



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-33-41>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3-046.47

ВЛИЯНИЕ ОРИЕНТАЦИИ КАНАЛОВ В КУЛЕРАХ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТВЕДЕНИЯ ТЕПЛА ОТ ПРОЦЕССОРОВ

Г. А. ПИСКУН, В. Ф. АЛЕКСЕЕВ, А. Н. БЕЛИКОВ, Д. Г. РЫБАКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 30.01.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2023
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2023

Аннотация. Приведены результаты исследования кулеров воздушного охлаждения при естественном и принудительном отведении тепла от таких мощных полупроводниковых приборов, как процессоры. В программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation выполнены эксперименты по оценке влияния ориентации сформированных тепловых каналов на эффективность отведения тепла от поверхности теплонагруженного элемента. Разработаны трехмерные модели башенных радиаторов с установленным вентилятором и несущей конструкцией в виде тепловых трубок, пронизывающих ребра, которые формируют горизонтальные (модель № 1) или вертикальные (модель № 2) воздушные каналы, позволившие определить эффективность отвода тепла от процессора при естественной и вынужденной конвекции. Разработанная модель № 1 была повернута на 90°, что может быть обусловлено конструкторскими требованиями при разработке технических средств. Это привело к изменению движения теплого воздуха при естественной и вынужденной конвекции по направленным вертикально каналам с анализом эффективности пассивного и активного охлаждения. Сократили количество тепловых трубок с шести до двух для ранее разработанных типов радиаторов (модели № 1 и 2), только при активном охлаждении, что позволило экспериментально установить влияние конструктивных решений (количества и ориентации тепловых трубок) на эффективность теплоотвода.

Ключевые слова: кулер воздушного охлаждения, нагрев, процессор, тепловые трубки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Влияние ориентации каналов в кулерах воздушного охлаждения на эффективность отведения тепла от процессоров / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 5. С. 33–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-33-41>.

INFLUENCE OF CHANNEL ORIENTATION IN AIR COOLERS ON THE EFFICIENCY OF HEAT REMOVAL FROM POWERFUL SEMICONDUCTOR DEVICES

GENNADY A. PISKUN, VIKTOR F. ALEXEEV, ANDREY N. BELIKOV,
DMITRY G. RYBAKOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30.01.2023

Abstract. The results of the study of air-cooled coolers with natural and forced heat removal from such powerful semiconductor devices as processors are presented. Experiments were performed in the SOLIDWORKS

Flow Simulation software environment to assess the influence of the orientation of the formed thermal channels on the efficiency of heat removal from the surface of a heat-loaded element. Three-dimensional models of tower heatsinks with an installed fan and a supporting structure in the form of heat pipes penetrating fins that form horizontal (model No 1) or vertical (model No 2) air channels have been developed, which made it possible to determine the efficiency of heat removal from the processor during natural and forced convection. The developed model No 1 was rotated by 90°, which may be due to design requirements in the development of technical means. This led to a change in the movement of warm air during natural and forced convection along the vertically directed channels with an analysis of the effectiveness of passive and active cooling. The number of heat pipes has been changed from six to two for previously developed types of radiators (models No 1 and 2), only with active cooling. This made it possible to experimentally establish the influence of design solutions (the number and orientation of heat pipes) in the production of modern air-cooled coolers on the efficiency of heat removal.

Keywords: air coolers, heating, processor, heat pipes.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. (2023) Influence of Channel Orientation in Air Coolers on the Efficiency of Heat Removal from Powerful Semiconductor Devices. *Doklady BGUIR*. 21 (5), 33–41. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-33-41> (in Russian).

Введение

При разработке эффективных высокопроизводительных вычислительных систем одним из наиболее значимых факторов является обеспечение их теплового режима, что, в свою очередь, напрямую связано с разработкой и использованием систем охлаждения для таких мощных и теплонагруженных электронных компонентов, как процессоры. Незначительное повышение температуры данных интегральных микросхем может привести к возникновению параметрических отказов (сбросу тактовой частоты в процессе перегрева, появлению ошибок в работе программного обеспечения персонального компьютера и т. д.), а в отдельных случаях возможны необратимые изменения внутри самого процессора (расплавление металлизированных дорожек, перегорание внутренних выводов и т. д.).

