

В. Н. Голощапов, канд. техн. наук, Ю. О. Бахмутская, аспирант (Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, г. Харьков, Украина)

Граничные условия теплообмена во впадинах уплотнений ступенчатого типа

Разработан алгоритм определения коэффициентов теплоотдачи на поверхностях переднего концевго уплотнения паровой турбины с учетом турбулентных пульсаций в полуограниченной струе. Из сопоставления относительных значений коэффициентов теплоотдачи на поверхностях впадины, полученных на основании расчетных и экспериментальных исследований, найдены характерные точки, которые являются границами зон формирования различных структур течения рабочего тела.

Ключевые слова: коэффициент теплоотдачи, ступенчатое уплотнение, турбулентность струи, граничные условия, полуограниченная струя.

Розроблено алгоритм визначення коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях переднього кінцевого ущільнення парової турбіни з урахуванням турбулентних пульсацій у напівобмеженому струмені. Из зіставлення відносних значень коефіцієнтів тепловіддачі на поверхнях впадини, отриманих на базі розрахункових та експериментальних досліджень, знайдено характерні точки, котрі є границями зон формування різних структур течії робочого тіла

Ключові слова: коефіцієнт тепловіддачі, ступінчаті ущільнення, турбулентність струменя, граничні умови, напівобмежений струмінь.

An algorithm for determining the heat transfer coefficient on the surfaces of the front-end seal of the steam turbine with taking into account the turbulent pulsations in the semi-restricted jet is developed. After the comparison of the relative values of heat transfer coefficients on the surfaces of cavities which are obtained on the basis of theoretical and experimental studies the reference points were obtained, which are the boundaries of the zones forming different structures of the working fluid flow.

Keywords: heat transfer coefficient, step seal, jet turbulence, boundary conditions, semi-restricted jet

Актуальность темы

В настоящее время определение коэффициентов теплоотдачи (КТО) на поверхностях сложной формы возможно путем решения сопряженной задачи теплообмена с привлечением современных методов численного моделирования [1]. Но оказалось, что для ступенчатых уплотнений результаты, полученные с использованием программных комплексов для расчета вязкого течения рабочей среды, не совпадают с результатами физического моделирования.

На рис. 1 приведена схема элемента ступенчатого уплотнения паровой турбины, включающая два выступа с короткими гребнями и впадину с длинным гребнем. Поверхности гребней и впадины формируют щель высотой $S_{ш}$, из которой вытекает полуограниченная струя, находящаяся в окружении вихревых зон с высокой степенью турбулентности. Из сопоставления относительных значений КТО на торцевой поверхности впадины, перпендикулярной течению полуограниченной струи, полученных на осно-

вании данных расчетных [2] и экспериментальных [3] исследований видно, что $\bar{\alpha}_i$ по высоте выступа уплотнения существенно различаются. Так, максимальное значение $\bar{\alpha}_{i,max}$ в экспериментальном иссле-

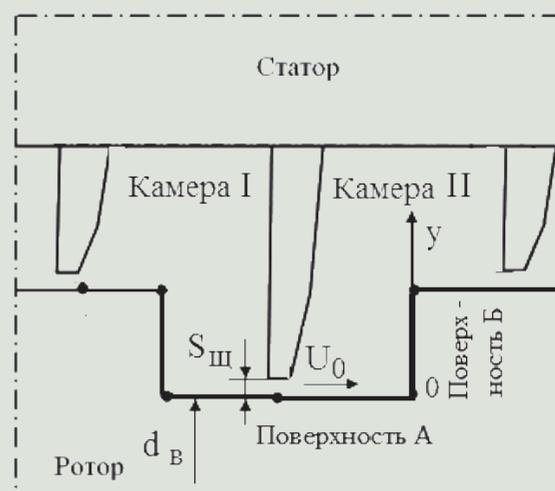


Рис. 1. Схема камеры ступенчатого уплотнения

довании находится в области $0,25 \leq \bar{y} \leq 3,0$, а в расчетном исследовании – в области $3,0 < \bar{y} \leq 7,0$.

