

УДК 621.165

В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин, И.И. Усачев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЯМОТОЧНОГО СОТОВОГО УПЛОТНЕНИЯ ПРИ ВДУВЕ ОХЛАЖДАЮЩЕГО ВОЗДУХА

Экспериментально изучено влияние режимных и геометрических параметров на гидравлическое сопротивление и теплообмен в прямоточном сотовом уплотнении. Установлена связь между характером изменения степени интенсификации гидравлического сопротивления, теплообмена и вихревой структурой в пространстве ячеек. Исследовано влияние вдува охлаждающего воздуха через поверхность с сотовой структурой на теплогидравлические свойства уплотнения.

Ключевые слова: сотовое уплотнение, гидравлическое сопротивление, теплообмен, охлаждающий воздух, эффективность охлаждения, надёжность работы, срок службы, безопасная эксплуатация.

Одним из перспективных направлений развития турбостроения является повышение экономичности и надёжности работы турбоустановки за счет сокращения потерь энергии, связанных с утечками рабочего тела через различные зазоры между неподвижными и вращающимися деталями турбоагрегата, а также обеспечения необходимого температурного режима элементов проточной части.

В процессе эксплуатации турбоустановки вследствие нерасчетных силовых воздействий на ротор и статор турбины, термических расширений элементов проточной части, а также износа радиальные зазоры могут изменяться в значительных пределах. В авиадвигателестроении и последних конструкциях стационарных турбин в уплотнениях широко применяют сотовую поверхность, что позволяет достичь определенного положительного эффекта за счет снижения утечек рабочего тела и повышения надёжности работы уплотнения в случае касания элементов ротора и статора. Наилучший уплотнительный эффект может быть достигнут лишь при соблюдении оптимальных конструктивных параметров сотовой структуры и уплотнения в целом.

Сотовая поверхность также может быть использована в системе охлаждения газотурбинного двигателя для подачи в сотовое уплотнение охлаждающего воздуха с целью уменьшения температуры элементов уплотнения и периферийной части рабочих лопаток [4]. При этом существенное влияние на гидравлические характеристики уплотнения и эффективность охлаждения его поверхностей при подаче охлаждающего теплоносителя оказывают режим течения и конструктивные параметры сотовой структуры. Поэтому исследование гидравлического сопротивления и теплообмена в сотовом уплотнении, а также эффективности охлаждения поверхностей канала уплотнения в случае подачи охлаждающего воздуха является актуальной задачей и представляет практический интерес.

Аналитический обзор работ [1;4-8], выполненных на базе ЦКТИ, ЦИАМ, БИТМ, МЭИ и посвященных экспериментальным и численным исследованиям аэродинамических характеристик сотовых уплотнительных устройств и теплообменных процессов в них, в том числе при организации охлаждения теплонапряженных элементов в проточной части высокотемпературных газовых турбин, позволил установить, что по эффективности и надёжности работы сотовые уплотнения, допускающие контакт сопряженных поверхностей ротора и статора без разрушения конструкции, имеют определенные преимущества перед классическими лабиринтными, чем обуславливается перспективность их использования.

Анализ рассмотренной информации показывает, что проблема повышения экономичности и надёжности работы турбомашин путем уменьшения величин зазоров в проточной части требует как совершенствования конструкций самих уплотнительных устройств, так и учета их теплогидравлических характеристик и эксплуатационных факторов. Однако обзор опубликованных работ по сотовым уплотнениям обнаруживает противоре-

чивость части результатов исследований. Это обстоятельство, а также недостаток данных о физической сущности процессов, протекающих в каналах с сотовой поверхностью, указывают на необходимость дальнейших исследований особенностей течения и теплообмена в таких каналах.

Настоящие исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в статических моделях уплотнений выполнялись на экспериментальном стенде (рис. 1), в рабочем участке которого монтировались испытываемые модели сотовой поверхности.

Экспериментальная установка состоит из участка стабилизации, рабочего участка (канала с сотовой структурой), расходомерного участка, системы прокачки рабочего тела, системы нагрева опытных образцов, системы измерений. Система прокачки рабочего тела обеспечивала массовый расход воздуха через экспериментальный участок $G_{общ} = 0,007 \dots 0,08$ кг/с. При экспериментальном исследовании влияния вдува охлаждающего воздуха через сотовую поверхность система нагрева опытных образцов заменялась на систему подачи охлаждающего воздуха, обеспечивающую массовый расход $G_{охл} = 0 \dots 0,016$ кг/с (рис. 2).

