

УДК 621.643.533.6

Е.Н. ПИСЬМЕННИЙ, В.А. РОГАЧЕВ, В.Д. БУРЛЕЙ, А.Ф. ВАСИЛЬЕВ, В.В. ЕЖОВА

# ОБОБЩЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ПО АЭРОДИНАМИЧЕСКОМУ СОПРОТИВЛЕНИЮ ПРОДОЛЬНО-ОМЫВАЕМЫХ ПЛОСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С СЕТЧАТО-ПРОВОЛОЧНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ

## Введение

Плоские поверхности с сетчато-проволочным оребрением, предназначенные для систем воздушного охлаждения РЭА, ПК, наряду с поперечным их омыванием [1], позволяют осуществлять и продольное омывание ребер путем поворота поверхности на 90° вокруг вертикальной оси при этом происходит продольное движение теплоносителя относительно ребер (рис.1). Продольное омывание по сравнению с поперечным [2] отличается тем, что при снижении интенсивности теплообмена на 5...15% аэродинамическое сопротивление снижается на 20...60%, а это приводит к повышению энергетической эффективности поверхности.

Поэтому задача экспериментального определения и расчет аэродинамического сопротивления поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при продольном их омывании является актуальной.

В НТУУ «КПИ» проведены такие работы с целью получения обобщенных зависимостей для расчета сопротивления сетчато-проволочных поверхностей при продольном омывании их теплоносителем.

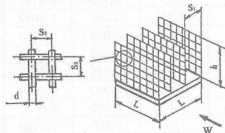


Рис.1. Конструкция теплообменной поверхности

## 1 Методика исследований

Обработка экспериментальных данных и методика исследования аэродинамического сопротивления продольно-омываемых по-

верхностей аналогична приведенным в [1] для поперечного способа омывания. Геометрические характеристики поверхностей представлены в таблицах 1,2.

Потери давления при прокачке теплоносителя через оребренную поверхность определялись по формуле:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ст}} - \left( \lambda_{\text{тр}} \cdot \frac{L}{d_0} + \xi_M \right) \cdot \frac{\rho \cdot w_f^2}{2} \quad (1)$$

По значениям  $\Delta P$  находились значения чисел Эйлера для поверхности в целом:

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot w^2} \quad (2)$$

и чисел Эйлера, отнесенных к безразмерной длине основания поверхности  $L/d$ :

$$Eu_1 = \frac{Eu}{L/d} \quad (3)$$

## 2 Результаты исследований и их анализ

Результаты исследования аэродинамического сопротивления частично представлены на рис.2. Опытные данные достаточно точно аппроксимируются степенной зависимостью вида:

$$Eu_1 = C_1 \cdot Re_d^{-n} \quad (4)$$

В таблице 2 приводятся, кроме геометрических характеристик исследованных поверхностей, и найденные при обработке экспериментальных данных значения показателя степени  $n$  при числе Рейнольдса и коэффициента  $C_1$  в формуле (4).

Методологический подход к выявлению геометрических параметров, влияющих на аэродинамическое сопротивление продольно-омываемых теплоотводящих поверхностей, такой же, как и для поперечно-

омываемых поверхностей [1]. Имеется лишь отличие, связанное с определением параметра размещения  $S1/S2$  [1,4], представляющим собой отношение поперечного шага к продольному. Однако в случае продольного омывания поперечный шаг  $S1$  это шаг между сетчатыми ребрами, а продольный  $S2$  – шаг квадратной ячейки ребра. Как и в [1,3] за приведенную длину развитой поверхности  $H/F$  принято отношение полной теплоотдающей поверхности к площади поперечного проходного сечения.

Из рис.2 и табл.2 видно, что значения

показателя степени  $n$  изменяются от  $n=0$  до  $n=0,16$ . Для поверхностей, у которых параметр размещения  $S1/S2 \geq 2$  показатели степени при числе Рейнольдса в формуле (4) равны нулю. Этим же поверхностям соответствуют и наименьшие значения приведенных длин  $H/F < 3$ . Здесь уместно провести аналогию с ширмовыми трубчатыми поверхностями нагрева, для которых характерны малые значения  $H/F$  и большие  $S1/S2 > 2$ . А, как известно из [5], для ширмовых поверхностей  $n=0$ .

