

УДК 621.438-762

**И.Ф. КРАВЧЕНКО, Ю.А. ЗЕЛЁНЫЙ, Р.П. ПРИДОРОЖНЫЙ, О.А. ПЕТРОВА***Государственное предприятие «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина***РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УТЕЧЕК ВОЗДУХА В СТЫКАХ СЕКТОРОВ  
НА ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛОПАТОК  
СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ**

Рассмотрены результаты расчетного анализа влияния паразитных утечек через зазор в стыке секторов лопаток соплового аппарата турбины на их теплонапряженное состояние и ресурс.

**лопатки соплового аппарата, каналы охлаждения, зазор в стыке секторов, паразитные утечки, расход воздуха, температурное состояние, эффективность охлаждения, уровень напряжений и температур, ресурс**

**Введение**

Создание газотурбинных двигателей (ГТД), отвечающих современным требованиям по экономичности и ресурсу работы, особенно его горячей части, требует не только более совершенных методов проектирования и расчетов, но и анализа влияния всех паразитных утечек охлаждающего воздуха, на температурное состояние деталей и узлов и на их работоспособность в течение ресурса.

Одним из сложных и теплонапряженных узлов современного ГТД, являются лопатки соплового аппарата турбины, непосредственно воспринимающие температуру газа её радиальную и окружную температурную неравномерность. Поэтому становится актуальным вопрос не только количественной оценки величины паразитных утечек и их влияния на основные параметры, но и разработка конструктивных мероприятий по их снижению.

**Целью настоящей работы** является расчетная оценка влияния величины паразитных утечек через зазор в стыке между секторами лопаток по наружной полке на теплонапряженное состояние профиля лопатки соплового аппарата, на примере лопаток СА турбины низкого давления (ТНД) авиационного ТРДД.

**1. Концепция исследований**

Для охлаждения лопаток соплового аппарата ТНД используется воздух, отбираемый из промежуточной ступени компрессора специальными трубопроводами и подающийся в полость над наружной полкой соплового аппарата и наружным корпусом турбины. Из этой полости воздух поступает в систему охлаждения профиля лопаток и некоторая, незначительная его часть, в газовый тракт в виде утечек по стыкам секторов на наружной полке.

Схема охлаждения лопаток соплового аппарата ТНД представлена на рис. 1.

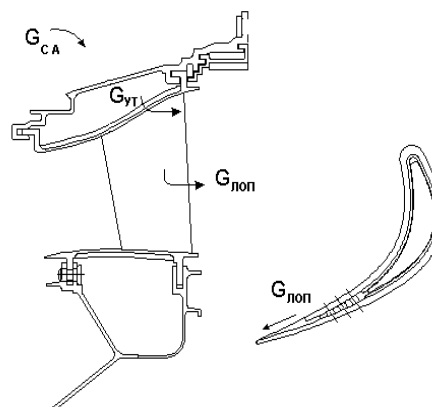


Рис. 1. Схема охлаждения лопатки СА ТНД

По системе охлаждения сопловая лопатка ТНД-дефлекторного типа, с выдувом воздуха из входной кромки дефлектора на внутреннюю поверхность

входной кромки лопатки, течением вдоль профиля пера по корыту и спинке и выпуском воздуха в газовый тракт через щели на корыте у выходной кромки.

Изготовлен сопловой аппарат ТНД в виде отдельных секторов, которые имеют сопрягаемые стыки с уплотнительными пластинами, вставляемыми в специально выполненные пазы. В зависимости от качества изготовления уплотнения, величины монтажного зазора в стыке и качества сборки секторов соплового аппарата может изменяться и величина утечек через стык [1]. Эти утечки носят паразитный характер и отрицательно влияют на температурное состояние профиля пера и КПД узла.

## 2. Содержание и результаты исследований

Для оценки влияния вышеуказанного фактора на температурное состояние профиля пера лопатки, были выполнены гидравлические и тепловые (2D) расчеты температурного состояния:

- профиля пера исходной лопатки;
- профиля пера исходной лопатки, но с увеличенными утечками по стыкам секторов на наружной полке.

Гидравлический расчет выполнялся по методике и программе разработанной в Харьковском Государственном политехническом университете (ХПИ). В основе методики лежит представление системы охлаждения в виде графа. А математическая модель описывается соотношениями, вытекающими из 1 и 2-го законов Киргофа и замыкающим соотношением, характеризующим взаимосвязь между напором, гидравлическим сопротивлением и расходом в ветвях графа.

