

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ В ГАЗОСБОРНИКЕ ТУРБОМАШИНЫ

АННОТАЦИЯ

Исследуется сжимаемое пространственное турбулентное течение в газосборнике. На основе численного решения системы уравнений Рейнольдса и уравнения энергии, замыкаемой уравнениями стандартной « $k - \epsilon$ » модели турбулентности, а также начальными и граничными условиями, получены распределения статической температуры и скорости на поверхности и в некоторых характерных сечениях газосборника. Установлено местоположение высокотемпературных «пятен» на стенках газосборника. Представлены результаты расчетов для двух вариантов стандартной « $k - \epsilon$ » модели: линейной и квадратичной. Численные расчеты проводились с помощью универсального пакета инженерного анализа STAR-CD. Для численного расчета по чертежам моделируется разностная сетка немногим более ста тысяч ячеек. Результаты исследования используются для определения требований к пассивной и активной теплозащите турбомашин.

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье представлены результаты расчетного исследования теплового состояния модели газосборника. Статья состоит из двух разделов, а также введения и заключения.

В разд. 2 изложена общая формулировка постановки задачи.

В разд. 3 изложена методика численного исследования с описанием построения геометрической модели объекта, а также результаты численного расчета.

Исследован случай, когда на входы в газосборник подаются газовые потоки с горячими ядрами, которые моделируются как урезанный сектор круга. Получены распределения температуры на стенках исследуемого канала и в его выходном сечении, поля скорости внутри газосборника и на выходе. Исследование проведено с использованием двух моделей турбулентности: линейной « $k - \epsilon$ » модели и квадратичной « $k - \epsilon$ » модели.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим сжимаемое трехмерное турбулентное течение в газосборнике турбомашин. Объект исследования изображен на рис. 1. Геометрическая модель объекта строится по инженерным чертежам.

На входы в рукава подачи газосборника подаются газовые потоки с горячим ядром определенного вида.

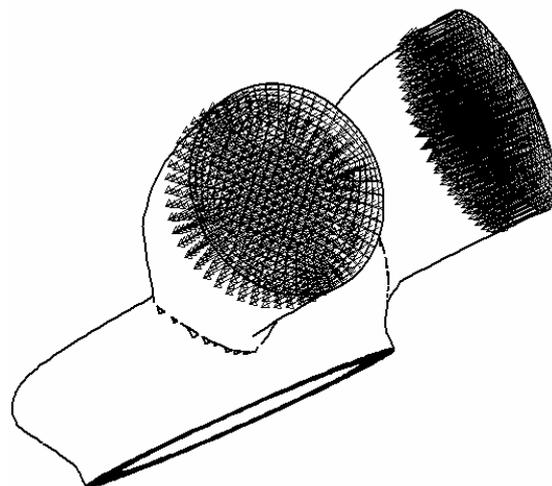


Рис. 1. Общий вид газосборника. Показаны входные сечения, выходное сечение, направление вектора скорости потока

Предметом исследования являются распределения температуры и скорости внутри представленного объекта. Наибольший интерес представляют собой поле температуры на стенках и распределение скорости и температуры на выходе из газосборника.

3. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ

3.1. Методика численного исследования

Моделирование течения проводилось на основе полной системы уравнений Рейнольдса и уравнения энергии для модели совершенного газа. Система уравнений замыкается уравнениями стандартной « $k - \epsilon$ » модели турбулентности, а также начальными и граничными условиями: все составляющие скорости на твердых стенках равны нулю (условие прилипания); теплопередача через стенку равна нулю (адиабатический режим); скорость и распределение температуры потоков воздуха на входах в рукава подачи газосборника заданы.

Численное исследование проведено для двух вариантов стандартной « $k - \epsilon$ » модели турбулентности: линейной « $k - \epsilon$ » модели и квадратичной « $k - \epsilon$ » модели.

Для численного расчета использовалась трехмерная разностная сетка, изображенная на рис. 2.