Постановка задачи исследований

Приведенные на рисунке 2 данные свидетельствуют о том, что физические процессы, происходящие в уплотнениях, не полностью отображаются в математических моделях, построенных на основе уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу и использующих для замыкания системы модели турбулентности $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и другие. При получении решения не учитываются турбулентные пульсации скорости, влияние которых на уровень КТО отражается в экспериментальном исследовании. Этим объясняется необходимость разработки методологического подхода определения КТО, основанного на анализе сопоставления результатов экспериментальных и расчетных исследований.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности камеры уплотнения, перпендикулярной течению струи

Подробно механизм формирования коэффициентов теплоотдачи на поверхностях ступенчатого уплотнения рассмотрен в работе [4]. В статье выделены две области течения струи на торцевой поверхности впадины ступенчатого уплотнения – область торможения струи (1), где влияние пульсационной составляющей скорости существенно, и область течения полуограниченной струи вдоль поверхности (2), т. е. область установившегося течения (рис. 3).

Выступы и впадины на роторе в ступенчатом уплотнении могут быть представлены как сочетание плоских поверхностей. Для определения КТО на этих поверхностях можно использовать критериальное уравнение вида [5]

$$Nu = K \cdot Re^n \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{S_{uz}}{H} \right)^m,$$

где $Nu = \frac{\alpha \cdot S_{uz}}{\lambda}$ – число Нуссельта; $Re_{uz} = \frac{U_0 \cdot S_{uz}}{\nu}$ – число Рейнольдса; K – коэффициент пропорциональности, зависящий от формы поверхностей; Pr – число Прандтля; S_{uz} – геометрический размер щели; H – расстояние от среза щели до торцевой стенки.

Результаты обработки экспериментальных данных течения полуограниченной струи, контактирующей на внешней границе с развитым вихрем, позволили получить показатели степени равные $n = 0,65$, $m = 0,5$.

Коэффициент пропорциональности, обеспечивающий привязку результатов экспериментального и расчетного исследований в области установившегося течения приведен на рис. 4.

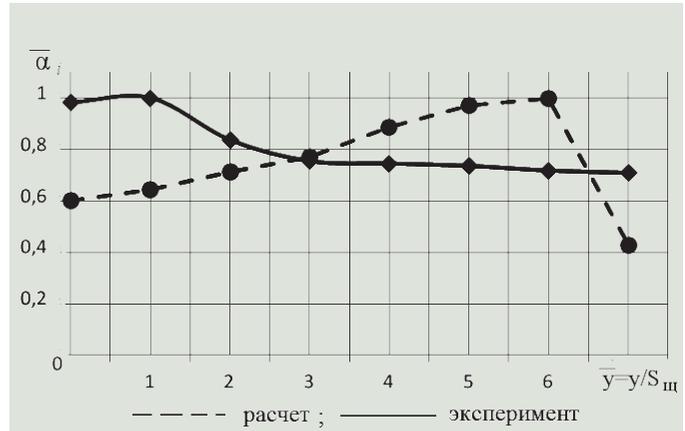


Рис. 2. Относительные значения КТО, полученные расчетно и экспериментально

Так как в ступенчатом уплотнении при движении струй в окружении вихревых течений степень турбулентности основного течения не определена, то для использования результатов расчетного определения КТО целесообразно принять значение α в точке, в которой наблюдается совпадение расчетных и экспериментальных значений. В качестве такой точки следует принять граничную точку $y_{гр}$ (рис. 3), которая разделяет область 1 и область 2. Критериальное уравнение для этой точки может быть представлено в виде

$$Nu_{zp} = 0,37 \cdot Re_{uz}^{0,65} \cdot Pr^{0,43} \cdot (\bar{H})^{-0,5}, \quad (1)$$

где $Nu_{zp} = \frac{\alpha_{zp} \cdot S}{\lambda}$; $Re_{uz} = \frac{U_0 \cdot S}{\nu}$; $U_0 = \frac{G \cdot v}{\pi \cdot d_e \cdot S}$; $\bar{H} = \frac{H}{S}$;

$S = \varphi \cdot S_{uz}$ – размер струи на выходе из щели, м; φ – коэффициент сужения струи, для щели сформированной гребнем $\varphi = 0,85$; G – массовый расход пара

