Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 63–75
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 63–75

Проектирование и технология радиоэлектронных средств
УДК 621.382.2/.3-046.47 Научная статья
https://doi.org/10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75

Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора

Г. А. Пискун[1]✉, В. Ф. Алексеев[1], О. В. Степченков[2], А. Н. Попов[2], А. Н. Беликов[1], Д. Г. Рыбаков[1]

[1]Учреждение образования "Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники", Минск, Республика Беларусь

[2] Открытое акционерное общество "Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин", Минск, Республика Беларусь

✉ piskun@bsuir.by

Аннотация

Введение. Современные технические (вычислительные, электронные) средства в большинстве случаев строятся на базе радиоэлектронных компонентов, например процессоры, графические чипы и т. д., которые при работе выделяют десятки ватт тепловой энергии. В связи с этим одной из приоритетных задач проектирования таких устройств становится эффективное отведение посредством введения пассивных или активных систем охлаждения избыточной тепловой энергии как от полупроводниковых приборов, так и от электронных средств в целом.

Цель работы. Исследование влияния конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств (ГК ТС), особенностью которых является использование внутри корпусов только пассивных систем охлаждения, а также сравнительный анализ эффективности отведения тепла от процессора для каждой рассматриваемой конструкции корпуса.

Материалы и методы. Эксперименты проводились на разработанных в программной среде SolidWorks Flow Simulation трехмерных параметрических моделях различных типов ГК ТС, особенностью которых являлась различная конфигурация тепловых каналов, сформированных внешним оребрением крышки корпуса.

Результаты. Реализация моделей позволила исследовать процесс охлаждения процессора, установленного в современных ГК ТС, а также проанализировать влияние конфигурации и формы ребер на отведение избыточной тепловой энергии от процессора в режиме пассивного охлаждения и при обдуве ГК ТС воздухом, движущимся сверху (перпендикулярно крышке) или сбоку (параллельно крышке) при постепенном увеличении мощности процессора с 10 до 25 Вт. Показано, что оребренный корпус при пассивном охлаждении обеспечивает отвод тепла от процессора мощностью 10 Вт больше, чем неоребренный (понижение температуры составляет 4.1 °С); при 25 Вт – на 11.01 °С. Установлено, что направление (перпендикулярное или параллельное) движения воздуха при обдуве ГК ТС значительно влияет на эффективность охлаждения нагретой поверхности корпуса (при мощности процессора 45 Вт разность составляет более 10 °С).

Заключение. Разработанные трехмерные модели позволили наиболее эффективно реализовать систему охлаждения теплонагруженных высокомощных радиоэлектронных компонентов, расположенных в герметичных корпусах, за счет реализации внешнего оребрения корпусов.

Ключевые слова: герметичный корпус, наружный обдув, пассивное охлаждение, процессор, теплообмен, тепловой режим

Для цитирования: Влияние конфигурации и формы внешних ребер герметичных корпусов технических средств на эффективность отведения тепла от процессора / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, О. В. Степченков, А. Н. Попов, А. Н. Беликов, Д. Г. Рыбаков // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 63–75. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках договора № 23-1051 на выполнение научно-исследовательской работы на тему «Моделирование тепловых процессов в безвентиляторных ПЭВМ и разработка рекомендаций по оптимизации их конструкции» (№ гос. рег. 20231182 от 13.07.2023).

Статья поступила в редакцию 22.09.2023; принята к публикации после рецензирования 27.10.2023; опубликована онлайн 29.11.2023

© Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Степченков О. В., Попов А. Н., Беликов А. Н., Рыбаков Д. Г., 2023

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26, № 5. С. 63–75
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 63–75

Engineering Design and Technologies of Radio Electronic Facilities

Original article

Effect of the Configuration and Shape of External Ribs of Sealed Enclosures of Electronic Devices on Heat Removal Efficiency

Gennady A. Piskun[1]✉, Victor F. Alexeev[1], Aleh V. Stsepchankou[2], Aleksandr N. Popov[2], Andrey N. Belikov[1], Dmitry G. Rybakov[1]

[1]Educational Establishment "Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics", Minsk, Republic of Belarus

[2]Open Joint-Stock Company "NIIEVM", Minsk, Republic of Belarus

✉ piskun@bsuir.by

Abstract

Introduction. Modern computing and electronic devices are constructed on the basis of radio-electronic components, such as processors, graphics processing units, etc. During operation, these components emit tens of watts of thermal energy. Therefore, effective excess heat removal from both semiconductor electronic devices and electronic systems as a whole through the use of passive or active cooling systems represents an important research problem.

Aim. To study the influence of the configuration and shape of external ribs of sealed enclosures of electronic devices, which use solely passive cooling systems inside, on the efficiency of heat removal from the processor for each enclosure design under consideration based on their comparative analysis.

Materials and methods. Simulation experiments were carried out using 3D parametric models of various device types, which were developed in the SolidWorks Flow Simulation software environment. These models differed in terms of configuration of thermal channels formed by the external enclosure ribs.

Results. The conducted simulation experiments allowed the authors to study the cooling process of processors installed in modern electronic devices. The influence of the configuration and shape of the enclosure ribs on excess heat removal from the processor was studied in a passive cooling mode and when blowing the devices with air moving from above (perpendicular to the cover) or laterally (parallel to the cover) with a gradual increase in a processor power from 10 to 25 W. A ribbed enclosure with passive cooling was shown to ensure a more effective heat removal from a 10 W processor compared to a non-ribbed enclosure (the temperature drop is 4.1 °C). For a 25 W processor, this value comprises 11.01 °C. When blowing the device, the direction (perpendicular or parallel) of air movement significantly affects the cooling efficiency of the heated surface (with a processor power of 45 W, the difference is more than 10 °C).

Conclusion. The developed 3D models effectively simulate the cooling system of heat-loaded high-power radio-electronic components located in sealed enclosures, due to the implementation of their external ribbing.

Keywords: sealed enclosure, external airflow, passive cooling, processor, heat transfer, thermal conditions

For citation: Piskun G. A., Alexeev V. F., Stsepchankou A. V., Popov A. N., Belikov A. N., Rybakov D. G. Effect of the Configuration and Shape of External Ribs of Sealed Enclosures of Electronic Devices on Heat Removal Efficiency. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2023, vol. 26, no. 5, pp. 63–75. doi: 10.32603/1993-8985-2023-26-5-63-75

Acknowledgments. The work was performed under contract № 23-1051 for research work on the topic "Modeling of thermal processes in fanless PCs and development of recommendations for optimizing their design" (State Reg. № 20231182 dated 13.07.2023).

