

УДК 536.24

БАРАНИЮК А.В., ПИСЬМЕННЫЙ Е.Н., ТЕРЕХ А.М.,  
РОГАЧЕВ В.А., БУРЛЕЙ В.Д.

Национальный технический университет Украины  
“Киевский политехнический институт”

## АЭРОДИНАМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИНЧАТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С РАЗРЕЗНЫМ ОРЕБРЕНИЕМ ПРИ ВЫНУЖДЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

Пропонуються узагальнюючі залежності для розрахунку аеродинамічного опору плоских поверхонь із пластинчастото-розрізним оребрением, у тому числі і для пластинчастих поверхонь із поверненими під кутом до набігаючого потоку розрізнаними частинами ребер. Отримані співвідношення можна використувати для інтервалів змін значень чисел Рейнольдса  $Re = 2000 \dots 12000$ , відносної глибини розрізки  $h_p/h = 0,4 \dots 0,8$ , кута повороту  $\varphi = 0^\circ \dots 45^\circ$ , кроку між ребрами  $t = 2,5 \dots 6,9$  мм, зведеної довжини  $H/F = 14 \dots 30$ .

Предлагаются обобщающие зависимости для расчета аэродинамического сопротивления плоских поверхностей с пластинчато-разрезным оребрением, в том числе и для пластинчатых поверхностей с повернутыми под углом к набегающему потоку разрезанными частями ребер. Полученные соотношения можно использовать для областей изменений значений числа Рейнольдса  $Re = 2000 \dots 12000$ , относительной глубины разрезки  $h_p/h = 0,4 \dots 0,8$ , угла поворота  $\varphi = 0^\circ \dots 45^\circ$ , шага между ребрами  $t = 2,5 \dots 6,9$  мм, приведенной длины  $H/F = 14 \dots 30$ .

Generalizing dependences are proposed for calculation of aerodynamic resistance of flat surfaces with cut plate fining as well as (including) of plate surfaces with cut parts of the fins turned at an angle to the running flow. Obtained relations can be used within Reynolds number variation range  $Re = 2000 \dots 12000$ , relating cutting depth range  $h_p/h = 0,4 \dots 0,8$ , fins rotation angle range  $\varphi_p = 0 \dots 45^\circ$ , range of step between fins  $t = 2,5 \dots 6,9$  mm, reduced length  $H/F = 14 \dots 30$ .

$b$  – ширина “лепестка”;  
 $d$  – диаметр;  
 $h$  – высота ребра;  
 $h_p$  – высота “лепестка”;  
 $L$  – линейный размер основания;  
 $t$  – шаг между ребрами;  
 $T$  – температура;  
 $u$  – ширина разрезки;  
 $w$  – скорость воздушного потока;  
 $Z$  – количество ребер;  
 $\delta$  – толщина ребра;  
 $\varphi$  – угол поворота “лепестка”;  
**Безразмерные комплексы**

### Введение

Вопросам, посвященным изучению тепловых характеристик теплоотводящих развитых поверхностей для охлаждения РЭА, различных теплонагруженных узлов ПК и другой электронной

$$Eu = \frac{\Delta P}{\rho \cdot w_H^2} \text{ – число Эйлера;}$$

$$Re_\varepsilon = \frac{w_H \cdot d_\varepsilon}{\nu} \text{ – число Рейнольдса;}$$

$H/F$  – приведенная длина развитой поверхности.

### Индексы:

$v$  – вход;  
 $n$  – набегающий;  
 $o$  – опытный;  
 $p$  – полный;  
 $p$  – расчетный, разрезной;  
 $c$  – свободный;  
 $\varepsilon$  – эквивалентный.

техники, уделено много внимания [1–4]. Однако при конструировании и внедрении теплообменных поверхностей необходимо знать и правильно проводить расчеты потерь давления и аэродинамического сопротивления при прохождении теплоносителя через охлаждающий элемент. От это-

