

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАНАВКИ НА НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ КОРПУСА ТУРБИНЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ УПРАВЛЕНИЯ РАДИАЛЬНЫМИ ЗАЗОРАМИ

Фэн Цзини, Фалалеев С.В., Юртаев А.А.  
Самарский университет, г. Самара, [falaleev.sv@ssau.ru](mailto:falaleev.sv@ssau.ru)

*Ключевые слова:* газовая турбина, охлаждение корпуса турбины, изменение радиального зазора

Различные режимы работы двигателя, в том числе нестационарные, оказывают существенное влияние на величину радиального зазора в турбине. Поэтому применение системы активного управления радиальными зазорами (САУРЗ) является важным направлением для повышения эффективности двигателя. Большинство научных исследований направлено на улучшение эффекта теплообмена между струйками воздуха и корпусом турбины, а также на обеспечение точности регулирования величины радиального зазора. Имеется ряд публикаций с результатами численного моделирования и натурных экспериментов САУРЗ с различными формами корпуса и конструкцией трубок струйного охлаждения. Одним из возможных конструктивных решений является выполнение кольцевой канавки на корпусе турбины в месте подачи охлаждающего воздуха. Целью данной работы является исследование влияния геометрических параметров канавки на процесс теплообмена.

Геометрическая модель расчетной области модельного корпуса турбины представляет собой угловой сектор величиной  $8^\circ$  и содержит корпус, воздушную полость и трубку с двадцатью пятью равномерно распределенными струйными отверстиями. Осевой размер расчетной области составляет 200 мм. Величина зазора между корпусом и трубками составляет 6,4 мм. На внешней поверхности корпуса турбины непосредственно под отверстиями создана кольцевая канавка. Добавление небольших фасок на углы канавки улучшает картину течения воздуха в этих местах. Величины глубин и ширины канавки принимаются в качестве переменных, всего рассматривается 25 вариантов. Глубина канавки находится в диапазоне от 0,5 до 2 мм, ширина - от 2 до 100 мм. Толщина модели корпуса составляет 2,5 мм. В качестве материала корпуса турбины и трубки выбран жаропрочный сплав на основе никеля *Inconel 718*. Рабочее тело - идеальный газ.

Для моделирования теплового воздействия воздуха на конструкцию используются *ANSYS CFX 2024R1* и *ANSYS Statistic Structural*. Неструктурированное построение сетки было выполнено в геометрической области, включающей воздушную область и корпус турбины. Построение сетки в пограничном слое проводилось с учетом интерфейса сопряжения воздуха и твердого тела. Принята модель турбулентности *shear stress transport (SST)*, а расчетная модель соответствует требованию низкого значения  $y^+$  модели турбулентности *SST*. Сетка около отверстия для струи сгущена. Модель в *ANSYS Meshing* имеет более 2500000 элементов.

В качестве граничного условия задается массовый расход воздуха на входе в отверстие трубки. На выходе воздуха из рассматриваемой области установлено граничное условие «*opening*». Область воздушной полости задается достаточно большой, чтобы учесть влияние изменения аэродинамического состояния на выходе на настройки модели. Внутреннюю поверхность корпуса турбины омывает газ с коэффициентом конвективной теплоотдачи  $2500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и температурой 800 К. Для каждой поверхности сопряжения воздух-твердое тело, учитывая требования моделирования сопряженного теплообмена, задается непрерывность теплового потока между каждой поверхностью сопряжения. Моделирование сопряженного теплообмена выполняется с помощью *CFX* для получения данных о значениях температур и скоростей потока.

Для моделирования теплового состояния конструкции используется *ANSYS Mesh* для создания неструктурированной сетки корпуса турбины. Расчеты методом конечных элементов

(КЭ) выполнялись с использованием решателя *Mechanical APDL*. Данные о распределении температур тела и давлениях воздуха, полученные в результате расчета *CFX*, импортируются в модель *Mechanical APDL*, в которой рассчитывается величина изменения радиального зазора.

Сравнивая результаты расчетов при различных сочетаниях величин ширин и глубин канавок, можно найти закономерности изменения параметров теплообмена.

Величины скоростей, полученные с помощью *CFD*-моделирования, показаны на рис. 1. Глубина канавки составляет 1,2 мм, ширина 2 мм, а массовый расход струи через одно отверстие 0,05 г/с.