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Submitted 22.09.2023; accepted 27.10.2023; published online 29.11.2023

Введение. При проектировании технических средств различного назначения особое внимание уделяется вопросу организации как локальной системы охлаждения (определенного узла, элемента и т. д.), так и всего устройства в целом. Корректная разработка таких систем позволяет эксплуатировать устройство без потерь в качестве функционирования.

На практике используются системы охлаждения, построенные на комбинации пассивных элементов теплоотвода (радиаторы, тепловые трубки и т. д.) и активных компонентов (вентиляторы, кулеры и т. д.). Однако использование вентиляторов не всегда целесообразно, так как они создают акустические (фоновые) шумы во время работы, обладают ограниченным сроком службы, требуют своевременного технического обслуживания, а также наличие вентилятора делает невозможным полную герметизацию технического средства.

Процесс формирования нагретой зоны в современных герметичных корпусах технических средств (ГК ТС) детально не изучен. Так, в [1–4] приведены общие подходы к построению пассивных и активных систем охлаждения устройств и элементов, методики математического описания процессов нагрева и отведения тепла от теплонагруженных и/или теплочувствительных элементов. Однако в данных работах рассматривались общие технические решения по оребрению плоских поверхностей корпуса, не изучались вопросы особенностей конвективного отведения тепла в конструктивно сложных воздушных каналах, а также не осуществлялось имитационное моделирование процесса охлаждения определенного теплонагруженного элемента с учетом ГК ТС.

В связи с этим актуальной задачей является анализ и оценка влияния конфигурации и формы ребер, расположенных на крышке ГК ТС, на эффективность отведения тепловой энергии от процессора с учетом особенностей нестационарного теплового режима при пассивном и активном (разнонаправленный обдув корпуса) воздушном охлаждении.

Методы и объекты исследования. Принцип переноса тепловой энергии в герметичных корпусах устройств осуществляется:

– при пассивном охлаждении, особенностью которого является то, что передача теплоты от источника (например, такого работающего с большими токами компонента, как центральный или графический процессор) происходит сначала на контактирующую с ним через термоинтерфейс (чаще всего это слой термопасты) теплосъемную пластину (в большинстве случаев это пластинчатый радиатор с тепловыми трубками для эффективного растекания тепла по большей площади) и печатную плату, затем к крышке или другой части корпуса, а от него уже в окружающую среду;

– при активном охлаждении теплонагруженных элементов ТС, осуществляемом интенсивно движущимся потоком воздуха, объем и скорость которого определяются специальными устройствами (например, вентиляторами и т. д.).

Внутреннее строение разработанной модели ГК ТС приведено на рис. 1.

Учитывая специфику переноса тепловой энергии в твердых телах, целесообразно использовать уравнение для расчета теплового потока [5–7]

$$\Phi = \lambda \frac{(T_2 - T_1)}{d} S,$$

где λ – коэффициент теплопроводности материала; $(T_2 - T_1)$ – разность температур между нагретым и холодным участками тела; S – площадь поверхности тела; d – толщина тела.

Элементами сборки в модели, представленной на рис. 1, являются процессор; теплосъем-

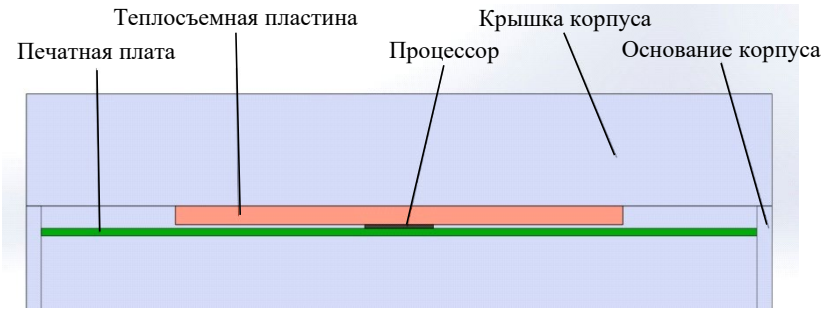


Рис. 1. Внутреннее строение ГК ТС с крышкой без оребрения

Fig. 1. Interior structure of the FSC TM with cover without fins

ная пластина; печатная плата; основание и крышка корпуса устройства.

Качество теплоотвода характеризуется величиной теплового сопротивления, которое возникает при контакте двух тел и значительно влияет на значение температуры ГК ТС. Числовое значение теплового сопротивления "процессор – окружающая среда" определяется по формуле [5–7]

$$R_{\theta\text{п-ср}} = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{ср}}}{P},$$

где $T_{\text{п}}$ – температура процессора; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; P – рассеиваемая мощность процессора.

Так как проводится анализ распределения тепла в ГК ТС, то полное тепловое сопротивление "процессор – окружающая среда" можно записать в виде [5–7]

$$R_{\theta\ \text{п-ср}} = R_{\theta\ \text{п-т.п}} + R_{\theta\ \text{т.п-кор}} + R_{\theta\ \text{кор-ср}},$$

где $R_{\theta\ \text{п-т.п}}$ – тепловое сопротивление "процессор – теплосъемная пластина"; $R_{\theta\ \text{т.п-кор}}$ – тепловое сопротивление "теплосъемная пластина – корпус устройства"; $R_{\theta\ \text{кор-ср}}$ – тепловое сопротивление "корпус устройства – окружающая среда".

При пассивном охлаждении устройства заметное влияние оказывает естественная конвекция, которая вызывает перемешивание среды посредством замкнутых циркуляционных потоков в объеме теплоносителя. В этом случае используются следующие критериальные уравнения:

1) число Нуссельта – критерий, характеризующий соотношение между интенсивностью теплообмена за счет конвекции и интенсивностью теплообмена за счет теплопроводности (в условиях неподвижной среды) и имеющий следующий вид [5–7]:

$$\text{Nu} = A(\text{Gr}\cdot\text{Pr})^n, \qquad (1)$$

где A и n – безразмерные коэффициенты, определяемые в зависимости от характера течения воздуха; комплекс Gr·Pr – число Релея;

2) число Грасгофа – критерий, который характеризует подъемную силу, возникающую в жидкости или газе вследствие разности плотностей. Для воздушной среды он имеет следующий вид [5–7]:

$$\text{Gr} = \frac{\beta h^3 g\left(T_{\text{ст}} - T_{\text{ср}}\right)}{\nu^2},$$

где β – коэффициент объемного расширения воздуха; h – высота корпуса устройства; g – ускорение свободного падения; $T_{\text{ст}}$ – температура стенок корпуса; $T_{\text{ср}}$ – температура окружающей среды; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха;

3) число Прандтля – критерий, являющийся теплофизической характеристикой теплоносителя и определяемый по формуле [5–7]

$$\text{Pr} = \nu/a,$$

где ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха; $a = \lambda/\left(\rho\cdot c_\rho\right)$ – коэффициент температуропроводности (ρ – плотность воздуха; c_ρ – удельная теплоемкость окружающей среды при постоянном давлении).

