

УДК 621.45.01

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СОПЛОВОЙ ЛОПАТКИ ТВД ПРИ НАЛИЧИИ ВХОДНОЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА

© Давыдов А.А., Ковалева Н.Н.

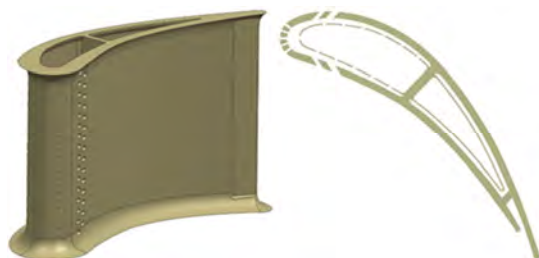
*Рыбинский государственный авиационный технический университет  
имени П.А. Соловьева, г. Рыбинск, Российская Федерация*

e-mail: andryusha\_davydov\_01@mail.ru

Обеспечение работоспособности лопаток высоконагруженных турбин в условиях постоянного роста температуры газа на входе в сопловой аппарат основано в первую очередь на применении эффективных систем охлаждения. Наиболее востребованным является конвективно-плёночное охлаждение входной кромки и начальных участков корытца и спинки [1].

Проектирование лопаток с конвективно-плёночным охлаждением преимущественно базируется на результатах исследования распространения охладителя в модельных условиях на пластине или в решетках с равномерными параметрами потока на входе [2–4]. Однако в реальных условиях работы двигателя поток газа на входе в сопловой аппарат имеет существенную радиальную неравномерность параметров (полного и статического давления, скорости, температуры торможения и т. д.). Вектор внимания при проектировании турбин направлен на рассмотрение влияния неравномерности поля температур, а неравномерность по полному давлению обычно не рассматривается или анализируется лишь с точки зрения потерь. Однако неравномерность поля полного давления, которое определяется конструкцией камеры сгорания, меняет условия обтекания входной кромки соплового аппарата, что влияет на формирование конвективно-плёночного охлаждения.

Для выявления особенностей формирования охлаждения начальных участков профиля было проведено численное исследование сопловой лопатки с параметрами, характерными для первой ступени турбины высокого давления газотурбинного двигателя при различных условиях на входе в межлопаточный канал. Исследуемая лопатка имеет конвективно-плёночное охлаждение начальных участков спинки и корытца. Лопатка соплового аппарата моделировалась с учетом внутренних полостей (см. рисунок).



*Рисунок – Геометрическая модель сопловой лопатки с шахматным расположением перфораций*

В качестве переменных параметров на входе рассматривались три варианта эпюр полного давления. Результаты расчета сравнивались с условиями равномерного поля параметров. Задача решалась в сопряженной постановке в условиях периодичности. Для численных расчетов была построена неструктурированная тетрагональная расчетная сетка. Общее количество узлов сеточной модели: 27354274 для газо-воздушного домена и 11610407 для твердотельного домена

лопатки. В пограничном слое для отверстий смоделировано 6 призматических слоев с высотой первой ячейки 0,002 мм, коэффициентом роста 1,1. Величина  $y^+$  составила

порядка 4,9. Стгущения внутри и в окрестности перфораций подобраны с учетом особенностей протекания изучаемых процессов.

По результатам исследования сделаны следующие выводы:

1. Характер распределения эффективности пленочного охлаждения за отверстиями начального участка корытца сопловой лопатки зависит от входной неравномерности потока. При этом неравномерность поля давлений в большей степени оказывает влияние на формирование пелены охладителя и саму величину пленочной эффективности охлаждения, нежели неравномерность поля температуры.

2. В зависимости от характера эпюры давлений на входе в сопловой аппарат происходит смещение оси струй охладителя из отверстий в приторцевых областях на начальном участке корытца в направлении к торцевым поверхностям. Данный эффект наблюдается даже при равномерных параметрах на входе в сопловой аппарат (в области отверстий, примыкающих к торцевым поверхностям), что является результатом влияния ветви канального вихря, которая формируется на входной кромке при торможении входного пограничного слоя. Размер областей смещения будет существенно увеличен при переходе к аэродинамически коротким лопаткам.

3. Происходит перераспределение эффективности пленочного охлаждения за перфорациями, примыкающими к торцевым поверхностям. В этих областях нарушается интерференция пленочного охлаждения при шахматном расположении рядов отверстий. Возникают области перегрева.

4. Необходимо изменение взаимного расположения рядов отверстий в областях градиента полного давления на входе с целью снижения негативного эффекта от входной неравномерности параметров потока. Для этого в работе предлагаются конструктивные мероприятия по организации эффективного пленочного охлаждения начальных участков корытца и спинки. Рассматривается вариант шахматного расположения перфораций в областях, примыкающих к торцевым поверхностям. Выполнен анализ влияния такого расположения отверстий на температурное состояние лопатки.

5. Выявлено, что при коридорном расположении перфораций в области торцевых поверхностей не происходит существенного смещения струек охлаждающего воздуха и, соответственно, образования явных областей перегрева, как при шахматном. При прочих равных условиях такой способ расположения отверстий позволяет снизить негативное влияние неравномерности поля давлений на входе в сопловой аппарат на эффективность пленочного охлаждения.

6. Таким образом, результаты анализа показывают значительное влияние характера неравномерности поля давлений на входе в сопловой аппарат на эффективность конвективно-пленочного охлаждения лопатки и доказывают актуальность дальнейшего исследования в данном направлении с целью поиска методов обеспечения должного теплового состояния.

### Библиографический список

1. Соловьев М.С. Обзор конструкторских мероприятий по повышению эффективности пленочного охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин перспективных авиационных ГТД // Вестник РГАТА. 2021. № 4. С. 10–17.
2. Марчуков Е.Ю., Стародумов А.В., Ильинков А.В. и др. Эффективность пленочного охлаждения плоской поверхности в ускоряющемся потоке при вдуве воздуха через веерные отверстия // Теплоэнергетика. 2022. № 4, С. 1–11.
3. Rutledge J.L., King P.I., Rivir R.B. Influence of film cooling unsteadiness on turbine blade leading edge heat flux // J. Eng. Gas Turbines Power. 2012. V. 134, P. 071901–(1–10).
4. Kartuzova O., Danila D., Ibrahim M. Computational simulation of cylindrical film hole with jet pulsation on flat plates // J. Propul. Power. 2009. № 25 (6), P. 1249–1258.