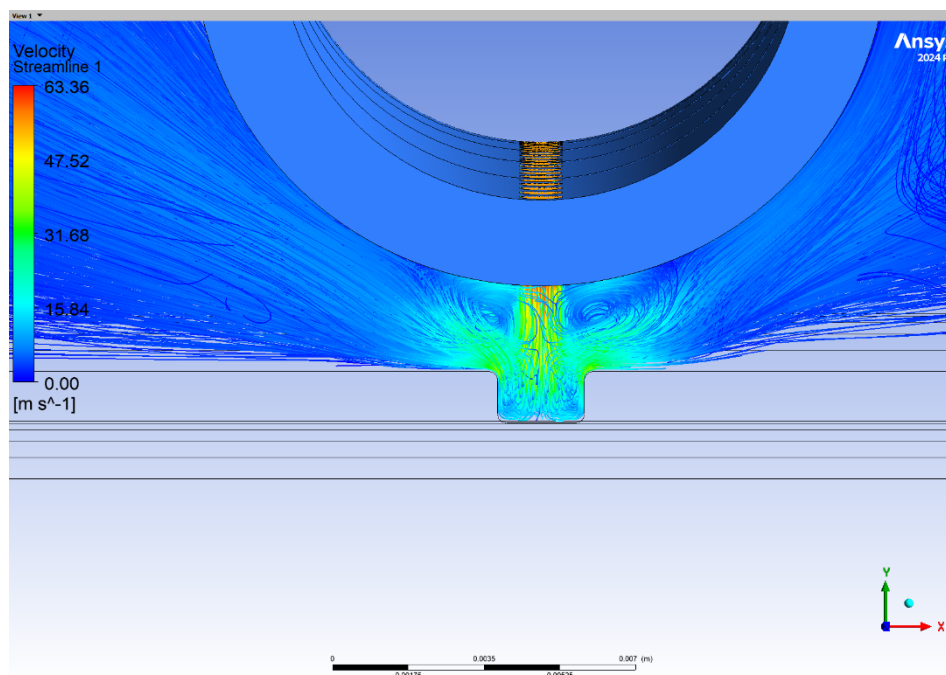


Рис. 1 – Распределение величин скоростей течения воздуха при обтекании корпуса

После выхода из отверстия струя воздуха тормозится и ударяется в дно канавки. Часть ее отражается, образуя поток вокруг трубки, а часть образует пристеночную струю вдоль корпуса турбины. Канавки на поверхности корпуса турбины позволяют струе более полно контактировать с внешней поверхностью корпуса, образуя вихри вдоль канавок. Анализ результатов моделирования с другим сочетанием геометрических параметров канавок показал, что аналогичные результаты могут быть получены при узкой ширине канавки. Однако при большей ширине канавки (8 и более мм) поток воздуха не отражается от дна канавки, а как бы «прилипает» к внешней поверхности корпуса. В углах канавки могут образовываться небольшие вихри, а в достаточно широкой канавке вихри исчезают. Проведенные исследования показали, что в отличие от ширины канавки изменение ее глубины в рассматриваемом диапазоне влияет незначительно.

Также был проведен расчет величин коэффициентов теплоотдачи от наружной поверхности корпуса турбины. При большей ширине канавок наибольшее значение коэффициента теплоотдачи получается в зоне торможения струи. То есть в этой области эффект теплопередачи высокий. При удалении от оси отверстий в трубке величина коэффициента снижается. Однако при более узких канавках распределение коэффициента конвективной теплоотдачи имеет другой вид (рис. 2). При этом к зонам интенсивной теплопередачи относятся как зона торможения, так и вся область канавки. Анализируя полученные результаты, можно отметить, что локальное максимальное значение коэффициента теплоотдачи в этом случае значительно растет, но величина площади эффективного охлаждения значительно уменьшается. Это может привести к снижению эффективности САУРЗ.