Наличие на поверхности корпуса ребер позволяет увеличить отвод тепла в окружающую среду, что обусловлено значительным увеличением теплоотдающей поверхности и наличием каналов в межреберном пространстве, по которым протекают потоки охлаждающей среды. Теплоотдача оребренной поверхности определяется, в первую очередь, конфигурацией ребер, их количеством, расположением относительно охлаждающего потока и друг друга, геометрическими размерами каждого отдельно взятого ребра, материалом.

Для оценки эффективности теплоотвода от оребренной поверхности используется коэффициент эффективности ребра, выражение которого имеет вид [5–7]

$$\xi = \frac{\text{th}\left(\sqrt{\alpha_{\text{ор}} U/\left(\lambda_{\text{р}} F\right)}\cdot h_{\text{р}}\right)}{\sqrt{\alpha_{\text{ор}} U/\left(\lambda_{\text{р}} F\right)}\cdot h_{\text{р}}},$$

где $\alpha_{\text{ор}}$ – коэффициент теплоотдачи оребренной поверхности; U – периметр поперечного сечения ребра; $\lambda_{\text{р}}$ – теплопроводность материала ребра; F – площадь поперечного сечения ребра; $h_{\text{р}}$ – высота ребра.

Следует отметить, что принцип переноса тепловой энергии при активном охлаждении устройств отличается от пассивного тем, что

Рис. 2. Различные направления воздушного обдува корпуса: перпендикулярно (*а*) и параллельно (*б*) крышке

Fig. 2. Various air blowing directions of the case: perpendicular (*a*) and parallel (*б*) to the cover

добавляется наружный обдув корпуса. Течение воздуха создается с помощью вентилятора, который при вращении придает направленное движение среде вблизи корпуса со скоростью ϑ. В статье авторами принят обдув по следующим направлениям: перпендикулярно крышке корпуса (рис. 2, *а*) и параллельно сформированным на крышке ребрами тепловым каналам (рис. 2, *б*).

Поскольку в статье проводится анализ движения потоков воздуха в различных направлениях, то необходимо учитывать его характер движения. Локальные числа Рейнольдса используются для определения является ли поток ламинарным или турбулентным [5–7]:

$$\mathrm{Re} = \frac{\vartheta L}{\nu},$$

где ϑL – произведение скорости и длины потока воздуха; ν – коэффициент кинематической вязкости воздуха.

Наружный обдув корпуса предполагает вынужденную конвекцию путем его обтекания охлаждающим воздушным потоком, поэтому:

– при ламинарном движении воздуха критериальное уравнение (1) примет вид [5–7]

$$\mathrm{Nu} = 0.664\,\mathrm{Re}^{0.5}\,\mathrm{Pr}^{1/3}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}_{\text{к}}}\right)^{0.25},$$

где $\mathrm{Pr}_{\text{к}}$ – критерий Прандтля при температуре, равной температуре корпуса;

– при турбулентном движении воздуха, критериальное уравнение (1) примет вид [5–7]

$$\mathrm{Nu} = 0.037\,\mathrm{Re}^{0.8}\,\mathrm{Pr}^{0.43}\left(\frac{\mathrm{Pr}}{\mathrm{Pr}\,\text{к}}\right)^{0.25}.$$

После определения характера течения воздуха коэффициент теплоотдачи корпуса с окружающей средой может быть рассчитан по формуле [5–7]

$$\alpha = \frac{\mathrm{Nu}\,\lambda}{h},$$

где Nu – число Нуссельта для воздушной среды при ламинарном или турбулентном течении воздуха; λ – теплопроводность воздух; h – высота корпуса.

Разработка трехмерных моделей ГК ТС с различной конфигурацией тепловых каналов. Для разработки герметичных корпусов с различными конфигурациями оребрения поверхностей корпуса, авторами в программной среде SolidWorks Flow Simulation было разработано 6 трехмерных моделей различных типов ГК ТС, с идентичными для всех моделей габаритными размерами 100×100×67 мм и материалом корпуса – алюминием.

Мощность, рассеиваемая процессором, который располагался на печатной плате (материал – стеклотекстолит FR-4) в центре устройства, задавалась равной 10, 15, 20, 25 и 45 Вт (повышенная мощность при высокой нагрузке), что обусловлено тем, что они являются типовыми для сегмента мобильных процессоров, которые чаще всего устанавливаются в ГК ТС. Как пример, к такому классу процессоров можно отнести Intel Core i5-10210U с мощностью от 10 до 25 Вт [8], а в качестве более производительного варианта – Intel Core i5-10200H с мощностью до 45 Вт [9]. На процессор монтировалась медная теплосъемная пластина размером – 70×60×2.5 мм.

В качестве эталонного образца (модель № 1) был смоделирован корпус, где его крышка представлена как пластина без оребрения (рис. 3).

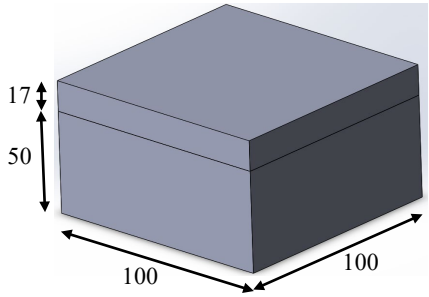


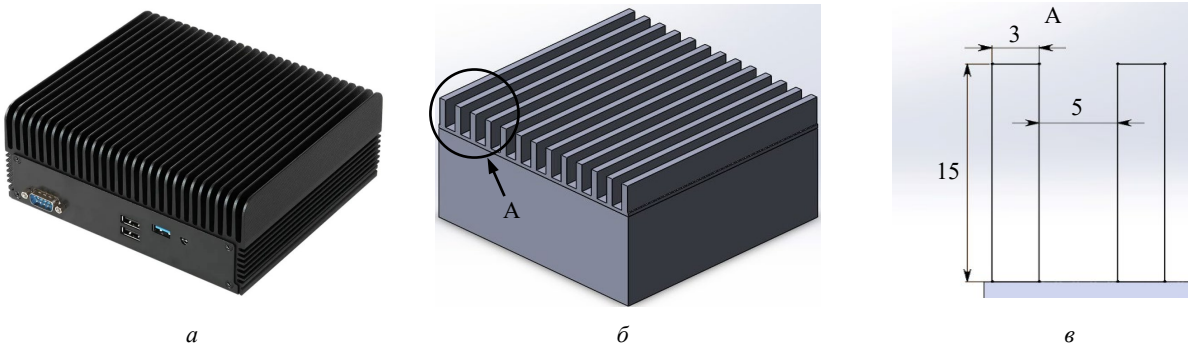
Рис. 3. Внешний вид ГК ТС с крышкой без оребрения (модель № 1)

Fig. 3. Appearance of the device with an unfinned cover (model No. 1)

Данное конструктивное решение является простым, но неэффективным способом охлаждения из-за чрезмерного увеличения размеров пластинчатого радиатора. Поэтому для улучшения теплоотвода от процессора авторами было разработано пять различных моделей оребренных корпусов (рис. 4–8), которые имеют одинаковые размеры ребер и межреберное расстояние.