Готовых универсальных решений для обеспечения допустимой температуры нагрева процессоров на данный момент не существует, что обусловлено сферой их применения (персональные компьютеры, ноутбуки, серверы, суперкомпьютеры, мобильные телефоны и планшеты), конструкторско-технологическими и массогабаритными ограничениями. Наиболее частые способы отведения тепла от теплонагруженных компонентов – использование пассивных (отвод тепла происходит благодаря излучению тепла и естественной конвекции) и/или активных (тепло отводится посредством теплового излучения и принудительной конвекции) систем охлаждения [1–5].

Пассивные системы охлаждения процессоров нашли свое применение в условиях производственных помещений с повышенной влажностью, запыленностью и температурой, где охлаждающие вентиляторы принудительного охлаждения (кулеры) быстро выходят из строя, а также при проектировании бесшумных персональных компьютеров (используются специально созданные радиаторы большой площади для работы без вентилятора) [1, 2, 5]. Особенностью активных систем охлаждения является наличие вентиляторов, которые усиливают движение холодной окружающей среды, что приводит к более эффективному отведению выделяемой тепловой энергии. Правильное размещение вентилятора улучшает воздушный поток внутри корпуса, что не только понижает температуру элементов, но и снижает температуру сформировавшейся нагретой зоны [1, 2, 5].

Цель исследования – анализ эффективности отведения тепловой энергии от теплонагруженной поверхности процессора посредством использования кулеров воздушного охлаждения (КВО), особенностью которых являются различная ориентация (вертикальная или горизонтальная) воздушных тепловых каналов и наличие как естественной, так и вынужденной конвекции.

Исходные данные и постановка задачи

Для построения КВО использовали программу SOLIDWORKS Flow Simulation, в которой разработаны трехмерные модели, структурно повторяющие форму и размеры таких распространенных систем охлаждения центрального процессора персональных компьютеров, как Nos-

tua NH-D14 [6] (модель № 1) и Noctua NH-P1 [7] (модель № 2) (рис. 1, *a, b*). Для источника тепловой энергии создали модель процессора AMD Ryzen™ 7 5800x [8] (рис. 1, *c*).

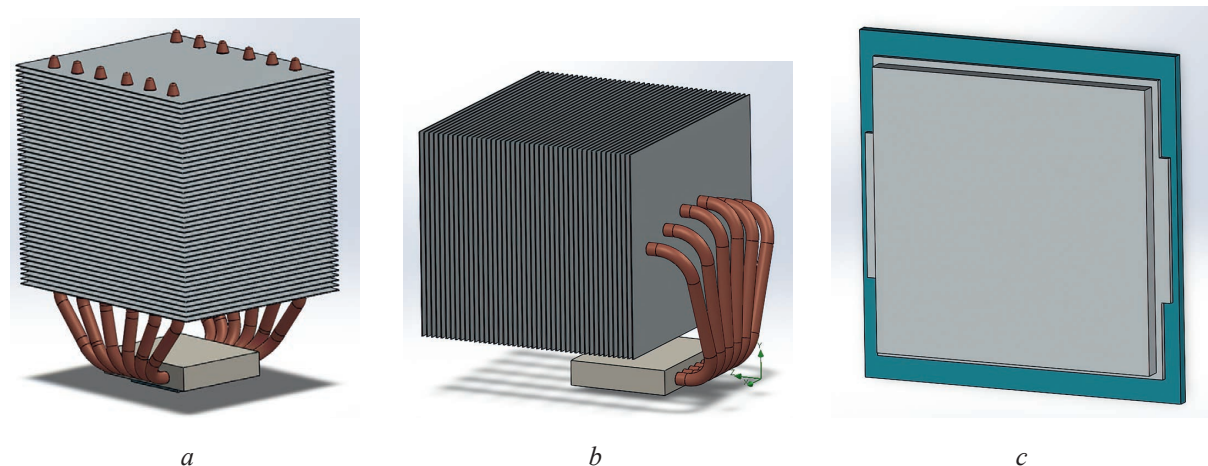


Рис. 1. Трехмерная модель кулера воздушного охлаждения Noctua NH-D14 (*a*), Noctua NH-P1 (*b*) и процессора AMD Ryzen™ 7 5800x (*c*)

Fig. 1. 3D model air cooler Noctua NH-D14 (*a*), Noctua NH-P1 (*b*) and processor AMD Ryzen™ 7 5800x (*c*)

Модель № 1 представляет собой радиатор башенного типа размерами $160 \times 125 \times 99$ мм, состоящий из теплосъемной площадки в основании и горизонтальных алюминиевых ребер (45 отдельных пластин), соединенных проходящими сквозь них шестью тепловыми трубками диаметром 6 мм, незначительно выходящими наружу корпуса. Отличительной особенностью является монтаж П-образных тепловых трубок, заключающийся в том, что средняя их часть устанавливается непосредственно на теплосъемник и распределяет тепло по наиболее длинным, вмонтированным в ребра радиатора концам.