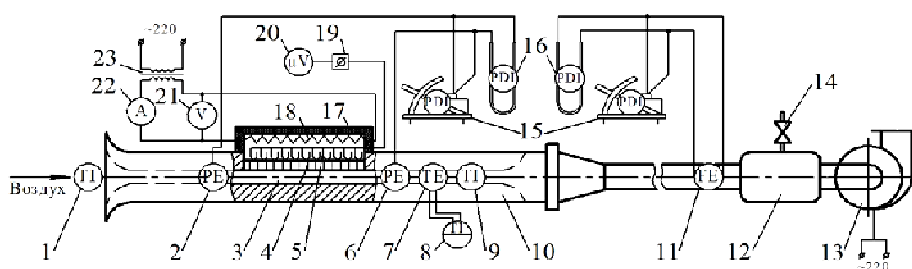


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования гидравлического сопротивления и теплообмена в сотовом уплотнении: 1 – термометр ртутный ТЛ-4; 2 – отборы статического давления на входе в рабочий участок ($p_{вх}$); 3 – канал с сотовой структурой (рабочий участок); 4 – сотовая структура; 5 – набор термопар; 6 – отборы статического давления на выходе из рабочего участка ($p_{вых}$); 7 – термометр сопротивления; 8 – мост постоянного тока МО-62 с наружным гальванометром М 195/3; 9 – термометр ртутный ТЛ-4; 10 – аэродинамическая труба; 11 – расходомерное устройство (диафрагма); 12 – ресивер; 13 – вентилятор низкого давления; 14 – перепускной клапан; 15 – микроманометр ММН-250; 16 – водяной дифманометр; 17 – теплоизоляция; 18 – электрический нагревательный элемент; 19 – блок переключения термопар; 20 – потенциометр ПП-63; 21 – вольтметр; 22 – амперметр; 23 – регулятор напряжения ЛАТР 1М 220V 9А

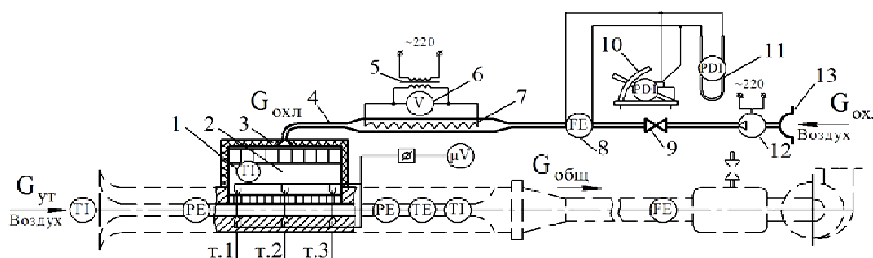


Рис. 2. Функциональная схема экспериментальной установки для исследования влияния вдува охлаждающего воздуха в сотовое уплотнение: 1 – термометр ртутный ТЛ-4; 2 – ресивер; 3 – теплоизоляция; 4 – труба подвода вдуваемого воздуха; 5 – регулятор напряжения ЛАТР 1М 220V 9А; 6 – вольтметр; 7 – электрический нагревательный элемент; 8 – расходомерное устройство (сопло); 9 – регулирующий клапан; 10 – микроманометр ММН-250; 11 – водяной дифманометр; 12 – объемный компрессор; 13 – входное устройство; т.1, т.2, т.3 – места установки термопар

Для проведения экспериментов был изготовлен набор моделей – пластин с напаянной сотовой структурой различной глубины ($h_{я} = 2,4 \dots 24,0$ мм), каждая из которых содержала 5 рядов по 14 сотовых ячеек с диаметром вписанной окружности $d_{я} = 12$ мм. Высота рабочего канала $H = 6 \dots 12$ мм регулировалась при помощи калиброванных пластин-прокладок, устанавливаемых между опорными поверхностями экспериментальной установки и опытных образцов (рис. 3).

В расчетах использовались следующие геометрические комплексы: $\bar{h} = h_{я} / d_{я}$ – относительная глубина сотовых ячеек; $\bar{H} = H / d_{я}$ – относительная высота канала сотового уплотнения.

В случае проведения экспериментальных исследований влияния подачи охлаждающего воздуха через поверхность с сотовой структурой на гидравлическое сопротивление и эффективность охлаждения поверхностей канала сотового уплотнения в сотовых пластинах выполнялась система отверстий, за счет чего обеспечивался равномерный по всей площади сотовой структуры вдув охлаждающего воздуха в канал уплотнения перпендикулярно основному потоку рабочего тела (рис. 4).

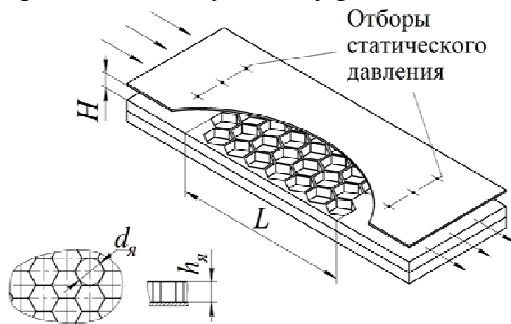


Рис. 3. Схема канала с сотовой структурой на одной из стенок

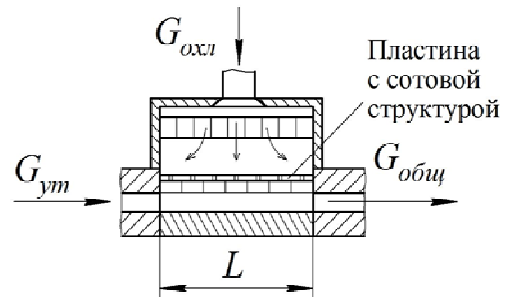


Рис. 4. Схема рабочего участка с системой подачи охлаждающего воздуха

Целью первого этапа исследований [2] являлось изучение влияния геометрических параметров сотовой структуры и режима течения на гидравлическое сопротивление в канале, измеряемое как разность статических давлений до и после рабочего участка. Пластины с сотовой структурой, формирующие щелевой тракт, препарировались отборами статического давления p потока в двух фронтальных сечениях канала: на расстоянии $20 \cdot 10^{-3}$ м до начала контрольного участка длиной $L = 0,17$ м ($p_{вх}$) и на выходе из него на расстоянии $20 \cdot 10^{-3}$ м ($p_{вых}$).