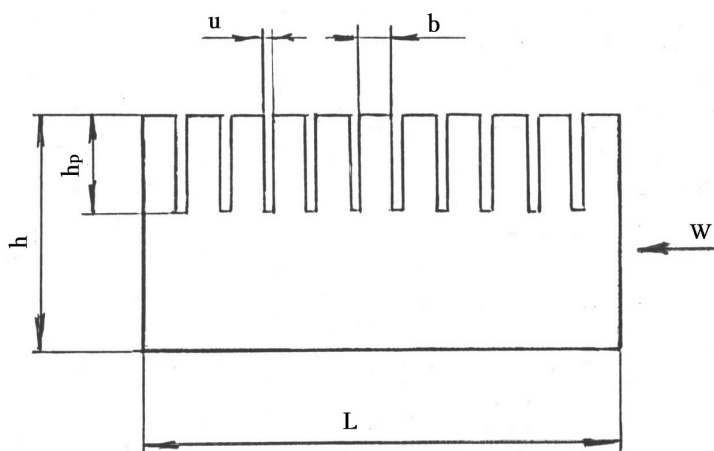


Рис. 1. Пластинчато-разрезное ребро.

го зависит правильный выбор вентилятора по расходно-напорным характеристикам для системы охлаждения.

В НТУУ “КПИ” разработан ряд перспективных развитых теплообменных поверхностей для охлаждения теплонагруженных электронных устройств при вынужденной конвекции. Одна из них – плоская поверхность с пластинчато-разрезными ребрами, разрезанные части которых (так называемые “лепестки”) повернуты относительно набегающего потока под углом 0, 30 и 45 градусов.

Целью данной статьи является обобщение полученных данных, выявление влияния глубины разрезки ребер, угла поворота “лепестков” и геометрических характеристик поверхностей на потери давления, разработка метода расчета аэродинамического сопротивления для плоских поверхностей с пластинчато-разрезными ребрами при их омывании воздушным потоком в канале.

### Методика исследований

Аэродинамическое сопротивление исследованных поверхностей (рис. 1,2) определялось при температурах изотермического потока охлаждающего воздуха  $T_B = 290...300\text{K}$  для чисел Рейнольдса  $Re = 2500...12000$  в аэродинамической трубе прямоугольного сечения [3]. Геометрические характеристики экспериментальных поверхностей представлены в таблице. Все поверхности имели одинаковые линейные размеры основания. Определяющим размером в числе Рей-

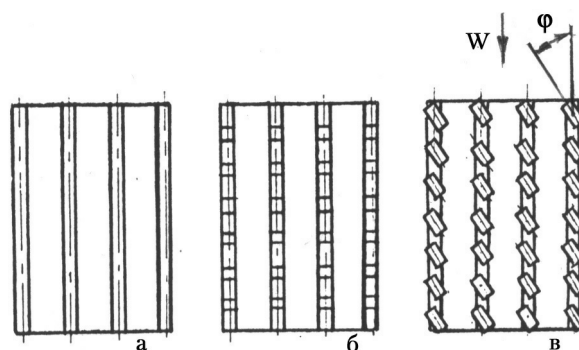


Рис. 2. Фрагменты исследованных поверхностей: а – пластинчато-ребристая; б – пластинчато-ребристая с разрезкой ребер; в – пластинчато-ребристая с разрезкой ребер и поворотом “лепестков”.

нольдса принят эквивалентный диаметр поперечного проходного сечения поверхности. В качестве расчетной скорости в числах Рейнольдса и Эйлера принята скорость набегающего потока  $w_H$ .

Потери давления определялись по разности статических давлений до и после исследуемой поверхности при помощи впаянных на проточные участки трубы штуцеров диаметром 1,5 мм на расстояниях 0,9 м от заднего и 0,2 м от переднего фланцев рабочего участка соответственно. В каждом сечении отбора по ширине канала имелось по три штуцера, к которым через тройник подсоединялся микроманометр ММН-240(5)II классом точности 1.0. Показания микроманометра регистрировали значения падения давления в канале длиной 1600 мм (подробно экспериментальная установка описана в [3]). Собственное аэродинамическое сопротивление теплоотводящих поверхностей определялось по разности статических давлений при наличии ( $\Delta P_{\Pi}$ ) и отсутствии ( $\Delta P_C$ ) в рабочем участке исследуемой поверхностей.

$$\Delta P = \Delta P_{\Pi} - \Delta P_C . \quad (1)$$

Аэродинамическое сопротивление свободного от исследуемой поверхности канала ( $\Delta P_C$ ) измерялось в диапазоне набегающих скоростей  $w_H = 1,5...12$  м/с с последующей статистической обработкой полученных результатов. По значениям  $\Delta P$  определялись числа Эйлера для поверхности.

