



УДК 536.245

Н.П. Соколов, В.Г. Полищук, К.Д. Андреев

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В КАНАЛАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ СО СКРЕЩИВАЮЩИМСЯ ОРЕБРЕНИЕМ

N.P. Sokolov, V.G. Polishchuk, K.D. Andreev

THE HYDRAULIC RESISTANCES IN THE RECTANGULAR CROSS-SECTION CHANNELS WITH CROSSED RIBS

Дан обзор всех опубликованных на момент выпуска настоящей статьи работ по экспериментальному исследованию гидравлических характеристик трактов с компланарными каналами (каналы со скрещивающимся оребрением). Проведен анализ и сопоставление результатов опытных исследований коэффициентов гидравлических сопротивлений в трактах с компланарными каналами.

КОМПЛАНАРНЫЕ КАНАЛЫ. ВИХРЕВЫЕ ТРАКТЫ. СКРЕЩИВАЮЩЕЕСЯ ОРЕБРЕНИЕ. ГИДРАВЛИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

The review of papers on the experimental investigations of the hydraulic characteristics of the coplanar channels tracts (the channels with crossed ribs) is made. The comparison analysis of the results of the experimental investigations of the hydraulic resistances coefficients in the coplanar channels tracts is carried out.

COPLANAR CHANNELS. VORTICAL CHANNELS. CROSSED RIBS. HYDRAULIC RESISTANCE. EXPERIMENTAL INVESTIGATION.

В результате интенсификации процессов теплообмена можно достичь существенного уменьшения веса и габаритных размеров теплообменного оборудования, а также обеспечить заданный температурный уровень элементов этого оборудования и повысить надежность их работы.

Наилучшие показатели интенсификации теплообмена в среде газообразных теплоносителей могут быть достигнуты при использовании оребрения. Оребрение не только увеличивает поверхность теплообмена с той стороны, где коэффициенты теплоотдачи имеют более низкое значение, но и оказывает большое влияние на гидродинамику потока.

Геометрические характеристики трактов с компланарными каналами и основные критерии подобия течения в таких трактах

Применительно к внутренним задачам усложнение конфигурации теплообменных поверхностей наиболее часто достигается за счет

размещения поперечного или расположенного под некоторым углом к потоку оребрения на стенках каналов, которое в предельном случае соприкосновения ребер на противоположных стенках приводит к полизональному оребрению канала кольцевого сечения или скрещивающемуся оребрению канала прямоугольного сечения. Каналы с таким оребрением находят широкое применение, например в трактах охлаждения лопаточных аппаратов высокотемпературных газовых турбин [1]. Если же ребра на одной широкой стенке канала прямоугольного сечения с большим отношением сторон $B:H$ пересекаются с ребрами противоположной стенки, то получается теплообменный тракт со взаимно пересекающимися и скрещивающимся оребрением. Такой тракт характеризуется следующими геометрическими размерами (рис. 1): шириной B , высотой H и длиной L исходного базового канала, толщиной b , высотой h_p и шагом установки S ребер прямоугольного сечения, величиной взаимного пересечения ре-

бер h_{π} и углом их установки по направлению продольной оси канала β . Если ребра имеют не прямоугольное сечение, то вводится угол наклона поверхности ребра к плоскости основной широкой стенки α . При этом между указанными высотами H , h_p и h_{π} существует взаимосвязь: $2h_p = H + h_{\pi}$. Объем V_B , занимаемый теплоносителем в тракте с компланарными каналами, и общая теплообменная поверхность тракта F_{Σ} в случае прямоугольного оребрения могут быть определены по соотношениям

$$V_B = LB [2h_p (1 - b/S) + h_{\pi} (b/S)^2]; \quad (1)$$

$$F_{\Sigma} = 2LB [1 + 2h_p/S + H(1 - b/S)/B - 2b(2h_p + b)/S^2]. \quad (2)$$

Другой обобщенной геометрической характеристикой тракта с компланарными каналами может служить эквивалентная площадь проходного сечения $f_3 = V_B/L$. Тогда может быть определена и усредненная по всему объему тракта скорость течения $w_3 = G/(\rho f_3)$. Использование эквивалентных геометрических параметров d_3 и f_3 при обработке и обобщении опытных данных по гидравлическим характеристикам каналов рассматриваемой конфигурации представляется целесообразным ввиду их универсальности. Так, в соответствии с соотношениями (1), (2) для базового канала без оребрения получают обычные формулы для определения эквивалентного и гидравлического диаметров

$$d_3 = 4V_B/F_{\Sigma}; \quad d_{\Gamma} = 4f_0/\Pi_0. \quad (3)$$

Вообще же использование метода анализа размерностей из теории обобщенных переменных приводит к следующим уравнениям подобия для описания закономерностей гидравлического сопротивления [2]:

$$\zeta = f(\text{Re}; L/B; B/H; S/B; S/b; h_p/S; \beta), \quad (4)$$

где $\zeta = 2\Delta p / (\rho w^2)$ — коэффициент гидравлического сопротивления тракта с компланарными каналами.

