

К. т. н. В. Е. ТРОФИМОВ, к. т. н. А. Л. ПАВЛОВ, Е. А. МОКРОУСОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАТОРА ДЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРОВ В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

*Проведено CFD-моделирование радиатора с компактной теплоотдающей поверхностью в виде тупиковых полостей, в которые втекают импульсные воздушные струи. Получены теплоаэродинамические характеристики и даны рекомендации по конструированию радиаторов такого типа для отвода тепла от микропроцессоров в ограниченном пространстве.*

*Ключевые слова:* CFD-моделирование, радиатор, тепловое сопротивление, импульсные струи, микропроцессоры.

Одним из завершающих и обязательных этапов проектирования и разработки таких изделий электронной техники, как микропроцессоры, является термотренировка, в процессе которой определяется поведение функциональных свойств микропроцессора при изменении его температуры, в частности температуры корпуса [1]. Термотренировка проводится на специальном стенде, основным элементом которого является многослойная коммутационная печатная плата с установленными на ней сокетом (одним или несколькими) с микропроцессорами (МП), чипсетами, интерфейсами, джамперами и другими электронными и неэлектронными компонентами, обеспечивающими разнообразные режимы функционирования МП в соответствии с техническим заданием на их разработку. Здесь размещаются и многочисленные датчики приборов (или сами приборы) для измерения всевозможных электрических параметров в контрольных точках коммутационной платы в соответствии с электрической принципиальной схемой.

Изменение температуры корпуса микропроцессора осуществляется, как правило, при помощи термоэлектрического модуля, габаритные размеры которого не превышают размеров МП. Условно холодная поверхность модуля с регулируемой температурой находится в прямом тепловом контакте с пьедесталом корпуса МП, предназначенного для установки кулера. На «горячую» поверхность термоэлектрического модуля устанавливается радиатор (теплообменник), отводящий в окружающую среду суммарный тепловой поток от МП и от самого модуля [2].

В зависимости от типа, производительности и режима работы МП используется жидкостное или воздушное охлаждение радиатора. Реализация способа охлаждения существенно зависит от размеров свободного пространства на

коммутационной плате стенда в зоне размещения сокета с микропроцессором. Высокая плотность компоновки платы, требование свободного доступа к джамперам и интерфейсам, а также наличие многочисленных датчиков и измерительных приборов ограничивает это пространство габаритными размерами сокета с элементами крепления в плане не более 50×50 мм и требует применения чрезвычайно компактного радиатора.

Требование компактности становится особенно актуальным в случае воздушного охлаждения. В известных решениях воздушного охлаждения микропроцессоров, исследованных, например, в [3–5], имеется радиатор с оребрением в виде пластин различной формы и осевой вентилятор, который, работая на нагнетание, направляет воздушный поток в межреберное пространство радиатора. Для повышения эффективности теплоотвода радиатор может дополняться тепловой трубой [5]. Такие и аналогичные им радиаторы прекрасно справляются с задачей обеспечения нормального теплового режима МП, однако из-за габаритных размеров они не могут быть использованы в ограниченном пространстве, характерном для термотренировочного стенда. В этом случае одним из решений может быть уменьшение площади теплоотдающей поверхности радиатора за счет резкого роста ее коэффициента теплоотдачи без увеличения объема охлаждающего воздуха.

Как показано в [6, 7], при неизменном расходе воздуха обеспечить резкий рост коэффициента теплоотдачи поверхности позволяет выполнение в ней одной или нескольких тупиковых полостей, в которые втекают импульсные (ударные) воздушные струи. В настоящей работе для оценки теплоаэродинамических характеристик такого решения применительно к

охлаждению микропроцессоров было проведено CFD-моделирование импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями, форма и геометрические параметры которого допускают его размещение в ограниченном пространстве стенда для термотренировки микропроцессора.

**Расчетная область**

На рис. 1 схематично показан объект исследования (его симметричная половина), который представляет собой металлический радиатор, имеющий форму параллелепипеда, и немагнитный соплодержатель.

