

## ВЛИЯНИЕ ТЕПЛООБМЕНА НА ПРОПУСКНУЮ СПОСОБНОСТЬ ВНУТРЕННЕЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ ГТД

Зубанов В.М., Харитонов А.А., Мельников С.А., Кудряшов И.А.

Самарский университет, г. Самара, zubanov.vm@ssau.ru

*Ключевые слова: турбина, система охлаждения, пропускная способность.*

Система охлаждения турбины играет важную роль при проектировании двигателя. Обеспечение работоспособного теплового состояния охлаждаемой лопатки турбины требует достоверного определения расхода охлаждающего воздуха, который в свою очередь обусловлен согласованием пневмосистемы всего двигателя. В связи с этим актуальной является задача достоверного определения пропускной способности внутренней системы охлаждения лопатки турбины ГТД.

Самыми достоверными данными являются экспериментальные. Эксперименты для определения теплового состояния лопаток испытания как правило проводятся с использованием подогретого горячего газа, но при граничных условиях (температуры горячего газа и охлаждающего воздуха) отличных от условий работы в составе двигателя. Это достаточно для определения теплового состояния по безразмерному коэффициенту эффективности охлаждения  $\Theta$  [1]. Однако, при таких испытаниях либо нет информации о подогреве охлаждающего воздуха в системе охлаждения или/и она не будет соответствовать действительному значению подогрева при работе в составе двигателя. Известны экспериментальные данные по измерению пропускной способности системы охлаждения лопатки турбины ГТД в составе исследовательского стенда с использованием лазерного доплеровского анемометра [2]. Такой стенд позволяет получить зависимость пропускной способности внутренней системы охлаждения лопатки от перепада давления в системе охлаждения, но на данный момент только для холодного состояния лопаток.

Численное моделирование рабочего процесса охлаждаемых лопаток турбины выполняется с учётом твёрдого тела (теплообмена) [3]. В то же время отсутствие твёрдого тела может упростить расчёт, сократить количество элементов сеточной модели, уменьшить затраты времени на настройку модели и проведение расчётов. Такой подход может использоваться, например, при доводке плёночного охлаждения без учёта твёрдого тела [4]. При этом не исследовалось влияние отсутствия учёта твёрдого тела (подогрева охлаждающего воздуха) на пропускные способности внутренней системы охлаждения лопатки и межлопаточного канала.

Таким образом, в результате проведенного анализа литературных источников не было выявлено исследований по влиянию теплообмена на пропускную способность внутренней системы охлаждения. В связи с этим в данной работе была поставлена задача оценить это влияние расчётным способом.

Объектом исследования является рабочий процесс охлаждаемой лопатки турбины. В качестве предмета исследования выбрана лопатка соплового аппарата (СА) турбины газогенератора (ТГГ). Лопатка СА ТГГ имеет конвективный дефлекторно-матричный способ охлаждения.

Структурированная гексагональная сеточная модель домена лопаточного венца рабочей лопатки была создана в программе Numeca AutoGrid5, сеточная модель охлаждаемой сопловой лопатки – в Ansys Meshing. Во всех сеточных моделях выполнение сгущение вблизи поверхностей стенок для корректного моделирования пограничного слоя. Объём сеточной модели составил 201 млн. эл., из них 57 млн. эл. составляет твёрдое тело.

Численное моделирование выполнялось в ANSYS CFX. Для расчёта в качестве граничных условий были заданы: на входе сопловой аппарат – распределения по высоте полной температуры и полного давления, направление потока; на выходе из рабочего колеса – распределение статического давления; для системы охлаждения соплового аппарата – полное давление и полная температура на входе, значение расхода на выходе.

По результатам расчётов охлаждаемой лопатки СА ТГГ с учётом теплообмена и без него (наличие/отсутствие твёрдого тела) были определены (рис. 1):

- пропускная способность охлаждающего тракта лопатки от перепада давления в системе охлаждения  $A_{\text{охл}} = f(\pi_{\text{охл}})$ ;
- пропускная способность межлопаточного канала от степени понижения давления в ступени турбины  $A_{B2B} = f(\pi_{\text{ст}})$ .

