г)

Таблица 5

Температурное состояние лопатки Г в характерных точках при различных $\Theta_{кc \max}$.

$\Theta_{кc \max}$	Вх.кр	Вых.кр	Кор	Сп-ка
1,30	977	1116	990	1011
1,25	963	1096	971	995
1,35	991	1136	1009	1027
$\pm 0,05$	$\approx \pm 14$	$\approx \pm 20$	$\approx \pm 19$	$\approx \pm 16$

Результаты выполненных расчетов показывают влияние величины окружной неравномерности температурного поля газа на величину максимальной температуры газа и температуры металла профиля лопатки.

Для оценки влияния окружной неравномерности поля газа на выходе из камеры сгорания на статическую прочность исследуемых лопаток сопловых аппаратов проведены расчеты на прочность в плоских сечениях этих лопаток с учетом неравномерности распределения температур по сечению. Отклонение окружной неравномерности от номинального значения, как показано выше, приводит как к изменению местной температуры лопатки, так и перераспределению температур по сечению. Поэтому статическая прочность лопаток будет зависеть не только от уровня температур, но и от изменения уровня напряжений в лопатке.

На рис. 5 показана относительная долговечность исследуемых лопаток сопловых аппаратов в зависимости от изменения окружной температурной неравномерности на $\pm 0,05$ от номинального значения.

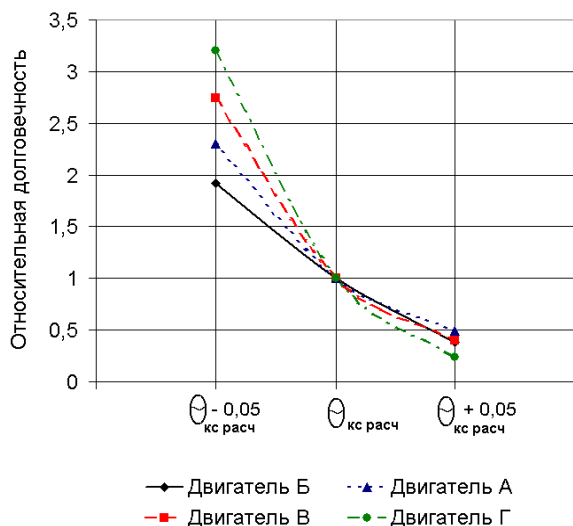


Рис. 5. Относительная долговечность лопаток соплового аппарата в зависимости от окружной температурной неравномерности газа

Из рис. 5 видно, что изменение окружной неравномерности температуры газа может привести

к значительному изменению статической прочности и долговечности лопаток. В тоже время следует отметить, что это влияние зависит от условий и особенностей работы двигателя, конструкции и материала лопаток. Это говорит о необходимости более тщательного подхода к вопросам, учитывающим все вышеперечисленные факторы.

Таким образом, окружная неравномерность температуры газа на выходе из камеры сгорания может существенным образом влиять на работоспособность лопаток СА, и поэтому еще на стадии проектирования становится актуальным вопрос о ее выборе и ее стабильности в процессе работы двигателя, для реализации всех потенциальных возможностей конструкции.

Заключение

Анализ полученных результатов позволил получить численную оценку влияния величины окружной неравномерности температурного поля газа на выходе из камеры сгорания на работоспособность лопаток СА. Показана необходимость более обоснованного подхода к назначению величины окружной неравномерности и ее стабильности в процессе эксплуатации двигателя. Такой подход позволит реализовать условия, направленные на улучшение работоспособности лопаток СА и горячей части двигателя в целом.

Литература

Зеленый Ю.А., Денисюк В.Н.. Модернизация системы охлаждения лопаток соплового аппарата первой ступени турбины двигателя АИ-25ТЛ // Авиационно-космическая техника и технология. — 2005. — № 10 (26). — С. 188-190.

Поступила в редакцию 5.06.2006

Рецензент: канд. техн. наук, доцент А.В. Олейник, Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», Харьков.