Результаты гидравлических расчетов сведены в табл. 1.

Из результатов, приведенных в таблице 1, видно влияние утечек по стыкам полок, на расход воздуха через систему охлаждения пера лопаток. Увеличение утечек по зазорам в стыке между полками при-

водит к снижению расхода охлаждающего воздуха на перо лопатки и влияет на температурное состояние профиля пера.

Таблица 1

Результаты гидравлических расчетов

Варианты	Исх. сред. разм	Исх. увел. утечки
$\Delta G_{отб}, \%$	2,043	2,17
$\Delta G_{ут}, \%$	0,393	0,665
$\Delta G_{перо}, \%$	1,3	1,16
Зазор в стыке, мм	0,22	0,40

Для оценки температурного состояния лопатки были выполнены двумерные (2D) тепловые расчеты методом конечных элементов (МКЭ) при допущении постоянства граничных условий со стороны газа. Тепловые расчеты выполнялись для исходного варианта и варианта с увеличенными утечками по стыкам секторов при условии, что утечки увеличены по всем стыкам комплекта.

Температурное состояние профиля пера исходной лопатки и его изменение в отдельных точках при повышенных паразитных утечках по стыкам полок, представлено на рис. 2.

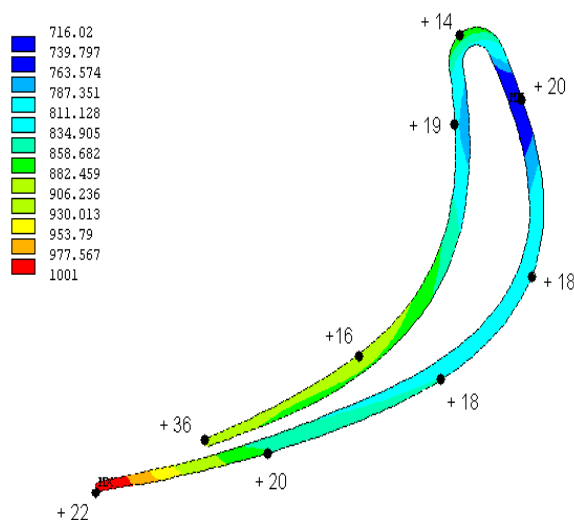


Рис. 2. Тепловое состояние пера исходной лопатки и влияние на него паразитных утечек по стыкам секторов

Результаты расчетов температурного состояния исходной лопатки и его изменение при увеличенных утечках по стыкам секторов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов температурного состояния

Температура профиля, °С	Исх. перо	Исх. перо и увелич. утечки
Вх. кромка	876°	↑14°
Вых. кром.	1001°	↑22°
Корыто	863...895°	↑16...19°
Спинка	819...843°	↑18...20°

При этом средняя расчётная температура сечения профиля пера лопатки из-за уменьшения расхода охлаждающего воздуха за счет повышенных утечек по стыку увеличилась  $\approx$  на 19 °С.

Анализируя результаты тепловых расчетов, приведенных на рис. 2 и в табл. 2, можно сделать следующие выводы:

- увеличение утечек по стыкам полок секторов лопаток СА с 0,39% до 0,67% приводит к снижению расхода охлаждающего воздуха на перо лопатки с 1,3% до 1,16%;

- изменение гидравлики системы охлаждения приводит к изменению температурного состояния профиля пера лопатки (увеличение температуры на 14...36 °С), причем изменение температурного состояния различных участков профиля пера происходит по-разному.

Связано это не только с изменением (уменьшением) суммарного расхода воздуха, но и с изменением расхода воздуха по различным участкам профиля пера лопатки, изменением его скорости, коэффициентов теплоотдачи и эффективности плёночного охлаждения на выходной кромке со стороны корыта.

