

УДК 62-135.2

М. А. ЩЕРБАКОВ

ОКБ им. А. Льюльки, Россия

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТУРБИНЫ

В статье представлено исследование моделирования обтекания рабочей лопатки турбины, имеющей конвективную систему охлаждения. Также моделировалось течение воздуха в системе охлаждения и материал самой лопатки. Распределение температуры по перу лопатки и бандажной полке сверялось с данными, полученными с использованием известных критериальных зависимостей и с данными, полученными из натурального эксперимента. Даны рекомендации применения программного комплекса ANSYS CFX для трехмерного моделирования тепломассообмена в лопатках турбины, имеющих конвективный способ охлаждения.

Ключевые слова: лопатка турбины, тепловое состояние, система охлаждения, математическое моделирование, CFD, вычислительная гидродинамика.

Введение

Определение теплового состояния элементов конструкции — это важнейший этап при проектировании и доводке двигателя. Особенно сложным является определение теплового состояния охлаждаемых рабочих лопаток турбины из-за наличия сложных пространственных течений, влияния вращения на структуру потоков и взаимодействия потоков газа и охлаждающего воздуха. Получение этих данных экспериментальным путем связано с большими материальными и временными затратами. При этом используемые на отечественных предприятиях и в институтах методы получения экспериментальных данных, в большинстве случаев, не позволяют получить необходимый объем информации. Для оперативного получения данных используются расчетные методы. Особенно стоит выделить использование трехмерного моделирования процессов тепломассообмена, иногда полностью заменяющего натуральный эксперимент. Но применение современных программ не избавляет от работ по предварительной настройке расчетной модели под конкретную задачу.

В статье даны рекомендации по основным настройкам расчетной модели с целью получения теплового состояния рабочей лопатки турбины, имеющей конвективное охлаждение.

1. Постановка задачи и объект исследования

Проблемы, связанные с определением значений коэффициента теплоотдачи на омываемых поверхностях с использованием программного комплекса ANSYS CFX, были описаны в статье [1]. Там же представлена методика определения этих значений. Но предложенная методика требует значительных вы-

числительных ресурсов и очень чувствительна к качеству сеточной модели. Так незначительный рост размера пристеночного элемента ($y^+ = 1$ до $y^+ = 1,5$) приводит к увеличению локального значения коэффициента теплоотдачи в 1,5 – 2 раза. Некондиционные сеточные элементы приводят к появлению завышенных на несколько порядков и даже отрицательных значений коэффициента теплоотдачи. В связи с этим необходимо проводить «чистку» полученных результатов — удалять завышенные и не физические значения. Но возникает задача: как определить, завышено локальное значение или величина соответствует действительности? Помимо этого существует проблема передачи полученных данных в модель, созданную для определения теплового состояния исследуемого объекта. Это связано с тем, что расчетные модели определения теплового состояния обтекаемого тела часто создаются в программах, предназначенных для расчетов на прочность, и имеют собственные упрощения в геометрии, разбиения на характерные регионы и, иногда, используется другая система координат.

Так как конечной целью тепло-гидравлических расчетов чаще всего является определение теплового состояния обтекаемого тела и ANSYS CFX позволяет выполнять подобные расчеты в одном файле, то необходимо получить рекомендации по настройке модели сопряженного тепло-газодинамического расчета.

Описанная в [1] методика может быть применена для получения коэффициентов теплоотдачи, например, используемых в двумерных и квази-трехмерных моделях.

Для отработки методики определения теплового состояния обтекаемого тела с использованием сопряженного тепло-газодинамического

расчета использовался лопаточный венец рабочего колеса турбины низкого давления (ТНД). Рабочая лопатка 1 (рисунок 1) лопаточного венца имеет бандажную полку 2. Система охлаждения рабочей лопатки – конвективная и состоит из внутреннего канала со штырьками-интенсификаторами. Вход в охлаждающий канал расположен в подошве замка лопатки, а выход – над бандажной полкой за зубом лабиринтного уплотнения. Выдувы на перо лопатки отсутствуют. Помимо основного потока газов 3, выходящих из соплового аппарата ТНД, лопатку ТНД в районе бандажной полки обдувает охлаждающий воздух, вытекающий через систему отверстий 4, расположенных в верхней полке соплового аппарата ТНД.

