

Авторефер.
Е92

инженер Чурману М.В.

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

Для служебного пользования

Экз. № 0020

ЕФРЕМОВ Владимир Иванович

УДК 621.396.69.049.77.017.72

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ
И МИКРОСБОРОК С ПОМОЩЬЮ ПЛАСТИНЧАТО-ШТЫРЕВЫХ
РАДИАТОРОВ ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ДВИЖЕНИИ ВОЗДУХА

Специальность 05.14.05 - теоретические основы теплотехники

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Одесса - 1988

xv 1057

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
БІБЛІОТЕКА

Работа выполнена на предприятии п.я. Г-4371

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Спокойный Ю.Е.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Коноплев И.Д.
кандидат технических наук,
доцент Титарь С.С.

Ведущее предприятие - научно-производственное
объединение "Авангард",
г. Ленинград.

Защита диссертации состоится "20" Июль 1988 г.
в 10 часов на заседании специализированного совета
К 068.27.01 при Одесском технологическом институте холодильной
промышленности по адресу: 270057, г. Одесса, ул. Петра Великого, 1/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОТИХП.

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь

следующим образом

ление 1 % прироста

ление 1 % прироста

Кульшин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных направлений совершенствования современной радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) является комплексная микроминиатюризация на основе широкого внедрения интегральных микросхем высокой степени интеграции (БИС, СБИС) и микросборок (МСБ), неизбежным следствием которой является увеличение рассеиваемой в единице объема мощности.

В связи с этим обеспечение теплового режима элементов РЭА выдвигается в качестве одной из основных задач при конструировании РЭА.

Наиболее простым и надежным способом локального обеспечения теплового режима элементов РЭА является отвод теплового потока с помощью радиаторов воздушного охлаждения. Однако, применение радиаторов для охлаждения БИС, СБИС и МСБ (ИС) до настоящего времени не нашло достаточно широкого распространения. Это вызвано тем, что существующие конструкции радиаторов охлаждения дискретных полупроводниковых приборов (ППП) не пригодны для охлаждения ИС, а используемые в единичных случаях радиаторы специальных конструкций для охлаждения ИС не обеспечены необходимыми методами расчета и конструирования.

Все это в целом определяет актуальность диссертационной работы.

Цель работы является разработка методов расчета и конструирования радиаторов принудительного воздушного охлаждения для обеспечения теплового режима современных и перспективных ИС и создание на этой основе стандартизованных параметрических рядов радиаторов.

Научная новизна состоит в следующем:

1. Разработана и обоснована тепловая и математическая модель, на базе которой созданы методы расчета и конструирования, позволившие разработать стандартизованные параметрические ряды радиаторов охлаждения ИС.

2. Разработана методика экспериментального определения коэффициента теплоотдачи различных типов ребрений, применяе-

мых в конструкциях радиаторов охлаждения ИС, на базе которой исследованы закономерности теплоотдачи призматических штырей, являющихся элементами пластинчато-штыревого оребрения, используемого в перспективных конструкциях радиаторов охлаждения ИС.

3. Получены и обоснованы уравнения подобия, необходимые для проведения тепловых расчётов радиаторов охлаждения ИС.

Научные положения:

1. Теплообменные процессы, происходящие в радиаторах охлаждения ИС, могут быть с достаточной для инженерной практики точностью описаны разработанной тепловой и математической моделью, в которой радиатор представлен в виде двух пластин с четырьмя явно выраженными областями, характеризующимися различными условиями теплообмена радиатора с корпусом ИС и охлаждающим потоком воздуха.

2. Теплоотдача призматических штырей, поперечно-обтекаемых потоком воздуха, в характерном для радиаторов охлаждения ИС диапазоне скоростей и геометрических параметров зависит не только от определяющих размеров штырей и скорости потока воздуха, но и от соотношения толщины и ширины штыря, а также номера ряда в шахматном пакете, и практически не зависит от ориентации штыря относительно направления потока воздуха, а также шагов расположения штырей в шахматном пакете.

