



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3-046.47

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТВЕДЕНИЯ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ПРОЦЕССОРОВ ПРИ ПОМОЩИ КУЛЕРОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

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. Представлены результаты исследования по отведению тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров с воздушным охлаждением (КВО). Проведены четыре эксперимента, в которых при помощи трехмерного твердотельного параметрического моделирования выявлены наиболее эффективные варианты исполнения КВО. В первом эксперименте был разработан башенный радиатор с несущей конструкцией в виде медных прутков и установленным вертикально вентилятором. Это дало возможность определить эффективность передачи тепловой энергии по радиатору. В следующем эксперименте в разработанной ранее модели заменили медные прутки на тепловые трубки и убрали вентилятор, что позволило обосновать необходимость наличия или отсутствия обдува при постепенном увеличении мощности процессора во время его эксплуатации. В третьем случае изменяли скорость вращения вентилятора, благодаря чему установили предельную скорость воздушного потока для эффективного охлаждения радиатора. В последнем эксперименте определили оптимальную конструкцию КВО, позволившую эффективно реализовать рассеивание тепловой энергии от процессора при различной его мощности. Экспериментально доказана необходимость использования КВО в таких современных технических средствах, как персональные компьютеры, сервера, вычислительные комплексы и т. д., в которых нет ограничений по обеспечению массогабаритных параметров.

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

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. 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>.

SIMULATION OF THERMAL ENERGY REMOVAL FROM PROCESSORS USING AIR COOLERS

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 a study on the removal of thermal energy from processors using air coolers (AC) are presented. Four experiments were carried out, in which, with the help of three-dimensional solid-state parametric modeling of various versions of the AC, the most effective ones were identified. In the first experiment, a tower radiator with a supporting structure in the form of copper bars and a vertically mounted fan was developed, which made it possible to determine the efficiency of heat transfer through the radiator. In the next experiment, in the

previously developed model, copper bars were replaced with heat pipes and the fan was removed, which made it possible to substantiate the need for the presence or absence of airflow with a gradual increase in processor power during its operation. In the third case, the possibility of changing the fan speed was implemented, which made it possible to set the maximum air flow rate for efficient cooling of the radiator. In the last experiment, the optimal design of the AC was established, which made it possible to effectively implement the dissipation of thermal energy from the processor at various power levels. The necessity of using AC in such modern technical means as personal computers, servers, computer systems, etc., in which there are no restrictions on providing weight and size parameters has been experimentally proved.

Keywords: air cooler, modeling, 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) 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).

Введение

В настоящее время при проектировании и разработке современных технических средств различного функционального назначения имеется огромное разнообразие способов охлаждения входящих в их состав интегральных схем (ИС) разной мощности, которые основываются на различных физических явлениях [1–3]. При этом одна из наиболее важных задач – изучение и понимание того, каким образом реализовать эффективное охлаждение высокопроизводительных элементов и как сконструировать устройство с учетом высоких требований в области массогабаритных параметров. Сегодня наиболее эффективный способ отведения тепла от ИС мощностью в несколько десятков ватт – использование кулеров воздушного охлаждения (КВО), состоящих из четырех основных элементов – теплоъемника, тепловых трубок, радиатора и вентилятора.

Теплоъемник устанавливается на нагревающийся элемент устройства (например, чип процессора или видеокарты, сильно греющиеся элементы системы стабилизации напряжения питания и т. д.) и представляет собой металлическую пластину, чаще всего сделанную из меди, с переходом на тепловые трубки. Данные трубки соединяют между собой теплоъемник и радиатор охлаждения и передают тепло от первого ко второму посредством конвективного переноса тепла содержащейся внутри легкокипящей жидкостью (т. е. жидкость испаряется на горячем конце трубки, поглощая теплоту испарения, и конденсирует на холодном, откуда перемещается обратно на горячий конец). Радиатор охлаждения в большинстве случаев имеет конструкцию, состоящую из ряда параллельных пластин (преимущественно алюминиевых), структурирующих движение воздуха, пронизанных тепловыми трубками. Для повышения эффективности таких систем используется вентилятор, обдувающий радиатор холодным воздухом, поступающим в технические средства через перфорационные отверстия.