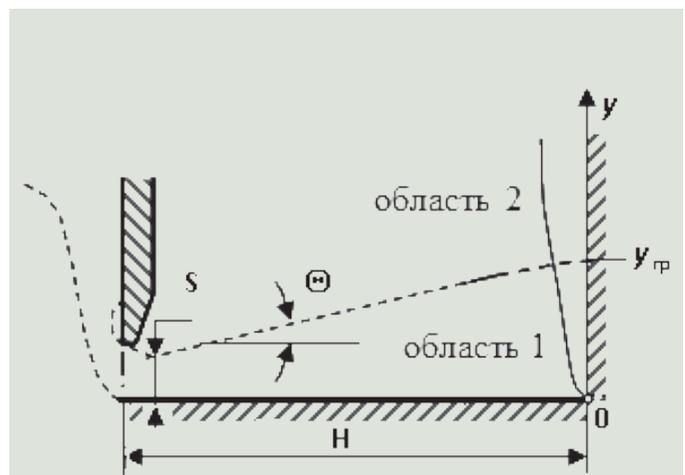


Рис. 3. Положение граничной точки между областями 1 и 2

через щель уплотнения, кг/с; v – удельный объем пара на срезе щели, определяемый по давлению и температуре в камере II (рис. 1); d_B – диаметр впадины уплотнения под рассматриваемым гребнем, м; λ – теплопроводность рабочего тела, Вт/(м²·К); ν – кинематическая вязкость рабочего тела, м²/с; H – расстояние от среза щели до стенки, м.

Критериальное уравнение (1) получено по результатам экспериментального исследования течения полугограниченной струи в угловой области камеры прямоугольной формы [6].

Граничная координата между областями 1 и 2 определяется следующим образом. При натекании струи на перпендикулярно расположенную плоскость и воздействию на неё вихря внешняя граница полугограниченной струи при расширении располагается под углом $\Theta \approx 23^\circ$ [6]. Из геометрического построения (рис. 3) положение точки $y_{ГР}$ может быть рассчитано по зависимости

$$y_{ГР} = S + H \cdot \operatorname{tg}\Theta. \quad (2)$$

Определение КТО в области 2 ($y_i > y_{ГР}$) установившегося течения полугограниченной струи вдоль поверхности с использованием критерия Nu_{sp} производится на основании соотношения

$$Nu_i = Nu_{sp} \cdot \left(\frac{\bar{y}_{sp}}{\bar{y}_i} \right)^{0,245}, \quad (3)$$

где $Nu_i = \frac{\alpha_i \cdot S}{\lambda}$; $\bar{y}_i = \frac{y_i}{S}$ – текущая относительная координата в области 2.

Коэффициент теплоотдачи в области 1 ($0 < y < y_{ГР}$) состоит из двух составляющих

$$\alpha_i = \alpha_{sp} + \Delta\alpha,$$

где α_{sp} – коэффициент теплоотдачи в граничной точке угр, который определяется на основании уравнения (1); $\Delta\alpha$ – изменение КТО при воздействии пульсационной составляющей скорости.

Пренебрегая незначительным снижением α_i в угловой точке, занятой локальным вихрем небольшого размера, изменение $\Delta\alpha$ в результате обработки экспериментальных данных может быть описано зависимостью вида

$$\Delta\alpha = \Delta\alpha_{\max} \left(a + b\bar{y} + c(\bar{y})^2 \right), \quad (4)$$

где $\bar{y} = \bar{y}/\bar{y}_{sp}$ и изменяется от 0 до 1,0. При $Re > 2 \cdot 10^4$ уравнение (4) аппроксимируется зависимостью

$$\Delta\alpha(\bar{y}) = \Delta\alpha_{\max} (1 - 0,35\bar{y} - 0,65\bar{y}^2), \quad (5)$$

где $\Delta\alpha_{\max}$ определяется как $\Delta\alpha_{\max} = \alpha_{\max} - \alpha_{sp}$.