Модель № 2 – это тоже радиатор башенного типа размерами $133 \times 124 \times 125$ мм, состоящий из теплосъемной площадки в основании и вертикальных алюминиевых ребер (45 отдельных пластин), соединенных проходящими сквозь них шестью тепловыми трубками диаметром 6 мм. Особенность монтажа используемых П-образных тепловых трубок заключается в том, что одна их часть устанавливается непосредственно на теплосъемник, а другая монтируется в ребра радиатора.

Для обеспечения адекватного сравнения конфигурации радиаторов были максимально приведены к общим значениям размеров ребер, их количеству и расстоянию между ними, количеству и размерам тепловых трубок, а также размерам теплосъемных оснований. При моделировании использованы исходные данные из [3], а также скорректированы параметры теплопроводности материалов для составных частей модели (материал очень высокой теплопроводности – для тепловых трубок ($4 \text{ кВт}/(\text{м} \cdot \text{К})$), алюминий – для ребер радиатора, медь – для теплораспределительной крышки процессора и основания радиатора, кремний – для кристалла процессора).

С целью оценки эффективного использования различных конструктивных решений КВО выполнены исследования, позволяющие:

- оценить эффективность отведения тепловой энергии от процессора с установленным на него башенным радиатором с несущей конструкцией в виде тепловых трубок, пронизывающих алюминиевые ребра, которые формируют горизонтальные или вертикальные тепловые воздушные каналы при их пассивном и активном охлаждении (эксперимент 1);

- проанализировать эффективности пассивного и активного охлаждения повернутого на 90° КВО с горизонтально ориентированными алюминиевыми ребрами, что дало возможность организовать течение воздуха при естественной и вынужденной конвекции по направленным вертикально тепловым каналам (эксперимент 2);

- исследовать влияние конструктивных решений (количество и ориентацию тепловых трубок) при производстве современных КВО на эффективность теплоотвода только при активном охлаждении процессора (эксперимент 3).

Результаты экспериментов и их обсуждение

При проведении эксперимента 1 получены значения температур нагретого воздуха в сформированных тепловых каналах КВО для различных моделей при их пассивном и активном охлаждении. Установлено, что при пассивном режиме эксплуатации КВО, конструктивно соответствующей модели № 1, воздух между пластинами нагрелся до температуры 157 °С (рис. 2, *a*), в то время как в модели № 2 (рис. 2, *b*) – до 141,49 °С. Значение максимальной мощности процессора в обеих моделях 100 Вт.

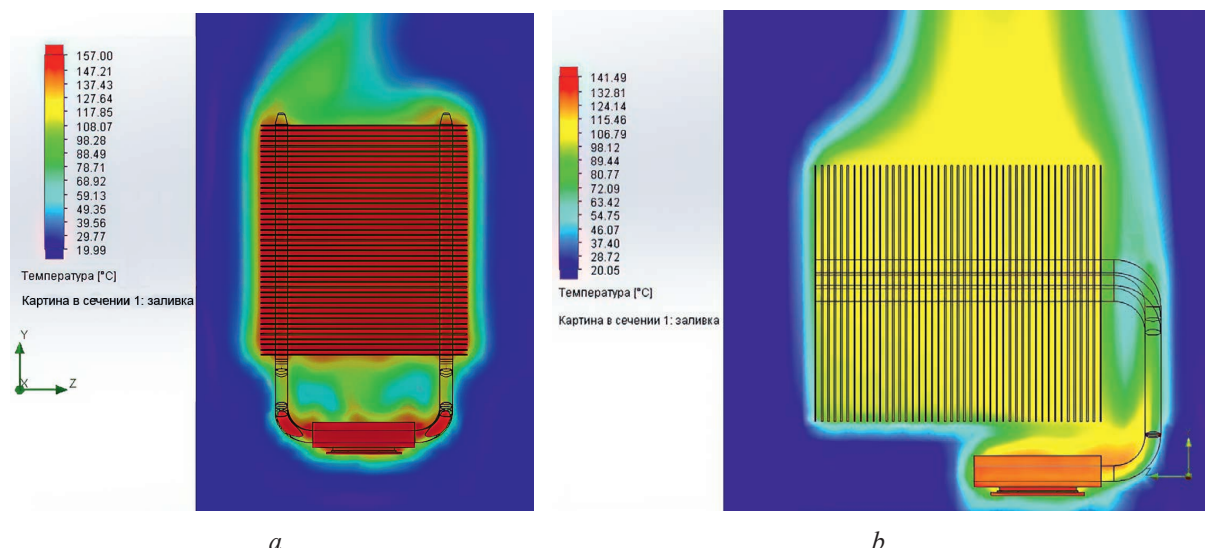


Рис. 2. Значения температуры нагретого воздуха в моделях № 1 (*a*) и № 2 (*b*) при пассивном охлаждении процессора при мощности 100 Вт