В верхнем (условно) основании радиатора выполнено пять тупиковых полостей цилиндрической формы — одна в геометрическом центре и четыре по углам. Соосно с тупиковыми полостями располагаются пять цилиндрических сопел, срезы которых утоплены вглубь полостей. К нижнему (условно) основанию радиатора подводится тепловой поток от термоэлектрического модуля и микропроцессора. Соплодержатель с входными отверстиями сопел является также и основанием распределительной камеры (на рис. 1 не показана), в которую по гибкому шлангу подается воздух от компрессора, расположенного за пределами стенда для термотренировки.

Воздух, поступаая в сопло, образует осесимметричную струю, которая ударяется в основание тупиковой полости и, растекаясь по ее основанию, разворачивается на 180° и вдоль боковой поверхности полости выходит из нее, а затем и из самого радиатора через зазор между радиато-

ром и соплодержателем. Возникающий в тупиковой полости удар и разворот струи приводит к заметному возрастанию интенсивности теплоотдачи по сравнению с традиционными ребристыми радиаторами, что позволяет достичь требуемого теплового сопротивления при резком уменьшении площади теплоотдающей поверхности.

На рис. 2 показана 3D-модель расчетной области радиатора для CFD-моделирования: твердотельный объем собственно радиатора с тупиковыми полостями, твердотельный объем соплодержателя с соплами и проточный объем, т. е. объем воздуха, заполняющий тупиковые полости, сопла, зазор между радиатором и соплодержателем в границах расчетной области. Моделирование проводилось с целью установления зависимости теплового сопротивления радиатора от скорости истечения воздуха из сопел, от диаметра сопел, глубины погружения среза сопла в тупиковую полость, а также определения его аэродинамической характеристики, т. е. зависимости потери напора воздуха  $\Delta H$  от скорости струи  $V$ .

Моделирование проводилось для следующих значений параметров расчетной области (см. рис. 1):

- размеры радиатора  $A \times B \times C = 40 \times 15 \times 20$  мм;
- форма тупиковой полости — цилиндр диаметром  $D = 12$  мм и глубиной  $H = 14$  мм;
- толщина основания соплодержателя  $h_2 = 2$  мм;
- внутренний диаметр сопла  $d = 2; 2,5; 3$  мм;
- толщина стенки сопла 0,5 мм;

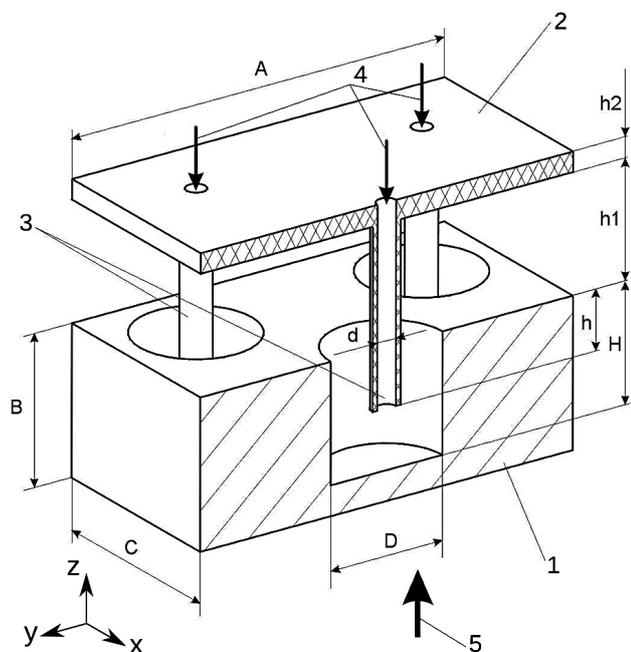


Рис. 1. Конструкция импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями:  
1 — радиатор; 2 — соплодержатель; 3 — сопло; 4 — вход воздуха; 5 — подвод теплового потока