Таблица 1

Геометрические характеристики поверхностей

Номер поверхности	d, мм	h, мм	L, мм	S2, мм	z1
1	0.75	35.0	71.0	5.0	17
2	0.75	32.0	71.0	7.5	17
3	0.75	32.0	71.0	7.5	9
4	0.75	32.0	71.0	7.5	5
5	0.75	32.0	71.0	7.5	3
6	0.65	36.0	72.0	3.0	17
7	0.55	34.5	72.0	3.0	17
8	0.75	35.0	72.0	3.0	5
9	0.80	35.5	72.0	5.0	17
10	0.80	31.0	72.0	5.0	17
11	0.80	26.0	72.0	5.0	17
12	0.75	35.0	102.0	3.5	25
13	0.75	35.0	102.0	7.5	23

Таблица 2

Безразмерные геометрические характеристики и опытные коэффициенты

Номер поверхности	S1/d	S2/d	S1/S2	H/F	n	C1
1	5.33	6.67	0.800	10.70	0.100	0.0118
2	5.33	10.00	0.533	6.03	0.145	0.0140
3	10.00	10.00	1.000	4.05	0.060	0.0042
4	20.00	10.00	2.000	2.73	0.000	0.0016
5	40.00	10.00	4.000	2.09	0.000	0.0013
6	6.15	4.62	1.330	13.86	0.045	0.0050
7	7.27	5.45	1.330	12.10	0.050	0.0040
8	16.00	4.00	4.000	5.11	0.000	0.0017
9	5.00	6.25	0.800	11.4	0.100	0.0120
10	5.00	6.25	0.800	9.91	0.095	0.0103
11	5.00	6.25	0.800	8.33	0.090	0.0088
12	4.66	4.00	1.170	24.64	0.080	0.0112
13	5.33	10.00	0.533	9.04	0.160	0.0186

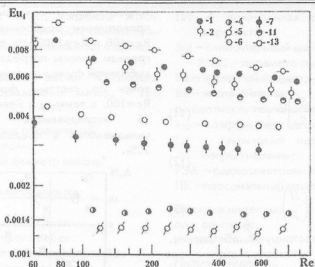


Рис.2. Графики экспериментальных данных  $E_{u1}=f(Re)$  для продольноомываемых поверхностей с сетчато-проволочным оребрением:  
1, 2, 4-7, 11, 13 – номера поверхностей в соответствии с табл. 1, 2.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость показателя степени  $n$  и коэффициента  $C_1$  от параметра размещения и приведенной длины. Расслаивающим параметром здесь выступает  $S_1/S_2$ . Графики рис.3, как и для поперечного способа омыывания поверхности с сетчато-проволочным оребрением [1], описываются подобными по структуре функциями  $n=f_1(S_1/S_2) \cdot f_2(H/F)$ ,  $C_1=f_3(S_1/S_2) \cdot f_4(H/F)$ :

при  $0.5 \leq S_1/S_2 < 2$

$$f_1\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = \frac{0.41}{\frac{S_1}{S_2} + 1.6} - 0.11; \quad (5)$$

$$f_2\left(\frac{H}{F}\right) = \left(\frac{H}{F}\right)^{0.25}; \quad (6)$$

$$f_3\left(\frac{S_1}{S_2}\right) = 0.0016 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-1.58}; \quad (7)$$

$$f_4\left(\frac{H}{F}\right) = \left(\frac{H}{F}\right)^{0.65}; \quad (8)$$

$$n = \left( \frac{0.41}{\frac{S_1}{S_2} + 1.6} - 0.11 \right) \cdot \left(\frac{H}{F}\right)^{0.25}; \quad (9)$$

$$C_1 = 0.0016 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^{-1.58} \cdot \left(\frac{H}{F}\right)^{0.65}; \quad (10)$$

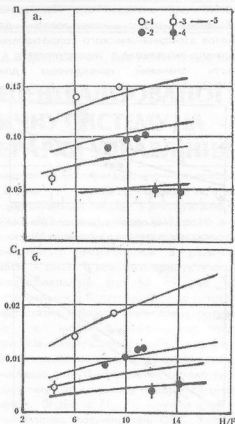


Рис.3. Зависимость абсолютного значения показателя степени  $n$ (а) и коэффициента  $C_1$  (б) в формуле (4) от приведенной длины  $H/F$  и параметра размещения  $S_1/S_2$ :  
1 -  $S_1/S_2=0.533$ ; 2 -  $S_1/S_2=0.8$ ;  
3 -  $S_1/S_2=1.0$ ; 4 -  $S_1/S_2=1.33$ ;  
5 - расчет по формулам (9) и (10).