Для расчета коэффициента гидравлического сопротивления использовалась зависимость $\lambda_{\Sigma} = 2\Delta p \rho (G / F_{\kappa})^{-2} (L / d_c)^{-1}$, где G – массовый расход рабочего тела; F_{κ} – площадь поперечного сечения канала; L – длина контрольного участка канала; d_c – гидравлический диаметр канала; ρ – плотность рабочего тела; $\Delta p = p_{вх} - p_{вых}$ – изменение (потери) статического давления в потоке рабочего тела на контрольной длине L канала. На основании проведенных экспериментальных исследований модельных и гладкостенных каналов рассчитывалась степень интенсификации гидравлического сопротивления $\psi_{\lambda} = \lambda_{\Sigma} / \lambda_0$ и формировались зависимости $\psi_{\lambda} = f(\bar{h}; \bar{H})$; $\lambda_{\Sigma} = 0,018 \psi_{\lambda} (\lambda_0 - \text{коэффициент гидравлического сопротивления в гладкостенной модели})$.

Второй этап экспериментальных исследований [3] был посвящен определению характеристик теплообмена в канале с сотовой структурой. Использовался стационарный

метод, при котором определялись величина теплового потока $q = Q_{\Sigma}/F$ через исследуемую поверхность и перепад температур $\Delta\bar{t}$ между потоком и стенкой.

Исследования теплообмена выполнялись в условиях постоянства теплового потока через поверхность опытного образца $q_c \geq 1,5 \cdot 10^4$ Вт/м² и температурного фактора $\bar{T}_c = T_c/T_n \leq 1,4$ (T_c, T_n – средние температуры стенки и потока соответственно). В качестве рабочего тела использовался осушенный воздух.

По данным экспериментальных исследований модельных и гладкостенных каналов рассчитывалась степень интенсификации теплообмена $\psi_{\alpha} = Nu_d / Nu_{d0}$ и формировались зависимости $\psi_{\alpha} = f(\bar{h}; \bar{H})$; $Nu_d = 2,21 \cdot 10^{-2} \psi_{\alpha} Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_c^{-0,55}$ (при $X/H \geq 20$) (Nu_{d0} – критерий Нуссельта для гладкостенных моделей).

На основании результатов первого и второго этапов исследования рассчитана энергетическая эффективность $\bar{\psi} = \psi_{\lambda} / \psi_{\alpha}$ применения сотовой структуры в прямоугольном канале и сопоставлена с аналогичными параметрами других интенсификаторов теплообмена.

Третий этап исследований состоял в изучении влияния геометрических параметров сотовой структуры и канала уплотнения, а также количества вдуваемого охлаждающего воздуха на величину гидравлического сопротивления λ_{Σ} в канале и эффективность охлаждения его поверхностей.

В экспериментальных исследованиях в качестве обоих теплоносителей использовался воздух, в результате чего стало возможно выполнить эксперимент зеркально («охлаждающий» воздух являлся горячим теплоносителем). Основным теплоносителем подавался в осевом направлении, охлаждающий воздух – через систему отверстий в пластине с сотовой структурой перпендикулярно к направлению движения основного потока. В процессе опытов варьировалась величина расхода охлаждающего воздуха, чем обуславливалось изменение тепловых режимов. Постоянство температуры охлаждающего теплоносителя $t_{охл}$ при различных значениях его расхода $G_{охл}$ обеспечивалось изменением количества подводимой к нему теплоты.

Результаты экспериментальных исследований эффективности охлаждения поверхностей сотового уплотнения представлены в виде зависимости глубины охлаждения $\Theta = (T_{осн} - T_{изм}) / (T_{осн} - T_{охл})$ от коэффициента вдува $m = G_{охл} / G_{общ}$, где $T_{изм}$ – измеряемая температура поверхности канала, К; $T_{охл}$ – температура охлаждающего воздуха, К; $T_{осн}$ – температура основного потока (в отсутствие вдуваемого охлаждающего воздуха), К; $G_{охл}$ – массовый расход охлаждающего воздуха, кг/с; $G_{общ} = G_{ум} + G_{охл}$ – общий массовый расход рабочего тела через сотовое уплотнение, кг/с.