Fig. 2. Temperature values of heated air in models No 1 (*a*) and No 2 (*b*) with passive cooling of the processor at a power of 100 W

Более эффективное отведение тепла от модели № 2 объясняется тем, что отвод тепловой энергии осуществлялся посредством подъема массы нагретого воздуха без столкновения с преградами, т. е. по вертикально ориентированным каналам. В свою очередь, в модели № 1 происходило столкновение поднимающегося вверх теплого воздуха с первой пластиной КВО и его дальнейшее турбулентное распределение.

При использовании принудительного (активного) конвективного охлаждения результаты оказались противоположными: в модели № 1 (рис. 3, *a*) воздух между пластинами нагрелся до температуры 47 °С, в то время как в модели № 2 (рис. 3, *b*) – до 63 °С при максимальной мощности процессора 100 Вт.

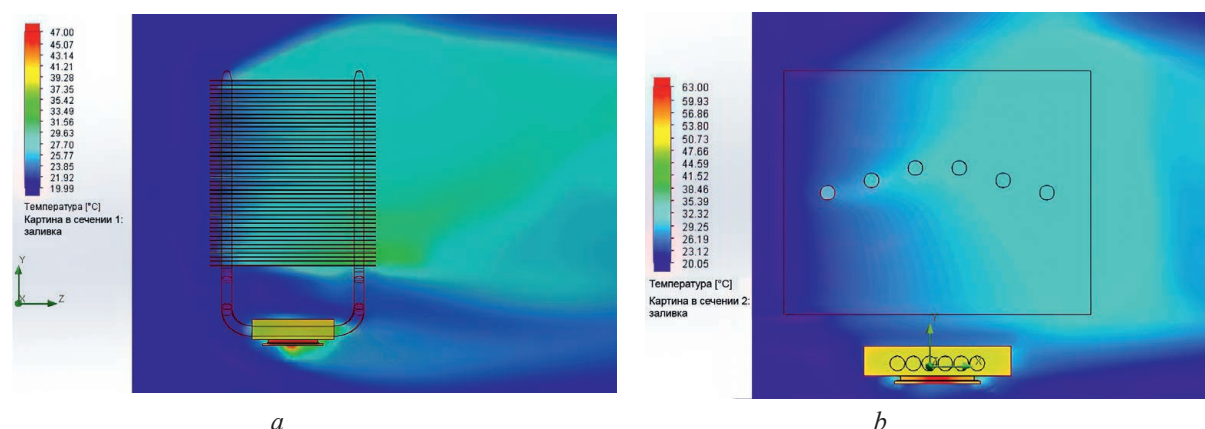


Рис. 3. Значения температуры нагретого воздуха в моделях № 1 (*a*) и № 2 (*b*) при активном охлаждении процессора при мощности 100 Вт

Fig. 3. Temperature values of heated air in models No 1 (*a*) and No 2 (*b*) with active cooling of the processor at a power of 100 W

Это может объясняться тем, что в модели № 1 происходит более равномерный перенос тепловой энергии от процессора по горизонтально ориентированным ребрам радиатора благодаря двойному их пронизыванию тепловыми трубками, в то время как в модели № 2 пронизывание одинарное.

С увеличением мощности процессора с 20 до 100 Вт и при изменении вида конвективного охлаждения разница в показателях температур начинает значительно отличаться (рис. 4). Так, при мощности 20 Вт разница между температурами при охлаждении в разных моделях составила около 3 °С в пассивном и 5 °С в активном режимах, а при 100 Вт – 15 °С и 16 °С соответственно. В свою очередь, разница температур для модели № 1 при пассивном и активном охлаждении составила ~31 °С при мощности 20 Вт и ~110 °С – при 100 Вт, а для модели № 2 – примерно 24 °С при мощности 20 Вт и 81 °С – при 100 Вт.