Обзор условий проведения опытов основных результатов экспериментальных исследований

По-видимому, одно из первых исследований тракта со скрещивающимся оребрением, образующим компланарные каналы, было проведено в МВТУ в начале 80-х годов [3]. Опыты по исследованию гидравлических ха-

рактеристик трактов проводились на разных моделях, причем модели представляли собой прямой канал кольцевого сечения с полизональным оребрением (цилиндрический корпус с внутренней винтовой нарезкой и втулкой с внешней винтовой нарезкой, направленной в противоположную сторону). Угол скрещивания компланарных каналов — это сумма углов захода винтовой нарезки на корпусе β_k и втулке β_b .

Изменение геометрических параметров кольцевого тракта с компланарными каналами реализовалось за счет изменения параметров винтовой нарезки втулки модели.

Результаты опытного исследования коэффициентов сопротивления на участке гидродинамически стабилизированного течения были представлены в виде зависимостей $\xi = f(\text{Re})$. На основании анализа результатов авторы [3] делают вывод о том, что в диапазоне критериев $\text{Re} = (2-4) \cdot 10^3$ характер течения существенно не меняется, а область автомодельности начинается при $\text{Re} = (1-1,5) \cdot 10^4$. С увеличением угла скрещивания возрастает и коэффициент трения и темп его увеличения.

Данные по коэффициентам гидравлического трения в [3] были обобщены эмпирической формулой

$$\xi = \frac{e^{1,47(\beta_k + \beta_b) + 5,24}}{\text{Re}^{1,32}} + e^{1,73(\beta_k + \beta_b) - 4,7}. \quad (5)$$

В середине 80-х годов в МАТИ были проведены исследования гидравлических характеристик собственно в каналах прямоугольного сечения со скрещивающимся оребрением [4, 5].

Анализ данных показал, что с ростом значений критерия Re снижаются коэффициенты гидравлического сопротивления ζ , а увеличение 2β от 30 до 120° приводит к росту ζ более чем в 10 раз.

Опытные данные аппроксимировались выражением

$$\xi = 1370 \bar{\beta}^{2,75} \frac{\bar{\beta}^2 + 0,78\bar{\beta} + 0,19}{\text{Re}_3^{0,23}}, \quad (6)$$

где $\bar{\beta} = \frac{2\beta}{\pi}$.

Размещение взаимоперекрещивающихся ребер ведет к увеличению коэффициентов гидравлического сопротивления в 25–30 раз.

Вслед за первыми опубликованными работами [4, 5] появились новые результаты экспе-

риментальных исследований гидравлических характеристик, проведенных в МАТИ [6, 7]. Боковые поверхности представляли собой оребренные пластины, при этом одна боковая стенка имела форму полуокружности, а другая была плоской. Внутренняя полость моделей была системой скрещивающихся под заданным углом 2β ребер.

Анализ гидравлических характеристик показал, что увеличение относительного шага оребрения \bar{S} сопровождалось ростом сопротивления. Это обстоятельство авторы исследований [6, 7] объясняли как увеличением площади взаимодействия пересекающихся струй воздуха, так и менее интенсивным затуханием возмущений в потоке охладителя. Выяснилось, что изменение угла 2β в интервале от 30° до 120° ведет к возрастанию коэффициентов ζ в несколько десятков раз в связи с увеличением количества зон, в которых происходит взаимодействие потока хладагента с боковыми стенками модели, и общей протяженности каналов.

Одно из всеобъемлющих экспериментальных исследований гидравлических сопротивлений и макроструктуры потока в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов выполнялось в первой половине 80-х годов в КНПО «Труд» применительно к охлаждаемым рабочим лопаткам турбин авиационных двигателей типа НК [8]. В рассматриваемой работе на крупномасштабном модельном канале была исследована общая картина течения при визуализации потока жидкости различными способами. Было установлено, что поток движется по отдельным межреберным каналам и перетекает из каналов одной половины системы в каналы противоположной только вблизи боковых стенок тракта. Визуализацией линий тока вблизи стенок канала было показано, что в тракте можно выделить несколько участков с различными типами течения. На начальном участке в каналах, начинающихся от входного сечения тракта и заканчивающихся у первого поворота на боковой поверхности тракта, вектор скорости совпадает с осью канала. Основной участок, состоящий из каналов, начинающихся у боковых стенок тракта, характеризуется закруткой потока относительно оси отдельного канала, что обусловлено его пространственным поворотом у боковой стенки.

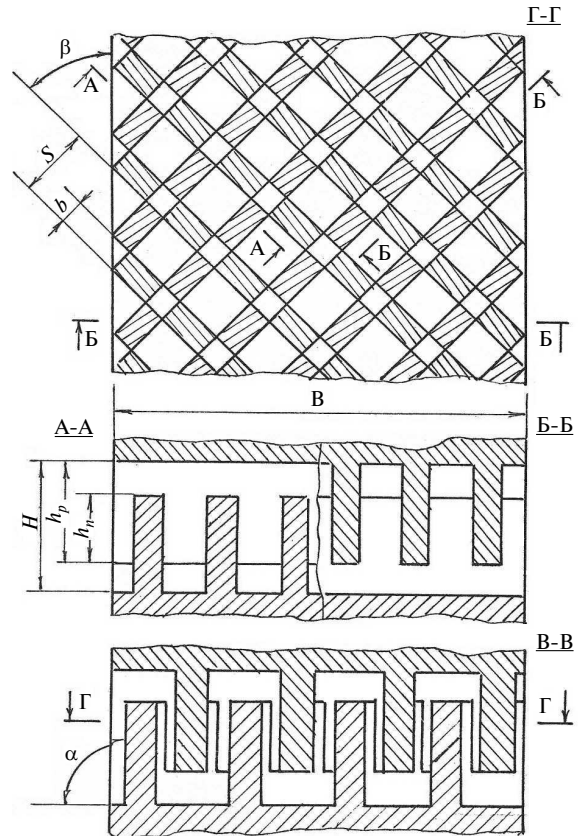


Рис. 1. Конфигурация и основные геометрические размеры тракта со взаимно-пересекающимися и скрещивающимся оребрением (компланарными каналами)

Исследование полей скоростей и давлений в сечениях модельного канала подтвердило результаты визуализации и дополнило их количественными характеристиками.