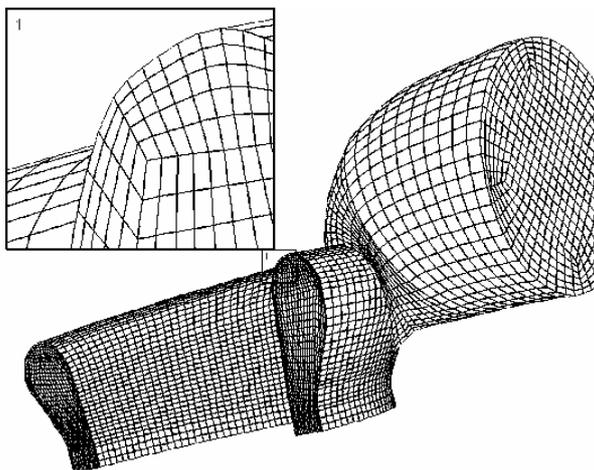


Рис. 2. Разностная сетка

Геометрическая модель объекта строится по специальным чертежам. Для частичной оцифровки чертежей использовался пакет AutoCAD. В качестве образующих брались сплайны, построенные по некоторому множеству характерных точек на чертеже, а также сплайны, требуемые для задания внутренней структуры сетки.

Для построения геометрической модели объекта и разностной сетки используются внутренние средства моделирования трехмерных объектов пакета инженерного анализа STAR-CD. На внутреннем языке команд пакета написана программа с общим количеством строк порядка 2000. Весь процесс создания сетки рассматриваемого в данной работе трехмерного канала сложной геометрии реализован в виде указанной программы.

В процессе моделирования использовался мультиблочный метод (The multi-block method) построения сетки. Это подход «сверху вниз», который предполагает разбиение моделируемой геометрии на отдельные блоки.

Разбиение на блоки выбирается не произвольно, а так, чтобы получить желаемую геометрию сетки с требуемым размером ячеек в различных ее частях. В настоящей работе геометрия разбита на 34 блока, каждый из них задается по отдельности. Такое количество блоков необходимо, чтобы получить плавное сгущение сетки вблизи стенок газосборника, где в результате действия условий прилипания, значительно влияющих на развитие турбулентного течения, образуется пограничный слой, вблизи которого нужна более высокая точность вычисления.

Исходными физическими параметрами рассматриваемого сжимаемого турбулентного течения, являются:

- суммарный, т.е. через два рукава подачи, массовый расход $Q = 39$ кг/с;
- давление на входе $p = 968$ кПа;
- скорость входного потока, задана равномерно и равна $V = 70$ м/с;
- средняя температура на входе $T_{cp} = 1383$ К;
- температура во входных сечениях рукавов подачи газосборника задается неравномерно, рассматривается течение, где в каждую входную трубу втекает газовый поток с горячим ядром определенного вида;

- температура горячего ядра в потоке $T_{я} = 1670$ К;
- температура остальной области (вне горячего ядра) $T_0 = 1340$ К.

Входные сечения рукавов подачи газосборника представляют собой правильный круг. Ядро моделируется как урезанный сектор круга.

Результатом описанного способа моделирования ядра стало следующее распределение температуры на входе.

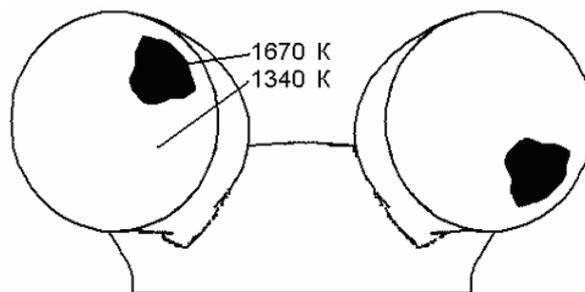


Рис. 3. Расположение горячих ядер

3.2. Численный расчет

Расчет проводится для двух моделей турбулентного течения с одинаковой точностью (двух вариантов стандартной « $k - \epsilon$ » модели). Точность задается в программе и равна 0.001 (Max. Residual Tolerance). Требуемый критерий точности удовлетворяется в рассматриваемых двух случаях за разное число итераций. В случае линейной « $k - \epsilon$ » модели он достигается за 1113 итерации, а для квадратичной « $k - \epsilon$ » модели – за 1448 итераций.

В результате вычисления для квадратичной « $k - \epsilon$ » модели было получено распределение температуры, показанное на рис. 4. Для линейной модели турбулентности соответствующее распределение имеет схожую картину.