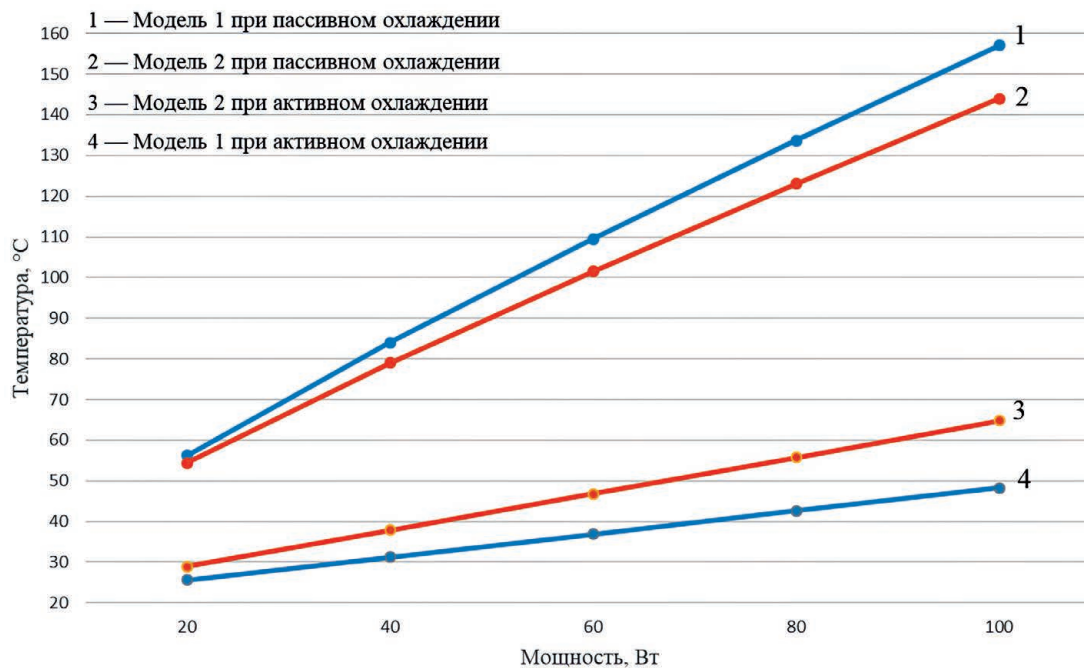


Рис. 4. Зависимость температуры от мощности процессора при сравнении разных конфигураций кулеров воздушного охлаждения в различных вариантах охлаждения

Fig. 4. Dependence of temperature on processor power when comparing different air coolers configurations in different cooling options

По результатам моделирования можно сделать вывод, что конфигурация радиатора с вертикальным расположением ребер является более эффективной в пассивном режиме охлаждения без обдува, но проигрывает классическому башенному радиатору в режиме активного охлаждения. Поскольку конфигурации моделей № 1 и № 2 отличались друг от друга, то, как указывалось ранее, на результаты значительно повлияли их конструктивные отличия. Для того чтобы оценить влияние естественной конвекции при различных вариантах ориентации ребер, провели эксперимент 2, в котором определенный тип КВО (модель № 1) был повернут на 90°, что позволило обеспечить течение воздуха при естественной и вынужденной конвекции по направленным вертикально тепловым каналам. Тепловая картина КВО модели № 1 с вертикально ориентированными воздушными каналами, сформированными при повороте радиатора на 90°, представлена на рис. 5.

Из рис. 5 видно, что КВО с вертикально расположенными каналами за счет естественной конвекции оказался более эффективным в пассивном режиме охлаждения (рис. 6), однако при наличии обдува радиатор показал абсолютно одинаковые результаты (табл. 1) вне зависимости от расположения ребер в пространстве. В результате проведенного эксперимента 2 доказано, что составляющая естественной конвекции важна и имеет значение только в случае пассивного охлаждения, при наличии обдува это не вносит никаких изменений.