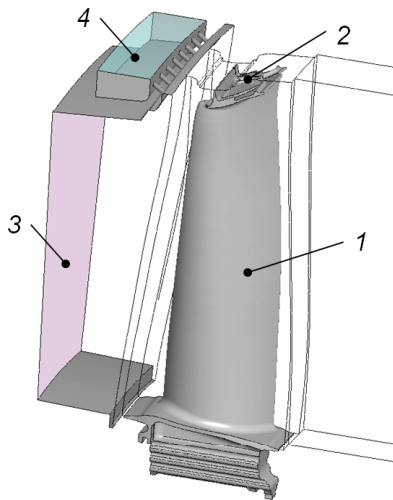


Рис. 1. Рабочая лопатка ТНД

На исследуемом лопаточном венце, установленном в двигателе, выполнено препарирование датчиками температуры и проведен натурный эксперимент. Чтобы исключить влияние друг на друга, термопары устанавливались по одной на каждой лопатке. Все установленные на венце термопары образуют группы расположенные в корневом, среднем и периферийном сечениях лопатки. Каждая группа включает в себя четыре термопары, измеряющие температуру металла, и, установленную на входной кромке на термоизолированном кронштейне, термопару для измерения полной температуры потока по относительной скорости T_w^* . Использовались хромель-алюмелевые термопары ТХА(К), класс допуска 2, ГОСТ 1790-77, имеющие погрешность измерения температуры не более 0,0075(t) или не более 7° для замеряемого в эксперименте уровня температур. Погрешность всей системы измерения составляет не более 5%. Замеры температуры потока и лопатки осуществлялись на всех режимах работы двигателя, соответствующих полетному циклу самолета.

2. Математическое моделирование

Трехмерная расчетная модель состоит из входного неподвижного домена, имитирующего сопловой аппарат ТНД, вращающегося домена, моделирующего проточную часть, вращающегося домена, моделирующего рабочую лопатку и неподвижного домена, моделирующего выходной участок. В домене соплового аппарата использовалась тетра-сетка с призматическим подслоем, качество сетки – достаточное для моделирования газового потока и составляет порядка 500 тысяч контрольных объемов. Сам профиль лопатки соплового аппарата отсутствует. В сетках межлопаточного канала и рабочей лопатки использовался тетра-элемент, на поверхностях стенок в газовом домене создавался слой призматических элементов. На совместных поверхностях газового домена и домена рабочей лопатки сеточные элементы совпадают узел в узел. Общее число элементов газового домена и домена лопатки изменялось в зависимости от этапа исследования от 16 до 22 миллионов контрольных объемов и зависело от количества слоев призматических элементов.

Использовалась SST-модель турбулентности. На вход 3 в лопаточный венец задавались значения параметров потока в виде радиальных эпюр, соответствующие параметрам на выходе из соплового аппарата ТНД: полное давление, полная температура и направление потока. На выходе из расчетной области задавалось статическое давление. Выдув на корпусе и подача охлаждающего воздуха в замок лопатки задавались полным давлением и полной температурой потоков. Параметры газа и охлаждающего воздуха получены из сторонних программ, используемых в ОКБ им.А.Люльки.

Для дополнительной сравнительной оценки инженером Д.А. Воробьевым, был проведен расчет теплового состояния лопатки по критерияльным зависимостям, описанным в [2].

Исследование влияния тех или иных параметров расчетной модели проходило в два этапа. На первом этапе исследовалось влияние качества пристеночного призматического слоя на результаты расчета: задавались различные размеры первого слоя, а также варьировалось число слоев. При этом в качестве рабочего тела использовалась модель воздуха с фиксированными параметрами – Ideal Gas, а свойства материала лопатки задавались фиксированными значениями углеродистой стали – модель Steel. Обе модели веществ взяты из библиотеки ANSYS CFX. Результаты расчетов подтверждают зависимость получаемых данных от качества сетки, в частности, от качества призматического подслоя. Но при увеличении числа слоев больше 14 и уменьшении толщины первого элемента до

y^+ меньше 3, получаемые значения параметров почти не зависят от качества сетки, т.е. достигается достаточно хорошее сеточное разрешение пограничного слоя. Дальнейшее исследование влияния сеточного разрешения расчетной области (в том числе улучшение тетра-сетки) не проводилось вследствие нехватки вычислительных ресурсов. Задание свойств реального газа как смеси массовых долей компонентов, имеющих зависимость свойств от давления и температуры с использованием качественной сетки, позволило в расчете увеличить температуру на поверхности лопатки, примерно, на 10° .