Практическая ценность работы заключается в разработке на базе проведенных исследований отраслевого стандарта ОСТ 4Г 0.297.200 "Радиаторы охлаждения элементов микроминиатюрной радиоэлектронной аппаратуры", внедренного на 30 предприятиях отрасли. В стандарте реализованы все полученные результаты проведенной работы. Часть стандартизованных типоразмеров радиаторов выпускается серийно.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на второй и третьей отраслевых конференциях по тепловым режимам РЭА в 1973 г. и 1983 г. (г. Одесса), а также научно-технической конференции ОТИИП в 1988 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 10 работ, в том числе получено авторское свидетельство на изобретение.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, выводов, списка литературы из 113 наименований и 13 приложений. Основной текст изложен на 125 страницах машинописного текста, включающих 30 рисунков и 8 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе рассмотрено влияние теплового режима элементов РЭА на их надежность, проанализированы различные способы обеспечения теплового режима, основные трудности при реализации которых связаны с проблемой отвода теплового потока от элементов РЭА, численно равного:

$$Q = \alpha_{\text{кон}} \cdot F_3 (t_3 - t_c) + \alpha_{\text{рад}} \cdot F_3 (t_3 - t_c) + \frac{\alpha_{\text{кв}}}{\beta_{\text{кв}}} \cdot F_{\text{кв}} (t_3 - t_n). \quad (I)$$

Для причудливого воздушного охлаждения, нашедшего наибольшее распространение в современных устройствах РЭА, вклад радиационно-кондуктивного теплообмена (второе и третье слагаемые в уравнении (I)) незначителен. Основная часть теплового потока отводится конвекцией, для чего нередко используются радиаторы, особенно в тех случаях, когда большинство элементов РЭА находится в нормальном тепловом режиме и лишь отдельные из них требуют дополнительных мер по его обеспечению. Существующие конструкции радиаторов охлаждения ПЭИ и методы их расчёта в большинстве своём оказываются непригодными для обеспечения теплового режима ИС, так как приводят к конструкторской избыточности. Используемые в единичных случаях радиаторы специальных конструкций для охлаждения ИС не обеспечены необходимыми методами расчёта и конструирования. Всё это ухудшает массо-габаритные характеристики РЭА.

Проведенный анализ существующих методов расчёта и экспериментальных исследований радиаторов позволил в работе обосновать и сформулировать основные задачи исследований.

Во второй главе приведена классификация конструкций радиаторов охлаждения ИС, разработана и обоснована тепловая и математическая модель, изложен методика теплового расчёта.

Анализ существующих конструкций ИС, единичных конструкций радиаторов охлаждения ИС и технических требований,

предъявляемых к ИС и радиаторам, позволил выявить все возможные конструкции радиаторов и классифицировать их в соответствии с рис. 1.

С учетом приведенной классификации в общем случае радиаторы можно представить состоящими из следующих основных частей:

основания радиатора, контактирующего с основанием корпуса ИС;

крышки радиатора, контактирующей с крышкой корпуса ИС;

элементов соединения деталей радиатора с корпусом ИС и крепления их к плате.

Конкретные конструкции радиаторов могут включать все перечисленные детали, либо только часть из них. Наиболее перспективным оребрением радиаторов охлаждения ИС, отличающимся высокой эффективностью и технологичностью изготовления, является пластинчато-штыревое оребрение, состоящее из призматических штырей. Уравнения подобия, описывающие теплоотдачу таких штырей в характерном для радиаторов охлаждения ИС диапазоне геометрических параметров и скоростей потока воздуха, отсутствуют.

Тепловая модель, разработанная на базе обобщенной конструкции радиатора охлаждения ИС, охватывает всё многообразие возможных конструкций радиаторов и представляет собой две пластины, между которыми расположен источник теплоты, имитирующий ИС (рис. 2). Пластины разделены на четыре явно выраженные области, характеризующиеся различными условиями теплообмена с корпусом ИС и охлаждающим потоком воздуха.

В общем случае тепловая модель радиатора трёхмерная, однако для упрощения математического описания этой модели приняты допущения, обоснованные в работе и позволяющие с достаточной для инженерной практики точностью свести рассматриваемую модель к одномерной:

1. Температура основания (крышки) корпуса ИС постоянна и равна среднеинтегральной температуре:

$$t_{0(k)} = \text{const.}$$

2. Температура основания радиатора (пластина I, рис. 2) изменяется только вдоль оси x :

