

Совершенствование систем охлаждения сопловых лопаток высокотемпературных турбин

С. И. Сендюрев, Н. Ю. Самохвалов, С. В. Бажин – АО «ОДК–Авиадвигатель»

In brief

Advancement of high-temperature turbine nozzle guide vanes cooling systems.

Nozzle guide vanes of up-to-date gas turbine engines operate in extremely severe conditions. Turbine inlet gas temperature is 2100 °C, pressure differential between cooling air and fuel gas is 15 kgs/cm², gas stream speed is over 400 m/s. Concurrently, the requirements to vanes service life and turbine inlet gas temperature are continuously increasing.

It is important to note that to arrange necessary cooling of nozzle guide vanes and to enable their reliable and long-term operation is very complicated task. Aviadvigatel JSC uses univariate, two-dimensional, three-dimensional and quasi-three-dimensional methods for thermal condition measurement of gas turbine components. All these models are used for preliminary design calculations of turbine components. Digital three-dimensional CFD-methods are also used for these purposes.

Сопловые лопатки современных газотурбинных двигателей работают в крайне тяжелых условиях: температура газа перед турбиной более 2100 °С, перепад давлений между охлаждающим воздухом и газом до 15 кгс/см², скорости газового потока свыше 400 м/с. При этом требования к ресурсу лопаток и температуре газа перед турбиной постоянно повышаются. Организовать охлаждение сопловых лопаток и обеспечить их работоспособность в таких условиях – довольно сложная задача.

В процессе работы возможны повреждения сопловых лопаток практически на всех участках трактовых поверхностей. Для каждого участка профиля лопатки имеются оптимальные соотношения конвективного и пленочного охлаждения. Это требует индивидуального подхода к охлаждению.

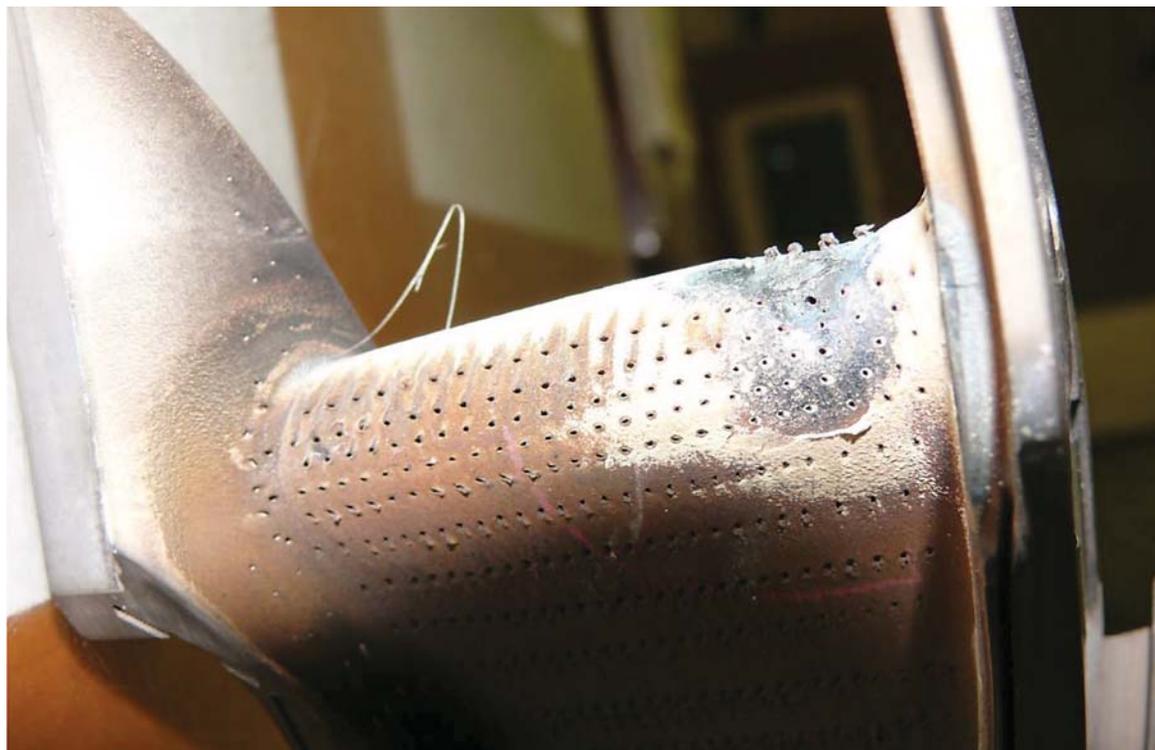
В АО «ОДК–Авиадвигатель» применяют одномерные, двухмерные, квазитрехмерные и трехмерные методы определения теплового

состояния деталей турбины. Все эти модели используются для примерных проектировочных расчетов деталей турбин. При этом одномерные и двухмерные методики постоянно увязываются с самыми современными трехмерными методами расчета и результатами испытаний и эксплуатации, на основе которых происходит усовершенствование данных методик.