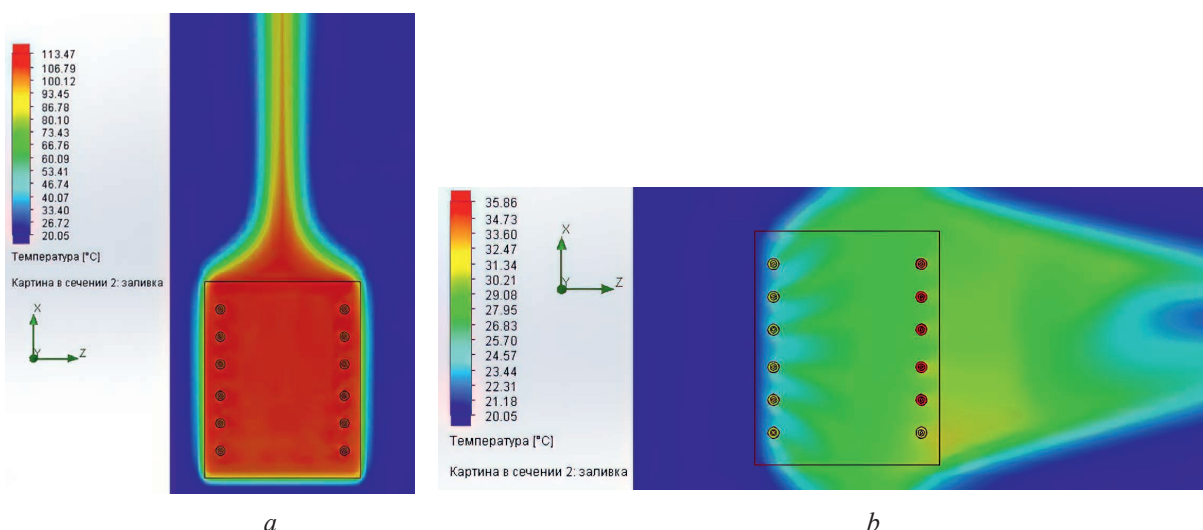


Рис. 5. Движение нагретого воздуха в кулере воздушного охлаждения модели № 1 после поворота радиатора на 90° при пассивном (a) и активном (b) охлаждении
Fig. 5. The movement of heated air in the air cooler of model No 1 after turning the radiator by 90° with passive (a) and active (b) cooling

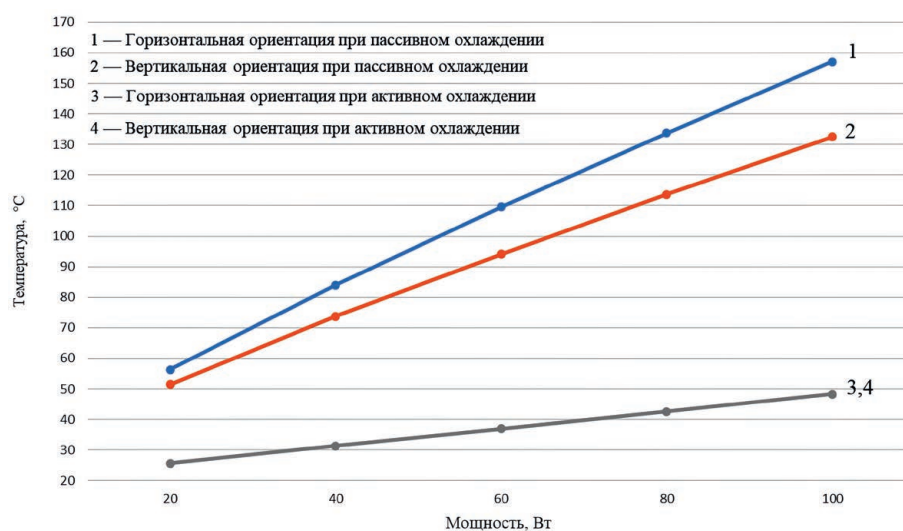


Рис. 6. Сравнение горизонтальной и вертикальной ориентации тепловых каналов кулера воздушного охлаждения модели № 1
Fig. 6. Comparison of the horizontal and vertical orientation of the thermal channels of the air cooler model No 1

Таблица 1. Значения температур процессора, охлаждаемого кулером воздушного охлаждения по модели № 1 с учетом ориентации его ребер (горизонтально/вертикально)
Table 1. The temperatures of the processor cooled by the air cooler according to model No 1 taking into account the orientation of its edges (horizontally/vertically)

Мощность, Вт / Power, W	Температура процессора, °С, охлаждаемого радиатором, расположенным / Temperature of the processor, °С, cooled by a radiator, located	
	горизонтально / horizontally	вертикально / vertically
20	25,67	25,67
40	31,31	31,31
60	36,97	36,95
80	42,63	42,61
100	48,31	48,28

При проведении эксперимента 3 по определению значимости количества используемых тепловых трубок на эффективность КВО последовательно были убраны по две тепловые трубки, расположенные симметрично центру, от краев к центру. Определяли предельную рассеиваемую мощность без перегрева для каждой комбинации (рис. 7, *b*), а также сравнивали температуры при зафиксированной мощности процессора 100 Вт (рис. 7, *a*) (режим охлаждения в данном случае – только активный).