$$t_{1(3,4)} = t(x).$$

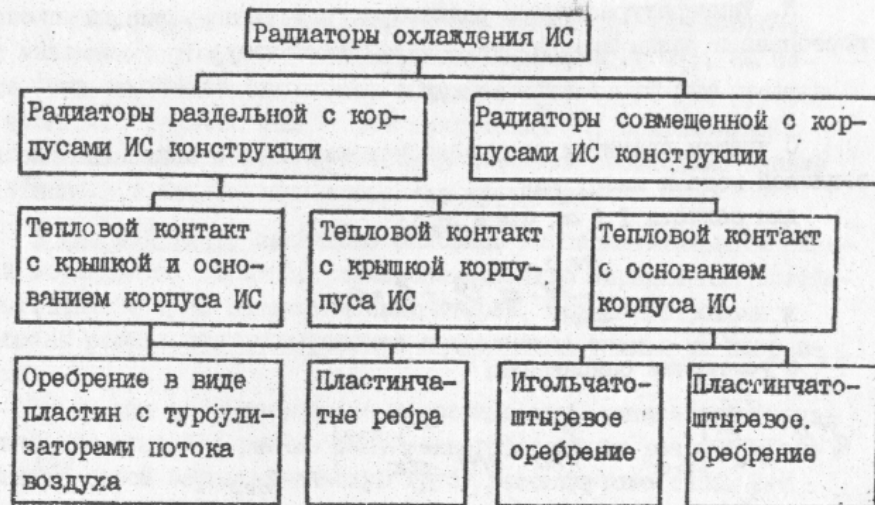


Рис. 1. Классификация конструкций радиаторов охлаждения ИС

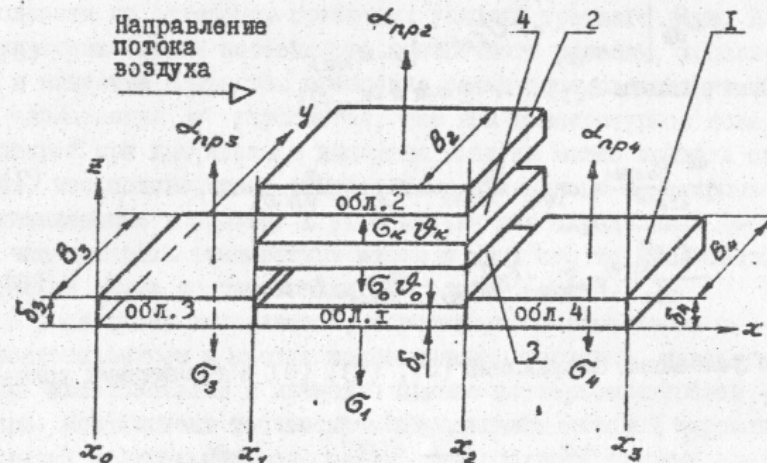


Рис. 2. Тепловая модель радиатора охлаждения ИС
I - основание радиатора; 2 - крышка радиатора;
3 - основание корпуса ИС; 4 - крышка корпуса ИС.

3. Температура крышки радиатора (пластина 2, рис. 2) постоянна и равна среднеинтегральной температуре:

$$t_2 = \text{const.}$$

С учетом принятых допущений математическое описание тепловой модели имеет вид

для области I ($x_1 \leq x \leq x_2$):

$$\frac{d^2 \vartheta_{p1}}{dx^2} - a_1^2 \vartheta_{p1} + b_1 = 0, \quad (2)$$

с условиями сопряжения:

$$\delta_1 \cdot B_1 \left. \frac{d\vartheta_{p1}}{dx} \right|_{x=x_{1(2)}} = \delta_{3(4)} \cdot B_{3(4)} \left. \frac{d\vartheta_{p3(4)}}{dx} \right|_{x=x_{1(2)}}, \quad (3)$$

$$\vartheta_{p1} \Big|_{x=x_{1(2)}} = \vartheta_{p3(4)} \Big|_{x=x_{1(2)}}; \quad (4)$$

для области 2 ($x_1 \leq x \leq x_2$):

$$\frac{d\vartheta_{\delta 2}}{dx} - a_2 (\vartheta_{\kappa} - \vartheta_{\delta 2}) = 0, \quad (5)$$

с условиями сопряжения:

$$\vartheta_{\delta 2} \Big|_{x=x_{1(2)}} = \vartheta_{\delta 3(4)} \Big|_{x=x_{1(2)}}, \quad (6)$$

для области 3(4) ($x_{0(2)} \leq x \leq x_{1(3)}$):

$$\frac{d^2 \vartheta_{p3(4)}}{dx^2} - a_{3(4)} \cdot \vartheta_{p3(4)} + E_{3(4)} \cdot \vartheta_{\delta 3(4)} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{d\vartheta_{\delta 3(4)}}{dx} + S_{3(4)} (\vartheta_{\delta 3(4)} - \vartheta_{p3(4)}) = 0, \quad (8)$$

с условиями сопряжения (3), (4), (6) и граничными условиями:

$$\vartheta_{\delta 3} \Big|_{x=x_0} = 0; \quad \left. \frac{d\vartheta_{p3(4)}}{dx} \right|_{x=x_{0(1)}} = 0. \quad (9)$$

В диссертационной работе и приложениях к ней приведены общие решения дифференциальных уравнений (2), (5), (7) и (8), определены постоянные интегрирования и получены выражения,

позволяющие определить тепловой поток, отводимый радиатором, при заданных значениях температурных напоров ϑ_0 и ϑ_{κ} . На основе этих выражений составлена и реализована на ЕС ЭМ программа теплового расчёта радиаторов охлаждения ИС, приведенная в приложении к работе. Для проведения расчётов необходимо знание коэффициента в теплоотдачи элементов оребрения.