Выполненные испытания экспериментальных моделей с различной относительной глубиной ячеек ($\bar{h} = 0,2 \dots 2,0$) показали, что размещение сотовой поверхности на одной из стенок канала сотового уплотнения неизбежно приводит к увеличению коэффициента гидравлического сопротивления λ_{Σ} при любых исследованных значениях геометрических параметров сотовой структуры (\bar{h}) и канала (\bar{H}) по сравнению с аналогичными характеристиками для гладкостенных моделей во всем исследованном диапазоне чисел $Re_d = \rho \bar{W} d_c / \mu$ (\bar{W} – среднерасходная скорость воздуха в рабочем участке; ρ – плотность воздуха в рабочем участке; μ – динамический коэффициент вязкости при средней темпе-

ратуре воздуха; $d_2 = \frac{4F_k}{\Pi} = 2H$ – гидравлический диаметр; F_k – площадь поперечного сечения канала; Π – смоченный периметр).

С учетом результатов предварительных опытов и данных из работ других авторов более детальные экспериментальные исследования гидравлического сопротивления и теплообмена, а также математическая обработка полученных данных были проведены для моделей при следующих значениях безразмерных геометрических комплексов: $\bar{h} = 0,2 \dots 1,0$ ($\bar{h} = 0,2 \dots 1,25$ в случае исследования теплообмена); $\bar{H} = 0,5 \dots 1,0$. Согласно результатам экспериментов, в указанном интервале геометрических параметров сотового уплотнения эффекты интенсификации гидравлического сопротивления и теплообмена имеют наибольшие значения-экстремумы, значительно снижаясь в дальнейшем.

Полученная зависимость величины избыточного гидравлического сопротивления от относительной глубины сотовой структуры $\psi_\lambda - 1 = f(\bar{h}^{n_h})$ в интервале $\bar{h} = 0,2 \dots 1,0$ при $\bar{H} = idem$ имеет два характерных участка (рис. 5). В интервале $\bar{h} = 0,2 \dots 0,42$ происходит монотонное увеличение степени интенсификации, которая достигает наибольших значений при $\bar{h} = 0,42$ ($n_h = 0,42$).

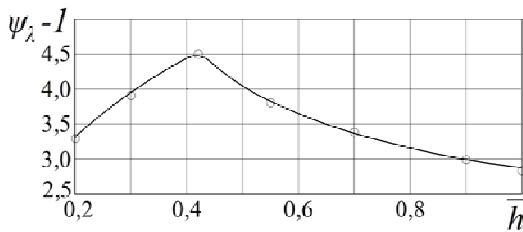


Рис. 5. Влияние относительной глубины \bar{h} сотовой структуры на степень интенсификации гидравлического сопротивления в канале с относительной высотой $\bar{H} = 1,0$

Дальнейшее повышение относительной глубины ячеек в интервале $\bar{h} = 0,42 \dots 1,0$ характеризуется уменьшением гидравлического сопротивления ($n_h = -0,5$). Зависимость избыточного гидравлического сопротивления $\psi_\lambda - 1$ от относительной высоты \bar{H} канала для рассмотренного диапазона геометрических параметров ($\bar{h} = 0,2 \dots 1,0$ и $\bar{H} = 0,5 \dots 1,0$) имеет степенной вид с показателем степени $n_H = -0,28$.

Установленные эмпирические законы индивидуального влияния каждого из определяющих геометрических параметров позволили обобщить результаты измерений едиными зависимостями величины степени интенсификации гидравлического сопротивления $\psi_\lambda = \lambda_\Sigma / \lambda_0$ от этих геометрических показателей: $\psi_\lambda = 1 + 6,47\bar{h}^{0,42} / \bar{H}^{0,28}$ (при $\bar{h} = 0,2 \dots 0,42$); $\psi_\lambda = 1 + 2,83\bar{h}^{-0,5} / \bar{H}^{0,28}$ (при $\bar{h} = 0,42 \dots 1,0$).

Эти обобщения в совокупности с известными данными по гидравлическому сопротивлению в плоских гладкостенных каналах при автомодельном режиме течения позволили сформировать зависимости для сопротивления в каналах с сотовой структурой в виде $\lambda_\Sigma = 0,018(1 + 6,47\bar{h}^{0,42} / \bar{H}^{0,28})$ (при $\bar{h} = 0,2 \dots 0,42$); $\lambda_\Sigma = 0,018(1 + 2,83\bar{h}^{-0,5} / \bar{H}^{0,28})$ (при $\bar{h} = 0,42 \dots 1,0$).

Результаты экспериментального исследования теплообмена в моделях сотового уплотнения, представленные в виде зависимости $Nu_d Pr^{-0,4} \bar{T}_c^{0,55} = f(Re_d)$, показали, что размещение сотовой структуры на поверхности канала изменяет только абсолютный уровень интенсивности теплообмена, но не влияет на закон изменения уровня теплообмена в зависимости от величины числа Re_d . Для всех исследованных каналов ($\bar{H} = 0,5 \dots 1,0$), независимо от геометрических показателей сотовой структуры ($\bar{h} = 0,2 \dots 1,25$), интенсивность теплообмена на сотовой поверхности оставалась пропорциональной числу Re_d в степени $n = 0,8$, как и в базовых законах теплообмена для каналов с гладкими стенками.