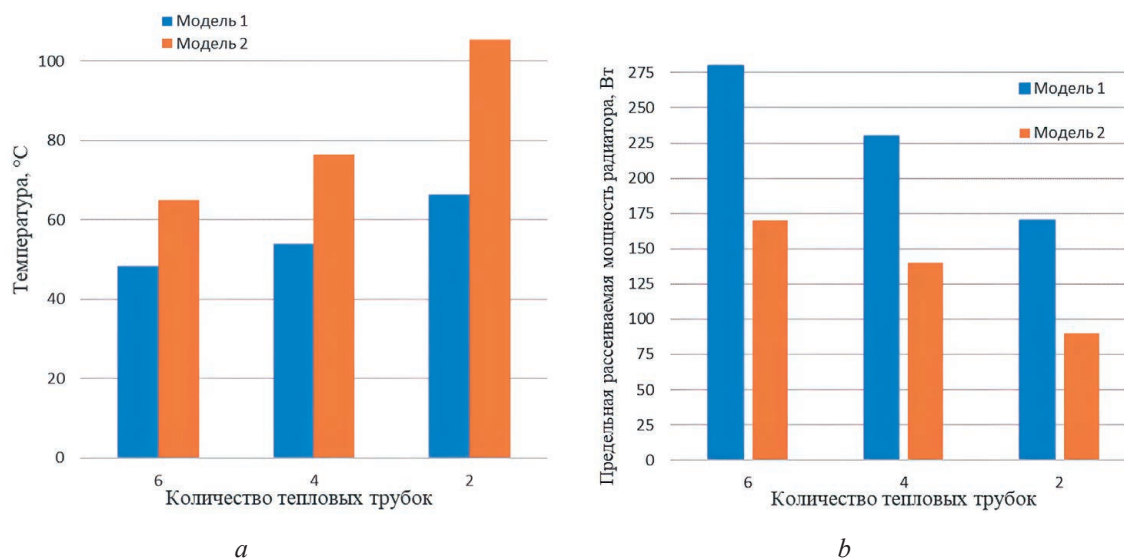


Рис. 7. Зависимость: *a* – температуры процессора от количества тепловых трубок в кулере воздушного охлаждения при рассеиваемой мощности 100 Вт; *b* – предельной рассеиваемой мощности радиатора от количества тепловых трубок в кулере воздушного охлаждения

Fig. 7. Dependence: *a* – processor temperature on the number of heat pipes in an air-cooled cooler with a power dissipation of 100 W; *b* – the maximum power dissipation of the radiator on the number of heat pipes in the air cooler

Анализ результатов исследований позволяет сделать вывод, что конфигурация КВО с вертикальным расположением ребер оказалась наиболее чувствительной к уменьшению количества тепловых трубок. Это можно объяснить тем, что в горизонтальной конфигурации каждая тепловая трубка проходит через радиатор дважды, что положительно сказывается на процессе теплообмена.

Заключение

1. Показано, что эффективность охлаждения процессора при естественной и вынужденной конвекции значительно зависит от ориентации сформированных в кулерах воздушного охлаждения тепловых каналов, в частности:

- при пассивном режиме эксплуатации радиатора с горизонтально ориентированными воздушными каналами (на примере кулера воздушного охлаждения Noctua NH-D14) воздух между пластинами нагрелся до температуры 157 °С, а при активном – до 47°С, при максимальной мощности процессора 100 Вт;

- при пассивном режиме эксплуатации радиатора с вертикально ориентированными воздушными каналами (на примере Noctua NH-P1) воздух между пластинами нагрелся до температуры 141,49 °С, а при активном – до 63 °С, при максимальной мощности процессора 100 Вт.

2. Выявлено, что составляющая естественной конвекции важна и имеет значение только в случае пассивного охлаждения. При наличии обдува это не вносит никаких изменений, и ориентация воздушных каналов в кулере воздушного охлаждения никак не влияет на эффективность охлаждения.

3. Конфигурация кулеров воздушного охлаждения с вертикальным расположением ребер (типа Noctua NH-P1) оказалась наиболее чувствительной к уменьшению количества тепловых трубок и в общем показала значительно худшие результаты (температура процессора при двух

тепловых трубках составила 105 °С, при четырех – 78 °С, при шести – 63 °С). В то время как у модели с горизонтальным расположением ребер (Noctua NH-D14) температура процессора при двух тепловых трубках составила 65 °С, при четырех – 53 °С, при шести – 48 °С.