Компоненты газа взяты из библиотеки ANSYS CFX. Скорость счета уменьшилась на 20%. Задание свойств материала лопатки, имеющих зависимость коэффициентов теплоемкости и теплопроводности от температуры, позволило значительно изменить результаты расчета: в контрольных точках лопатки произошел рост значений температуры на $10-30^\circ$.

Результаты характерных расчетов этапа представлены в таблице 1. Приведены изменения температуры в контрольных точках на поверхности лопатки в среднем сечении в зависимости от используемых настроек расчетной модели.

Таблица 1 – Температура лопатки в среднем сечении, $^\circ\text{C}$. Первый этап

	Входная кромка	Спинка	Корыто	Выходная кромка
Экспериментальные данные	893	823	839	883
Данные, полученные по критериальным зависимостям	888	823	827	890
Данные, полученные в ANSYS CFX				
8 призматических слоев, $y^+ = 15$	810	750	740	745
8 призматических слоев, $y^+ = 5$	833	760	746	860
15 призматических слоев, $y^+ = 2,8$	850	735	796	870
15 призматических слоев, $y^+ = 1,6$. Заданы свойства газов и металлолопатки	859	733	793	878

На втором этапе также исследовалось влияние качества пристеночного призматического слоя на результаты расчета, но при этом во всех расчетах использовались модели воздуха, газа и металла, имеющие зависимости свойств от температуры. Как видно из таблицы 2, влияние

качества пристеночного слоя в этом случае не настолько существенное, как при использовании моделей Ideal Gas и Steel. При достижении значения y^+ ниже 7 и числа слоев более 10 значения температуры поверхности лопатки изменяются незначительно – в пределах 5° .

Таблица 2 – Температура лопатки в среднем сечении, $^\circ\text{C}$. Второй этап

	Входная кромка	Спинка	Корыто	Выходная кромка
Экспериментальные данные	893	823	839	883
Данные, полученные по критериальным зависимостям	888	823	827	890
Данные, полученные в ANSYS CFX				
8 призматических слоев, $y^+ = 18$	844	773	803	889
12 призматических слоев, $y^+ = 7,7$	867	784	816	887
14 призматических слоев, $y^+ = 5,1$	869	786	821	890
16 призматических слоев, $y^+ = 3,5$	866	781	817	887

На рисунке 2 представлено распределение значений температуры в среднем сечении лопатки. Верхнее значение (черный шрифт) получено из расчета в ANSYS CFX. Нижнее значение (красный шрифт) получено из натурального эксперимента. Окончательные расчетные дан-

ные ниже в большинстве контрольных точек на $20 - 40^\circ$ значений, полученных в эксперименте и по критериальным зависимостям.

Данное расхождение можно объяснить меньшей на 20° температурой основного потока, полученной в расчете в данном сечении, по

сравнению с температурой, полученной в эксперименте. Стоит отметить, что для расчета по критериальным зависимостям использовались данные, полученные из двумерной математической модели турбины. Эти же данные использовались в ANSYS CFX. Отличие состоит в том, что в ANSYS CFX использовались значения по абсолютной скорости потока, а при расчете по критериальным зависимостям использовались значения по относительной скорости потока. Значения и распределение температуры в относительной системе координат, связанной с рабочим колесом, ANSYS CFX получает самостоятельно, при этом средние значения температур на входе в рабочее колесо, полученные в двумерной математической модели и в ANSYS CFX отличаются не более чем на 3%.

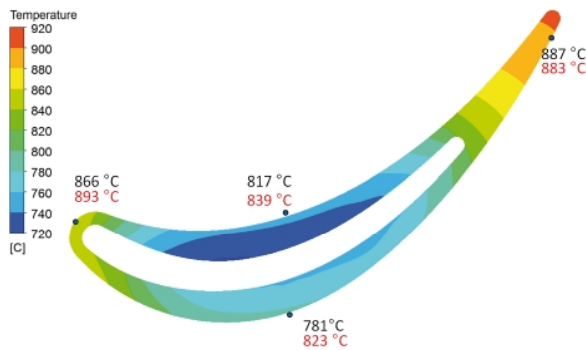


Рис. 2 Распределение температуры металла в среднем сечении лопатки

На расхождение полученных температур с экспериментальными данными влияет и расход охлаждающего воздуха, зависящий, в том числе, и от геометрии охлаждающего канала. В ANSYS CFX использовалась геометрическая модель, имеющая номинальные размеры, при этом лопатки, устанавливаемые на двигатель имеют отклонения. Так допуск на отклонение ширины входа в канал охлаждения составляет до 10% от номинального значения. По этой причине хорошее совпадение результатов, полученных по критериальным зависимостям с экспериментальными данными, объясняется использованием в расчете значений расхода воздуха, полученных из продувок одной из лопаток комплекта препарированного лопаточного венца.