Зависимости интенсификации теплообмена ψ_α в сотовом уплотнении имеют нелинейный характер: ее значения увеличиваются с ростом относительной глубины ячеек в интервале $\bar{h} = 0,20 \dots 0,55$ и уменьшаются при увеличении относительной высоты \bar{H} канала. При увеличении значений относительной глубины сотовой структуры более $\bar{h} \geq 0,55$ происходит монотонное снижение степени интенсификации теплообмена (рис. 6). При $\bar{h} \geq 1,50$ ее значения оказываются ниже аналогичных значений для гладкостенного канала при прочих равных режимных и геометрических параметрах. Зависимость избыточного теплообмена $\psi_\alpha - 1$ от относительной высоты \bar{H} канала для всего исследованного диапазона геометрических параметров ($\bar{h} = 0,20 \dots 1,25$ и $\bar{H} = 0,5 \dots 1,0$) имеет степенной вид с показателем степени $n_H = -0,5$.

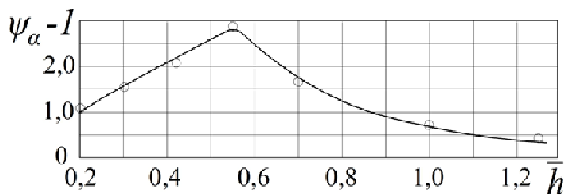


Рис. 6. Влияние относительной глубины \bar{h} сотовой структуры на степень интенсификации теплообмена в сотовом уплотнении при $\bar{H} = 1,0$

Экспериментальные исследования влияния сотовой структуры на теплообмен на противоположной гладкой поверхности канала обнаружили его интенсификацию в 2,0...2,5 раза. Уровень интенсификации ψ_α в значительной мере зависит от относительной удаленности \bar{H} поверхности от сотовой структуры и от относительной глубины \bar{h} ячеек. Из полученных данных следует, что интенсификация теплообмена на гладкой поверхности канала возникает и увеличивается только при приближении к ней противоположной поверхности с сотовой структурой, достигая наибольших значений при $\bar{H} = 0,5$, а также при относительной глубине сотовой структуры в интервале $\bar{h} = 0,4 \dots 0,55$, при которой наблюдается максимальное гидравлическое сопротивление вследствие наиболее активного влияния потока из пространства сотовых ячеек на основное течение в канале.

Полученные эмпирические законы индивидуального влияния на теплообмен каждого из определяющих геометрических параметров сотовой структуры и канала уплотнения позволили обобщить результаты измерений единичными зависимостями $\psi_\alpha = 1 + 4,53 \bar{h}^{0,88} / \bar{H}^{0,5}$ (при $\bar{h} = 0,20 \dots 0,55$) и $\psi_\alpha = 1 + 0,74 \bar{h}^{-2,30} / \bar{H}^{0,5}$ (при $\bar{h} = 0,55 \dots 1,25$). Эти обобщения в совокупности с известными данными по теплообмену в плоских гладкостенных каналах позволили сформировать зависимости для теплообмена в каналах с сотовой структурой в виде $Nu_d = 2,21 \cdot 10^{-2} (1 + 4,53 \bar{h}^{0,88} / \bar{H}^{0,5}) Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_c^{-0,55}$ (при $\bar{h} = 0,20 \dots 0,55$); $Nu_d = 2,21 \cdot 10^{-2} (1 + 0,74 \bar{h}^{-2,30} / \bar{H}^{0,5}) Re_d^{0,8} Pr^{0,4} \bar{T}_c^{-0,55}$ (при $\bar{h} = 0,55 \dots 1,25$).

Экспериментальные зависимости степени интенсификации гидравлического сопротивления и теплообмена в канале с сотовой структурой во всем исследованном интервале значений относительной глубины сотовых ячеек $\bar{h} = 0,2 \dots 1,25$ можно разделить на два характерных участка: $\bar{h} = 0,2 \dots 0,55$ и $\bar{h} = 0,55 \dots 1,25$. При относительной высоте сотовой структуры $\bar{h} = 0,4 \dots 0,6$ наблюдаются явные максимумы гидравлического сопротивления и теплообмена, что также подтверждается экспериментальными исследованиями других авторов [1;9].

Указанные явления могут быть объяснены специфической вихревой структурой, характерной только для интервала значений относительной глубины сотовых ячеек $\bar{h} = 0,4 \dots 0,6$. В указанном интервале увеличивается количество вихрей в пространстве каждой ячейки, оказывающих влияние на основное течение, что обуславливает интенсификацию гидравлического сопротивления и теплообмена в канале. В пространстве ячейки

последовательно (по ходу потока) образуются два вихря, причем второй приблизительно в полтора-два раза больше первого по объему (рис. 7б).