С 2014 года, после длительной идентификации и верификации на основе результатов испытаний и эксплуатации двигателей и наземных установок, для детального определения температурного состояния деталей турбин и точной их доводки используются численные трехмерные CFD-методы.

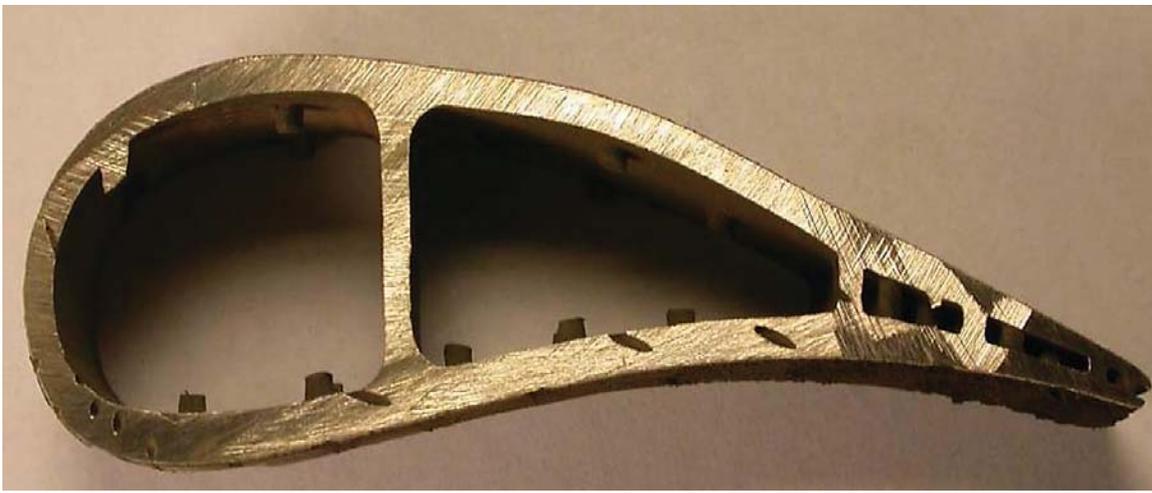
Для двигателя ПС-90А2 была спроектирована сопловая лопатка первой ступени ТВД на основе квазитрехмерных методик.

В процессе длительных горячих испытаний (максимальная температура газа на выходе из камеры сгорания составила 2317 К) сопловые лопатки первой ступени двигателя ПС-90А2



➔ Фото 1.

Прогар входной кромки сопловой лопатки



С Фото 2.
Деформация спинки
сопловой лопатки

получили различные повреждения в виде прогаров на входной кромке, мелких обгораний по полке и необратимой деформации спинки (фото 1, 2).

На базе этих же методик была спроектирована модифицированная сопловая лопатка первой ступени (рис. 1). Основными ее отличиями являются:

- трехполостная схема охлаждения, более эффективно распределяющая охлаждающий воздух и обладающая большей жесткостью для предотвращения деформаций;
- сужающаяся передняя полость, обеспечивающая равномерное распределение охлаждающего воздуха по входной кромке и увеличение перепада между воздухом и газом.

Для проверки получившейся конструкции новая лопатка была установлена на наземную энергетическую газотурбинную установку мощностью 25 МВт. В процессе работы выяснилось, что полученные ранее повреждения входной кромки и спинки лопатки удалось устранить, однако были выявлены новые повреждения, которые не удалось спрогнозировать, используя устаревающие методики расчета, – прогары полков, спинки в переходе к входной кромке, повреждения термозащитного покрытия (ТЗП) на корыте и деформации выходных кромок с последующим обгоранием (фото 3).