В исследованиях [8] было установлено, что закономерности гидравлического трения и структура потока различны на начальном и основном участках тракта с компланарными каналами.

На начальном участке трение не зависит от угла 2β и при $Re = idem$ определяется только относительной протяженностью каналов, принципиально не отличается от трения в прямых гладких каналах той же относительной протяженности и может вычисляться по формулам для потока в коротких каналах [1].

На основном участке тракта коэффициент трения ξ существенно выше, чем в прямых каналах с гидравлически гладкими стенками. Так, в тракте с компланарными каналами, скрещи-

вающимися под углом $2\beta = 90^\circ$, при $Re_x = 6 \cdot 10^5$ коэффициент трения возрастает в 3,1 раза. При этом основное влияние на коэффициент трения ξ оказывали параметры Re_r , β и x . Относительные коэффициенты трения ξ/ξ_0 возрастали с уменьшением Re_r и x и имели максимум при $2\beta = 90^\circ$.

Результаты измерений осредненного коэффициента трения по длине x канала основного участка тракта с компланарными каналами в рассматриваемой работе [8] для всего исследуемого диапазона изменения геометрических характеристик удалось обобщить критериальным соотношением

$$\xi = 0,43 \left[1 + 28(\sin 2\beta)^3 \right] Re_x^{n-1};$$

$$n = 0,8 + 0,16 \left[(1,27\beta - 1)^2 - 1 \right]. \quad (7)$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления при повороте потока у боковых стенок тракта с компланарными каналами не зависели от величины критериев Re и были обобщены эмпирической формулой

$$\zeta_{пов} = 5 \frac{\left(h_p \frac{\sin \beta}{S-b} \right)^2}{\sqrt{\frac{2B \cos \beta}{S}}}. \quad (8)$$

Полученные эмпирические соотношения для коэффициентов трения (7) и гидравлического сопротивления (8) для отдельных участков тракта с компланарными каналами позволяли определить и его общий коэффициент гидравлического сопротивления по формуле

$$\zeta_{\Sigma} = \zeta_{вх} + \zeta_{вых} + n\zeta_{пов} + \bar{L}_n \left[(\xi_{тр1} + \xi_{тр2})/2 + (n-1)\xi_{тр2} \right], \quad (9)$$

где $n = L/(l \cos \beta) = L \sin \beta / (B \cos \beta)$ — количество разворотов отдельного канала тракта у его боковых стенок; $\bar{L}_n = L_n/d_r$ — некоторая средняя относительная длина каналов на начальном участке тракта. Для начального участка тракта было принято, что на первой половине длины каналов реализуется обычное турбулентное течение с коэффициентом трения $\xi_{тр1}$, а на второй половине их длины — с коэффициентом трения $\xi_{тр2}$, определяемым по формуле (7)

В опытах, поставленных в ЛНПО им. В.Я. Климова, исследовано гидравлическое сопротивле-

ние в тракте с компланарными каналами, расположенными под углами β равными 30° и 45° [9]. Полученные данные показали, что пропускная способность зависит от угла скрещивания и переход от угла $2\beta = 90^\circ$ к углу $2\beta = 60^\circ$ ведет к увеличению пропускной способности ровно в 2 раза. Полученный при этом линейный характер зависимостей $G = f(\Delta p/p)$ указывал, по мнению автора [9], на автомодельность коэффициентов гидравлического сопротивления ζ по критериям Рейнольдса в исследованном диапазоне их изменения $Re = (27,5-90,5) \cdot 10^3$.

Опыты, в которых исследовались тракты с компланарными каналами, образованными не только взаимно пересекающимися, но и скрещивающимся оребрением, были поставлены в ЛГТУ [10]. Опытные данные представлялись в форме зависимостей коэффициентов гидравлического сопротивления ζ от критериев Re с выделением в качестве параметров глубины взаимного пересечения ребер h_n и угла их скрещивания 2β .

Переход от матриц без пересечения оребрения ($h_n = 0$) к матричной системе с ребрами, взаимно врезанными на глубину $h_n = 2,0$ мм, т. е. увеличение высоты ребер с 6 до 7 мм (примерно на 15%), ведет к росту гидравлического сопротивления в системах с углом скрещивания $2\beta = 90^\circ$ в 2 раза.

Изменение угла скрещивания ребер 2β для случая $h_n = 4,0$ мм в 2 раза ведет к изменению ζ не менее чем в 5 раз. Примерно такое же влияние угла скрещивания 2β на коэффициенты гидравлического сопротивления и при других значениях величины взаимного пересечения ребер h_n .