В третьей главе приведено описание экспериментального стенда и исследуемых образцов, изложена методика определения коэффициента теплоотдачи призматических штырей, проанализированы и обобщены результаты эксперимента и проведена оценка их погрешности.

Стенд для экспериментальных исследований теплоотдачи призматических штырей в режиме вынужденного движения воздуха представляет собой аэродинамическую трубу разомкнутого типа. Его схема незначительно отличается от широко используемых в подобных случаях схем стендов и приведена в работе.

Суть методики определения коэффициента теплоотдачи состоит в том, что вместо общепринятого метода определения α путём измерения теплового потока и усреднённого температурного напора определяют экспериментальным путём температурное поле исследуемого элемента оребрения и решают для него обратную задачу теплопроводности по отысканию граничных условий третьего рода. Для призматических штырей постоянного поперечного сечения, используемых в качестве элементов оребрения радиаторов охлаждения ИС, задача определения α упрощается, так как температурное поле таких штырей при вынужденном движении воздуха можно считать одномерным, что подтверждено результатами численного моделирования, приведенными в работе. В этом случае для определения α достаточно измерить температуру штыря в двух его точках, отстоящих друг от друга на расстоянии l по его длине.

Для уменьшения погрешности, обусловленной контактным тепловым сопротивлением в местах подсоединения термопар, исследуемый штырь использовался в качестве одного из термоэлектродов термопары. Коэффициент теплоотдачи определялся методом итераций по известной зависимости, описывающей теплоотдачу стержня конечной длины с постоянным поперечным сечением, с учетом теплового потока, отводимого термоэлектродом, расположенным на торце штыря

$$\alpha = \text{Arch}^2(\theta - A) \cdot \lambda \cdot f / (u \cdot l^2). \quad (10)$$

Экспериментальные исследования теплоотдачи одиночных и шахматных пакетов поперечно-обтекаемых призматических штырей проводились в диапазоне значений, характерных для радиаторов ИС: геометрических параметров штырей $\delta = 4 + 8$ мм, $\delta' = 0,5 + 2,0$ мм, $l = 5 + 20$ мм, $S_1 = 3,0 + 7,5$ мм, $S_2 = 4 + 7$ мм;

чисел $Re = 1 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^3$;

определяющих размеров $L = \delta + \delta' = 4,5 + 9,5$ мм;

температуры охлаждающего потока воздуха $t_c = 20 \pm 4$ °С.

Экспериментальные данные обрабатывались в виде уравнений подобия $Nu = cRe^n$. Характер теплоотдачи одиночных призматических штырей, как показали результаты эксперимента, зависит от соотношения толщины δ' и ширины δ штыря. С уменьшением отношения δ'/δ показатель степени n при числе Re увеличивается, а коэффициент c — уменьшается (рис. 3).

Теплоотдача штырей незначительно зависит от направления потока воздуха. При изменении угла φ от 0 до 90° число Nu изменяется не более чем на $\pm 15\%$ (рис. 4). Теплоотдача штырей, установленных в шахматных пакетах, стабилизируется, начиная с третьего ряда. Характер теплоотдачи зависит от числа Re . При числах $Re < 800$ в области преобладающего ламинарного движения воздуха теплоотдача призматических штырей в шахматном пакете на 4...8% выше теплоотдачи одиночных штырей, причём теплоотдача штырей в первом ряду всего на 2...3% ниже теплоотдачи в глубинных рядах, а во втором ряду — практически совпадает с теплоотдачей штырей в глубинных рядах (рис. 5).

При числах $Re > 800$ характер теплоотдачи штырей в первом ряду не меняется (рис. 5); во втором ряду — постепенно повышается показатель степени n , достигая значения 0,5; в третьем и последующих рядах — показатель степени n существенно увеличивается, достигая значений 0,70...0,72, что свидетельствует о наступлении переходного режима движения воздуха. В этой области чисел Re коэффициент теплоотдачи штырей в глубинных рядах не зависит от отношения δ'/δ .