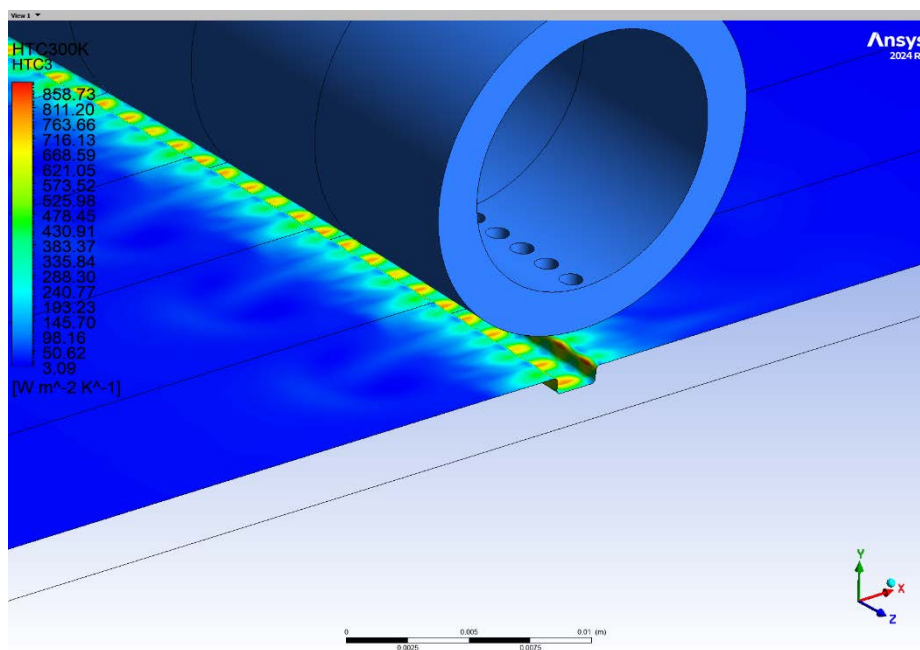


Рис. 2 – Распределение коэффициента конвективной теплоотдачи (глубина 0,8 мм, ширина 2 мм)

Проведено сравнение величин коэффициента конвективной теплоотдачи при различных размерах канавок с результатами расчета охлаждения корпуса турбины при отсутствии канавки, ранее полученными в нашем коллективе. При небольшой глубине канавки максимальный коэффициент теплоотдачи в зоне торможения улучшается.

Аналогичные выводы можно сделать из анализа распределения температуры корпуса. При изменении ширины канавки температура корпуса напротив отверстий для струйного охлаждения отличается незначительно (при уменьшении глубины канавки с 2 до 0,5 мм температура корпуса в ее центре уменьшается на 6 градусов), однако имеются явные различия в размере области охлаждения. Наибольшее снижение средней температуры корпуса достигается при величине глубины канавки 0,8...1,2 мм и ширине более 15 мм. Если поток воздуха ограничен узкими канавками и не может хорошо прилегать к корпусу, охлаждающий эффект будет значительно снижен.

Анализ изменения величины радиального зазора показал, что его максимальное уменьшение находится в области под струей. При ширине канавки 2 мм его уменьшение наблюдается на отрезке величиной 60 мм. При ширинах канавки более 8 мм уменьшение радиального зазора при включении САУРЗ усиливается, но появляется эффект более значительного прогрева участка корпуса турбины за счет уменьшения его толщины из-за выполнения канавки. В итоге величина радиального зазора из-за более значительного прогрева корпуса увеличивается и положительный эффект от выполнения канавки пропадает.

Поэтому глубина канавки не должна быть слишком большой (рекомендуется 0,5...0,8 мм), а сама канавка не должна быть слишком широкой (менее 8 мм). Также представляет практический интерес выполнение трубок с двумя рядами отверстий и с двумя узкими канавками на корпусе турбины в области расположения рабочей лопатки.

### Сведения об авторах

Фэн Цзини, магистрант каф. КиПДЛА, Самарский университет. Область научных интересов: регулирование радиальных зазоров в турбине ГТД, сопряженные расчеты.

Фалалеев Сергей Викторинович, д.т.н., проф., зав. кафедрой КиПДЛА, Самарский университет. Область научных интересов: проектирование ДЛА, цифровые двойники, регулирование радиальных зазоров, газо- и гидродинамическая смазка, уплотнительная техника.

Юртаев Артем Алексеевич, ассистент кафедры КиПДЛА, Самарский университет.  
Область научных интересов: проектирование ДЛА, цифровые двойники, система регулируемых направляющих аппаратов компрессора, подшипники с газовой смазкой.

**STUDY OF THE EFFECT OF THE GROOVE ON THE OUTER SURFACE OF THE TURBINE HOUSING ON THE EFFICIENCY OF RADIAL CLEARANCE ADJUSTMENT**

Feng Jingyi, Falaleev S.V., Yurtaev A.A.  
Samara University

*Keywords: gas turbine, turbine casing cooling, radial clearance change.*

The analysis of the system of active regulation of radial clearances in the engine turbine was carried out. The results of the modeling allowed to identify rational geometric parameters of the groove on the turbine housing, ensuring the efficiency of the system under study.