Характер расположения опытных точек говорит об области автомодельности коэффициентов ζ по критерию Re . Опытные данные позволили авторам [10] определить границы области автомодельности. Для определения величины ζ в рассматриваемой области автомодельности была предложена эмпирическая формула, имеющая точность $\pm 15\%$:

$$\zeta = \frac{162\beta^2 - 90\beta + 21,5}{0,8 - h_n} + 1,15\bar{\beta}^2 - 985\bar{\beta} + 193. \quad (10)$$

При значениях критериев за границей области автомодельности коэффициенты гидравлического сопротивления ζ с увеличением кри-

териев Re убывают. Аппроксимация опытных результатов в этой области критериев Re степенной зависимостью позволила получить приближенную формулу с погрешностью не выше $\pm 30\%$:

$$\zeta = A/Re^m, \quad m = 0,15 + 0,525\bar{h}_n. \quad (11)$$

Использованный в опытах МГТУ [11] модельный канал со скрещивающимся оребрением был образован двумя оребренными пластинами, образующими при наложении их друг на друга заданную конфигурацию. Методика обработки и обобщения опытных данных та же, что и в ранее выполненной работе [3].

Исследованное в ЦИАМ [12] оребрение имело не прямоугольную форму, как во всех выше рассмотренных работах, а близкую к трапециевидальной со скругленными радиусами r'' и r' вершинами трапеций и промежутками между ними. Примененное оребрение поверхности характеризовалось относительно небольшими размерами и двумя значениями углов скрещивания ребер $2\beta = 50^\circ$ и 130° .

Результаты экспериментальных исследований гидравлических характеристик с отклонением, не превышающим $\pm 23\%$, аппроксимировались критериальным соотношением

$$\xi = 4,85\bar{\beta}^{3,71} (d_r/l)^{2,39} / Re^{0,426} \bar{\alpha}^{8,91} (h/S)^{3,2}. \quad (12)$$

Диапазон же изменения относительной длины l/d_r остался неопределенным, что, конечно, затрудняет пользование найденными соотношениями.

В работе сотрудников из Chemical Engineering Research Group, Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) (ЮАР) рассмотрено влияние угла скрещивания двух противоположных синусоидально гофрированных стенок на теплогидравлические характеристики образуемых ими каналов пластинчатых теплообменных аппаратов [13].

Угол скрещивания компланарных каналов варьировался от $\beta = 0^\circ$ до $\beta = 90^\circ$.

Коэффициенты гидравлического сопротивления, отнесенные на единицу характерного размера $2H$, вычислялись по формуле

$$\xi' = \frac{2\Delta p}{\rho w^2} \frac{2H}{L}. \quad (13)$$

Опытные данные по сопротивлению представлялись в форме корреляций коэффициентов трения ξ' с критериями Re с отклонением 7% :

$$\xi' = \frac{B}{Re^n}. \quad (14)$$

По представленным опытным корреляциям между коэффициентами трения и критериями Рейнольдса с использованием в качестве параметра угла скрещивания β видно, что с увеличением значений критериев Re коэффициенты ξ' монотонно понижаются при любом значении угла β . В то же время зависимость коэффициентов ξ' от углов β в диапазоне их изменения в опытах оказывается немонотонной, и существует значение угла $\beta = 80^\circ$, при котором ξ' максимальны.

Для каждого из исследованных в опытах углов β данные по коэффициентам сопротивления были аппроксимированы на отдельных участках полного диапазона изменения критериев Рейнольдса критериальными соотношениями вида (14) с подходящими степенями m . Так, для угла скрещивания $\beta = 45^\circ$ было получено следующее:

при $Re = 150-1800$

$$\xi' = 1,21 + 3,67/Re;$$

при $Re = (1,8-30) \cdot 10^3$

$$\xi' = 5,84/Re^{0,177}. \quad (15)$$

Соотношение между различными параметрами подобия процессов течения в трактах с компланарными каналами

Из представленного материала видно, что на сегодняшний день имеется небольшое количество опубликованных работ по экспериментальному исследованию гидравлики трактов охлаждения с компланарными каналами.

Все модельные каналы, за исключением канала кольцевого сечения, выполнялись плоскими и имели поперечное сечение либо в форме прямоугольника с прямыми [9, 10] или скругленными [4, 5, 8] углами либо в форме вытянутого равнобедренного треугольника со скругленным острым углом у вершины [7]. Относительная высота каналов H/h_p с непересекающимся оребрением принимала тривиальное значение 2 и только в единственном исследовании ЛГТУ [10], где исследовалось взаимно пересекающееся оребрение, снижалась до 1,35.

Неоднородность используемых параметров требует определенных дополнительных преобразований имеющихся критериальных соотно-

шений для сопоставления. При этом гидравлический диаметр определяется через площадь проходного сечения f_k и смоченный периметр $\Pi_k = S - b + 2h_p$ отдельного межреберного канала $d_r = 4f_k/\Pi_k$, а эквивалентный диаметр отыскивается с использованием выражений (1), (2).