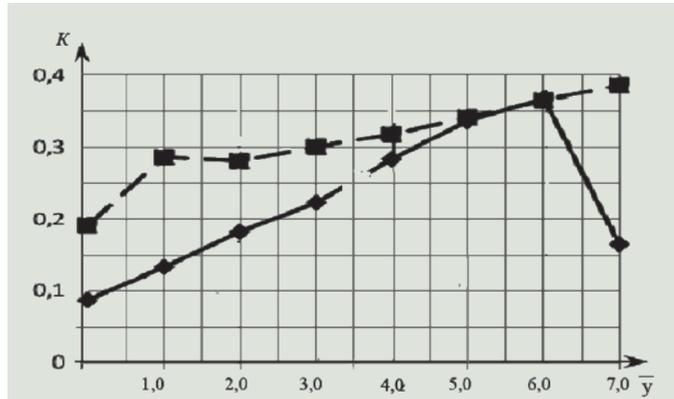


Рис. 4. Коэффициент пропорциональности для расчетных и опытных данных

Обработка опытных данных показала, что в исследованном диапазоне геометрических размеров и режимных параметров при натекании полугограниченной струи в прямой угол с последующим её поворотом отношение $a_{\max}/a_{ГР} \approx \text{const}$ и равно 1,32, т. е. $\Delta\alpha_{\max} = \alpha_{sp} \cdot \left(\frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{sp}} - 1 \right) = 0,32 \cdot \alpha_{sp}$.

Коэффициент теплоотдачи на поверхности камеры уплотнения, вдоль которой движется полугограниченная струя

Струя, поступающая из щели под малым гребнем в камеру I (рис. 1), натекает на поверхность длинного гребня и вдоль него движется к поверхности впадины. Вблизи поверхности поток разворачивается на 90° и далее через щель под длинным гребнем формирует полугограниченную струю. Движение полугограниченной струи вдоль этой поверхности А с начальной скоростью U_0 турбулизует вращающимся в камере II вихрем и может быть рассмотрено как движение турбулентного потока вдоль плоской поверхности. В этом случае распределение КТО на поверхности А ступенчатого уплотнения описывается уравнением [5].

$$Nu_x = a \cdot Re_x^m \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25},$$

где $Nu_x = \frac{\alpha \cdot x}{\lambda_{cp}}$; $Re_x = \frac{U_0 \cdot x}{\nu_{cp}}$.

Определяющий размер x отсчитывается от среза щели, определяющая скорость U_0 , учитывая ограниченную длину поверхности А, принимается постоянной и равной среднерасходной скорости на срезе щели, физические свойства рабочей среды принимаются по ее температуре на входе в щель.

Локальные значения коэффициентов теплоотдачи на поверхности А в диапазоне $0 \leq x \leq x_{ГР}$

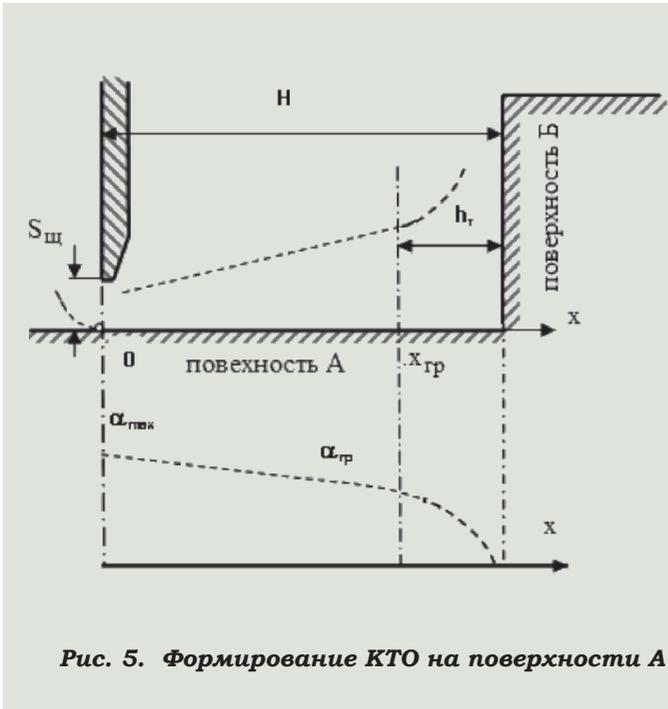


Рис. 5. Формирование КТО на поверхности А

($x_{гр}$ – граница зоны торможения, отсчитываемая от среза щели) могут быть рассчитаны на основании формулы

$$Nu_x = 0,03 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_{cp}}{Pr_{cm}} \right)^{0,25} \quad (6)$$

При натекании полуограниченной струи на поверхность Б (рис. 5) в угловой зоне возникает область торможения потока, в которой происходит повышение давления за счет уменьшения динамического напора. Граница области уменьшения скорости струи удалена от поверхности Б на расстояние $h_t = H - x_{гр}$.