Таблица.

Номер поверхн.	Параметр								
	$h$ , мм	$h_p$ , мм	$t$ , мм	$\delta$ , мм	$u$ , мм	$b$ , мм	$Z$ , шт	$H/F$	$\varphi$ , град
1	35	14,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	0
2	35	21,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	0
3	35	28,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	0
4	35	14,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	30
5	35	21,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	30
6	35	28,0	6,9	1,4	1,0	5,6	11	14,3	30
7	35	28,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	45
8	35	28,0	6,9	1,4	1,5	5,6	11	14,3	45
9	35	-	6,9	1,4	-	-	11	14,3	-
10	35	14,0	2,5	0,55	0,6	6,5	27	30,5	0
11	35	21,0	2,5	0,55	0,6	6,5	27	30,5	0
12	35	-	2,5	0,55	0,6	-	27	30,5	-
13	35	21,0	5,0	0,55	0,6	5,6	14	17,4	0
14	35	21,0	5,0	0,55	0,6	5,6	14	17,4	30
15	35	21,0	5,0	0,55	0,6	5,6	14	17,4	45
16	35	-	5,0	0,55	-	-	14	17,4	-

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

Определение погрешности для чисел Эйлера проводилось для двух крайних режимов скоростей. Расчеты показали, что относительная погрешность при определении числа Эйлера лежит в пределах  $\pm (5...15) \%$ .

### **Результаты исследований, их анализ и обобщение**

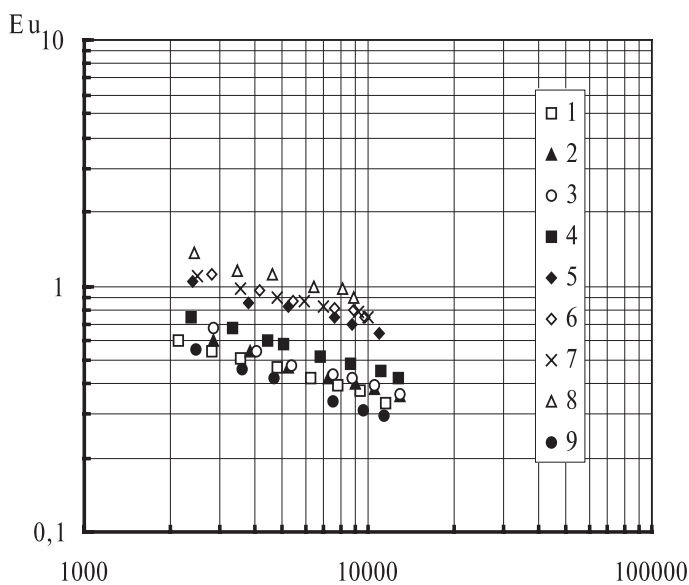
Часть результатов исследования аэродинамического сопротивления представлено на рис.3. Опытные данные достаточно точно аппроксимируются степенной зависимостью вида:

$$Eu = C \cdot Re_3^{-n} \quad (3)$$

На рис. 3 представлены также результаты исследования потерь давления для обычной пластинчато-ребристой теплообменной поверхности

№9. Пластинчато-ребристые поверхности №9,12,16 использовались в качестве базовых для сравнения с данными, полученными для теплоотводящих поверхностей №1-№8, №10,11, №13-15 с разрезкой ребер и поворотом “лепестков” на угол  $30^\circ$  и  $45^\circ$ , что позволило проследить влияние глубины разрезки ребер  $h/h_p$  и угла поворота “лепестков” на потери давления. Между собой поверхности №9,12,16 отличались величиной шага  $t$  и приведенной длиной  $H/F$ , представляющей собой отношение полной теплоотдающей площади оребренной поверхности  $H$  к “живому” сечению  $F$  для прохода воздуха.