Во всём исследованном диапазоне геометрических параметров штырей и чисел Re теплоотдача и аэродинамическое сопротивление шахматных пакетов призматических штырей практически не зависят от поперечного и продольного шагов их расположения.

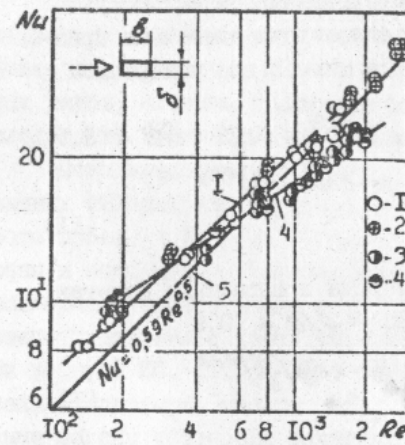


Рис. 3. Теплоотдача одиночных призматических штырей
 1 - $\delta = 4$ мм, $\delta' = 0,5$ мм;
 2 - $\delta = 8$ мм, $\delta' = 1,5$ мм;
 3 - $\delta = 4$ мм, $\delta' = 1,5$ мм;
 4 - $\delta = 4$ мм, $\delta' = 2,0$ мм;
 5 - пластина, $Pr = 0,7$

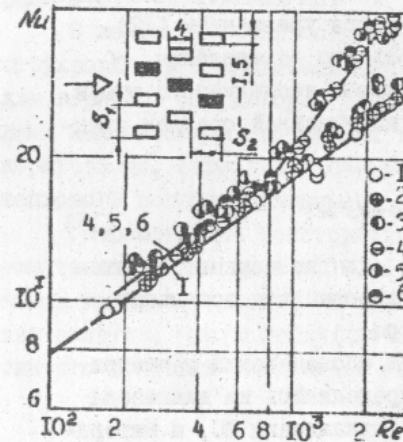


Рис. 5. Теплоотдача штырей в шахматных пакетах
 1 - одиночный штырь;
 2 - первый ряд; 3 - второй ряд; 4 + 6 - третий ряд;
 5 - $S_1 = 7,5$ мм, $S_2 = 5$ мм;
 6 - $S_1 = 4,5$ мм, $S_2 = 7$ мм

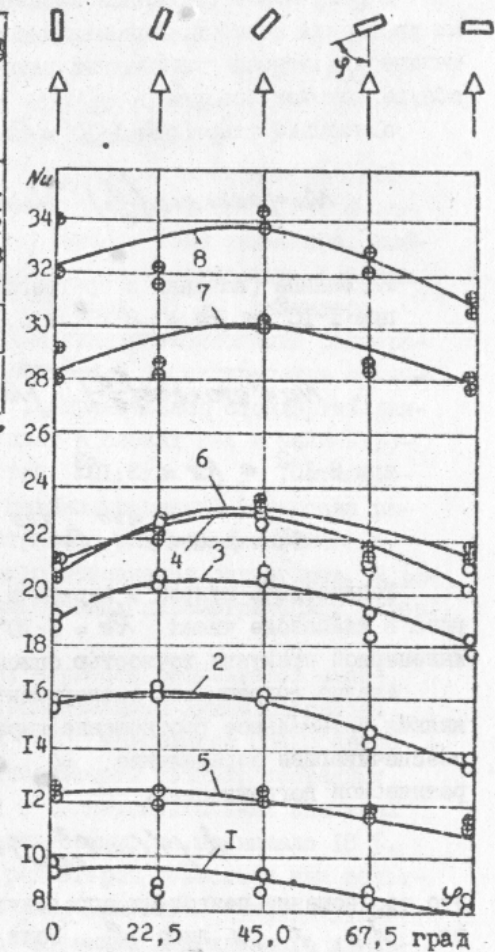


Рис. 4. Влияние угла поворота φ на теплоотдачу призматических штырей
 1 + 4 - $\delta = 4$ мм, $\delta' = 1,5$ мм;
 5 + 8 - $\delta = 8$ мм, $\delta' = 1,5$ мм;
 1 - $w = 0,5$ м/с, ($Re = 175$);
 2 - $w = 2,0$ м/с, ($Re = 710$);
 3 - $w = 3,5$ м/с, ($Re = 1240$);
 4 - $w = 5,0$ м/с, ($Re = 1755$);
 5 - $w = 0,5$ м/с, ($Re = 310$);
 6 - $w = 2,0$ м/с, ($Re = 1255$);
 7 - $w = 3,5$ м/с, ($Re = 2180$);
 8 - $w = 5,0$ м/с, ($Re = 3070$)