при  $2 < S_1/S_2 \leq 4$ ;

$$f_1 \left( \frac{S_1}{S_2} \right) = 0;$$

и, следовательно,  $n=0$

$$f_3 \left( \frac{S_1}{S_2} \right) = 0.0009 \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{-0.2}; \quad (11)$$

$$f_4 \left( \frac{H}{F} \right) = \left( \frac{H}{F} \right)^{0.65}; \quad (12)$$

$$C_1 = 0.0009 \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{-0.2} \cdot \left( \frac{H}{F} \right)^{0.65}. \quad (13)$$

Рис.4 и 5 иллюстрируют обобщение, соответственно, по показателю степени  $n$  и коэффициенту  $C_1$ . Сплошная линия на рис.4 соответствует формуле (6), на рис.5 – формуле (8). Рассев опытных данных укладывается в пределы  $\pm 10\%$  для значений  $n$  и  $\pm 15\%$  для значений  $C_1$ . Полученное обобщение можно использовать для расчетов аэродинамического сопротивления продольно-омываемых поверхностей в области значений приведенных длин  $2 \leq H/F \leq 25$ .

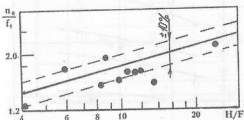


Рис.4. Обобщение опытных данных по значению показателя степени  $n$  в формуле (4)

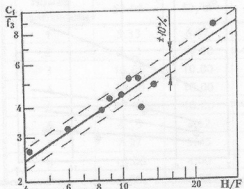


Рис.5. Обобщение опытных данных по значению коэффициента  $C_1$  в формуле (4)

Оценка расхождений опытных  $E_{эл}^{оп}$  и вычисленных по (4), (9), (10), (13) чисел Эйлера  $E_{эл}^P$  для продольно-омываемых

теплопроводящих поверхностей с сетчато-проволочным оребрением выполнена при  $Re=100$  и  $Re=1000$ . На рис.6 представлены границы полосы погрешности адекватности выбранной функциональной зависимости (4), точки со светлым фоном относятся к  $Re=100$ , с темным к  $Re=1000$ . В целом все 13 исследованных поверхностей укладываются в пределы погрешности  $\pm 20\%$ .

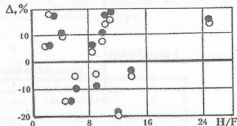


Рис.6. Результаты оценки расхождений опытных данных с расчетом по формулам (4), (9), (10), (13)

### Выводы

Для расчета аэродинамического сопротивления продольно-омываемых сетчато-проволочных теплопроводящих поверхностей предлагается использовать соотношения (4), (9), (10), (13). Показатель степени  $n$  и коэффициент  $C_1$  являются переменными, зависящими от параметра размещения  $S_1/S_2$  и приведенной длины развитой поверхности  $H/F$ . При  $S_1/S_2 \geq 2$ , значения показателя степени равны нулю.

Предлагаемое обобщение обеспечивает расхождение с опытными данными не более  $\pm 20\%$  для всех исследованных поверхностей.

### Литература

1. Письменный Е.Н., Терех А.М., Рогачев В.А., Бурлей В.Д. Обобщение экспериментальных данных по аэродинамическому сопротивлению поперечно-омываемых плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением // Энергетика: экономика, технологии, экология. – 2003. – №6.
2. Письменный Е.Н., Рогачев В.А., Терех А.М., Бурлей В.Д., Разумовский В.Г. Теплообмен плоских поверхностей с сетчато-проволочным оребрением при вынужденной конвекции // Пром. теплотехника.–2002.–Т.24. – № 4.–С.71–78.
3. Кэйс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники.–М.:Энергия.–1967.–222 с.

4. Стасюлявичюс Ю.К., Скринска А.Ю. Теплоотдача поперечно-обтекаемых пучков ребристых труб. - Вильнюс: Минтис. - 1974. - 243 с.
5. Аэродинамический расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. - Л.: Энергия. - 1977. - 256 с.

**Список принятых обозначений:**

- $d$  – диаметр проволоки;  
 $d_3$  – гидравлический диаметр канала;  
 $h$  – высота ребра;  
 $L$  – линейный размер основания;  
 $S$  – шаг;  
 $w$  – скорость воздушного потока;  
 $z$  – количество сетчатых ребер;  
 $\Delta P$  – аэродинамическое сопротивление;  
 $\Delta P_{ст}$  – статический перепад давления;  
 $L/d$  – относительная длина основания поверхности;

$H/F$  – приведенная длина развитой поверхности;

$S/d$  – относительный шаг;

$S1/S2$  – параметр размещения;

$Re$  – число Рейнольдса;

$Eu$  – число Эйлера;

$\rho$  – плотность теплоносителя;

$\lambda_{тр}$  – коэффициент сопротивления трения;

$\xi_M$  – суммарный коэффициент местных сопротивлений;

РЭА – радиоэлектронная аппаратура;

ПК – персональный компьютер;

*Верхние индексы:*

оп – опытный;

р – расчетный;

*Нижние индексы:*

1 – поперечный;

2 – продольный;

т – незагроможденный канал.