Анализ полученных результатов показал, что увеличение глубины разрезки приводит к росту сопротивления на 12 % при  $h/h_p = 0,4$  (поверхность №1) и на 32 % при  $h/h_p = 0,8$  (поверхность №3) рис. 4. Увеличение аэродинамического сопротивления при разрезке ребер можно объяснить тем, что поток протекая вдоль ребер и взаимодействуя с кромками “лепестков”, образует отрывные области на поверхности ребер, затра-

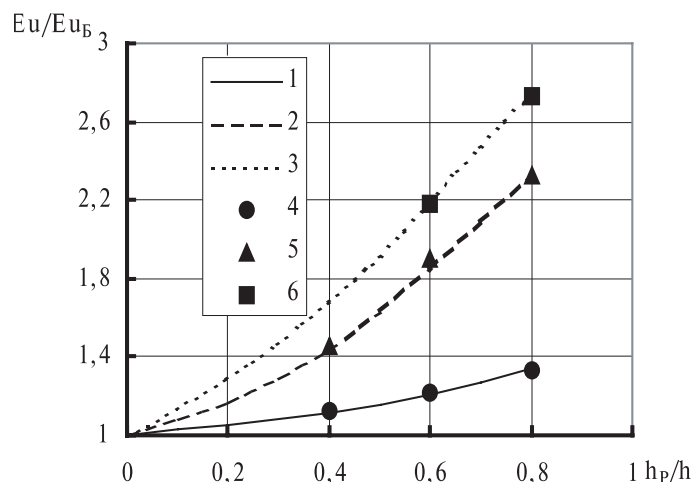


**Рис. 3. Результаты исследования аэродинамического сопротивления плоских пластинчато-ребристых теплоотводящих поверхностей. Номера на рисунке соответствуют номерам поверхностей в таблице.**

чивая при этом дополнительную энергию на преодоление местных сопротивлений, связанных с отрывом потока. Последующий поворот “лепестков” на угол 30 и 45 градусов (поверхности №4-6, №7,8) приводит к резкому росту аэродинамического сопротивления в 1,5...2,5 раза, по сравнению с базовой поверхностью (рис. 5), что связано с увеличением загромождения проходного сечения за счет повернутых “лепестков” и с повышением турбулизации потока.

Кроме влияния на сопротивление глубины разрезки и угла поворота “лепестков”, выявлено также влияние приведенной длины  $H/F$ . С увеличением  $H/F$  аэродинамическое сопротивление возрастает.

При обобщении опытных данных в качестве параметров, существенно влияющих на потери давления, приняты: относительная глубина разрезки ребер  $h_p/h$ , угол поворота “лепестков” и приведенная длина развитой поверхности  $H/F$ . Влияние  $h_p/h$ ,  $\varphi$  и  $H/F$  на потери давления выражалось через коэффициент  $C$  в формуле (1). Его величина представляется как произведение коэффициентов  $C_S$  и  $C_P$ , т.е.  $C = C_S C_P$ . В свою очередь эти коэффициенты функционально связаны



**Рис. 4. Зависимость приращения аэродинамического сопротивления от относительной глубины разрезки. 1-3 – расчет; 4 – угол поворота “лепестков”  $\varphi = 0^\circ$ ; 5 –  $\varphi = 30^\circ$ ; 6 –  $\varphi = 45^\circ$ .**

с основными геометрическими характеристиками поверхности, т.е.  $C_S = f(H/F)$   $C_P = f(h_p/h)$ . Показатель степени при числе Рейнольдса в формуле (1) зависит от приведенной длины  $H/F$ .

Для определения коэффициентов  $C_S$ ,  $C_P$  и показателя степени  $n$  математическая обработка опытного материала дала следующие аппроксимации:

$$C_S = 34 \left( \frac{H}{F} \right)^{-0,47}, \tag{4}$$

$$C_P = \exp \left[ \left( \ln \frac{1,36}{e^\varphi} + 3,8\varphi \right) \frac{h_p}{h} \right], \tag{5}$$

$$n = 0,74 \left( \frac{H}{F} \right)^{-0,26}. \tag{6}$$

Таким образом, с учетом соотношений (4-6) обобщающая зависимость для расчета аэродинамического сопротивления теплоотводящих поверхностей с пластинчато-разрезными ребрами и поворотом к набегающему потоку имеет вид:

$$Eu_H = 34 \left( \frac{H}{F} \right)^{-0,47} Re_H^{0,74 \left( \frac{H}{F} \right)^{-0,26}} C_P. \tag{7}$$

Оценка точности формул (3), (5), (7) проводилась прямым сопоставлением опытных значений чисел Эйлера  $Eu_0$  и расчетных  $Eu_p$  при гранич-