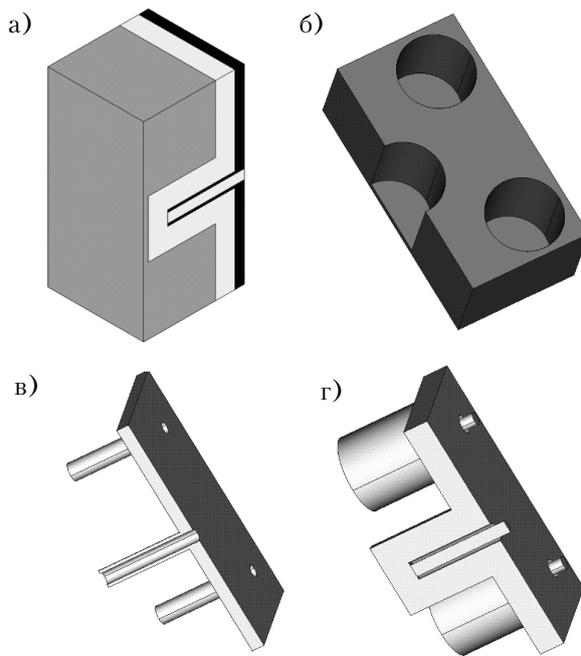


Рис. 2. 3D-модель расчетной области радиатора:  
а — общий вид; б — радиатор с тупиковыми полостями; в — соплодержатель; г — проточный объем

- отношение длины сопла к его диаметру  $(h + h_1 + h_2)/d = 5,33 - 8,0$ ;
- глубина погружения среза сопла в тупиковую полость  $h = 6; 10; 12$  мм;
- зазор между соплодержателем и радиатором  $h_1 = 8; 4; 2$  мм;
- материал радиатора — медь;
- материал соплодержателя — пенопласт.

**Математическая модель**

При проведении моделирования были приняты следующие допущения:

- в расчетной области имеет место турбулентный режим течения с  $k$ - $\epsilon$ -моделью турбулентности;
- вязкость, теплопроводность и плотность воздуха не зависят от температуры;
- в расчетной области имеет место стационарное течение воздушного потока;
- гравитационные силы пренебрежимо малы.

С учетом сделанных допущений математическая модель течения и сопряженного теплообмена в расчетной области представлялась уравнениями неразрывности, сохранения энергии и Навье–Стокса в проекциях на координатные оси  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  (направление оси  $Z$  совпадает с направлением осей сопел, а направление оси  $X$  перпендикулярно плоскости симметрии):

- уравнение неразрывности

$$\frac{\partial V_x}{\partial X} + \frac{\partial V_y}{\partial Y} + \frac{\partial V_z}{\partial Z} = 0; \tag{1}$$

- уравнение сохранения энергии

$$V_x \frac{\partial T}{\partial X} + V_y \frac{\partial T}{\partial Y} + V_z \frac{\partial T}{\partial Z} = \frac{k}{C_p} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right); \tag{2}$$

- уравнение Навье–Стокса в проекциях на координатные оси

$$V_x \frac{\partial V_x}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_x}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_x}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial X} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial Z^2} \right); \tag{3}$$

$$V_x \frac{\partial V_y}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_y}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_y}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Y} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_y}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_y}{\partial Z^2} \right); \tag{4}$$

$$V_x \frac{\partial V_z}{\partial X} + V_y \frac{\partial V_z}{\partial Y} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial Z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial Z} + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 V_z}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial Z^2} \right); \tag{5}$$

- где  $T$  — температура в расчетной области, °С;  
 $V_x, V_y, V_z$  — проекции вектора скорости воздуха на координатные оси, м/с;  
 $k, \rho, C_p$  — теплопроводность, Вт/(м·°С), плотность, кг/м<sup>3</sup>, и теплоемкость, Дж/(кг·°С), соответствующей среды (воздуха, радиатора или соплодержателя);  
 $\mu$  — вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с;  
 $P$  — давление воздушного потока, Па.