Тогда для случая $h_p = 0$ эквивалентный диаметр описывается формулой

$$d_3 = \frac{4V_B}{F_\Sigma} = \frac{2H(1-b/S)}{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}, \quad (16)$$

а гидравлический диаметр отдельного межреберного канала — формулой

$$d_r = \frac{4f_{k\Sigma}}{\Pi_\Sigma} = \frac{2H}{1+H/S} \left(1 - \frac{b}{S}\right). \quad (17)$$

Итак, для трактов с компланарными каналами при непересекающемся оребрении ($h_p = 0$) эквивалентный диаметр определяется выражением (16), а гидравлический — (17). Отсюда их соотношение есть

$$\frac{d_3}{d_r} = \frac{1+H/S}{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}. \quad (18)$$

Далее найдем соотношение между проходными площадями сечений $f_{k\Sigma}$ и некоторой эквивалентной f_3 , определяемой по формуле $f_3 = V_B/L$. Формула определения проходной площади $f_{k\Sigma}$ в случае $h_p = 0$ имеет вид

$$f_{k\Sigma} = 2(S-b)h_p B \cos\beta/S = HB(1-b/S)\cos\beta,$$

а для определения эквивалентной площади сечения

$$f_3 = BH(1-b/S).$$

Откуда для их отношения получается совсем простое выражение

$$f_3/f_{k\Sigma} = 1/\cos\beta.$$

Полученные связи между диаметрами d_r и d_3 и площадями $f_{k\Sigma}$ и f_3 позволяют выполнять пересчеты критериев Re и коэффициентов трения ξ :

$$Re_r = \frac{Gd_r}{\mu f_{k\Sigma}} = \frac{1+H/S+(H/B)(1-b/S)-2(b/S)^2}{(1+H/S)\cos\beta} Re_3; \quad (19)$$

$$\xi_r = \frac{d_r}{L} \frac{2\Delta P}{\rho w^2} = \xi_3 \cos^2\beta \frac{d_r}{d_3}.$$

Анализ и сопоставление результатов экспериментальных исследований

Целесообразно проводить сравнение полученных критериальных соотношений в координатах $\xi = f(Re)$ с использованием относительного угла скрещивания ребер $\bar{\beta} = 2\beta/\pi$. Этот параметр используется во всех критериальных соотношениях и оказывает наиболее существенное влияние на величину коэффициентов сопротивления. Далее сравнение ведется для непересекающегося оребрения ($h_p = 0$) с углом скрещивания $2\beta = 90^\circ$ ($\bar{\beta} = 0,5$), поскольку такой угол устанавливался во всех опытах и был близок к среднему из диапазона $\bar{\beta} = 0-1,0$ их изменения в различных опытах. В качестве определяющего размера во всех сравниваемых соотношениях $\xi_3 = f(Re_3)$ принят эквивалентный гидравлический диаметр d_3 , определяемый по (1), (2), так что по определению

$$\xi_3 = \frac{2\Delta p}{\rho w_3^2} \frac{d_3}{L}; \quad Re_3 = \frac{Gd_3}{\mu f_3} = \frac{\rho w_3 d_3}{\mu}. \quad (20)$$

Использование в сравнении коэффициентов сопротивления ξ , отнесенных на единицу безразмерной длины канала, потребовало прежде всего досчета опытных данных ЛГТУ [10], поскольку результаты этих опытов были обработаны в форме зависимости полного коэффициента сопротивления канала ζ_3 от величины критерия Re_3 . В итоге для расчетов коэффициента сопротивления ζ_3 канала с $2\beta = 90^\circ$ и $h_p = 0$ по опытным данным ЛГТУ для области автомодельности по критерию Re_3 использовалась формула (10):

$$\xi_3 = \frac{d_3}{L} \left[1150\bar{\beta}^2 - 985\bar{\beta} + 193 + (162\bar{\beta}^2 - 90\bar{\beta} + 21,5)/0,8 \right] = 0,425. \quad (21)$$

Граничное значение критерия $Re_{3,гр}$ для этой области автомодельности в соответствии с выражением (9) составило $Re_{3,гр}^{max} = 20,5 \cdot 10^3$. Коэффициент сопротивления ξ_3 подсчитывался уже с использованием формулы (11) для $m = 0,15$ и $A = 43$:

$$\xi_3 = \frac{d_3}{L} \frac{A}{Re^m} = \frac{1,8735}{Re^{0,15}}. \quad (22)$$

Построенная по соотношениям (21) и (22) зависимость $\xi_3 = f(Re_3)$, обобщающая данные

ЛГТУ [10], нанесена на график рис. 2 (линия 1). Для проведения обоснованного сопоставления всех результатов все они приводились к относительным геометрическим размерам тракта с компланарными каналами, исследованного в ЛГТУ [10].

Линия $\xi_3 = f(Re_3)$, обобщающая данные МВТУ [3], была построена с использованием формулы (5), где $b_k = b_b$, $b_k + b_b = 2\beta$, и для $2\beta = \pi/2$

$$\xi_r = \frac{1900}{Re_r^{1,32}} + 0,137. \quad (23)$$

Отсюда с использованием соотношений (16) между Re_r и Re_3 и (17) между ξ_r и ξ_3 получалась окончательная зависимость в виде

$$\xi_3 = \frac{2593}{Re_3^{1,32}} + 0,283. \quad (24)$$

Полученная расчетом по формуле (24) линия 2 нанесена на графике рис. 2, откуда видно, что опыты, выполненные в МВТУ [3], приводят к меньшим примерно на 25 % значениям коэффициентов сопротивления ξ , чем опыты ЛГТУ, в диапазоне их перекрытия по критериям $Re_3 = (4-20) \cdot 10^3$. И это вполне объяснимо, поскольку в модельном канале МВТУ, имеющем кольцевое поперечное сечение и полизональное оребрение, отсутствуют развороты потока у боковых стенок тракта.