В связи с этим была проведена работа по детальному определению температурного состояния и течения газа и воздуха в сопловой лопатке с применением уже отработанной и идентифицированной трехмерной методики.

Для расчетов использовался трехмерный CFD-пакет Ansys CFX. В его основе лежит решение систем уравнений Навье-Стокса методом конечных объемов с неявным алгоритмом интегрирования, который позволяет проводить совместные теплогазодинамические расчеты. Была подготовлена подробная конечно-элементная сетка, описывающая всю систему охлаждения лопатки со всеми отверстиями

перфорации в пере и дефлекторе и систему подвода охлаждающего воздуха. Размерность сетки – 125 миллионов элементов. Модель турбулентности – SST-GTM.

Расчет проводился с учетом ТЗП и максимальной окружной неравномерности температуры газа на входе в турбину. Граничными условиями по газу являются: эпюра полного давления на выходе из КС и эпюра полной температуры газа с учетом окружной неравномерности, эпюра статического давления на выходе из турбины, температура воздуха и давление в подводе системы охлаждения с учетом потерь в камере сгорания.

Рис. 1. Сравнение конструкций лопаток – исходной (слева) и модифицированной (справа) двигателя ПС-90А2; 1, 2, 3 – внутренние полости лопатки

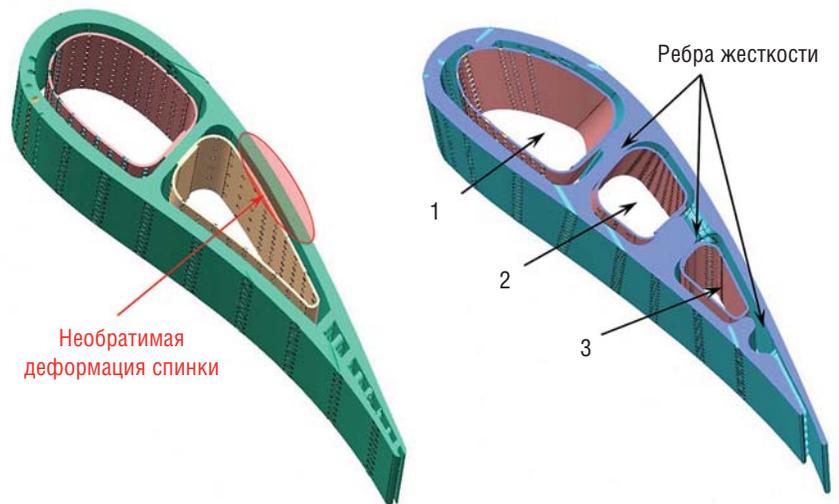


Фото 3. Повреждения модифицированной сопловой лопатки

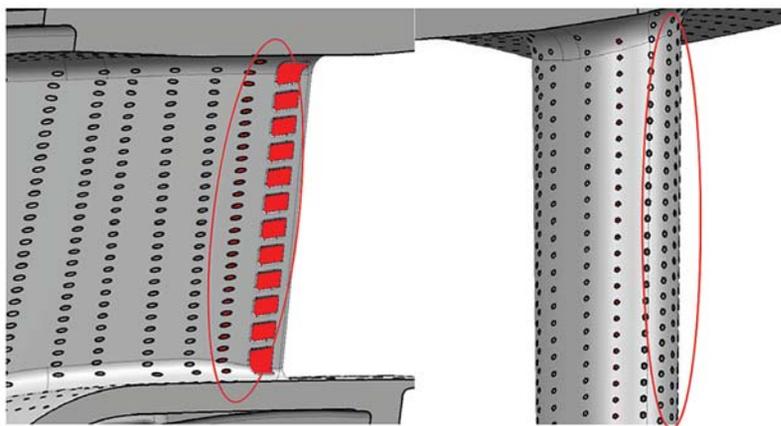


Рис. 2. Модификация пера сопловой лопатки.

