

ВАЛИДАЦИЯ 3D РАСЧЕТОВ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ ПО ПРОФИЛЮ СОПЛОВЫХ ЛОПАТОК С ПЛЕНОЧНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Горелов Ю.Г.

Производственный комплекс "Салют" АО «ОДК», г. Москва

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, параметр вдува, модели турбулентности.

Наибольшие тепловые нагрузки приходятся на сопловые лопатки турбины высокого давления (ТВД), на поверхности профиля которых возникают максимальные температурные градиенты. Для надёжного 3D расчёта эффективности плёночного охлаждения ($\eta_{ад.}$) сопловых лопаток необходимо применение модели турбулентности S-A, при этом отклонение расчетных данных $\eta_{ад.}$ от экспериментальных [1, 2] составило 10% - 15%. Хуже обстоят дела при расчете коэффициентов теплоотдачи как при конвективном, так и при пленочном охлаждении.

Так, в работе [3] при расчете в STAR-CD получено максимальное расхождение между расчетным и замеренным коэффициентами теплоотдачи сопловой лопатки с конвективным охлаждением в 4,25 раза на спинке, и очень высокое в лобовой точке входной кромки для модели $k-\varepsilon$. Удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных коэффициентов теплоотдачи получено в работе Иллинойского в работе [4] для сопловой лопатки без пленочного охлаждения с использованием LES на корытце сопловой лопатки с большой входной кромкой. В обзоре [5] за 2022 год по исследованию пленочного охлаждения с применением LES отмечено, что результаты исследований сфокусированы в основном на эффективности пленочного охлаждения, ощущается существенная нехватка исследований коэффициентов теплоотдачи.

Целью представленного исследования является выявление влияния модели турбулентности SST и S-A, LES модели – на характеристику охлаждения с помощью отверстий пленочного охлаждения расположенных на входной кромке, спинке и корытце сопловой лопатки двигателя СЗХ.

Результаты исследования коэффициентов теплоотдачи при пленочном охлаждении.

В этом разделе рассматривается сравнительное 3D расчетное и экспериментальное исследование [6] влияния относительной скорости пленки $VR = U_{охл.}/U_{\infty}$, геометрии и уровня входной температуры на интенсификацию теплоотдачи при пленочном охлаждении для сопловой лопатки. Для поверхностей спинки и корытца представлены результаты с 2 рядами отверстий. Данные были получены при $-DR = \rho_{охл.}/\rho_{\infty} = 0,94$. Домен был реализован при $M_{вых.} \approx 0,27$. Дополнительная детализация сопловой лопатки представлена в [6]. Величина u^+ составила $\sim 1,6$, в пограничном слое было сгенерировано 20 призматических слоев.

3D расчеты базовой сопловой лопатки. По результатам 3D расчетов базовой сопловой лопатки без отверстий пленочного охлаждения (модель S-A) установлено, что расчетные коэффициенты теплоотдачи отличаются от экспериментальных на корытце на вполне приемлемую величину – на 20 - 35%, однако на спинке это отличие составило – в 1,67 - 2,24 раза. Далее по спинке максимальное отличие составляет $\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} \approx 20\%$. При использовании модели турбулентности SST - $\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} \approx 1,34 - 2,1$, большие отличия получены при использовании $k-\omega$. При использовании LES прогнозы теплоотдачи на корытце удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными ($\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} \approx 5 - 10\%$).

При выдуве через два ряда отверстий пленочного охлаждения на корытце и (S-A) установлено, что расчетные коэффициенты теплоотдачи превышают экспериментальные на корытце - на 1 - 29%, на входной кромке – на 25%, на спинке на максимальную величину - 83%, в области входной кромки у спинки – расчетные значения практически совпадают с экспериментальными. При использовании модели турбулентности SST $\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} = 5 - 17\%$, на входной кромке - $\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} = 1,7$ раза, на спинке - $\alpha_{расч.}/\alpha_{эксп.} = 1,2 - 2,1$ раза.