Вторая модель ГК ТС – модель № 2 – наиболее распространенная форма оребрения различных поверхностей корпусов, например как у промышленного компьютера (ПК) Asrock iBOX-8365UE (рис. 4, *а*) [10]. Особенностью конфигурации является то, что тепловые каналы расположены перпендикулярно к основанию (обладают прямоугольной формой) и сплошной протяженностью по всей ширине крышки (рис. 4, *б*). Геометрические размеры теплового канала с обозначением ширины и высоты ребра, а также межреберного расстояния приведены на рис. 4, *в*.

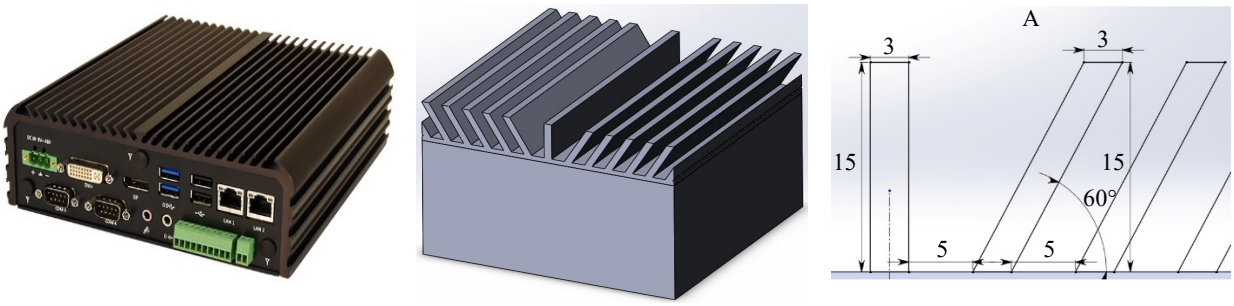
У следующей модели – модель №3 – уникальность конфигурации тепловых каналов заключается в том, что реализована их различная комбинация, как, например, у ПК Sparton LPC-835 (рис. 5, *а*) [11]. В трехмерной модели реализовано симметричное расположение относительно центра крышки двух геометрических форм – прямоугольной трапеции (наименьшее ее основание расположено на крышке ГК



а *б* *в*

Рис. 4. Внешний вид корпуса ПК Asrock iBOX-8365UE (модель № 2) (*а*), его упрощенная трехмерная модель (*б*) и геометрические размеры сформированного теплового канала (*в*)

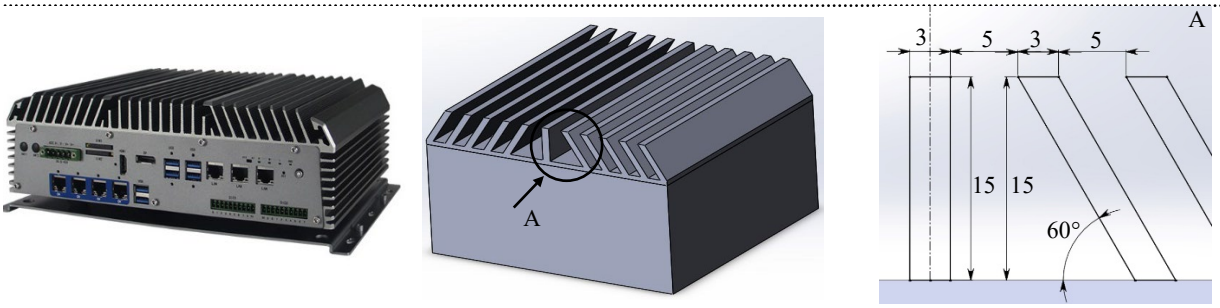
Fig. 4. Appearance of the enclosure of IC Asrock iBOX-8365UE (model No. 2) (*а*), its simplified 3D model (*б*), and geometric dimensions of the formed thermal channel (*в*)



а *б* *в*

Рис. 5. Внешний вид корпуса ПК Sparton LPC-835 (модель № 3) (*а*), его упрощенная трехмерная модель (*б*) и геометрические размеры сформированного теплового канала (*в*)

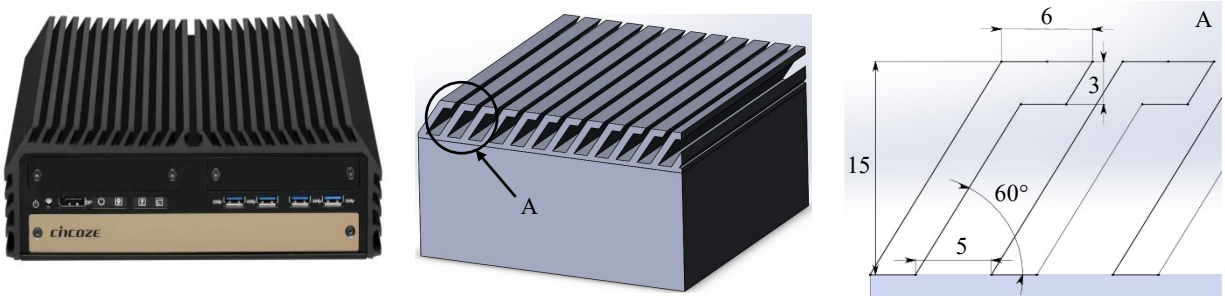
Fig. 5. Appearance of the enclosure of IC Sparton LPC-835 (model No. 3) (*а*), its simplified 3D model (*б*), and geometric dimensions of the formed thermal channel (*в*)



а *б* *в*

Рис. 6. Внешний вид корпуса ПК AIPC-A3601 (модель № 4) (*а*), его упрощенная трехмерная модель (*б*) и геометрические размеры теплового канала (*в*)