Как было отмечено выше, снижение эффективности охлаждения лопатки приводит к повышению и перераспределению температур по сечению профиля. При этом температура выходной кромки уве-

личивается на 22 °С, а температура на корыте на 16 °С (табл. 2). В результате этого происходит увеличение градиента температур между корытом и выходной кромкой и как следствие рост напряжений ( $\sigma_y$ ) на выходной кромке лопатки, величина которых возрастает на 15% (табл. 3). С повышением температуры ускоряются и процессы ползучести материала лопатки, происходит релаксация напряжений [3] и разница в уровне напряжений ( $\sigma_y$ ) на выходной кромке в исходной лопатке и лопатке с увеличенными утечками сокращается до 6% (табл. 3). С другой стороны увеличение температуры выходной кромки с  $T = 1001$  °С до  $T = 1023$  °С снижает предел длительной статической прочности на базе  $t = 100$  ч в 1,22 раза, на базе  $t = 500$  ч в 1,24 раза, на базе  $t = 1000$  ч в 1,26 раза (рис. 3).

Таблица 3

Рост напряжений на выходной кромке лопатки

Лопатка	$T$ , °С	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_z$ , МПа
исходная	1001	-14,6	-6,45
с увелич. утечками	1023	-16,8	-6,81

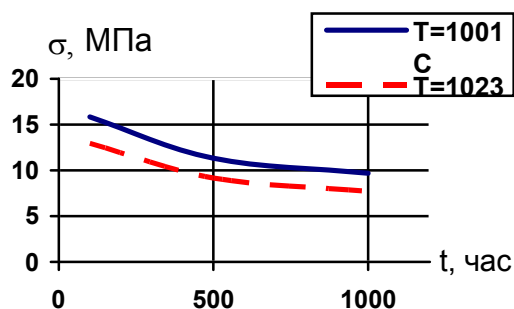


Рис. 3. Кривые длительной статической прочности материала лопаток

Следовательно, уменьшение ресурса лопатки главным образом связано не с изменением ее напряженности в результате перераспределения температур, а с повышением уровня рабочих температур [4].

Таким образом, увеличение утечек охлаждающего воздуха по стыкам полок секторов лопаток СА,

приводит к существенному уменьшению ресурса лопаток по длительной статической прочности.

Следует отметить, что с ростом рабочих температур в процессе эксплуатации ускоряются процессы высокотемпературной газовой коррозии, что может привести к существенному снижению их надежности и ресурса [5].

Еще раз следует оговориться, что расчеты выполнялись при неизменных граничных условиях со стороны газа (худшие условия с максимальной окружающей неравномерностью температурного поля) и при условии, что утечки возросли по всем стыкам секторов (худший случай).

Выполненные расчетные оценки говорят о том, что для эффективной работы лопаток в течение ресурса необходимо экономно расходовать и рационально распределять охлаждающий воздух в системе подвода и по участкам профиля, используя все возможности дефлекторной лопатки, современные методы расчета и результаты термометрирования при реальных испытаниях двигателя. Необходимо разрабатывать, проверять на специальных установках и внедрять в конструкцию мероприятия, снижающие паразитные утечки и повышающие эффективность работы уплотнительных элементов [1].

### **Заключение**

Выполненные в настоящей работе расчеты позволили получить качественную и количественную оценку влияния паразитных утечек воздуха через зазор в стыке между секторами лопаток соплового аппарата на их теплонпряженное состояние.

Анализ полученных результатов показал, что наличие паразитных утечек существенным образом сказывается не только на температурном состоянии

профиля пера сопловой лопатки, но и на ее надежности и ресурсе.

Поэтому в процессе проектирования и доводки узлов двигателя, необходимо экономно и рационально распределять расходы воздуха в системе охлаждения и принимать все меры по снижению паразитных утечек. Это сложная комплексная проблема, успешное разрешение которой во многом зависит от разработки и внедрения конструктивных мероприятий, снижающих паразитные утечки на двигателе.

### **Литература**

1. Зеленый Ю.А., Фокин Ю.А., Петрова О.А. Экспериментальная оценка эффективности статорных уплотнений // Вестник двигателестроения: Научн. техн. журн. – 2005. – № 2. – С. 125-128.
1. Метод и программа расчета систем охлаждения газовых турбин. – Х.: ХГПУ, 1983. – 120 с.
2. Сизова Р.Н., Дикман Г.И., Селифонова Л.П. Влияние ползучести на напряженное состояние охлаждаемых лопаток // Тепловые напряжения в элементах конструкций. – К.: Наук. думка, 1970. – С. 173-183.
3. Прочность материалов при высоких температурах / Г.С. Писаренко, В.Н. Руденко, Г.Н. Третьяченко, В.Т. Трощенко. – К.: Наук. думка, 1966. – 796 с.
4. Трощенко 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.

*Поступила в редакцию 7.05.2007*

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