При выдуве через два ряда отверстий пленочного охлаждения на спинке и использовании модели турбулентности S-A установлено, что расчетные коэффициенты теплоотдачи ниже экспериментальных на 1,5 – 2%, т.е. практически совпадают по профилю, однако при использовании модели турбулентности SST в области ближе к выходной кромки получены более существенные отличия - $\alpha_{расч}/\alpha_{эксп} = 72 - 76\%$.

При выдуве через пять рядов отверстий на входной кромке и использовании модели турбулентности S-A и $Pr_{eqv} = 0,35$ установлено, что сразу за входной кромкой на спинке расчетные коэффициенты теплоотдачи выше экспериментальных в 1,34 - 1,73 раза, на спинке расчетные данные согласуются с экспериментальными при незначительном отличии на выходной кромке, где $\alpha_{эксп}/\alpha_{расч} = 15\%$. За входной кромкой на корытце - $\alpha_{расч}/\alpha_{эксп} = 1,1 - 2,6$. При использовании модели SST установлено, что за входной кромкой на спинке - $\alpha_{расч}/\alpha_{эксп} = 1,48$ раза.

В работе получены расхождения с экспериментальными коэффициентами теплоотдачи, особенно существенные на спинке лопатки и сделан вывод, что, хотя методы RANS и LES имеют свои преимущества, они не могут точно предсказать теплоотдачу во всем пограничном слое для лопатки с пленочным охлаждением. В недавнем времени для пленочного охлаждения были реализованы более сложные формы отверстий с помощью аддитивного производства, LES может быть использовано для обнаружения и оптимизации новых форм.

Список литературы

1. Ю.Г. Горелов, К.В. Тюльков. Верификация 3D расчетов пленочного охлаждения сопловых лопаток в ANSYS CFX // Климовские чтения-2016: перспективные направления развития авиадвигателестроения: сборник докладов международной научно-технической конференции. – СПб.: Скифия-принт, 2016. – С. 105–113.
2. Ю.Г. Горелов, К.В. Тюльков, В.В. Ананьев, П.М. Бывальцев. Верификация расчетов пленочного охлаждения входных кромок сопловых лопаток в ANSYS CFX // Изв. вузов. Авиационная техника. – 2019. – № 1. – С. 67–72.
3. Bruno Facchini, Andrea Magi, Alberto Scotti Del Greco. Conjugate Heat Transfer Simulation of a Radially Cooled Gas Turbine Vane // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 14-17, 2004, Vienna, Austria. Heat Transfer: General, ASME GT2004-54213. pp. 1 - 11.
4. Yousef Kanani, Sumanta Acharya, Forrest Ames. LES Study of the Laminar Heat Transfer Augmentation on the Pressure Side of a Turbine Vane Under Freestream Turbulence // Proc. of the ASME Turbo Expo, June 11-15, 2018, Oslo, Norway. Heat Transfer: General, ASME GT2018-77135. pp. 1 - 14.
5. Joon Ahn. Large Eddy Simulation of Film Cooling: A Review. MDPI. Energies **2022**, 15, 8876. <https://doi.org/10.3390/en15238876>.
6. Ames, F.E., 1998, "Aspects of Vane Film Cooling With High Turbulence: Part I – Heat Transfer". ASME Journal of Turbomachinery, Vol. 120, pp. 768–776.

Сведения об авторах

Горелов Юрий Генрихович, к.т.н., зам. начальника отдела, ПК "Салют" АО «ОДК», ОКБ, Тепломассообмен и гидродинамика в охлаждаемых лопатках газовых турбин, E-mail: yu.gorelov@uecrus.com, +7(905)5744921.

VALIDATION OF 3D CALCULATIONS HEAT TRANSFER COEFFICIENTS ALONG THE PROFILE VANE WITH FILM COOLING

Yu. G. Gorelov

Keywords: heat transfer coefficient, blowing ratio, turbulence models.

Carried out 3D calculations with turbulence models SST and S-A, LES and perforation on the leading edge, suction and pressure side of vane showed disagreement with experimental heat transfer coefficients, particularly significant on the suction side, hereby, though these methods have own advantages, it can't exactly predict heat transfer for all vane.