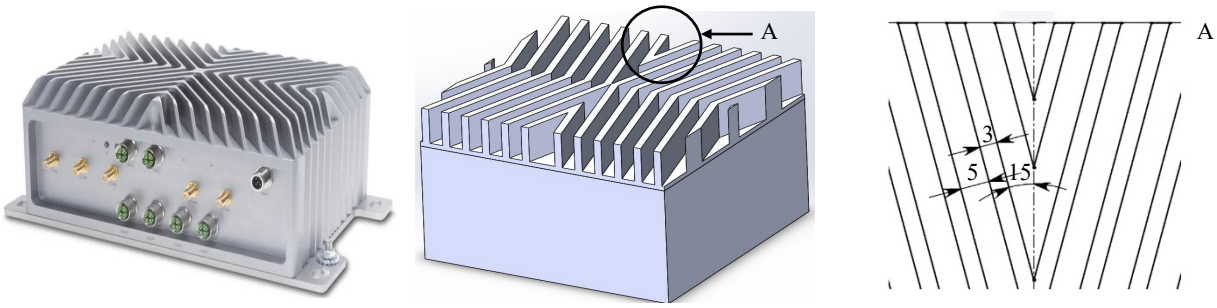
Fig. 6. Appearance of the enclosure of IC AIPC-A3601 (model No. 4) (*a*), its simplified 3D model (*б*), and geometric dimensions of the formed thermal channel (*в*)



а *б* *в*

Рис. 7. Внешний вид корпуса ПК Cincoze Dx-1100 (модель № 5) (*а*), его упрощенная трехмерная модель (*б*) и геометрические размеры сформированного теплового канала (*в*)

Fig. 7. The appearance of the enclosure of IC Cincoze Dx-1100 (model No. 5) (*a*), its simplified 3D model (*б*) and geometric dimensions of the formed thermal channel (*в*)



а *б* *в*

Рис. 8. Внешний вид корпуса ПК Syslogic RSL A3 (модель № 6) (*а*), его трехмерная модель (*б*) и геометрические размеры сформированного теплового канала (вид сверху) (*в*)

Fig. 8. The appearance of the case of the IC Syslogic RSL A3 (model № 6) (*a*), his simplified 3D model (*б*), and geometric dimensions of the formed thermal channel (top view) (*в*)

ТС) и параллелограмма (большая его сторона наклонена под углом 60° к основанию и направлена от центра) тепловых каналов (рис. 5, *б*). Их геометрические размеры приведены на рис. 5, *в*.

Следующая модель – модель № 4 – очень схожа с предыдущей моделью (модель № 3), одним из отличий является то, что наклон ребер реализован в центральную часть крышки, как у ПК AIPC-A3601 (рис. 6, *а*) [12]. При этом ближайшая к центру геометрическая форма канала – трапеция с расположенным на крышке ГК ТС наибольшим ее основанием и примыкающий тепловой канал в форме параллелограмма, в котором большая его сторона наклонена

под углом 60° к основанию и направлена к центру (рис. 6, *б*). Их геометрические размеры приведены на рис. 6, *в*.

В следующей модели – модель № 5 – реализована оригинальная Г-образная форма ребер, как у ПК Cincoze Dx-1100 (рис. 7, *а*) [13]. Упрощенная трехмерная модель включает в себя ребра, расположенные в одном направлении и под углом 60° к основанию, что уменьшает зазор между соседними ребрами и формируя преграду для конвективного поднятия теплого воздуха от поверхности крышки (рис. 7, *б*). Их геометрические размеры приведены на рис. 7, *в*.

В последней модели – "модель № 6" – тепловые каналы имеют Х-образную форму расположения, как у ПК Syslogic RSL A3 (рис. 8, *а*) [14]. Это делает его более адаптированным к тепловым нагрузкам вследствие различной ориентации тепловых каналов, как у ранее рассмотренных моделей (рис. 8, *б*). Геометрические размеры ребер приведены на рис. 8, *в*.

Исходя из усредненного варианта использования ГК ТС, была выбрана температура окружающей среды 20 °С (≈293 К), что соответствует температуре производственного помещения или рабочего места. В случае активного охлаждения скорость воздушного потока наружного обдува составляла 1.7 м/с [15].

Сформированные ребра высотой 15 мм с толщиной основания 2 мм, показанные в моделях 2–6, эквивалентны по значению высоты неоребренной крышке ГК ТС, приведенной в модели № 1.

Результаты экспериментов по оценке эффективности отведения тепловой энергии от процессора при пассивном охлаждении ГК ТС. Для разработанных моделей ГК ТС, в которых процессор использовался в качестве источника тепловой энергии, были получены значения температур при увеличении мощности от 10 до 25 Вт с шагом 5 Вт без наружного обдува (рис. 9 и 10). Полученные значения показали, что оребрение корпусов при заданных геометрических ограничениях может справиться с отведением тепловой энергии. Мощность процессора 25 Вт оказалась предельной по причине невозможности его работы при температуре выше 100 °С. Это обусловлено тем, что при достижении данной температуры наступает перегрев процессора [8, 9].

Максимальные значения температур при всех рассматриваемых мощностях показала модель корпуса без оребрения (модель № 1). Остальные модели, за исключением модели № 5, показали близкие результаты. Разница в значениях температур между ними составляет 2…3 °С. Настолько малое расхождение температур между большинством моделей обусловлено сложностью прохождения теплового потока на теплоотводящие элементы ввиду малой площади контакта процессора с теплосъемной пластиной.

При мощности процессора 25 Вт установлено, что наихудшее исполнение оребрения, приведенное в модели № 5, уступило всем остальным и соответствует результатам, максимально приближенным к модели № 1 и равно 101.1 °С. В данном варианте использовались наклоненные ребра в виде буквы Г, и именно изгибы уменьшили межреберное расстояние сверху корпуса, из-за чего воздушным потокам было сложнее проходить через данную струк-

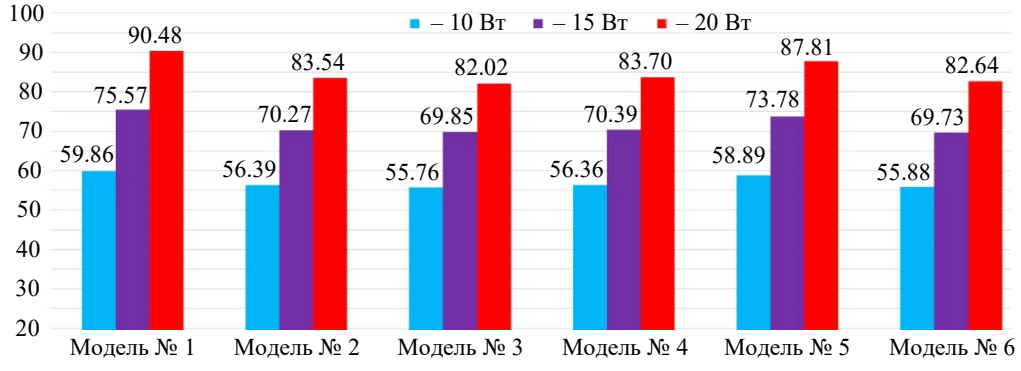


Рис. 9. Результаты моделирования температуры процессора в пассивном режиме охлаждения корпуса

Fig. 9. Simulation results of the processor temperature under passive cooling of the enclosure