Граничные условия для уравнений (1)–(5) следующие:

- на поверхностях радиатора и соплодержателя, контактирующих с проточным объемом,  $V_x = V_y = V_z = 0$ ;
- на границе проточного объема, совпадающей с плоскостью симметрии,  $V_x = 0$ ;
- на поверхностях проточного объема, контактирующих с окружающей средой,  $P = 0$ ;
- скорость воздуха на входе в сопло  $V$  совпадает со скоростью  $V_z$  в этом сечении;
- температура воздуха на входе в сопло равна температуре окружающей среды  $T_0$ ;
- к основанию радиатора подводится тепловой поток  $Q$ ;
- на поверхностях радиатора и соплодержателя, не контактирующих с проточным объемом, имеют место адиабатные условия.

При выборе диапазона значений скорости истечения воздуха из сопел учитывалось ограничение на уровень акустических шумов — не более 60 дБ для лабораторных помещений [8]. Исходя из этого, максимальная скорость воздуха  $V_0$  для сопел расчетной области не превышала 100 м/с.

Используя рассмотренную математическую модель, в расчетной области определялись поля температуры, скоростей и линий тока. Решение задачи проводилось в CAD/CAE-системе проектирования на платформе операционной системы CAELinux, используя алгоритм CFD-моделирования, приведенный в [9].

По результатам моделирования оценивалось тепловое сопротивление радиатора

$$R = \frac{T_R - T_0}{Q}, \tag{6}$$

- где  $T_R$  — максимальная температура радиатора, °С.

**Результаты моделирования и их анализ**

Результаты моделирования представлены на рис. 3 и в таблице. Их анализ показывает, что в диапазонах исследованных значений скорости воздуха на входе в сопло (50–100 м/с) и диаметра сопла (2–3 мм) тепловое сопротивление исследованного импактно-струйного радиатора с тупиковыми полостями изменяется от 0,9 до 2,6°С/Вт, чего вполне достаточно для проведения термотренировки некоторых типов микропроцессоров с заданием ряда режимов их функционирования [1].