Добавлен ряд перфорации и перемычки на «флажке» выходной кромки (слева) и ряд перфорации на входной кромке со стороны спинки (справа)

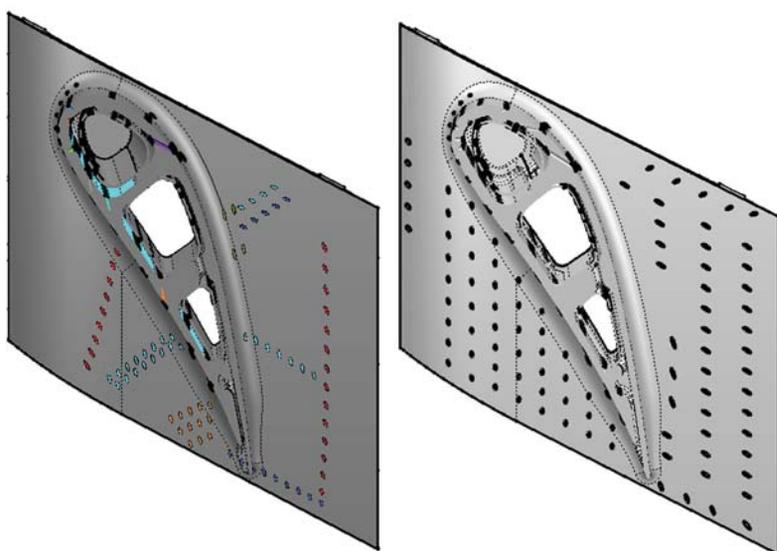


Рис. 3. Сравнение перфорации внутренней полки серийной лопатки (слева) и модифицированной (справа)

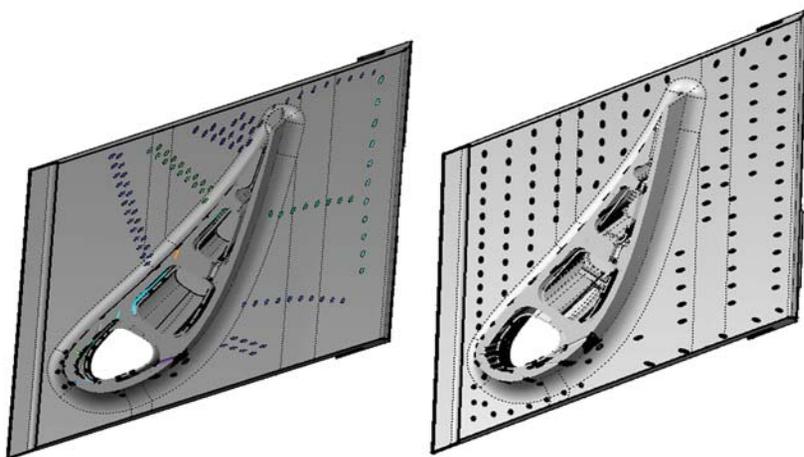


Рис. 4. Сравнение перфорации наружной полки серийной (слева) и модифицированной (справа) лопатки

Табл. Сравнение результатов теплового расчета сопловых лопаток серийной и модифицированной конструкций

	Исходная	Серийная	Модифицированная
$G_{\text{охл}}$, % от $G_{\text{квд}}$	12,7	10,05	10,42
$\Theta_{\text{ср}}$	0,73	0,7885	0,81

Для исключения повреждений в конструкцию сопловых лопаток были внесены следующие изменения:

- добавлен ряд перфорации на входную кромку со стороны спинки для исключения прогаров на спинке;
- для исключения обгорания ТЗП на корыте между последним рядом перфорации и выходной кромкой добавлен ряд перфорации на корыто ближе к выходной кромке;
- кардинально пересмотрена схема пленочного охлаждения полок, исключающая температурные повреждения полок;
- добавлены ребра жесткости на «флажок» выходной кромки, чтобы исключить отгибы выходных кромок.

На рис. 2, 3, 4 показаны изменения в конструкции сопловых лопаток. В таблице дано сравнение общих характеристик сопловых лопаток.

Сравнение результатов теплового расчета сопловых лопаток серийной и модифицированной конструкций показывает, что в модифицированном варианте значительно снижается температура (от 30 до 145 °С) в местах повреждений на пера лопатки. Средняя температура пера лопатки снижается на 10...15 °С. Значительно уменьшается температура внутренней и наружной полок – распределение температуры по ним становится более равномерным.

Кроме того, удалось заметно сократить расход охлаждающего воздуха по сравнению с исходной конструкцией, средняя эффективность охлаждения выросла на 0,08. Полученная система охлаждения одинаково эффективна как для наземных энергетических установок, так и для авиационных двигателей. Она учитывает практически все возможные изменения в эюре температуры газа на выходе из камеры сгорания. Сопловые лопатки модифицированной конструкции уже проработали в составе ГТУ мощностью 25 МВт более 3000 часов без повреждений. **ТД**