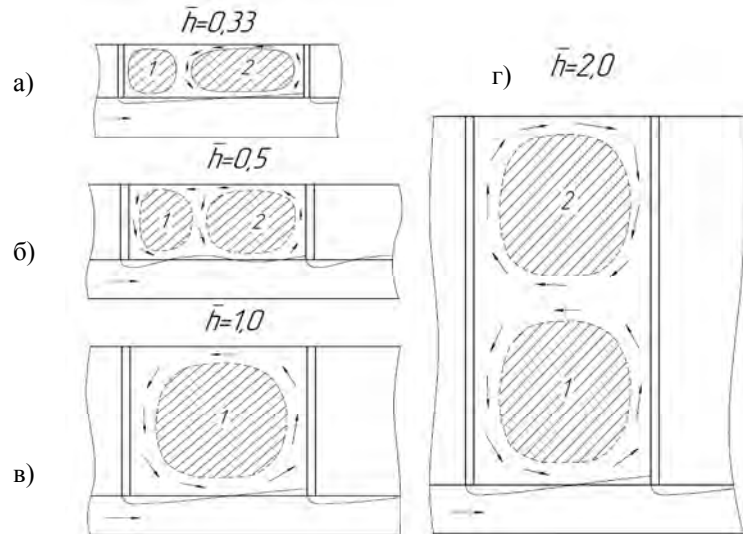


Рис. 7. Структура течения в пространстве ячеек при различной относительной глубине сотовых ячеек: а – $\bar{h} = 0,33$; б – $\bar{h} = 0,5$; в – $\bar{h} = 1,0$; г – $\bar{h} = 2,0$

Таким образом, основной поток дважды претерпевает ускорение по мере движения вдоль каждой сотовой ячейки: первый раз – под входной кромкой ячейки и второй раз – в зоне среднего сечения ячейки.

При дальнейшем увеличении относительной глубины сотовой структуры вихревая структура перестраивается, и при глубине ячейки, равной ее диаметру (рис. 7в), в пространстве ячейки располагается уже один вихрь, который незначительно взаимодействует с основным потоком у границ ячейки. В итоге сотовая ячейка с относительной глубиной $\bar{h} = 0,5$ по гашению энергии основного потока оказывается эффективнее двух ячеек с относительной глубиной $\bar{h} = 1,0$ [9].

В глубоких ячейках с относительной глубиной $\bar{h} = 2,0$ и более наблюдаются два вихря, расположенные по высоте и вращающиеся в противоположных направлениях (рис. 7г). При такой вихревой структуре гидравлическое сопротивление в канале сравнительно невелико.

Уменьшение интенсификации теплообмена на поверхности с сотовой структурой при увеличении относительной глубины ячеек более $\bar{h} = 0,6$ связано как с характером вихреобразования в пространстве сот, так и с появлением застойных зон у основания ячеек, в которых рабочее тело выступает в качестве тепловой изоляции между поверхностью и основным потоком в канале.

Исследуемый способ интенсификации теплообмена сопоставлялся по показателям ψ_α и ψ_λ со следующими широко применяемыми в практике охлаждения элементов высокотемпературных газовых турбин способами: при помощи системы кольцевых ребер, размещенных в цилиндрическом канале поперек потока; при помощи системы ребер, размещенных в прямоугольном канале поперек или под углом к потоку на одной, двух противоположных или всех его поверхностях; при помощи системы компланарно перекрещивающихся под углом 2β каналов в ограниченных по ширине щелевых трактах (вихревой способ интенсификации); при помощи системы упорядоченных рельефов из сферических углублений, размещенной в прямоугольных щелевых каналах (смерчевой способ интенсификации) (рис. 8).

Согласно экспериментальным исследованиям, поверхность канала с сотовой структурой по уровню интенсификации теплообмена ψ_α не уступает, но проигрывает по энергетической эффективности $\bar{\psi} = \psi_\lambda / \psi_\alpha$

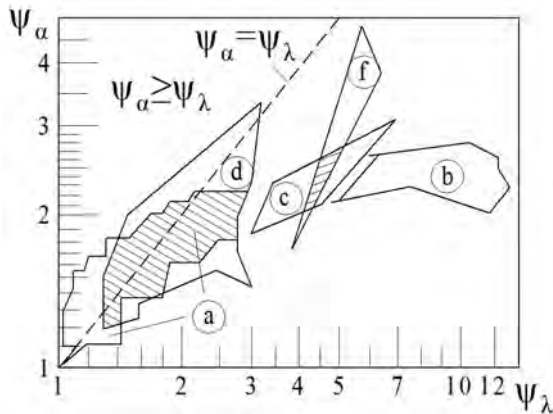


Рис. 8. Сопоставление эффективности различных способов интенсификации теплообмена по результатам измерений ψ_α и ψ_λ : а – цилиндрические каналы с кольцевым оребрением; б – прямоугольные каналы с оребрением поперек или под углом к потоку; в – вихревой способ; д – смерчевой способ; е – прямоугольные каналы с сотовой структурой на одной из стенок

энергетической эффективности $\bar{\psi} = \psi_\lambda / \psi_\alpha$ некоторым из рассмотренных способов интенсификации, при этом показатель $\bar{\psi}$ всегда больше 1,0. Для сотовой структуры характерны сравнительно большие величины интенсификации гидравлического сопротивления ψ_λ , которые при любых исследованных геометрических параметрах превосходят значения интенсификации теплообмена ψ_α . Наибольшие значения энергетической эффективности наблюдаются в условиях $\bar{h} = 0,4...0,6$ и $\bar{H} = 0,5$ ($\psi_\lambda = 6,46$; $\psi_\alpha = 4,70$; $\bar{\psi} = 1,37$), т. е. в условиях стесненного канала и при наибольших значениях гидравлического сопротивления и теплообмена.

