

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ НА ТОРЦЕВЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ СОПЛОВЫХ АППАРАТОВ ТУРБИН

Стремление к дальнейшему повышению тягово-экономической эффективности современных газотурбинных установок привело к созданию высокоперепадных и высокотемпературных газовых турбин. При проектировании таких турбин отношение высоты лопаток h к шагу их установки в лопаточных венцах t уменьшается и при температуре газа на входе в турбину $T_{г}^* = (1500...1700) \text{ К}$ относительная высота лопаток $\bar{h} = h/t$ становится ≤ 1 . В этом случае в межлопаточных каналах сопловых аппаратов имеет место сложное трехмерное вихревое течение, которое занимает практически все сечение канала. На рис. 1 показана структура вторичных течений в соответствии с данными [1].

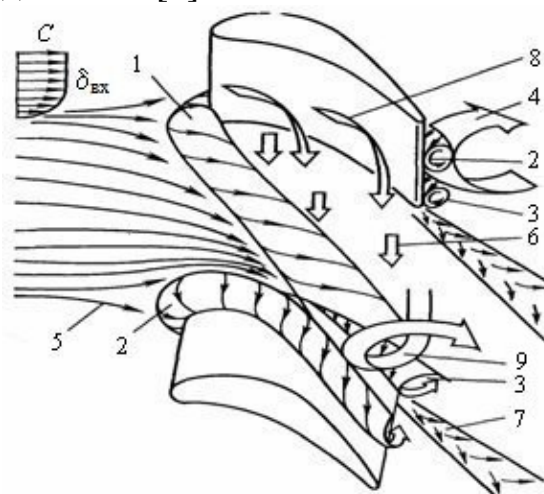


Рисунок 1 – Структура вторичных течений в сопловом аппарате газовой турбины: 1, 2 – ветви подковообразного вихря; 3 – угловой вихрь; 4 – канальный вихрь; 5 – линии тока; 6 – поперечные течения; 7 – вихревая пелена; 8 – стекание линий тока; 9 – натекание линий тока

В настоящее время около 60% омываемой газом площади лопаточных венцов турбины приходится на торцевые поверхности межлопаточных каналов. Очевидно, что: уменьшение \bar{h} ведет к увеличению доли площади торцевой поверхности лопаточных венцов, а стремление к увеличению $T_{г}^*$ требует всё более эффективной её тепловой защиты; выигрыш от повышения $T_{г}^*$ будет тем больший, чем меньше будут потери энергии на охлаждение. Проблему существенной противоречивости требований при проектировании систем охлаждения горячих частей турбины необходимо решать путём оптимизации способов их охлаждения и конструирования, а также путём внедрения надежных методик расчета граничных условий теплоотдачи торцевых поверхностей межлопаточных каналов.

Анализ последних достижений и публикаций. Исследования [1...3] показывают, что торцевые стенки имеют значительную неравномерность локальных коэффициентов теплоотдачи α . Это обусловлено наличием пространственного пограничного слоя и влиянием вторичных течений. Отдельные аспекты теплообмена около торцевой поверхности рассмотрены в работах [2, 3]. В этих работах нет общей методики расчёта граничных условий теплоотдачи на торцевых поверхностях сопловых аппаратов турбин в условиях интенсивных вторичных течений, что делает результаты этих работ малопригодными для разработки и проектирования систем их тепловой защиты.

Цель и постановка задачи. В настоящей работе предложен способ определения локальных коэффициентов теплоотдачи на торцевых поверхностях сопловых аппаратов турбин при отношении $\bar{h} \leq 1,0$ и различной толщине пограничного слоя на входе в лопаточный венец.

Результаты исследования. Анализ подобия выполнен для условий стационарного теплообмена; критерии подобия определены методом приведения уравнений к безразмерному виду; использована система криволинейных координат Мэйджера (см. рис. 2).

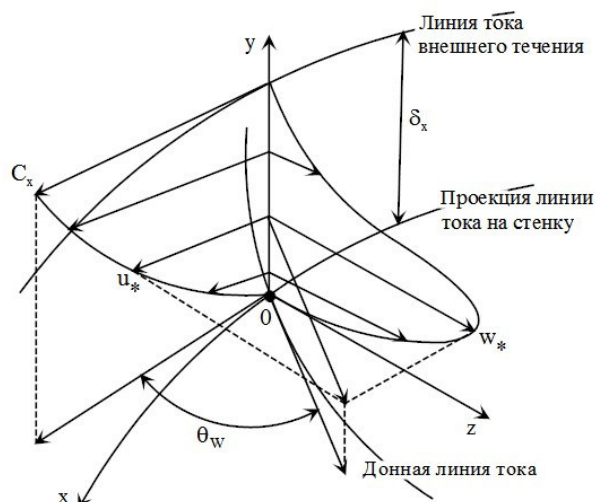


Рисунок 2 – Система координат и профиль скорости трёхмерного пограничного слоя

Приняты обозначения: p , T_f – давление и температура в ядре потока газа; T_w – температура стенки; C – скорость потока на внешней границе пограничного слоя; u , v , w – проекции вектора скорости C на оси криволинейной системы координат; ρ – плотность газа в ядре потока. За масштаб длины выбрана хорда профиля b_0 , скорости отнесены к среднерасходной скорости на входе в объект исследования C_1 , температуры к температуре на входе T_{f1} , давления – к удвоенному динамическому напору $\rho_1 \cdot c_1^2$. Безразмерные величины отмечены чертой сверху, например: $\bar{u} = u/c_1$; $\bar{x} = x/b_0$; $\bar{c} = c/c_1$ и т.д.