Положение граничной координаты $x_{гр}$ может быть определено на основании зависимости $\bar{h}_t = 0,28 \cdot \bar{H}$, полученной по данным экспериментальных исследований, приведенным в [6], в интервале изменения $3 \leq \bar{H} \leq 10$.

$$\bar{x}_{гр} = \bar{H} - \bar{h}_t = \bar{H} - 0,28 \cdot \bar{H} = 0,72 \cdot \bar{H}, \quad (7)$$

где $\bar{h}_t = x_{гр} / S_{щ}$; $\bar{H} = H / S$.

В области торможения струи вблизи поверхности Б происходит уменьшение КТО (рис. 5), изменение которого может быть представлено зависимостью

$$\alpha_i = \alpha_{гр} \cdot \left(1 - \left(\frac{\bar{x}}{\bar{x}_{гр}} \right)^2 \right), \quad (8)$$

где $\alpha_{гр}$ – значение КТО в граничной точке $x_{гр}$, рассчитанное из уравнения (6); $\bar{x} = (x - x_{гр}) / (H - x_{гр})$ – текущая координата в области торможения между $x_{гр} \leq H \leq x$.

Выводы

Определив параметры полуограниченной струи, вытекающей из щели, образованной поверхностью впадины и гребнем ступенчатого уплотнения, по приведенным зависимостям рассчитываются значения КТО на поверхностях стенок ступенчатых уплотнений. Для этого из теплового расчета принимается расход рабочего тела (пара) через ступенчатое уплотнение, а из технической документации – геометрические размеры уплотнения. По параметрам рабочего тела определяется среднерасходная скорость истечения струи рабочего тела из щели уплотнения с учетом коэффициента её сужения, а также определяются числа $Re_{щ}$, Pr .

Полученные значения коэффициентов теплоотдачи точнее отображают физические процессы, происходящие в камерах уплотнений паровых турбин, поскольку учитывают турбулентные пульсации скорости рабочего тела, и, тем самым, дают возможность более достоверно оценить причины возникновения термических ударов, возникающих в угловых зонах ступенчатых уплотнений.

Список литературы:

1. Теплообмен в элементах конструкций паровых турбин / [Мацевитый Ю. М., Алехина С. В., Голощапов В. Н., Котульская О. В.]; под общей редакцией акад. НАН Украины Мацевитого Ю. М. – Институт проблем машиностроения НАН Украины. – Харьков, 2012. – 288 с.
2. Алехина С. В. Нестационарный теплообмен на поверхности роторов турбомашин в лабиринтовых уплотнениях / С. В. Алехина, В. Н. Голощапов, А. О. Костиков // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2007. – № 1 (7). – С. 100–102.
3. Оценка условий теплообмена в окрестности критической точки при натекании струи на преграду / [Ю. М. Мацевитый, В. А. Малярченко, В. Н. Голощапов, В. А. Барсуков] // Инженерно-физический журнал. – 1979. – Т. XXXVII. – № 2. – С. 23–36.
4. Голощапов В. Н. Методологический подход к определению коэффициентов теплоотдачи во впадинах уплотнений ступенчатого типа / [В. Н. Голощапов, О. В. Котульская, Ю. О. Бахмутская] // Компрессорное и энергетическое машиностроение. – 2015. – № 3 (41). – С. 32–36.
5. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
6. Теплообмен и газодинамика в камерах отбора паровых турбин / [В. А. Малярченко, В. А. Барсуков, В. Н. Голощапов, О. В. Котульская, О. Ю. Черноусенко]. – Киев: Наук. думка, 1991. – 304 с.