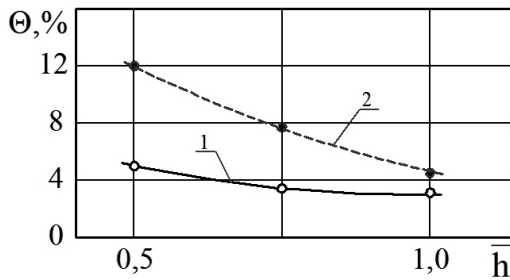


Рис. 9. Зависимость величины глубины охлаждения Θ на противоположной гладкой поверхности от относительной глубины ячеек \bar{h} при различных геометрических параметрах модели: 1 – $\bar{H} = 1,0$; 2 – $\bar{H} = 0,5$

Согласно результатам экспериментов, посвященных изучению влияния вдува охлаждающего воздуха в рабочий канал через сотовую поверхность на гидравлическое сопротивление и эффективность охлаждения поверхностей сотового уплотнения, изменение геометрических параметров сотовой структуры и канала в диапазоне $\bar{h} = 0,2...1,0$ и $\bar{H} = 0,5...1,0$ при фиксированной величине коэффициента вдува m в большей степени влияет на глубину охлаждения на противоположной сотовой структуре гладкой поверхности (рис. 9).

охлаждения Θ может достигать 12%.

Непосредственно на поверхности с сотовой структурой, в случае вдува охлаждающего воздуха через систему отверстий в ней, во всех исследованных моделях наблюдались высокие значения глубины охлаждения ($\Theta = 59...65\%$), возрастающие при увеличении относительной высоты канала \bar{H} и относительной глубины сотовой структуры \bar{h} (рис. 10).

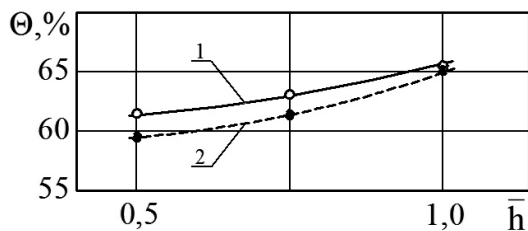


Рис. 10. Зависимость величины глубины охлаждения Θ на поверхности с сотовой структурой от относительной глубины ячеек \bar{h} при различных геометрических параметрах модели: 1 – $\bar{H} = 1,0$; 2 – $\bar{H} = 0,5$

При уменьшении относительной высоты канала \bar{H} в модели, для которой характерна наибольшая интенсификация гидравлического сопротивления в канале ($\psi_\lambda = 5,86$), глубина

По результатам экспериментальных исследований гидравлического сопротивления λ_Σ при вдуве охлаждающего воздуха в сотовое уп-

лотнение установлено различное (в зависимости от геометрических параметров сотовой структуры и канала) изменение гидравлического сопротивления λ_Σ , общего расхода $G_{общ}$ и расхода утечки G_{ym} при увеличении коэффициента вдува m (рис. 11). Для модели с относительной глубиной сотовой структуры $\bar{h} = 1,0$ при $\bar{H} = 1,0$, для которой при отсутствии вдува характерны сравнительно невысокие значения степени интенсификации гидравлического сопротивления ($\psi_\lambda = 3,83$), при повышении коэффициента вдува m наблюдается наибольшее по сравнению с другими моделями увеличение гидравлического сопротивления в канале ($\Delta\lambda_\Sigma \approx 85\%$ при $m = 15\%$).

Снижение величины общего расхода $G_{общ}$ через сотовое уплотнение наблюдается для всех моделей, кроме канала с $\bar{h} = 0,5$ и $\bar{H} = 0,5$, для которого характерны наибольшие значения гидравлического сопротивления.

Наблюдаемые в ходе экспериментальных исследований эффекты интенсификации гидравлического сопротивления в канале могут быть полезны в случае применения сотовой структуры неоптимальной, по критерию минимума утечки, глубины ($\bar{h} \geq 0,6$): за счет вдува охлаждающего воздуха будут достигаться более высокие значения гидравлического сопротивления, что приведет к снижению утечки через уплотнение. При этом благодаря глубоким ячейкам сотовой массив будет сохранять свою целостность и обеспечивать надежность работы при возможном задании сотовой структуры элементами ротора.

Таким образом, вдув охлаждающего воздуха через систему отверстий в пластине с сотовой структурой обеспечивает возможность

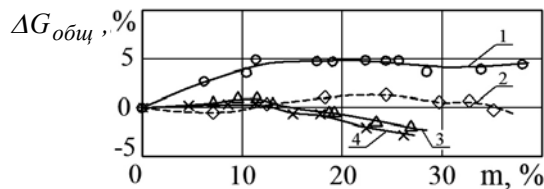


Рис. 11. Зависимость общего расхода $G_{общ}$ в канале с сотовой структурой от коэффициента вдува m : 1 – $\bar{H} = 0,5; \bar{h} = 0,5$; 2 – $\bar{H} = 0,5; \bar{h} = 1,0$; 3 – $\bar{H} = 1,0; \bar{h} = 0,5$; 4 – $\bar{H} = 1,0; \bar{h} = 1,0$

интенсифицировать гидравлическое сопротивление в канале в конструкциях уплотнительных устройств с сотовой структурой с относительной глубиной, отличной от оптимальной ($\bar{h} = 0,4...0,6$), повысить глубину охлаждения поверхностей канала. Экспериментальные исследования показали, что указанные эффекты зависят только от геометрических параметров модели и коэффициента вдува m .