В результате обобщения экспериментальных данных получены уравнения подобия, описывающие теплоотдачу одиночных шахматических штырей и шахматных пакетов штырей при поперечном обдуве потоком воздуха:

одиночные штыри при $1 \cdot 10^2 \leq Re \leq 3 \cdot 10^3$ и $0,15 \leq \delta/B \leq 0,5$.

$$Nu = \left[0,66 + 2,48 \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,66} \right] Re^{0,5-0,316 \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,89}}; \quad (11)$$

глубинные (начиная с третьего) ряды в шахматных пакетах: при $1 \cdot 10^2 \leq Re \leq 8 \cdot 10^2$ и $0,15 \leq \delta/B \leq 0,5$

$$Nu = \left[0,70 + 2,65 \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,66} \right] Re^{0,5-0,316 \left(\frac{\delta}{B} \right)^{0,89}}; \quad (12)$$

при $8 \cdot 10^2 \leq Re \leq 3 \cdot 10^3$

$$Nu = 0,192 \cdot Re^{0,70} \cdot Pr^{0,53} \quad (13)$$

Теплоотдача штырей в первом и втором ряду шахматного пакета в диапазоне чисел $Re = 1 \cdot 10^2 \dots 3 \cdot 10^3$ с достаточной для инженерной практики точностью описывается уравнением (12).

Анализ погрешности экспериментального определения α выявил оптимальное соотношение параметров исследуемого штыря, обеспечивающее определение α с минимальной средней квадратической погрешностью:

$$\lambda \cdot f / (\mu \cdot \epsilon_{эфф}^2) = 0,483 \alpha. \quad (14)$$

Это соотношение позволяет определить один из параметров штыря — λ , f , μ либо ϵ , если известны все остальные, или выбрать одновременно все параметры.

При проведении экспериментальных исследований геометрические параметры f , μ и ϵ определялись из диапазона значений, характерных для радиаторов охлаждения ИС, а материал штыря выбирался исходя из полученного по формуле (14) значения λ . Для исследованных образцов штырей использовался константан ($\lambda = 22 \text{ Вт/(м·К)}$), что обеспечило определение α с относительной средней квадратической погрешностью, не превышающей 5 %.

В четвертой главе разработаны и обоснованы базовые конструктивные схемы, стандартизованные параметрические ряды радиаторов, принципы их конструирования на базе стандартизованных рядов, а также приведены результаты экспериментальных исследований конкретных типоразмеров радиаторов.

Стандартизация радиаторов проводилась на основе разработанных базовых конструктивных схем трёх типов (рис. 6). В работе проанализированы особенности каждого типа радиатора, выбраны и обоснованы размеры, подлежащие стандартизации. К таким размерам отнесены длина $D_{1,2}$ и ширина $E_{1,2,3}$ радиатора, взаимосвязанные с соответствующими стандартизованными размерами корпуса ИС, длина D_3 , обусловленная эффективностью применения радиатора, высота $A_{1,2,3}$, ограниченная стандартизованными шагами установки печатных плат в блоках РЭА и межцентровые расстояния крепёжных отверстий $B_{2,3}$ и $C_{2,3}$, стандартизация которых необходима для механизированной установки радиаторов на печатных платах. Остальные размеры выбираются в зависимости от условий конкретного применения радиаторов. В работе приведены таблицы стандартизованных параметрических рядов радиаторов охлаждения ИС.

С целью проверки полученных в работе результатов сконструированы и исследованы экспериментальным путем радиаторы для корпусов микросборок I202 и I210, являющихся представителями наименьших и наибольших типоразмеров стандартизованных корпусов ИС. Разл. ие расчётных и экспериментальных значений теплового потока, отводимого радиаторами, не превышало 10 %.

Разработанные конструкции радиаторов позволили при заданном тепловом потоке в 2,5...3,3 раза уменьшить температурный напор между корпусом ИС и средой в режиме вынужденного движения воздуха, что подтвердило целесообразность применения пластинчато-штыревых радиаторов для обеспечения теплового режима ИС.

ВЫВОДЫ

1. Разработанная и обоснованная тепловая и математическая модель радиаторов охлаждения ИС охватывает всё разнообразие перспективных конструкций радиаторов для всей номенклатуры выпускаемых и разрабатываемых ИС.