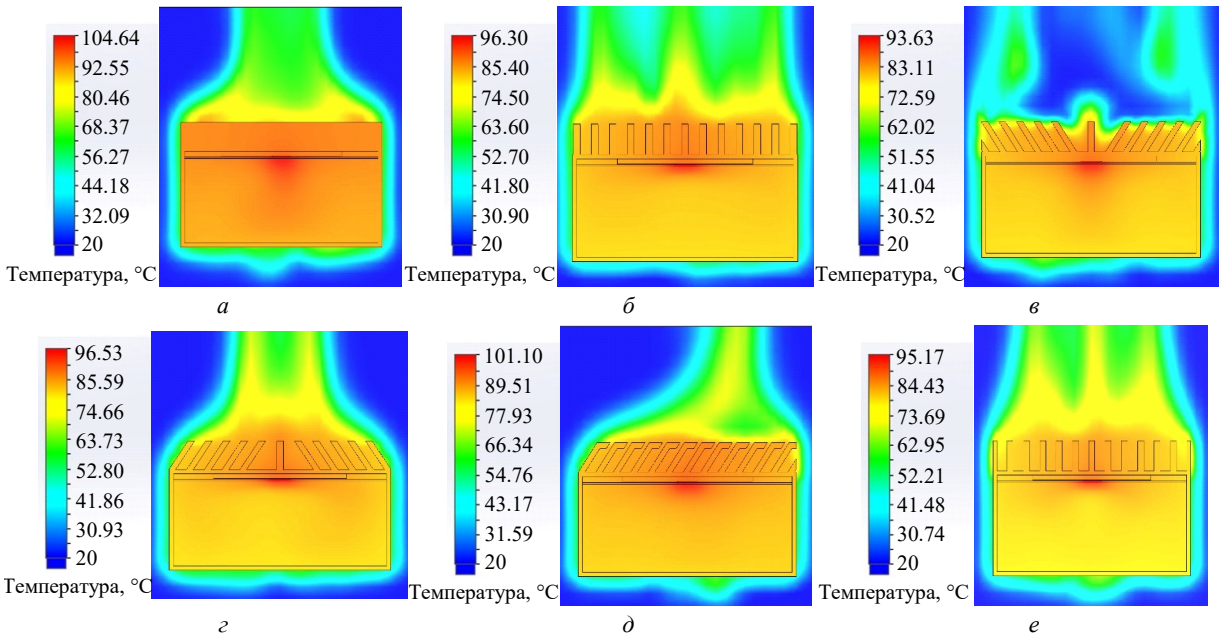


Рис. 10. Температурная картина теплораспределения без обдува при мощности процессора 25 Вт для моделей ГК ТС: *а* – № 1; *б* – № 2; *в* – № 3; *г* – № 4; *д* – № 5; *е* – № 6

Fig. 10. Temperature pattern of heat distribution without blowing at a processor power of 25 W for models: *а* – No. 1; *б* – No. 2; *в* – No. 3; *г* – No. 4; *д* – No. 5; *е* – No. 6

туру в условиях свободной конвекции, что в значительной степени повлияло на эффективность корпуса в пассивном режиме охлаждения. Тепловые картины рассматриваемых моделей ГК ТС приведены на рис. 10.

Полученные в данном эксперименте значения температур свидетельствуют о том, что, хоть лучшими вариантами и стали модели № 3 и 6 (93.63 и 95.17 °C соответственно), значительного прироста в эффективности охлаждения получено не было. Также было установлено, что работа ГК ТС при пассивном режиме охлаждения может использоваться только при мощностях до 25 Вт и в дальнейшем при росте тепловыделения необходимо внешнее принудительное охлаждение для рассеивания большего количества тепла.

Результаты экспериментов по оценке эффективности отведения тепловой энергии от процессора при активном охлаждении ГК ТС. Авторами были проведены эксперименты с применением наружного обдува перпендикулярно и параллельно крышке корпуса при увеличении мощности процессора от 10 до 45 Вт. Результаты приведены в таблице.

Эксперимент при пиковом значении мощности процессора (45 Вт) показал, что активное охлаждение справилось с отведением тепловой энергии от теплонагруженной области, а именно от процессора, его температура не достигает 100 °C.

При пассивном охлаждении ГК ТС особая конфигурация и расположение ребер под углом в виде буквы Г (модель № 5) не справились с отведением тепловой энергии, но при наличии обдува наблюдается обратная картина. В случае вынужденной конвекции данная модель является оптимальным решением за счет небольшого расстояния сверху корпуса между ребрами (явление микроканальности). Ребра в виде буквы Г имеют большую площадь теплоотдачи по сравнению с классическим исполнением прямых ребер. Суммарно это позволяет данной конфигурации выигрывать у второй по эффективности модели № 6 3.6 °C при обдуве сверху и 5.39 °C у модели № 2 (при обдуве, параллельном тепловым каналам). Остальные варианты исполнения оребрения корпусов имеют близкие по значению температур результаты.

Заключение. Исходя из результатов экспериментов можно сделать вывод, что в пассивном режиме форма и конфигурация ребер не играют критической роли. Что касается наружного обдува, то при воздушных потоках, направленных перпендикулярно и параллельно тепловым каналам, наблюдалась тенденция повторения результатов эффективности охла-

Результаты моделирования температуры процессора при разных вариантах наружного обдува

Simulation results of the processor temperature under different options of external blowing

Наружный обдув корпуса перпендикулярно тепловым каналам на крышке ГК ТС						
Мощность, Вт	Номер модели корпуса					
	1	2	3	4	5	6
	Температура процессора, °С					
10 Вт	38.60	31.24	31.59	31.61	30.07	30.97
15 Вт	47.72	36.83	36.97	37.38	35.10	36.40
20 Вт	57.09	42.37	42.88	43.19	40.12	41.88
25 Вт	66.24	47.87	48.65	49.04	45.17	47.32
45 Вт	104.64	69.26	70.41	72.14	65.39	68.99
Наружный обдув корпуса параллельно тепловым каналам на крышке ГК ТС						
Мощность, Вт	Номер модели корпуса					
	1	2	3	4	5	6
	Температура процессора, °С					
10 Вт	36.93	33.14	33.49	33.59	31.68	33.31
15 Вт	45.76	39.76	40.24	40.84	37.45	39.88
20 Вт	55.03	46.50	47.40	48.01	43.28	45.71
25 Вт	61.58	53.85	53.76	54.36	49.01	52.83
45 Вт	91.37	77.35	80.56	81.85	71.96	80.98

ждения. Так, модель № 5 за счет наличия микроканалов и увеличенной площади рассеивания показала наименьшую температуру (при наружном обдуве, перпендикулярном тепловым каналам, и рассеиваемой мощности процессора 45 Вт – 65.39 °С, а при наружном обдуве, параллельном тепловым каналам, и рассеиваемой мощности процессора 45 Вт – 71.96 °С).