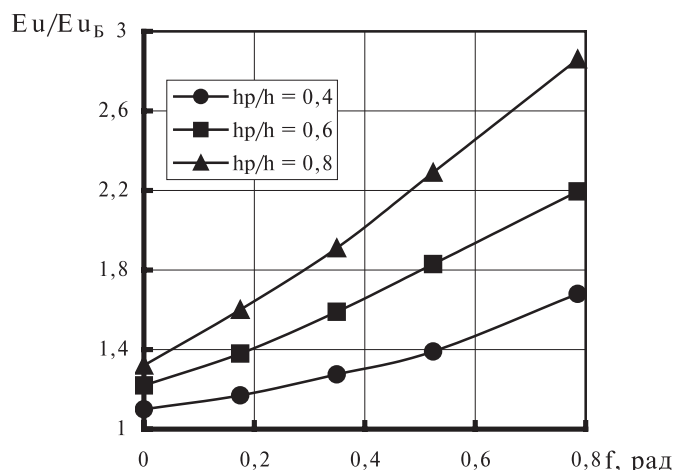


Рис. 5. Зависимость приращения аэродинамического сопротивления от угла поворота “лепестков”: 1 –  $h_p/h = 0,4$ ; 2 –  $h_p/h = 0,6$ ; 3 –  $h_p/h = 0,8$ .

ных значениях чисел Рейнольдса  $Re_{\vartheta} = 2000$  и  $Re_{\vartheta} = 11000$  по формуле

$$\Delta = \frac{Eu_0 - Eu_p}{Eu_p} 100\% . \quad (8)$$

Для идентификации поверхности использовался ее номер в таблице. Результаты этой оценки представлены на рис. 6. Штриховые линии на рисунке ограничивают область, где расхождения между опытными и расчетными значениями чисел Эйлера не превышают 10 %. Внутри нее находятся все 100 % опытных точек.

### Выводы

1. Неполная разрезка по высоте ребер пластинчато-ребристых поверхностей на отдельные прямоугольные части (“лепестки”) приводит к росту аэродинамического сопротивления теплоотводящей поверхности на 12...32 %.

2. Для поверхностей с поворотом “лепестков” на 30 и 45 градусов сопротивление соответственно в 1,35...2,2 и в 1,7...2,9 раза выше, чем для базовой пластинчато-ребристой теплоотводящей поверхности.

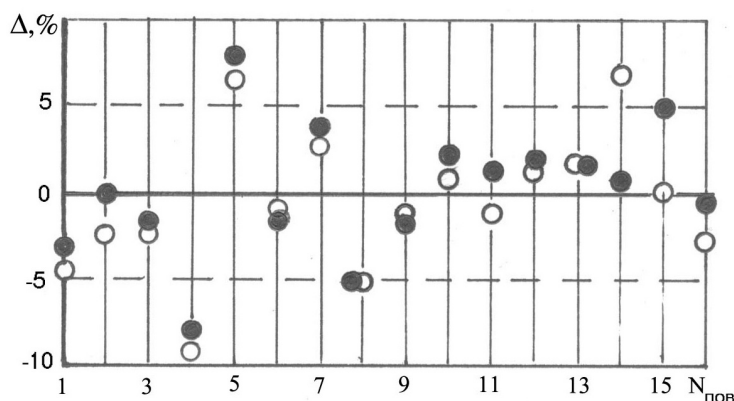


Рис. 6. Оценка точности обобщающих формул (5), (6) для пластинчато-ребристых теплоотводящих поверхностей с разрезкой ребер, с разрезкой ребер и поворотом “лепестков”.

3. Расчет потерь давления для приведенных в таблице геометрических характеристик теплообменных поверхностей №1-№16 в диапазоне изменения относительной глубины разрезки  $h_p/h = 0,4...0,8$  и углов поворота “лепестков”  $\varphi = 0^\circ...45^\circ$  предлагается вести по формулам (3), (5).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании РЭА. М.: Советское радио. – 1976. – 232 с.
2. Чернышов А.А., Иванов В.И., Аксенов А.И., Глушкова Д.Н. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники. М.: Энергия. – 1980. – 216 с.
3. 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
4. Письменный Е.Н., Терех А.М., Матвиенко О.Е. Теплоаэродинамические характеристики пучков труб с сегментным оребрением// Пром. теплотехника. – 1999. – Т.21, № 4-5. – С. 76-79.

Получено 31.01.2006 г.