2. Предложенная методика определения коэффициента тепло-

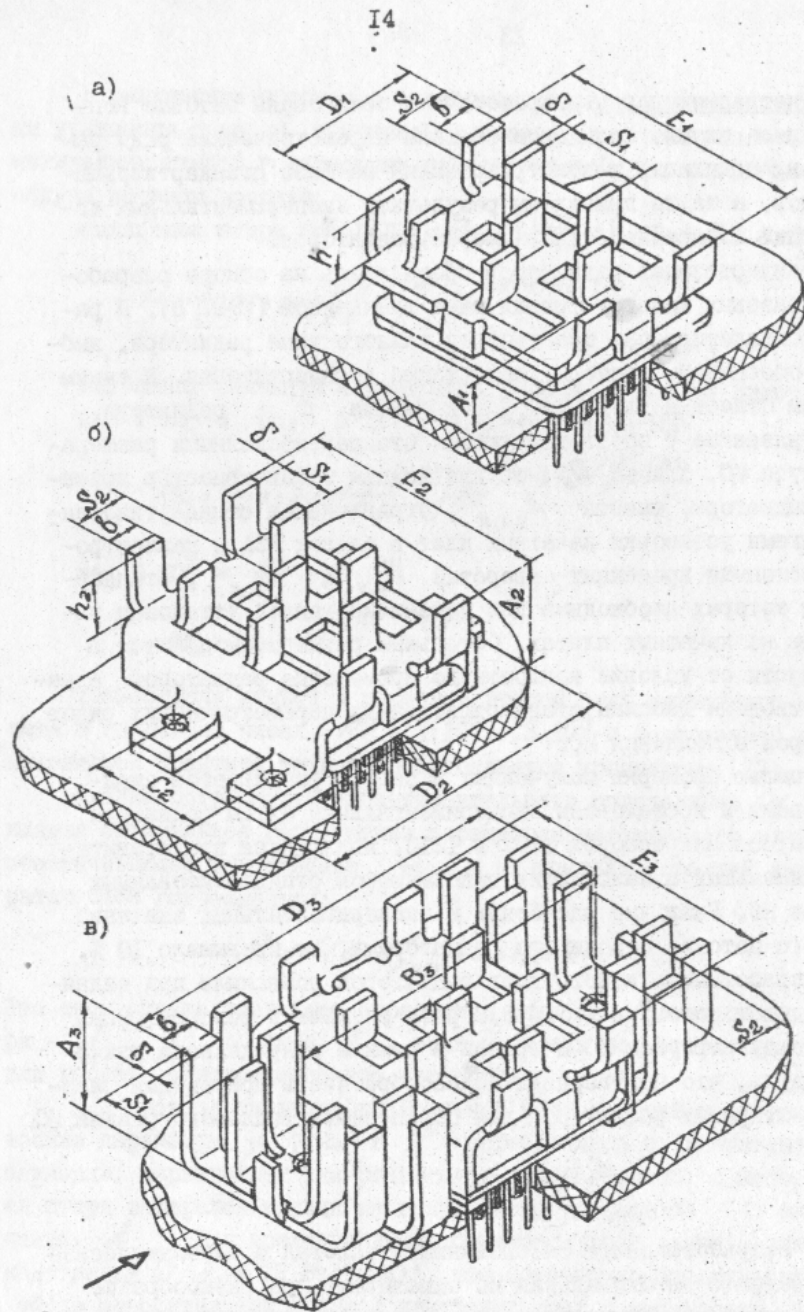


Рис. 6. Базовые конструктивные схемы радиаторов:
а - первого типа; б - второго типа; в - третьего типа

отдачи различных типов ребрений радиаторов позволила определить экспериментальным путём уравнения подобия, описывающие теплоотдачу поперечно-обтекаемых призматических штырей в режиме вынужденного движения воздуха, являющихся элементами пластинчато-штыревого ребрения перспективных конструкций радиаторов охлаждения ИС.

3. В диапазоне чисел Re и геометрических параметров призматических штырей, характерных для радиаторов охлаждения ИС, теплоотдача штырей зависит не только от определяющих размеров, но и от соотношения толщины и ширины штыря и номера ряда пакета, в котором штырь расположен, и практически не зависит от ориентации штыря относительно направления потока воздуха и шагов расположения штырей в шахматном пакете.

4. Разработанная на основе тепловой и математической модели методика расчёта и конструирования радиаторов охлаждения ИС базируется на полученных уравнениях подобия, описывающих теплоотдачу призматических штырей, и позволяет в зависимости от конкретных условий применения спроектировать оригинальный радиатор либо выбрать его параметры из стандартизованных параметрических рядов радиаторов.

5. Предложенные принципы стандартизации параметрических рядов радиаторов базируются на стандартизации типов радиаторов и 3 - 5 основных размеров. Остальные размеры должны определяться разработчиками для каждого конкретного случая применения.