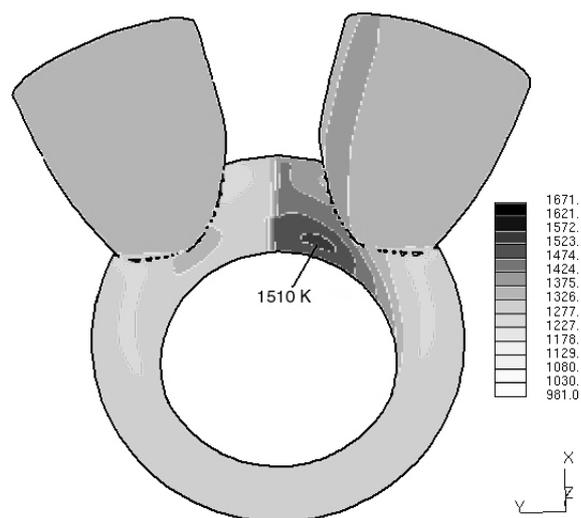


Рис. 4. Распределение температуры на стенке

На рис. 4 видно наличие горячего «пятна» на стенке газосборника. В области «пятна» температура превосходит среднюю температуру остальной области примерно на 200 градусов. Сильная асим-

метрия температуры связана с тем, что ядра на входах расположены по-разному (несимметрично). В левой (см. рис.3) входной трубе ядро находится в первой четверти воображаемой системы координат, в правой – ядро имеет ту же структуру и температуру, но расположено в четвертой четверти.

На выходе из газосборника наблюдается образование областей пониженной температуры относительно исходной температуры потока, которые совпадают с зонами наиболее высокой скорости потока.

На рис. 5 показан профиль статической температуры в этом сечении по всей окружности вдоль средней линии (находящейся ровно посередине между двумя стенками газосборника) для двух вариантов стандартной « $k - \epsilon$ » модели.

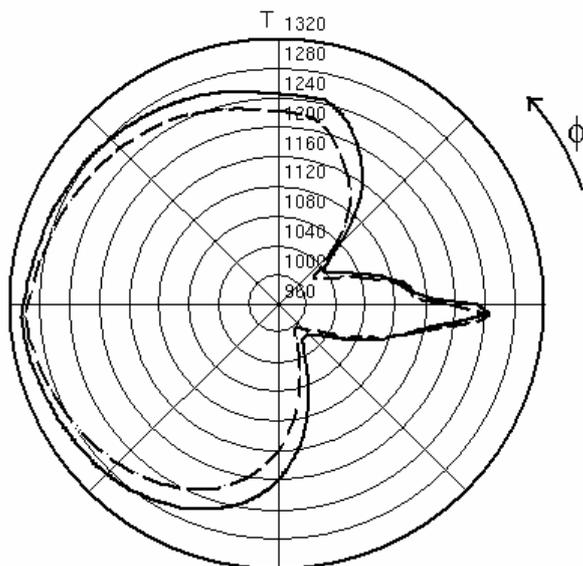


Рис. 5. Профиль статической температуры на средней линии выходного сечения газосборника: сплошная линия – линейная « $k - \epsilon$ » модель; штриховая линия – квадратичная « $k - \epsilon$ » модель

Из приведенных данных видно, что различие результатов для двух моделей незначительно (относительно порядка температуры в газосборнике) и находится в пределах 30 градусов.

Далее представлен график скорости в выходном сечении (см. рис. 6) по всей окружности вдоль средней линии для двух вариантов стандартной « $k - \epsilon$ » модели.

Из приведенных данных видно, что различие этих результатов достигает 40 м/с, что достаточно велико относительно минимальной скорости на этом графике (48.6 м/с), и довольно мало относительно максимальной скорости (881 м/с) – 4.5%. Более детальный анализ относительного различия между результатами двух моделей турбулентности, проведенный для выходного сечения, свидетельствует о наличии зон, где различие достигает 50%, но эти зоны имеют локальный характер (покрывают всего примерно 5% площади выходного сечения), на большей же части выходного сечения относительное различие не превосходит 6%.