Результаты МАТИ [6], рассчитанные по уравнению (6) для $2\beta = 90^\circ$:

$$\xi_3 = \frac{10,18}{Re^{0,23}}. \quad (25)$$

Результаты расчетов по этой формуле, представлены на графике рис. 2 линией 3.

Переходя к анализу обобщающих критериальных соотношений по коэффициентам гидравлического сопротивления, полученным в КНПО [8], следует отметить, что в этой работе коэффициент гидравлического сопротивления для канала складывается из коэффициентов гидравлического сопротивления на его отдельных участках:

$$\zeta = \zeta_n + \zeta_0 + \zeta_k. \quad (26)$$

Коэффициенты гидравлического сопротивления на каждом из участков складываются соответственно из коэффициентов гидравлических потерь на входе в участок ($\zeta_{вх}$), потерь на трение потока ($\zeta_{тр}$), потерь при повороте потока у боковой стенки тракта ($\zeta_{пов}$) и потерь на выходе из участка ($\zeta_{вых}$), так что для каждого участка

$$\begin{aligned} \xi_{тр1} &= 0,3165 / Re_r^{0,25}; \\ \xi_{тр2} &= 4,46 / Re_r^{0,363}. \end{aligned} \quad (27)$$

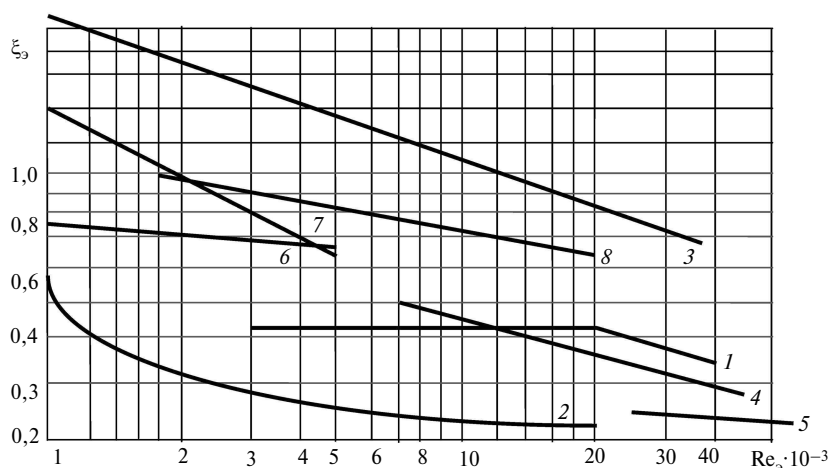


Рис. 2. Сопоставление эмпирических критериальных соотношений для расчетов коэффициентов сопротивления в каналах со скрещивающимся под углом $2\beta = 90^\circ$ оребрением, полученных различными организациями:

1 — ЛГТУ [10]; 2 — МВТУ [3]; 3 — МАТИ [6]; 4 — КНПО [8]; 5 — ЛНПО [9]; 6, 7 — ЦИАМ [12, 14]; 8 — CSIR [13]

В итоге в пределах начального участка

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{тр}} &= 0,5(\xi_{\text{тр}1} + \xi_{\text{тр}2}) \frac{L}{d_r} = \\ &= 8,5 \left(\frac{0,3165}{\text{Re}_r^{0,25}} + \frac{4,46}{\text{Re}_r^{0,363}} \right). \end{aligned} \quad (28)$$

Коэффициент гидравлического сопротивления разворота потока у боковой стенки тракта с компланарными каналами определяется по формуле (8), которая для рассматриваемого случая трансформируется в постоянное значение

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{пов}} &= 1,25 \frac{(H \sin 2\beta / (S - b))^2}{\sqrt{m}} = \\ &= 1,25(12/10)^2 / \sqrt{9} = 0,6. \end{aligned} \quad (29)$$

Общие потери давления на этом участке

$$\zeta_{\text{н}} = 0,816 + 8,5 \left(\frac{0,3165}{\text{Re}_r^{0,25}} + \frac{4,46}{\text{Re}_r^{0,363}} \right). \quad (4.11)$$

При подсчете коэффициента гидравлического сопротивления основного участка тракта по формуле (9) в расчет принимаются только коэффициенты $\zeta_{\text{тр}}$, определяемые по формуле

$$\zeta_{\text{тр}} = \xi_{\text{тр}2} \frac{L}{d_r} = 17\xi_{\text{тр}2}, \quad (31)$$

где $\xi_{\text{тр}2}$ считается по соотношению (27), а $L/d_r = 17$ — относительная длина каналов на основном участке тракта; $z_{\text{пов}} = 0,569$ в соответствии с формулой (29) при $m = 10$.

Аналогичным образом определен и общий коэффициент гидравлического сопротивления конечного участка.

Суммарные коэффициенты сопротивления тракта определены по (26). Пересчет этих коэффициентов на коэффициенты сопротивления на единицу длины канала выполнялся по (25), а величины критериев Re_3 — по соотношению (24).

Полученная в результате изложенного пересчета зависимость $\xi_3 = f(\text{Re}_3)$, обобщающая результаты опытов КНПО [8], представлена на графике рис. 2 линией 4. Она удовлетворительно коррелируется с линией 1.