6. Разработанный и внедренный на 30 предприятиях отраслевой стандарт "Радиаторы охлаждения элементов микроминиатюрной радиоэлектронной аппаратуры" включает все полученные результаты работы и устанавливает типы и основные параметры радиаторов охлаждения ИС. Часть стандартизованных типоразмеров радиаторов выпускается серийно.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Грабов Л.П., Базелев Б.П., Ефремов В.И. Методика определения коэффициента теплоотдачи ребрения пластинчато-штыревых радиаторов//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1973. - Вып. 3. - С. 38 - 43.
2. Ефремов В.И., Лепский Г.П. Анализ гидродинамических трубок как датчиков скорости потока воздуха в охлаждаемой РЭА//

- Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1976. - Вып. 2. - С. 89 - 92.
3. Базелев Б.П., Ефремов В.И., Прошкина Л.П. Методика теплового расчёта пакетов пластинчато-штыревых радиаторов//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1977. - Вып. 2. - С. 39 - 52.
 4. Ефремов В.И., Ленская Н.К., Прошкина Л.П. Результаты экспериментального исследования теплоотдачи призматических штырей пластинчато-штыревых радиаторов//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1978. - Вып. 2. - С. 42 - 43.
 5. Применение радиаторов для охлаждения микросборок в корпусах серии Г50/Базелев Б.П., Ефремов В.И., Ленская Н.К., Маковец В.П. и др.//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1983. - Вып. 2. - С. 83 - 88.
 6. Методика расчёта радиаторов с гофрированным оребрением, предназначенных для охлаждения конденсационных зон тепловых труб/Базелев Б.П., Гниличенко В.И., Ефремов В.И., Ленская Н.К.//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1983. - Вып. 3. - С. 65 - 71.
 7. Охлаждение микросборок с помощью радиаторов, Базелев Б.П., Дейнега В.Т., Ефремов В.И., Ленская Н.К. и др.//Деп. в НИИЭИР. - 1985. - Реф. № 3 - 7640.
 8. Влияние способа установки и некоторых конструктивных особенностей микросборок с радиаторами на их теплоотдачу/Базелев Б.П., Ефремов В.И., Ленская Н.К. и др.//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТРТО. - 1985. - Вып. 3. - С. 30 - 35.
 9. Спокойный Ю.Е., Ефремов В.И. Повышение точности определения коэффициента теплоотдачи оребрений различного типа//Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОВР (ТРТО). - 1987. - Вып. 12. - С. 91 - 95.
 10. А.с. 654093 СССР, МКИ N O1L 23/34. Радиатор для воздушного охлаждения/Ефремов В.И., Ленская Н.К., Маковец В.П. (СССР). - ДСП.

Условные обозначения

Q - тепловой поток; α - коэффициент теплоотдачи; F - площадь; t - температура; θ - температурный напор относительно набегающего потока воздуха; λ - теплопроводность; δ, b, l - толщина, ширина и длина призматического штыря;

u, f - периметр и площадь поперечного сечения штыря;
 σ - тепловая проводимость, $\theta = \theta_0/\theta_1$ - отношение температурных напоров основания и торца штыря; Nu, Re, Pr - числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; L - определяющий размер;
 φ - угол между направлением потока воздуха и большей стороной призматического штыря; S_1, S_2 - поперечный и продольный шаги расположения штырей в шахматном пакете; $m = \sqrt{\alpha \cdot u / \lambda f}$,
 $A = \left(\alpha + \frac{\sqrt{\alpha \cdot u \cdot \lambda_{tm} \cdot S_{tm} \cdot S_{tm}}}{f} \right) \cdot \frac{Sh(m \cdot l)}{A \cdot m}$ - комплекс, учитывающий теплоотдачу торца штыря с установленным на нём термоэлектродом.

Индексы

кон - конвективный; э - элемент; с - набегающий поток воздуха; в - охлаждающий поток воздуха в радиаторе; экв - эквивалентный; о - основание; т - торец; к - крышка; р - радиатор; тм - манганановый термоэлектрод; пр - приведенный; кт - контактная; п - плата.

Сокращения

РЭА - радиоэлектронная аппаратура; БИС, СБИС - большая и сверхбольшая интегральные микросхемы; МСБ - микросборка; ИС - БИС, СБИС, МСБ; ШП - дискретный полупроводниковый прибор.

Ефремов
6.05.88.

xv 1057

ИНСТИТУТ ХОЛОДА
ОНАХТ
Библиотека