Было установлено, что в некоторых случаях конфигурация и форма ребер критически влияют на охлаждение всего устройства в целом, поэтому при проектировании системы охлаждения необходимо использовать оребрение поверхности с учетом оптимизации под планируемое движение воздуха вокруг корпуса в процессе работы устройства. Это обусловлено тем, что воздух сверху корпуса движется перпендикулярно крышке и попадает в каналы охлаждения, через которые равномерно рассеивается в окружающую среду. При обдуве параллельно тепловым каналам воздушные потоки проходят по горизонтали и не рассеивают избыточную тепловую энергию, производимую процессором.

Установлено, что разность температур процессора при различных способах оребрения корпуса в пассивном режиме охлаждения и мощности 10 Вт составляет 3.13 °С, а при 25 Вт – 7.47 °С; в активном режиме (обдув корпуса перпендикулярно тепловым каналам) – при мощности 10 Вт – 1.54 °С, при 25 Вт – 3.87 °С; при пиковом значении мощности 45 Вт – 6.75 °С; в активном режиме (обдув корпуса параллельно тепловым каналам) – при мощности 10 Вт – 1.91 °С, при 25 Вт – 5.35 °С; при пиковом значении мощности 45 Вт – 9.89 °С.

Авторский вклад

Пискун Геннадий Адамович – анализ эффективности отведения тепла от процессора для каждой рассматриваемой конструкции безвентиляторных герметичных корпусов технических средств, формирование структуры статьи.

Алексеев Виктор Федорович – руководство исследованием по оценке влияния конфигурации и формы внешних ребер безвентиляторных герметичных корпусов технических средств, анализ корректности моделирования.

Степченков Олег Витальевич – постановка задачи исследования, планирование экспериментов и обсуждение полученных результатов.

Попов Александр Николаевич – идея разработки трехмерных моделей, анализ результатов моделирования.

Беликов Андрей Николаевич – моделирование конфигурации и формы внешних ребер безвентиляторных герметичных корпусов технических средств.

Рыбаков Дмитрий Григорьевич – построение моделей различных конфигураций безвентиляторных герметичных корпусов технических средств, подготовка материалов к публикации.

Author's contribution

Gennady A. Piskun, analysis of the efficiency of heat removal from the processor for each considered design of fanless sealed cases of technical means, formation of the structure of the article.

Victor F. Alexeev, management of the study to assess the influence of the configuration and shape of the external fins of fanless sealed cases of technical means, analysis of the correctness of the modeling.

Aleh V. Stsepchankou, formulation of the research problem, planning of experiments and discussion of the results obtained.

Aleksandr N. Popov, idea of developing three-dimensional models, analysis of modeling results.

Andrey N. Belikov, modeling the configuration and shape of the external fins of fanless sealed cases of technical means.

Dmitry G. Rybakov, building models of various configurations of fanless sealed enclosures of technical equipment, preparing materials for publication.

Список литературы

1. Моделирование распределения температуры в токоведущих элементах интегральных микросхем в результате воздействия электростатических разрядов / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, В. Л. Ланин, В. Г. Левин // Докл. БГУИР. 2014. № 4 (82). С. 16–22.

2. Основы конструирования и технологии радиоэлектронных средств / Г. М. Алдонин, А. М. Алешечкин, М. М. Валиханов, С. П. Желудько, О. А. Тронин. Красноярск: ИПЦ СФУ, 2011. 360 с.

3. The Impact of ESD on Microcontrollers / G. A. Piskun, V. F. Alexeev, S. M. Avakov, V. E. Matyushkov, D. S. Titko / ed. by V. E. Alexeev. Minsk: Kolorgrad, 2018. 184 p.

4. Яновский А. А., Каныгин Я. В. Математическое моделирование и разработка систем охлаждения процессоров персональных компьютеров // Междунар. студенческий науч. вестн. 2015. № 3–4. С. 496–498. URL: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14148 (дата обращения 10.06.2023).

5. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.

6. Критериальные уравнения теплообмена: расчет теплоотдачи в трубах и каналах. URL: http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006 (дата обращения 10.06.2023).

7. Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. URL: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_basis_of_cad_embedded_cfd_whitepaper.pdf (дата обращения 10.06.2023).

8. Intel® Core™ i5-10210U Processor. URL: https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/195436/intel-core-i510210u-processor-6m-cache-up-to-4-20-ghz.html (дата обращения 10.06.2023).

9. Intel® Core™ i5-10200H Processor. URL: https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/208016/intel-core-i510200h-processor-8m-cache-up-to-4-10-ghz.html (дата обращения 10.06.2023).

10. iBOX-8365UE Fanless Embedded BOX PC. URL: https://www.asrockind.com/en-gb/iBOX-8365UE (дата обращения 10.06.2023).

11. В мини-ПК Sparton LPC-835 используется процессор Intel Core i5 или i7 с пассивным охлаждением. URL: https://www.ixbt.com/news/2017/05/02/sparton-lpc-835-intel-core-i5-i7.html (дата обращения 10.06.2023).

12. AIPC-A3601. URL: http://www.ask-ia.com.cn/en/products/%e5%b7%a5%e4%b8%9a%e7%94%b5%e 8%84%91aipc-a3602 (дата обращения 10.06.2023).

13. DX-1100. URL: https://www.cincoze.com/goods_info.php?id=286 (дата обращения 10.06.2023).

14. AI Vehicle Computer RSL A3 Jetson AGX Xavier. URL: https://www.syslogic.com/eng/ai-vehicle-computer-rsl-a3-jetson-agx-xavier-113419.shtml?parentPageId=113479 (дата обращения 10.06.2023).

15. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения / Г. А. Пискун, В. Ф. Алексеев, А. Н. Беликов, Д. Г. Рыбаков // Докл. БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 54–62. doi: 10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62

Информация об авторах

Пискун Геннадий Адамович – кандидат технических наук (2015), доцент (2016) кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор более 110 научных работ. Сфера научных интересов – воздействие электростатических разрядов на полупроводниковые приборы; методы моделирования и оптимизации параметров радиоэлектронных компонентов, качественно улучшающие их технические характеристики.
Адрес: УО "БГУИР", ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: piskun@bsuir.by

Алексеев Виктор Федорович – кандидат технических наук (1991), доцент (1992) кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор более 300 научных работ. Сфера научных интересов – тепловая нестационарность полупроводниковых структур и интегральных схем; методы моделирования и их программная реализация; прогнозирование надежности радиоэлектронных средств.
Адрес: УО "БГУИР", ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: v.alekseev@bsuir.by
https://orcid.org/0000-0001-7056-6817