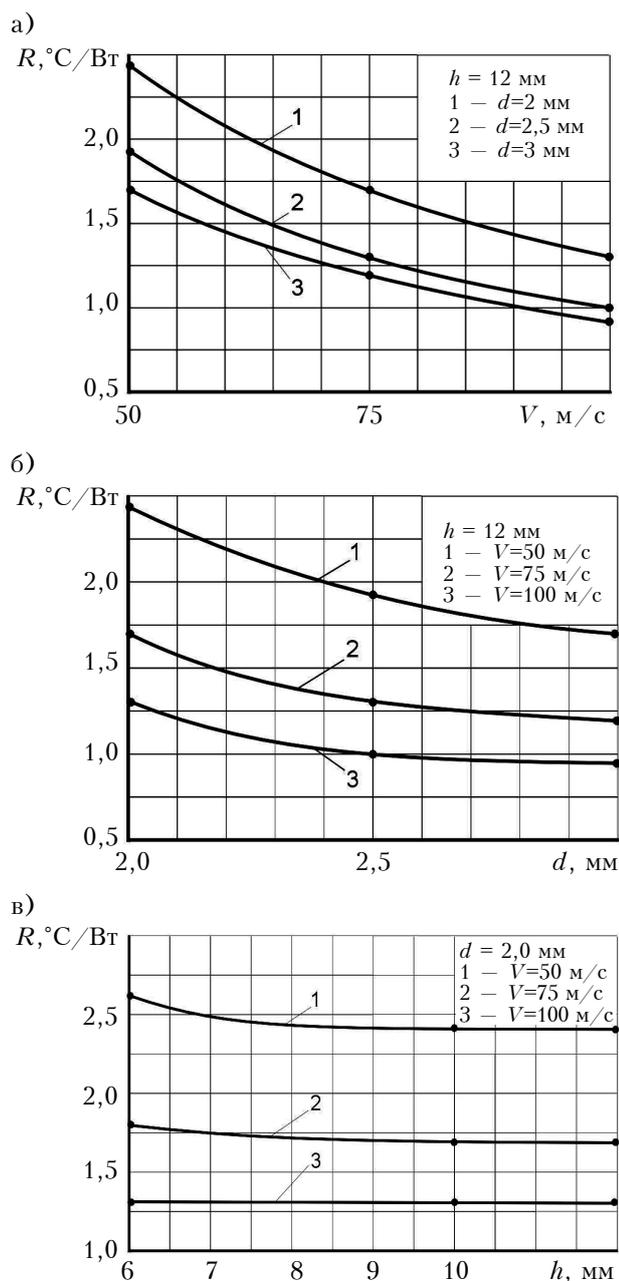


Рис. 3. Зависимость теплового сопротивления радиатора от скорости воздуха на входе в сопло (а), от диаметра сопла (б) и от глубины погружения среза сопла в тупиковую полость (в)

Наиболее влияющим на тепловое сопротивление радиатора параметром является скорость воздуха в струе. Как видно из рис. 3, а, увеличение скорости воздуха на входе в сопло до 100 м/с может привести к заметному уменьшению теплового сопротивления. Однако поскольку увеличение скорости связано с ростом уровня акустических шумов, представляется целесообразным провести отдельное исследование их взаимосвязи.

Как видно из рис. 3, б, для исследованной геометрии радиатора предпочтительным значением диаметра сопел является 2,5–3,0 мм. Тепловое сопротивление радиатора  $R$  значительно растет при уменьшении диаметра до 2 мм (а также и с уменьшением скорости воздуха на входе в сопло) и практически не изменяется при увеличении более 3,0 мм.

На рис. 3, в видно, что изменение глубины погружения среза сопла в тупиковую полость от 6 до 12 мм не оказывает существенного влияния на тепловое сопротивление радиатора, а значит, этот параметр может выбираться, исходя главным образом из требований к габаритам конструкции.

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что для исследованной геометрии радиатора при скорости воздуха на входе в сопло 50–100 м/с значения потерь напора воздуха лежат в диапазоне 3466–20823 Па, при этом требуемый расход воздуха составляет 0,56–2,54 м<sup>3</sup>/ч. Такие значения избыточного давления и расхода воздуха без труда могут быть созданы современными компрессорами, предназначенными для стационарного обеспечения воздухом высокого давления промышленных предприятий, исследовательских лабораторий, а также их подразделений, связанных с проведением разнообразных тепло-аэродинамических испытаний изделий электронной техники, в том числе термотренировок. По сравнению с осевыми и центробежными вентиляторами, традиционно применяемыми для обеспечения тепловых режимов микропроцессоров, импактно-струйный радиатор с тупиковыми полостями работает при меньшем (на порядок) количестве воздуха и большем (на два порядка) избыточном давлении, что является прямой платой за компактность и высокое аэродинамическое сопротивление исследованного радиатора.

Зависимость потери напора воздуха в радиаторе  $\Delta H$  от скорости воздуха  $V$  на входе в сопло, диаметра сопла  $d$  и глубины погружения среза сопла в тупиковую полость  $h$

$V$ , м/с	Потери напора воздуха в радиаторе $\Delta H$ , Па, при:				
	$d = 2,0 \text{ мм}$			$d = 2,5 \text{ мм}$	$d = 3,0 \text{ мм}$
	$h = 6 \text{ мм}$	$h = 10 \text{ мм}$	$h = 12 \text{ мм}$	$h = 12 \text{ мм}$	
50	5372	5335	5339	4572	3466
75	11811	11712	11730	9957	7847
100	20823	20599	20504	17495	14007

**Заклучение**

В результате проведенного исследования установлено, что импактно-струйный радиатор с тупиковыми полостями может быть эффективным решением для отвода теплоты от микропроцессоров в ограниченном пространстве, характерном при проведении такого вида их испытаний, как термотренировка. Вместе с тем следует учитывать, что радиатор указанного типа обладает высоким аэродинамическим сопротивлением и требует для своей работы источника воздуха высокого давления.

**ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ**

1. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors // Proc. of the 2011 International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 "Liquid, phase-change and refrigeration cooling". – Palo Alto, CA, USA. – 2011. – P. 1–18.
2. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J. M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // Proc. of the 9th AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference. – San Francisco, CA, USA. – 2006. – P. 1–21.
3. Булавин Л. А., Актан О. Ю., Николаенко Т. Ю., Николаенко Ю. Е. Экспериментальное исследование температурного поля радиатора кулера // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 5. – С. 61–64.

4. Письменный Е. Н., Рогачев В. А., Баранюк А. В., Цвященко Я. В. Теплоотводящая поверхность с пластинчато-просечным оребрением при низкоскоростном обдуве // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2005. – № 4. – С. 43–45.
5. Рассасакин Б. М., Рогачев В. А., Хайрнасов С. М. Кулеры на тепловых трубах для теплонагруженных компонентов персональных компьютеров // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2006. – № 4. – С. 48–50.
6. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Выбор конструктивных параметров радиаторов для струйного импактного охлаждения БИС // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 1. – С. 18–19.
7. Спокойный Ю. Е., Трофимов В. Е., Олибаш Г. В. Проектирование радиаторов для ИС со струйным импактным воздушным охлаждением // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1998. – № 2. – С. 17–19.
8. Березуцкий В. В. Основи охорони праці. Харків: Факт. – 2007.
9. Трофимов В. Е., Павлов А. Л., Жмуд Е. В. Визуализация взаимодействия струй с тупиковой полостью радиатора для жидкостного охлаждения микропроцессора // Труды 16-й МНПК «СИЭТ-2015». – Украина, Одесса. – 2015. – С. 160–161.

Дата поступления рукописи  
в редакцию 14.11 2016 г.

К. т. н. В. Є. ТРОФІМОВ, к. т. н. О. Л. ПАВЛОВ, О. О. МОКРОУСОВА

Украина, Одесский национальный политехнический университет

E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РАДІАТОРА ДЛЯ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ МІКРОПРОЦЕСОРІВ В ОБМЕЖЕНОМУ ПРОСТОРИ

Проведено CFD-моделювання радіатора з компактною поверхнею тепловіддачі у вигляді тупикових порожнин, у які втікають імпульсні повітряні струмені. Отримано тепло-аеродинамічні характеристики і дано рекомендації щодо конструювання радіаторів такого типу для відводу тепла від мікропроцесорів в обмеженому просторі.

Ключові слова: CFD-моделювання, радіатор, тепловий опір, імпульсні струмені, напівпровідникові мікросхеми.

DOI: 10.15222/TKEA2016.4.30  
UDC 536. 24

V. E. TROFIMOV, A. L. PAVLOV, E. A. MOKROUSOVA

Ukraine, Odessa national polytechnic university

E-mail: vovic@ukr.net

## CFD-SIMULATION OF RADIATOR FOR AIR COOLING OF MICROPROCESSORS IN A LIMITED SPACE

One of the final stages of microprocessors development is heat test. This procedure is performed on a special stand, the main element of which is the switching PCB with one or more mounted microprocessor sockets, chipsets, interfaces, jumpers and other components which provide various modes of microprocessor operation.

The temperature of microprocessor housing is typically changed using thermoelectric module. The cold surface of the module with controlled temperature is in direct thermal contact with the microprocessor housing designed for cooler installation. On the hot surface of the module a radiator is mounted. The radiator dissipates the cumulative heat flow from both the microprocessor and the module.

High density PCB layout, the requirement of free access to the jumpers and interfaces, and the presence of numerous sensors limit the space for radiator mounting and require the use of an extremely compact radiator, especially in air cooling conditions. One of the possible solutions for this problem may reduce the area of the radiator heat-transfer surfaces due to a sharp growth of the heat transfer coefficient without increasing the air flow rate. To ensure a sharp growth of heat transfer coefficient on the heat-transfer surface one should make in the surface one or more dead-end cavities into which the impact air jets would flow.

