

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СОТОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ ТУРБИН

М. А. Шилин

*ФГБОУ ВПО «Брянский государственный
технический университет», Россия*

Научный руководитель В. Т. Буглаев

Уплотнения в проточной части турбомашин используются для снижения потерь от утечек рабочего тела через зазоры между элементами ротора и статора. В свою очередь, эффективность и надежность работы уплотнений определяются конструктивными, геометрическими и режимными параметрами, а также тепловым состоянием отдельных их элементов, например, бандажа и уплотнительных гребней ротора. Задевания элементов ротора за статор, выгорание тонкостенных элементов конструкции, коробление обечайки являются основными проблемами, возникающими в процессе эксплуатации и снижающими экономичность и надежность работы ГТД.

Во всем диапазоне использования лабиринтных уплотнений в проточной части турбомашин положительно зарекомендовали себя уплотнения с сотовой структурой. Применение сотовых уплотнений в проточной части осевых турбомашин представляется перспективным для осуществления мероприятий по уменьшению утечек рабочего тела, повышению надежности работы агрегата при возможном задевании вращающихся частей ротора за элементы статора. Также сотовая структура позволяет организовать в уплотнении завесное охлаждение для обеспечения допустимых величин тепловых нагрузок для ряда элементов ротора и статора.

Настоящая работа посвящена экспериментальному исследованию гидравлических сопротивлений и теплообмена в щелевом канале с сотовой структурой на одной из стенок в широком диапазоне режимных и геометрических параметров.

Для исследования гидродинамического сопротивления и теплообмена в канале с сотовой структурой была создана экспериментальная установка, газодинамический

тракт рабочего участка которой представлял собой канал прямоугольного сечения шириной $B = 60$ мм и длиной $L_0 = 230$ мм. Основными элементами рабочего участка являются сменные металлические пластины с напаянной сотовой структурой, имеющей 5 рядов по 14 ячеек в каждом. Геометрические характеристики экспериментальных моделей для исследования сопротивления щелевого тракта имели следующие значения: диаметр вписанной в ячейку окружности $d_{\text{я}} = 12$ мм, глубина ячейки $h_{\text{я}} = 2,4\text{--}15$ мм. Высота канала H изменялась от 6 до 12 мм за счет передвижения нижней стенки рабочего участка.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления λ_{Σ} использовалось уравнение Бернулли для сжимаемых потоков в дифференциальной форме, которое с учетом уравнения неразрывности и состояния после интегрирования для случая изотермического потока в канале постоянного сечения $F_{\text{к}}$ приобретает вид

$$\lambda_{\Sigma} = \left[\frac{\Delta p (p_{\text{вх}} + p_{\text{вых}})}{RT} \left(\frac{G}{F_{\text{к}}} \right)^{-2} - \ln \frac{p_{\text{вх}}}{p_{\text{вых}}} \right] \left(\frac{L}{d_{\text{г}}} \right)^{-1},$$

где G и $F_{\text{к}}$ – величина массового расхода воздуха и площадь поперечного сечения канала соответственно; L – длина контрольного участка канала; $d_{\text{г}}$ – гидравлический диаметр канала; R , T – газовая постоянная и температура рабочего тела; $p_{\text{вх}}$, $p_{\text{вых}}$ – давления рабочего тела на входе и выходе рабочего канала; $\Delta p = p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$ – изменение (потери) статического давления в потоке рабочего тела на контрольной длине L канала.

Во всем исследуемом диапазоне $Re_d = 10^4 - 10^5$ коэффициенты гидравлического сопротивления λ_{Σ} каналов с сотовой структурой при любых исследованных значениях $\bar{h} = h_{\text{я}} / d_{\text{я}}$ и $\bar{H} = H / d_{\text{я}}$ всегда превышают аналогичные коэффициенты сопротивления λ_0 в гладкостенных каналах, а также коэффициенты сопротивления для рельефов со сферическими углублениями. Степенью этого превышения является показатель интенсификации трения $\psi_{\lambda} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_0$ в условиях $Re_d = \text{idem}$, зависящий только от сочетаний параметров рельефа и канала (\bar{h} и \bar{H}).

Из полученных данных следует, что степень интенсификации сопротивления не прямо пропорциональна величине \bar{h} , а имеет максимум (при $\bar{h} = 0,3 - 0,45$), зависящий от величины относительного зазора \bar{H} . Особенно указанное явление заметно при малых зазорах ($\bar{H} = 0,5$), что объясняется усилившимся влиянием противоположной стенки на течение в канале и деформацией характерного для сотовой поверхности поля скоростей.

Для исследования теплообмена в канале с сотовой структурой и получения средних коэффициентов теплоотдачи использовался стационарный метод, при котором необходимо определить величину теплового потока $q = Q/F$ через исследуемую поверхность и перепад температур $\Delta \bar{t}$ между потоком и стенкой. При этом соблюдалось гидродинамическое подобие, условиями которого являются геометрическое подобие и равенство чисел Re в образце и модели.

На основе полученных экспериментальных данных были построены зависимости $Nu_d Pr^{-0,4} \bar{T}_w^{0,55} = f(Re_d)$ для различных геометрических параметров сотовой поверхности:

$$Nu_d = 2,21 \cdot 10^{-2} (1 + 4,53 \bar{h}^{0,88} / \bar{H}^{0,5}) Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_c^{-0,55} \text{ для } \bar{h} = 0,25 - 0,55;$$

$$Nu_d = 2,21 \cdot 10^{-2} (1 + 0,74 \bar{h}^{-2,30} / \bar{H}^{0,5}) Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_c^{-0,55} \text{ для } \bar{h} = 0,55 - 1,25.$$

Интенсификация гидравлического сопротивления в канале при относительной глубине сотовой структуры $\bar{h} = 0,3 - 0,6$ сопровождается наибольшим увеличением избыточного теплообмена $\psi_\alpha - 1$. Причиной этому могут являться интенсивное вихреобразование и изменение структуры течения в сотовых ячейках и пространстве зазора вблизи них, а также пульсации потока в ячейках. Дальнейшее увеличение относительной глубины сотовой структуры \bar{h} влечет за собой снижение теплоотдачи на сотовой поверхности. Это связано с тем, что поток из зазора не проникает вглубь более глубоких ячеек, при этом рабочее тело в пространстве ячеек у основания служит дополнительным термическим сопротивлением.

Результаты проведенных экспериментальных исследований позволят улучшить гидравлические характеристики сотовых уплотнений, а также интенсифицировать охлаждение на поверхности с сотовой структурой в случае вдува охлаждающего воздуха перед уплотнением.