Анализ системы дифференциальных уравнений и условий однозначности показывает, что структура критериального уравнения, описывающего

локальный стационарный конвективный теплообмен на торцевых поверхностях сопловых аппаратов турбин, имеет вид

$$Nu = f \left(Re, Pr, \operatorname{tg} \theta_w, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}}, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}}, \frac{\bar{z}}{\bar{R}}, \frac{T_w}{T_f}, \frac{T_f^*}{T_f} \right), \quad (1)$$

где Nu , Re , Pr – локальные числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; $\operatorname{tg} \theta_w$ – критерий характеризующий степень “закрученности” профиля скорости пространственного пограничного слоя (i_w – угол отклонения продольной составляющей скорости \bar{u} от направления \bar{c} при $y \rightarrow 0$, см. рис. 2); $1/\bar{\rho} \cdot (\partial \bar{p} / \partial \bar{x})$, $1/\bar{\rho} \cdot (\partial \bar{p} / \partial \bar{z})$ – критерии отражающие влияние на теплообмен продольного и поперечного градиентов давления; \bar{z}/\bar{R} – критерий учитывающий изменение кривизны линий тока внешнего течения по ширине канала; T_w/T_f и T_f^*/T_f – комплексы, отражающие влияние неизотеричности и сжимаемости течения.

Модельные исследования газодинамики и теплообмена на торцевых поверхностях, организованы так, чтобы исключить влияние ряда факторов, входящих в функциональную зависимость (1). Эксперименты проведены в квазиизотермических условиях и в диапазоне чисел Маха, исключаящем влияние сжимаемости потока. Поэтому в модельных исследованиях из (1) можно исключить комплексы: T_f^*/T_f и T_w/T_f . Кроме того, хорошо известна критериальная зависимость безразмерного коэффициента теплоотдачи Nu_o плоской гладкой поверхности, находящейся в безградиентном квазиизотермическом потоке газа, от чисел Рейнольдса Re и Прандтля Pr :

$$Nu_o = 0,0296 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43}, \quad (2)$$

здесь Nu_o , Re – локальные числа Нуссельта и Рейнольдса.

Уравнение (2) позволяет учесть влияние на теплообмен чисел Re и Pr , и тем самым сократить степень неопределенности функциональной зависимости (1). Вдоль средней линии канала критерий \bar{z}/\bar{R} отсутствует в (1), поэтому для неё можно записать

$$\frac{Nu}{Nu_o} = f \left(\operatorname{tg} \theta_w, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}}, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} \right). \quad (3)$$

При изучении процесса теплоотдачи на торце в области вогнутой и выпуклой поверхности профиля в правую часть зависимости (3) необходимо ввести критерий \bar{z}/\bar{R}

$$\frac{Nu}{Nu_o} = f \left(\operatorname{tg} \theta_w, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}}, \frac{1}{\bar{\rho}} \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}}, \frac{\bar{z}}{\bar{R}} \right). \quad (4)$$

Таким образом, при обобщении опытных данных по теплообмену на торцевых поверхностях сопловых аппаратов в критериальное уравнение теплообмена на пластине (2) необходимо вводить дополнительные критерии, учитывающие воздействие на теплообмен продольного и поперечного градиентов давления, вторичных течений и изменение кривизны линий тока внешнего течения по ширине канала. Комплекс $1/\bar{\rho} \cdot (\partial \bar{p} / \partial \bar{x})$, можно заменить,

используя метод эффективной длины. Согласно [4] целесообразно пользоваться относительной эффективной длиной, поскольку она не зависит от условий на входе в объект исследования. Если принять за характерные величины скорости и плотности их среднемассовые значения на входе в межлопаточный канал, а в качестве характерной длины хорду профиля, то можно записать:

$$\bar{x}_{\text{эфф}} = \frac{x_{\text{эфф}}}{x} = \frac{\int_0^{\bar{x}} \bar{\rho} \cdot \bar{c} \cdot d\bar{x}}{\bar{\rho} \cdot \bar{c} \cdot \bar{x}}, \quad (5)$$

где x – текущее значение продольной криволинейной координаты.