Степченков Олег Витальевич – директор открытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин". Автор более 20 научных работ. Сфера научных интересов – разработка специальных ПЭВМ и СВЧ-приборов.
Адрес: ОАО "НИИЭВМ", ул. Богдановича, д. 155, Минск, 220040, Республика Беларусь
E-mail: orion@niievm.by

Попов Александр Николаевич – кандидат технических наук (1988), ученый секретарь открытого акционерного общества "Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин". Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – моделирование и испытания радиоэлектронных средств; прогнозирование надежности радиоэлектронных средств.
Адрес: ОАО "НИИЭВМ", ул. Богдановича, д. 155, Минск, 220040, Республика Беларусь
E-mail: anp@niievm.by

Беликов Андрей Николаевич – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – изучение и моделирование процессов тепломассообмена, протекающих в радиоэлектронных средствах.
Адрес: УО "БГУИР", ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: andrech1406@gmail.com

Рыбаков Дмитрий Григорьевич – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. Автор пяти научных публикаций. Сфера научных интересов – изучение и моделирование процессов тепломассообмена, протекающих в радиоэлектронных средствах.
Адрес: УО "БГУИР", ул. П. Бровки, д. 6, Минск, 220013, Республика Беларусь
E-mail: dmitry_ryb10@mail.ru

References

1. Piskun G. A., Alekseev V. F., Lanin V. L., Levin V. G. Modeling of Temperature Distribution in Current-Carrying Elements of Integrated Circuits as a Result of Exposure to Electrostatic Discharges. Reports of BSUIR. 2014, no. 4 (82), pp. 16–22. (In Russ.)

2. Aldonin, G. M., Aleshechkin A. M., Valikhanov M. M., Zheludko S. P., Tronin O. A. Fundamentals of Design and Technology of Radio-Electronic Means. CPI SibFU, 2011, 360 p. (In Russ.)

3. Piskun G. A., Alexeev V. F., Avakov S. M., Matyushkov V. E., Titko D. S. The Impact of ESD on Microcontrollers. Ed. by V. E. Alexeev. Minsk, Kolorgrad, 2018. 184 p.

4. Yanovsky A. A., Kanygin Y. V. Mathematical Modeling and Development of Cooling Systems for Personal Computer Processors. Intern. Student Scientific Bulletin. 2015, no. 3–4, pp. 496–498. Available at: https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14148 (accessed 10.06.2023). (In Russ.)

5. Dulnev G. N. Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment. Moscow, Higher School, 1984, 247 p. (In Russ.)

6. Criteria Heat Transfer Equations: Calculation of Heat Transfer in Pipes and Channels. Available at: http://thermalinfo.ru/eto-interesno/kriterialnye-uravneniya-teploobmena-raschet-teplootdachi-v-trubah-i-kanalah?ysclid=lisz04evan563077006 (accessed 10.06.2023).

7. Numerical Basis of CAD-Embedded CFD. Available at: https://www.solidworks.com/sw/docs/flow_basis_of_cad_embedded_cfd_whitepaper.pdf (accessed 10.06.2023).

8. Intel® Core™ i5-10210U Processor. Available at: https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/

195436/intel-core-i510210u-processor-6m-cache-up-to-4-20-ghz.html (accessed 10.06.2023).

9. Intel® Core™ i5-10200H Processor. Available at: https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/208016/intel-core-i510200h-processor-8m-cache-up-to-4-10-ghz.html (accessed 10.06.2023).

10. iBOX-8365UE Fanless Embedded BOX PC. Available at: https://www.asrockind.com/en-gb/iBOX-8365UE (accessed 10.06.2023).

11. The Sparton LPC-835 Mini-PC Uses an Intel Core i5 or i7 Processor with Passive Cooling. Available at: https://www.ixbt.com/news/2017/05/02/sparton-lpc-835-intel-core-i5-i7.html (accessed 10.06.2023). (In Russ.)

12. AIPC-A3601. Available at: http://www.ask-ia.com.cn/en/products/%e5%b7%a5%e4%b8%9a%e7%94%b5%e8%84%91aipc-a3602 (accessed 10.06.2023).

13. DX-1100. Available at: https://www.cincoze.com/goods_info.php?id=286 (accessed 10.06.2023).

14. AI Vehicle Computer RSL A3 (Jetson AGX Xavier). Available at: https://www.syslogic.com/eng/ai-vehicle-computer-rsl-a3-jetson-agx-xavier-113419.shtml?parentPageId=113479 (accessed 10.06.2023).

15. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers. Doklady BGUIR. 2023, vol. 21, iss. 4, pp. 54–62. doi: 10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62. (In Russ.)

Information about the authors

Gennady A. Piskun, Cand. Sci. (Eng.) (2015), Associate Professor (2016) of the Department of Design of Information and Computer Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The author more than 110 scientific publications. Area of expertise: the impact of electrostatic discharges on semiconductor devices; methods for modeling and optimizing the parameters of radio-electronic components that qualitatively improve their technical characteristics.
Address: BSUIR, 6, P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus
E-mail: piskun@bsuir.by

Victor F. Alexeev, Cand. Sci. (Eng.) (1991), Associate Professor (1992) of the Department of Design of Information and Computer Systems of Belarusian State University of Informatics and Radio Electronics. The author more than 300 scientific publications. Area of expertise: thermal nonstationarity of semiconductor structures and integrated circuits; modeling methods and their software implementation; predicting the reliability of radio-electronic equipment.
Address: BSUIR, 6, P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus
E-mail: v.alekseev@bsuir.by
https://orcid.org/0000-0001-7056-6817

Aleh V. Stsepchankou, Director of the open joint-stock company "Research Institute of Electronic Computers". The author more than 20 scientific publications. Area of expertise: development of special PCs and microwave devices.
Adress: OJSC "NIIEVM", 155, Bogdanovicha St., Minsk 220040, Republic of Belarus
E-mail: orion@niievm.by

Aleksandr N. Popov, Cand. Sci. (Eng.) (1988), Scientific secretary of the Open Joint-Stock Company "Research Institute of Electronic Computers". The author more than 50 scientific publications. Area of expertise: modeling and testing of radio-electronic equipment; forecasting the reliability of radio-electronic equipment.
Address: OJSC "NIIEVM", 155, Bogdanovicha St., Minsk 220040, Republic of Belarus
E-mail: anp@niievm.by

Andrey N. Belikov, Student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: modeling of thermal processes occurring in the radioelectronics devices.
Address: BSUIR, 6, P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus
E-mail: andrech1406@gmail.com

Dmitry G. Rybakov, Student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. The author of 5 scientific publications. Area of expertise: modeling of thermal processes occurring in the radioelectronics devices.
Address: BSUIR, 6, P. Brovki St., Minsk 220013, Republic of Belarus
E-mail: dmitry_ryb10@mail.ru