Максимальное расхождение значений, полученных в ANSYS CFX и эксперименте, наблюдается в точке, расположенной на спинке профиля. Возможно, это расхождение вызвано тем, что температурный пограничный слой в точках замера составляет, около 0,25 мм — на спинке и корыте и 0,6 мм на выходной кромке (рисунок 3), а диаметр спая термопары — 0,7 — 0,8 мм. По этой причине в эксперименте

возможно локальное возмущение потока. В связи с этим возникает перемешивание слоев газа с различной температурой в районе термопары и, как следствие, рост локального значения экспериментальной температуры.

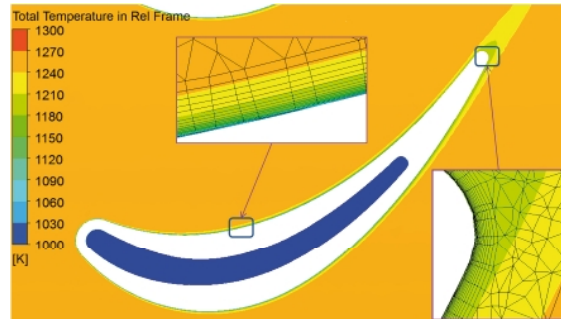


Рис. 3. Распределение температуры потока в среднем сечении межлопаточного канала

Исходя из приведенных рассуждений можно сделать вывод о том, что полученные результаты в ANSYS CFX достаточно хорошо отражают реальные процессы, происходящие при обтекании лопатки ТНД.

Заключение

Представлена методика определения теплового состояния лопаток турбин ГТД, имеющих конвективную систему охлаждения. Расхождение получаемых результатов с экспериментальными данными не превышает 6% по температуре материала лопатки.

Согласно этой методике необходимо моделировать как обтекаемое тело, так и сам поток и систему охлаждения. При этом необходимо обеспечить качество сеточной модели по параметру y^+ не более 5-7. Обязательным условием является задание тепло-физических свойств газов и материала омываемого тела как функций от температуры.

Планируется провести исследование применения этой методики для лопаток, имеющих пленочное охлаждение.

Литература

1. Определение коэффициентов теплоотдачи при моделировании задач в ANSYS CFX. [Текст] / М. А. Щербаков // Авиационно-космическая техника и технология. — 2011 — №7 (84) — С.165-169.
2. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов [Текст]: учебник для вузов / В. И. Локай, М. Н. Бодунов, В. В. Жуйков, А. В. Щукин. — М.: Машиностроение, 1986. — 215 с.: ил.

Поступила в редакцию 01.06.2013

М.О. Щербаков. Еспериментальне та чисельне визначення теплового стану робочої лопатки турбіни

У статті представлено дослідження моделювання обтікання робочої лопатки турбіни, яка має конвективну систему охолодження. Також моделювалася течія повітря в системах охолодження і матеріал самої лопатки. Розподіл температури по перу лопатки та бандажній полиці зрівнюється з даними, отриманими з використанням відомих залежностей критеріїв і з даними, отриманими з натурного експерименту. Надані рекомендації застосування програмного комплексу ANSYS CFX для тривимірного моделювання тепломасообміну в лопатках турбіни, які мають конвективний спосіб охолодження.

Ключові слова: лопатка турбіни, тепловий стан, система охолодження, математичне моделювання, CFD, обчислювальна гідродинаміка.

M. A. Shcherbakov. Experimental and numerical determination of thermal state of turbine blade

In this paper investigation of simulation of streamlining of turbine blade with convection cooling system is presented. Air flow in the cooling system and blade material were simulated also. Temperature distribution along blade and bandage shelf was compared with data obtained from criteria dependence and experimental data. Recommendations of using ANSYS CFX for 3D modeling of heat-mass exchange in turbine blade with convection cooling system were given.

Key words: turbine blade, thermal state, cooling system, mathematic modeling, CFD, computational hydrodynamics.