Из рис. 2 следует, что при $y = \delta$, $\bar{u} = \bar{c}$, тогда

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{z}} = \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{c}^2 \cdot b_0}{R}, \quad (6)$$

где $(\bar{\rho} \cdot \bar{c}^2 \cdot b_0)/R$ – безразмерная центробежная сила, действующая на частицы жидкости и уравновешивающая поперечный градиент давления на внешней границе пограничного слоя; δ – толщина пограничного слоя; b_0/R – относительная кривизна характерных линий исследуемой поверхности.

Влияние вторичных течений учитывает критерий $\text{tg}\theta_w$, величина которого отражает степень пространственности потока. Кроме того, на теплоотдачу торцевой поверхности в области вогнутой и выпуклой стенок профиля, оказывает влияние дополнительный фактор, обусловленный канальным вихрем. Суть его влияния проявляется в эффектах “вдува” потока в пограничный слой у вогнутой стенки, и “отсоса” у выпуклой. Эти дополнительные эффекты в области вогнутой и выпуклой стенок профиля учитываются критерием \bar{z}/\bar{R} .

При изменении высоты канала и толщины пограничного слоя на входе, очевидно, интенсивность вторичных течений меняется. Кроме того, при изменении высоты профилей имеет место нарушение геометрического подобия объектов исследования. Поэтому критерий \bar{z}/\bar{R} необходимо использовать в виде $d_{\text{экв}}/R$. Здесь $d_{\text{экв}} = 4F/\Pi$ – эквивалентный диаметр канала; F , Π – текущее значение площади и периметра поперечного сечения канала; R – текущий радиус кривизны характерных линий канала. Площадь и периметр можно определить по формулам:

$$F = L_{\text{экв}} \cdot h; \quad \Pi = 2 \cdot (L_{\text{экв}} + h), \quad (7)$$

где $L_{\text{экв}}$ – текущая длина эквипотенциали; h – высота канала.

Таким образом, неопределённость уравнений (3), (4) сводится к выявлению степени влияния критериев (5), (6), $\text{tg}\theta_w$ и $d_{\text{экв}}/R$ на теплоотдачу к торцевой поверхности. Степень влияния каждого из этих факторов можно найти при неизменных остальных критериях. В соответствии с (3), (4) могут быть получены уравнения подобия. При их записи необходимо использовать

принцип суперпозиции отдельных воздействий. С учетом этого принципа критериальное уравнение для средней линии канала примет вид

$$Nu = Nu_0 \cdot \epsilon_R \cdot \epsilon_B \cdot \epsilon_F . \quad (8)$$

В области вогнутой и выпуклой стенок профиля критериальное уравнение записывается как:

$$Nu = Nu_0 \cdot \epsilon_R \cdot \epsilon_B \cdot \epsilon_F \cdot \epsilon_*, \quad (9)$$

где ϵ_R , ϵ_B , ϵ_F , ϵ_* – степенные функции, учитывающие влияние кривизны линий тока, пространственности течения, продольного градиента давления, эффектов в области вогнутой и выпуклой стенок профиля, соответственно.

Аналитические выражения функций имеют вид:

$$\epsilon_R = \left(1 + \frac{\bar{\rho} \cdot \bar{c}^2 \cdot b_0}{R} \right)^n; \quad \epsilon_B = (1 + \operatorname{tg} \theta_w)^m;$$

$$\epsilon_F = \left(\frac{\int_0^{\bar{x}} \bar{\rho} \cdot \bar{c} \cdot d\bar{x}}{\bar{\rho} \cdot \bar{c} \cdot \bar{x}} \right)^k; \quad \epsilon_* = \left(1 + \frac{d_{\text{экр}}}{R} \right)^s,$$

где n , m , k , s – константы.

Вид функций выбран из условия отсутствия их влияния на уравнение подобия при отсутствии учитываемых ими факторов в данном месте поверхности. Локальные значения газодинамических и тепловых величин, необходимые для расчета функций ϵ_R , ϵ_B , ϵ_F , ϵ_* и Nu/Nu_0 в заданном диапазоне изменения граничных условий, требуется определить опытным путем.

Литература

1. Сивердинг, С.Н. Современные достижения в исследовании основных особенностей вторичных течений в каналах турбинных решеток / С.Н. Сивердинг // Энергет. машины и установки. - 1985. - № 2. - С. 1 – 15.
2. Экспериментальное исследование теплообмена на торцевых поверхностях и лопатках в крупномасштабной турбинной решетке / М.Ф. Блэр, Р.А. Грациани, Ж.Р. Тэйлор, Р.Е. Мэйл // Энергет. машины и установки. - 1980. - № 2. - С. 29 – 39.
3. Исследование локального теплообмена на торцевой поверхности модели соплового аппарата / А.А. Халатов, К.И. Капитанчук, А.С. Коваленко, А.Н. Труфанов // Изв. вузов. Авиационная техника. - 1986. - № 2. - С. 68 – 80.
4. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учеб. для авиационных специальностей вузов / В.С. Авдуевский, Б.М. Галицейский, Г.А. Глебов и др.; под общ. ред. В.С. Авдуевского, В.К. Кошкина. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 528 с.