Выводы:

1. Экспериментальные исследования показали, что режимные и геометрические параметры оказывают значительное влияние на теплогидравлические характеристики сотовых уплотнений рабочих колес осевых газовых турбин и во многом определяют особенности организации подачи охлаждающего воздуха через сотовую поверхность в уплотнение.

2. Экспериментально доказаны эффекты интенсификации гидравлического сопротивления ψ_λ и теплообмена ψ_α в канале сотового уплотнения, выявлено их возрастание при уменьшении относительной высоты канала \bar{H} и достижение наибольших значений в интервале относительных высот сотовой структуры $\bar{h} = 0,4...0,6$. Получены критериальные зависимости, отражающие влияние режимных и геометрических параметров на гидравлическое сопротивление и теплообмен в сотовом уплотнении.

3. Рассчитана энергетическая эффективность применения сотовой структуры в уплотнении. Выявлено, что отношение величин гидравлического сопротивления и теплообмена $(\psi_\lambda - 1)/(\psi_\alpha - 1)$ в исследованном диапазоне параметров всегда больше 1,0 и имеет минимальные значения 1,22...1,40 при $\bar{h} = 0,50...0,60$ и $\bar{H} = 0,5$. Выполнено сопоставле-

ние сотовой поверхности по энергетической эффективности с другими широко применяемыми в практике охлаждения элементов высокотемпературных газовых турбин способами интенсификации теплообмена.

4. Обнаружены эффекты интенсификации теплообмена на противоположной сотовой структуре поверхности, достигающие наибольших значений $\psi_{\alpha}^* = 2,0 \dots 2,5$ при $\bar{h} = 0,4 \dots 0,6$ и $\bar{H} = 0,5$ и уменьшающиеся при увеличении относительной высоты канала \bar{H} .

5. Экспериментально изучено влияние количества охлаждающего воздуха, подаваемого через сотовую поверхность, на гидравлическое сопротивление сотового уплотнения. При увеличении коэффициента вдува m , за исключением модели с $\bar{h} = 0,5$ и $\bar{H} = 0,5$, наблюдается повышение гидравлического сопротивления и снижение до 3% общего расхода через сотовое уплотнение, что при прочих равных условиях приведет к увеличению КПД ступени.

6. Установлено влияние количества охлаждающего воздуха, подаваемого через сотовую поверхность, на эффективность охлаждения стенок сотового уплотнения. Как показали опыты, глубина охлаждения пластины с сотовой структурой и противоположной поверхности канала может достигать 65 и 12% соответственно.

Дальнейшее развитие и внедрение полученных результатов исследований позволит повысить срок безопасной эксплуатации турбомашин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буглаев, В.Т. Сотовые уплотнения в турбомашинках: монография / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Брянск: БГТУ, 2006. – 192 с.
2. Буглаев, В.Т. Экспериментальное исследование гидравлических сопротивлений в канале с сотовой структурой / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, М.А. Шилин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – №3. – С. 84-90.
3. Буглаев, В.Т. Экспериментальное исследование теплообмена в канале с сотовой структурой / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, В.М. Шкодин, М.А. Шилин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2013. – №1. – С. 72-79.
4. Буглаев, В.Т. Эффективность охлаждения бандажных полок турбинной ступени с сотовыми уплотнениями / В.Т. Буглаев, В.Т. Перевезенцев, Д.В. Даниленко // Справочник. Инженерный журнал. – 2004. – №10. – С. 10-13.
5. Костюк, А.Г. Практический опыт внедрения сотовых надбандажных уплотнений на турбоагрегатах мощностью 60÷800 МВт / А.Г. Костюк, В.Г. Грибин, Б.Н. Петрунин [и др.] // Труды Второй всероссийской научно-практической конференции «Повышение надежности и эффективности эксплуатации электрических станций и энергетических систем. – М.: НИУ «МЭИ», 2012.
6. Орлик, В.Г. Исследование лабиринтного уплотнения / В.Г. Орлик // Энергомашиностроение. – 1987. – №10. – С. 17-21.
7. Речкоблит, А.Я. Исследование влияния размеров сотовых ячеек на эффективность уплотнительных устройств с различными вращающимися элементами / А.Я. Речкоблит, О.В. Авдеенко // Труды ЦИАМ. – 1985. – №1156. – 11 с.
8. Речкоблит, А.Я. Эффективность применения сотовых уплотнений радиального зазора в газовых турбинах / А.Я. Речкоблит // Труды ЦИАМ. – 1970. – №479. – 20 с.
9. Weighardt, K. Erholung des turbulenten Reibungswiderstandes durch Oberflächenstörungen / K. Weighardt // Forch. für Schiff. – 1953. – №1. – P. 65-81.

Материал поступил в редколлегию 25.02.15.