4. Установлено, что предельная рассеиваемая мощность радиатора существенно зависит от количества тепловых трубок и ориентации воздушных каналов. В частности, у кулера воздушного охлаждения типа Noctua NH-D14 при шести тепловых трубках она составила 280 Вт, при четырех – 231 Вт, при двух – 170 Вт, а у кулера типа Noctua NH-P1 при шести тепловых трубках – 170 Вт, при четырех – 143 Вт, при двух – 84 Вт.

5. Параметрическое моделирование в программной среде SOLIDWORKS Flow Simulation позволило оценить эффективность различных вариантов использования кулеров воздушного охлаждения для охлаждения процессоров с учетом условий теплообмена с окружающей средой. Разработанные модели и результаты исследований могут быть использованы при создании конструкций башенных радиаторов охлаждения процессоров и систем управления тепловыми режимами их эксплуатации.

Список литературы

1. Дульнев, Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре / Г. Н. Дульнев. М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
2. Тригорлый, С. В. Моделирование охлаждения процессоров и управление тепловыми режимами их эксплуатации / С. В. Тригорлый, А. А. Скрипкин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2022. Т. 95, № 4. С. 14–26.
3. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения / Г. А. Пискун [и др.] // Доклады БГУИР. 2023. Т. 21, № 4. С. 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>.
4. Оптимизация теплового режима приемо-передающего устройства по результатам моделирования тепловых процессов в среде SOLIDWORKS Flow Simulation / Г. А. Пискун [и др.] // Znanstvena Misel Journal. 2019. Т. 1, № 35. С. 47–60.
5. Дульнев, Г. Н. Методы расчета тепловых режимов прибора / Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов. М.: Радио и связь, 1990. 312 с.
6. Noctua/Noctua NH-D14 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://noctua.at/en/products/cpu-cooler-retail>. Дата доступа: 20.01.2023.
7. Noctua/Noctua NH-P1 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://noctua.at/en/products/cpu-cooler-retail>. Дата доступа: 20.01.2023.
8. AMD//Процессор AMD Ryzen™ 7 5800x [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.amd.com/en/products/cpu/amd-ryzen-7-5800x>. Дата доступа: 17.01.2023.

References

1. Dulnev G. N. (1984) *Heat and Mass Transfer in Electronic Equipment*. Moscow, Higher School Publ. 247 (in Russian).
2. Trigoriyi S. V., Skripkin A. A. (2022) Modeling of Processor Cooling and Thermal Management of their Operation. *Bulletin of the Saratov State Technical University*. 95 (4), 14–26 (in Russian).
3. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. (2023) Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers. *Doklady BGUIR*. 21 (4), 54–62. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62> (in Russian).
4. Piskun G. A., Alekseev V. F., Romanovsky P. S., Stanul A. A. (2019) Optimization of the Thermal Regime of a Transceiver Based on the Results of Modeling Thermal Processes in the SolidWorks Flow Simulation Environment. *Znanstvena Misel Journal*. 1 (35), 47–60 (in Russian).
5. Dulnev G. N., Parfenov V. G., Sigalov A. V. (1990) *Methods for Calculating the Thermal Regimes of the Device*. Moscow, Radio and Communication Publ. 312 (in Russian).
6. *Noctua/Noctua NH-D14*. Available: <https://noctua.at/en/products/cpu-cooler-retail> (Accessed 20 January 2023).
7. *Noctua/Noctua NH-P1*. Available: <https://noctua.at/en/products/cpu-cooler-retail> (Accessed 20 January 2023).
8. *AMD//Processor AMD Ryzen™ 7 5800x*. Available: <https://www.amd.com/en/products/cpu/amd-ryzen-7-5800x> (Accessed 17 January 2023).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Пискун Г. А., к. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Алексеев В. Ф., к. т. н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Беликов А. Н., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Рыбаков Д. Г., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 292-22-07
E-mail: alexvikt.minsk@gmail.com
Алексеев Виктор Федорович

Information about the authors

Piskun G. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Alexeev V. F., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at the Department of Design Information and Computer Systems of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Belikov A. N., Student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rybakov D. G., Student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 292-22-07
E-mail: alexvikt.minsk@gmail.com
Alexeev Viktor Fedorovich