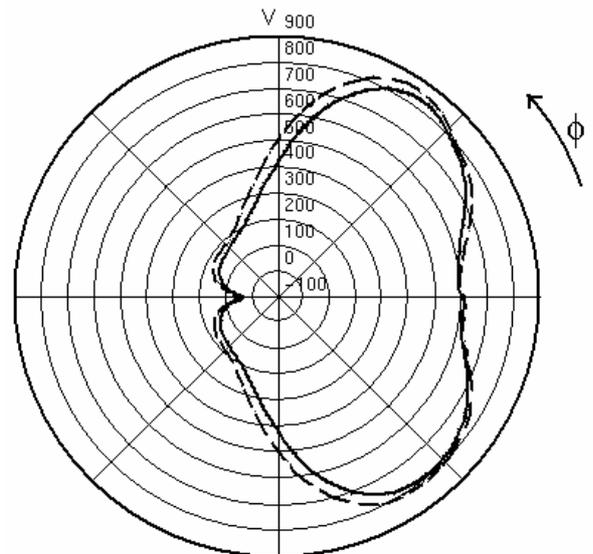


Рис. 6. Эюра скорости на средней линии выходного сечения газосборника: сплошная линия – линейная « $k - \epsilon$ » модель; штриховая линия – квадратичная « $k - \epsilon$ » модель

Рассмотрим распределение скорости внутри газосборника. На рис. 7 показано некоторое сечение, проходящее через центр рукава подачи. Диаметр этого рукава уменьшается в направлении течения потока, поэтому наблюдается возрастание скорости в этом направлении. На стенках же действует условие прилипания, что отражается белым (соответствует нижнему диапазону скорости) пристеночным слоем на рисунке.

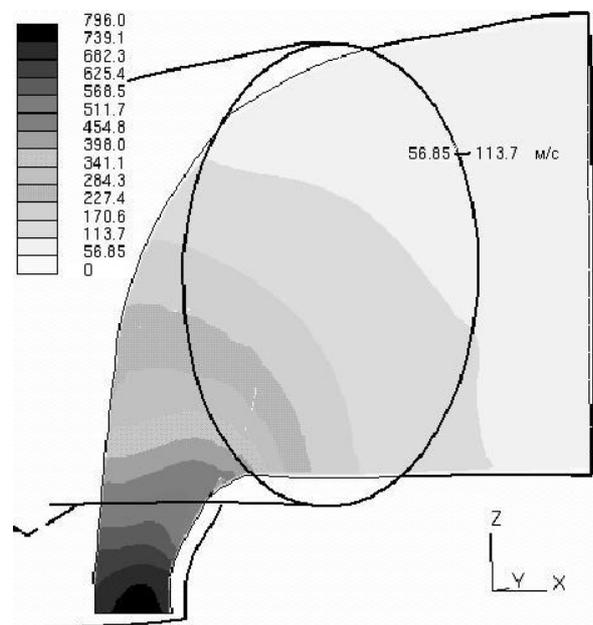


Рис. 7. Поле скорости в рукаве подачи

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрено сжимаемое турбулентное течение воздуха в газосборнике турбомашин. Модель исследуемого объекта строилась по специальным инженерным чертежам. Исследован случай, когда на входы в газосборник подаются газовые потоки с

горячими ядрами, которые моделируются как урезанный сектор круга.

Численный расчет проводился с использованием двух моделей турбулентности: линейной « $k - \varepsilon$ » модели и квадратичной « $k - \varepsilon$ » модели. В обоих случаях расчет достиг требуемого критерия точности.

Получены распределения температуры на стенках газосборника и в его выходном сечении, поля скорости внутри рассматриваемого канала и на выходе из него.

Показано, что при использованных для численного расчета расположениях горячих ядер, а также данных начальных и граничных условиях турбулентного течения на стенке газосборника образуется горячее «пятно», которое охватывает примерно 5% площади стенок. Температура пятна составляет 1520 К. В области горячего «пятна» значение тем-

пературы превосходит среднюю температуру остальной поверхности исследуемого объекта примерно на 200 градусов. Сильная асимметрия поля температуры связана с тем, что ядра на входах расположены несимметрично.

Полученная картина распределения скорости на выходе из газосборника демонстрирует области повышенной скорости в двух местах, где скорость достигает 881 м/с. Число Маха в этих зонах достигает $M = 1.3$. Таким образом, наблюдается образование двух сверхзвуковых областей. Зоны наиболее низкой температуры совпадают с зонами повышенной скорости.

В наиболее удаленной от рукавов подачи зоне, находящейся на поверхности выходного сечения, наблюдается сильное падение скорости. Установлено, что скорость в этой зоне составляет 48.6 м/с.