Переходя к анализу опытных данных ЛНПО [9], следует обратить внимание, что они были представлены графическими зависимостями коэффициентов гидравлического сопротивле-

ния от критериев Рейнольдса. К обработке были приняты опытные данные для $2\beta = 90^\circ$:

$$\begin{aligned} \zeta_3 &= \frac{2\Delta p}{\rho w_3^2} = 2,17 \cdot 10^{-12} \frac{\Delta p p}{G^2}; \\ \xi_3 &= \zeta_3 \frac{d_3}{L} = \zeta_3 \frac{4,9}{164}. \end{aligned} \quad (32)$$

По результатам расчетов по этим формулам на рис. 2 нанесена осредняющая их линия 5, которая располагается заметно (на 25–35 %) ниже линий 1 и 4, обобщающих опытные данные соответственно ЛГТУ и КНПО, и лишь ненамного ниже продолжения линии 2 (МАТИ).

Линия 6 отражает исследования в ЦИАМ [12]. Для обсчета исследуемого случая $2\beta = 90^\circ$ по формуле (12) было принято: $\alpha = \pi/3$ ($\bar{\alpha} = \alpha/\pi = 1/3$), $h/S = (h/b)/(S/b) = 0,474 \approx 0,5$. Подстановка в формулу (12) приводила к следующей зависимости ξ от величины критерия Re_r :

$$\xi_r = \frac{10,45}{\text{Re}_r^{0,426}}. \quad (33)$$

Теперь оставалось только преобразовать параметры ξ_r и Re_r в ξ_3 и Re_3 , что выполнялось по формулам (24) и (25)

Таким образом, результаты рассмотренных опытов [12] по определению гидравлических сопротивлений в трактах с волнистым оребрением приводят к большей величине этих коэффициентов, чем результаты опытов на трактах с прямоугольным оребрением (см. рис. 2).

В целом же, если принимать в расчет только данные по оребрению прямоугольного профиля, можно констатировать, что эмпирические критериальные соотношения КНПО [8] и ЛГТУ [10] приводят к весьма близким значениям коэффициентов гидравлического сопротивления ξ_3 ; соотношения, полученные в МВТУ [3], и обобщение опытов ЛНПО [9] как бы дополняют друг друга, приводя к практически одинаковым значениям ξ при $\text{Re} = 20 \cdot 10^3$, но отличаются от зависимостей ЛГТУ (линия 1) и КНПО (линия 4) примерно на 30 % в меньшую сторону. И, наоборот, зависимость МАТИ (линия 3) приводит к значениям ξ_3 примерно в 2,5 раза большим, чем в ЛГТУ и КНПО.

В итоге для расчетов коэффициентов гидравлического сопротивления в трактах с компланарными каналами, образованными прямоугольным оребрением, скрещивающимся под

углом $2\beta = 90^\circ$, можно использовать эмпирические критериальные соотношения ЛГТУ [10] или КНПО [8]. Величины коэффициентов гидравлического сопротивления, рассчитанные по этим соотношениям, практически совпадают между собой и лежат в середине полосы разброса коэффициентов гидравлического сопротивления по представленным к сравнению данным различных исследований.

Очевидные существенные различия, выявленные в ходе проведенного анализа, побудили авторов настоящей работы искать универсальную зависимость, способную обобщить столь разные результаты. Для этого опытные данные, представленные на графике рис. 2, были аппроксимированы степенными зависимостями вида $\xi = B/Re^n$. Далее были найдены простые линейные аппроксимации для коэффициента B и показателя степени n по относительному геометрическому параметру H/S годные для частного случая $2\beta = 90^\circ$ оребрения, а именно:

$$B = 3,65 \frac{H}{S} - 1,35; \quad n = \frac{H/S}{6}. \quad (34)$$

Для получения универсального критериального соотношения по коэффициентам гидравлических потерь формулы (34) были доработаны. В этом случае в качестве базовых были использованы зависимости, полученные в CSIR [13]. В рассматриваемой работе для $H/S = 1$ были получены эмпирические критериальные соотношения вида $\xi = B/Re^n$ для относительных углов скрещивания $\bar{\beta}$, изменяющихся в диапазоне $\bar{\beta} = (1/6) - 1,0$, с показателями степеней n и коэффициентами B , изменяющимися с изменением относительного угла $\bar{\beta}$. Используя принцип суперпозиции влияния параметров H/S и $\bar{\beta}$ на величину коэффициентов гидравлического со-

противления ξ , а также допустив, что сохраняются как влияние параметра H/S на коэффициенты ξ при относительном угле скрещивания $\bar{\beta}$, отличном от $1/2$, так и интенсивность влияния параметра $\bar{\beta}$ на коэффициенты гидравлического сопротивления при любой относительной высоте H/S , можно получить зависимости вида

$$\xi = B/Re^n; \\ B = 3,65 H/S + 150\bar{\beta}^2 - 120\bar{\beta} + 21,15; \quad (35)$$

$$n = H/S/6 + 1,80\bar{\beta}^2 - 2, \bar{\beta} + 55.$$

Проверка адекватности полученного соотношения имеющимся экспериментальным данным показала, что оно имеет силу в следующих диапазонах изменения параметров: $Re = (4-40) \cdot 10^3$, $H/S = 0,6-1,5$ и $\bar{\beta} = (1/6)-1,0$.