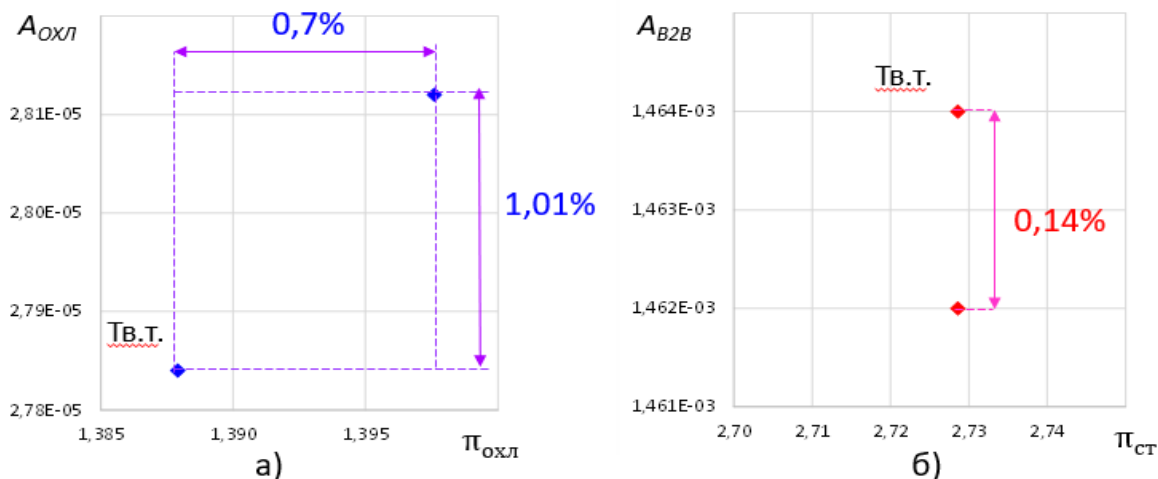


Рисунок 1 – Пропускная способность охлаждающего тракта лопатки (а) и межлопаточного канала (б)

Определено, что подогрев рабочего тела  $\Delta T^*_{\text{охл}}$  в системе охлаждения составил:  $\Delta T^*_{\text{охл}}=152$  К с учётом твердого тела,  $\Delta T^*_{\text{охл}}=0,6$  К без твердого тела. Отсутствие теплообмена с твердым телом привело к тому, что плотность охлаждающего воздуха на выходе из щелей матрицы охлаждения была на 15,14 % больше относительно случая с твердым телом, а значение скорости – уменьшилось на 6,1 %. В случае без учёта твердого тела физический расход охлаждающего воздуха был на 8,2% больше, а пропускная способность – больше на 1,0%. Для расчёта пневмосистемы двигателя необходимо знать физические значения расходов на конкретном режиме, а, следовательно, значение подогрева воздуха во внутренней системе охлаждения лопатки. Значения параметров охлаждающего воздуха выходного сечения представлены в таблице 1.

Табл. 1 – Параметры охлаждающего воздуха на выходе из щелей матрицы охлаждения

Параметр	С твёрдым телом	Без твердого тела
G, кг/с	0,03647	0,03945
$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	3,95	4,54
c, м/с	241,2	226,6
p*, МПа	1,353	1,346
T*, К	1109,4	957,6
A, * 10 <sup>-5</sup> мс√К	2,78	2,81

Таким образом, для оценки пропускной способности межлопаточного канала подходит модель без учета теплообмена (без твердого тела). Для оценки пропускной способности внутренней системы охлаждения лопатки необходимо учитывать теплообмен (использовать полную модель). Определенная в данной работе значительная разница в расходе охлаждающего воздуха через систему охлаждения лопатки от подогрева охлаждающего воздуха может привести к следующему: экспериментальное определение пропускной способности внутренней системы охлаждения лопатки на стендовых установках при температурах (температура газа и охлаждающего воздуха) меньших, чем температуры в составе двигателя, будут давать заниженные значения пропускной способности.

### Список литературы

1. Анализ результатов экспериментального определения значений коэффициента плёночного охлаждения лопаток соплового аппарата / В.Н. Матвеев, А.А. Волков, И.А. Кудряшов, Г.М. Попов // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сборник докладов Международной научно-технической конференции, Самара, 23-25 июня 2021 года. Том 1. Самара: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, 2021. С. 392-393.
2. Самохвалов Н.Ю. Разработка методики контроля системы охлаждения лопаток турбин ГТД / Н.Ю. Самохвалов, М.Д. Леванова, Д.А. Попов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 54. С. 41-56. DOI 10.15593/2224-9982/2018.54.04.
3. Викулин А.В. Разработка системы охлаждения и верификация результатов моделирования температурного состояния рабочей лопатки газовой турбины / А.В. Викулин, В.А. Земляная, Е.Н. Жильцова // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т. 20, № 6(86). С. 114-121.
4. Исследование влияния параметров конечно-элементной сетки потока на Численное моделирование пленочного охлаждения сопловых лопаток турбин / Г.М. Попов, А.А. Волков, В.Н. Матвеев и др. // Насосы. Турбины. Системы. 2021. № 1(38). С. 76-84.

### Сведения об авторах

Зубанов В.М., к.т.н., доцент кафедры ТДЛА им. В.П. Лукачёва. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

Харитонов А.А., студент. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

Мельников С.А., аспирант кафедры ТДЛА им. В.П. Лукачёва. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

Кудряшов И.А., аспирант кафедры ТДЛА им. В.П. Лукачёва. Область научных интересов: рабочие процессы турбомашин и ГТД, проектирование и численное моделирование лопаточных машин.

### THE INFLUENCE OF CONJUGATE HEAT TRANSFER ON THE GTE COOLED BLADE THROUGHPUT

Zubanov V.M., Kharitonova A.A., Melnikov S.A., Kudryashov I.A.  
Samara University, Samara, Russia, [annakharitonova15@gmail.com](mailto:annakharitonova15@gmail.com)

*Keywords: turbine, cooling system, throughput.*

The paper presents a study of the effect of heat transfer on the throughput of a gas turbine engine cooled blade.