CFD simulation of this type of radiator has been conducted. The heat-aerodynamic characteristics and design recommendations for removing heat from microprocessors in a limited space have been determined.

Keywords: CFD-modeling, radiator, heat resistance, impact jet, microprocessor.

REFERENCES

1. Spokoyny M., Trofimov V. Collider jets cooling method of microprocessors. *Proc. of the 2011 International Microelectronics and Packaging Society ATW on Thermal Management, Session 12 "Liquid, phase-change and refrigeration cooling"*. Palo Alto, CA, USA, November 7-9, 2011, pp. 1-18.
2. Spokoyny M., Trofimov V., Qiu X., Kerner J.M. Enhanced heat transfer in a channel with combined structure of pins and dimples // *Proc. of the 9<sup>th</sup> AIAA/ASME Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference*, San Francisco, CA, USA, 2006, pp. 1-21.
3. Bulavin L.A., Aktan O.Yu., Nikolaienko T.Yu., Nikolaienko Yu.E. [Experimental examination of a temperature field of a heat sink cooler]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2006. no 5, pp. 61-64. (Rus)
4. Pismenniy E. N., Rogachev V. A., Baranjuk A. V., Tsvyachenko E. V. [Thermal efficiency of with plate-cut fins in conditions low speed to blow]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2005, no 4, pp. 43-45 (Rus)
5. Rassamakin B. M., Rogachev V. A., Khayrnasov S. M. [Coolers based on heat pipes for thermally loaded devices of personal computers]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 2006, no 4, pp. 48-50. (Rus)
6. Spokoyny Ju.E., Trofimov V.E., Olibash G.V. [The choice of constructional parameters of heat radiators for LSIC jet impact cooling]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 1998, no 1, pp. 18-19. (Rus)
7. Spokoyny Ju.E., Trofimov V. E., Olibash G. V. [The designing of heat radiators for IC with jet impact air cooling]. *Tekhnologiya i konstruirovaniye v elektronnoy apparature*. 1998, no 2, pp. 17-19. (Rus)
8. Berezuts`kii V.V. [*Fundamentals of labor protection*]. Kharkov, Fact, 2007, 241 p. (Rus)
9. Trofimov V. E., Pavlov A. L., Zhmud E. V. [Visualization of the interaction of a jet with a dead-end cavity of the radiator for liquid cooling of a microprocessor]. *Proc. of the 16<sup>th</sup> International scientific-practical conference "Modern information and electronic technologies"*, Ukraine, Odessa, 2015, pp. 160-161. (Rus)

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Зайков В. П., Мещеряков В. И., Журавлёв Ю. И. Прогнозирование показателей надежности термоэлектрических охлаждающих устройств. Книга 2. Каскадные устройства.— Одесса: Политехпериодика, 2016.— 124 с.**

Книга посвящена прогнозированию показателей надежности каскадных термоэлектрических устройств (КТЭУ) при их проектировании и оценке показателей надежности КТЭУ выбранной конструкции.

Рассмотрены функциональные зависимости, позволяющие оценить как охлаждающие возможности, так и энергетическую эффективность и показатели надежности проектируемого устройства в различных токовых режимах работы. Продемонстрирован подход, позволяющий перейти от расчетов к построению каскадных ТЭУ на основе унифицированных модулей, и подход, который позволяет оценить показатели надежности КТЭУ заданной конструкции. Проанализировано влияние тепловой нагрузки на параметры надежности КТЭУ. Приведены алгоритмы, которые помогут разработчику вести оптимизированное проектирование РЭА с использованием КТЭУ или выбрать оптимальную для поставленной задачи конструкцию КТЭУ.

Предназначена для инженеров, научных работников, а также студентов соответствующих специальностей, занимающихся вопросами надежности элементов электроники и в целом РЭА, а также разработкой и проектированием термоэлектрических устройств.