Основные результаты нашего исследования: определены основные геометрические характеристики и установлены связи между ними в трактах с компланарными каналами;

на базе теории обобщенных переменных при использовании метода анализа размерностей получены безразмерные комплексы, которые могут быть использованы для обработки и обобщения опытных данных по гидравлическим характеристикам таких трактов;

сделан детальный обзор всех опубликованных на момент написания настоящей статьи работ по экспериментальному исследованию гидравлических характеристик трактов с компланарными каналами; на базе этого обзора проведен анализ и сопоставление результатов опытных исследований коэффициентов гидравлических в трактах с компланарными каналами, позволившие установить наиболее надежные эмпирические соотношения и обобщить опытные данные различных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Копелев, С.З.** Конструкция и расчет систем охлаждения ГТД [Текст] / С.З. Копелев, А.Ф. Слитенко / Под ред. А.Ф. Слитенко.— Харьков: Основа, 1994.— 240 с.
2. **Исаченко, В.П.** Теплопередача [Текст] / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сухомел.— М.: Энергия, 1975.— 488 с.
3. **Кудрявцев, В.М.** Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления в трактах с компланарными каналами [Текст] / В.М. Кудрявцев,

С.А. Орлин, С.А. Поснов // Известия вузов. Машиностроение.— 1983. № 4.— С. 54–58.

4. **Галкин, М.Н.** Расчет и анализ внутренней теплоотдачи в охлаждаемых конструкциях с перекрестным течением охладителя [Текст] / М.Н. Галкин, А.Н. Бойко, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Тез. докл. Всесоюзной конф.: Методы и средства машинной диагностики газотурбинных двигателей и их элементов.— Харьков: ХАИ, 1983.— С. 105–106.

5. **Галкин, М.Н.** Внутренняя теплоотдача в оребренных каналах со скрещивающимися струями охлаждающего воздуха [Текст] / М.Н. Галкин, А.Н. Бойко, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Изв. вузов. Машиностроение.— 1984. № 5.— С. 56–60.

6. **Галкин, М.Н.** Исследование и расчет гидравлических и тепловых характеристик охлаждаемых конструкций с компланарными каналами [Текст] / М.Н. Галкин, В.Г. Попов, Н.Л. Ярославцев // Изв. вузов. Машиностроение.— 1985. № 3.— С. 73–76.

7. **Галкин, М.Н.** Интенсификация теплообмена в оребренных трактах с предельно большими углами скрещивающихся каналов [Текст] / М.Н. Галкин, В.П. Литвинков, В.А. Мальков [и др.] // Изв. вузов. Машиностроение.— 1987. № 9.— С. 60–63.

8. **Нагога, Г.П.** Теплообмен и гидравлическое сопротивление в трактах из компланарно-скрещивающихся каналов [Текст] / Г.П. Нагога, И.С. Копылов, М.В. Рукин // Межвуз. научн. сб.: Рабочие процессы в охлаждаемых турбомашинных газотурбинных двигателях.— Казань: КАИ, 1989.— С. 35–41.

9. **Лебедев, А.С.** Экспериментальное исследование теплообмена в модельных каналах охлаждения турбинных лопаток [Текст] / А.С. Лебедев // Изв. вузов. Энергетика.— 1986. № 9.— С. 92–95.

10. **Андреев, К.Д.** Исследование теплообмена и гидравлических сопротивлений в канале прямоугольного сечения со взаимно пересекающимися и скрещивающимися оребрением [Текст] / К.Д. Андреев, Л.В. Арсеньев, В.Г. Полищук, Н.П. Соколов // Промышленная теплотехника.— 1998. Т. 20, № 3.— С. 70–75.

11. **Муравьев, В.В.** Пути повышения эффективности теплообмена в трактах с компланарными каналами [Текст] / В.В. Муравьев, Ф.В. Пелёвин // Труды II Росс. нац. конф. по теплообмену. Тез. докл. Т. 8. Студенческая секция.— М.: МЭИ, 1998.— С. 34–35.

12. **Антонов, А.Н.** Экспериментальное исследование теплопередающих поверхностей с компланарными каналами (типа Френкеля) / А.Н. Антонов, Ю.Ф. Баранов, А.Ю. Клочков [и др.] // Вестник МЭИ.— 1997. № 1.— С. 21–23.

13. **Focke, W.W.** The effect of the corrugation inclination on the thermohydraulic performance of plate heat exchangers [Текст] / W.W. Focke, J. Zachariades, I. Olivier // Int. J. Heat and Mass Transfer.— 1985. Vol. 28, No. 8.— P. 1469–1479.

14. **Савостин, А.Ф.** Исследование характеристик пластинчатых поверхностей нагрева [Текст] / А.Ф. Савостин, А.М. Тихонов // Теплоэнергетика.— 1970. № 9.— С. 75–78.

СОКОЛОВ Николай Павлович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-65-66
odigitriya@mail.ru

ПОЛИЩУК Владимир Григорьевич — кандидат технических наук, заведующий лабораторией Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
(812) 552-65-66
visantiya@freemail.ru

АНДРЕЕВ Константин Дмитриевич — кандидат технических наук, доцент кафедры турбин, гидромашин и авиационных двигателей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета.

195251, Политехническая ул., 29, Санкт-Петербург, Россия
akostik@land.ru