Цель исследований – обоснование эффективности использования КВО для отведения избыточного тепла от интегральных микросхем. В частности, в программной среде SolidWorks Flow Simulation реализовано трехмерное твердотельное параметрическое моделирование различных вариантов исполнения таких систем с определением наиболее эффективных.

Исходные данные и постановка задачи

При построении моделей КВО использовали программу для параметрического моделирования конвективного потока SolidWorks Flow Simulation, в которой разработали трехмерную модель (рис. 1), точно повторяющую форму и размеры одного из самых широко распространенных башенных радиаторов – DeepCool GAMMAXX 300 [4]. В качестве источника тепла был выбран процессор AMD Ryzen™ 7 5800X [5].

Разработанный в среде SolidWorks Flow Simulation проект основывался на уже заложенных в нее физических закономерностях конвективного теплообмена в газовой среде с учетом особенностей теплопроводности в твердых телах. Использовали следующие исходные данные и оборудование:

- мощность тепловыделения процессора 20–105 Вт [5], в пиковых режимах эксплуатации может возрасти до 120 Вт [6];
- температура воздуха в отапливаемом помещении 20 °С (293 К);



Рис. 1. Внешний вид (a) и трехмерная модель (b) кулера воздушного охлаждения
Fig. 1. External view (a) and three-dimensional model (b) of the air cooler

- скорость воздушного потока 0–10 м/с [4];
- параметры теплопроводности материалов для составных частей модели (материал высокой теплопроводности (4 кВт/(м·К)) [7] для тепловых трубок и алюминий для всех остальных);
- характеристики неучтенных в модели дополнительных прослоек, создающих важные для учета тепловые сопротивления, таких как термопасты между основанием радиатора (теплосъемником) и крышкой процессора и припой между тепловыми трубками и ребрами радиатора:
 - толщина слоя термопасты между процессором и теплосъемником 0,08 мм;
 - теплопроводность термопасты 4 Вт/(м·К) [8];
 - толщина слоя припоя между тепловыми трубками и контактирующими поверхностями 0,05 мм;
- радиатор конструкции башенного типа размерами 121×135,7×75,5 мм, состоящий из теплосъемной площадки в основании и горизонтальных алюминиевых ребер (68 отдельных алюминиевых пластин), соединенных проходящими сквозь них тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм и незначительно выходящих наружу корпуса [4];
- вентилятор с гидродинамическим типом подшипника, способный работать в режиме PWM, т. е. автоматической регулировки оборотов, которые составляют 900 об/мин в минимальном режиме и 1600 об/мин – в максимальном [4];
- рассеиваемая мощность вентилятора – до 130 Вт [4].

Для выявления причин применения некоторых конструктивно-технологических решений в структуре КВО провели следующие эксперименты.

Эксперимент № 1: в радиаторе башенного типа использовались пронизывающие ребра медные прутки диаметром 6 мм для того, чтобы установить эффективность передачи тепловой энергии от теплосъемника до радиатора, а также постепенное повышение скорости обдува воздухом от 0 до 1,7 м/с для выявления целесообразности использования принудительной системы охлаждения.

Эксперимент № 2: разработана модель конструкции радиатора башенного типа с алюминиевыми ребрами, которая пронизана тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм без дополнительной системы принудительного охлаждения. В процессе исследований устанавливали необходимость наличия или отсутствия обдува при постепенном увеличении мощности процессора.

Эксперимент № 3: определение предельной скорости движения воздушного потока для эффективного отведения тепла от радиатора по сформированным межреберным тепловым каналам. Исследования позволили установить влияние скорости движения газовой среды на эффективность рассеивания тепловой энергии с радиатора и выявить причину, почему на практике редко применяются кулеры со скоростью воздушного потока более 2 м/с.

Эксперимент № 4: определение предельной мощности рассеивания тепловой энергии от процессора для различных режимов его эксплуатации (от 20 до 100 Вт) с помощью смоделированного радиатора башенного типа с установленными тепловыми трубками и вентилятором при поэтапном увеличении скорости обдува от 0 до 1,7 м/с.

Результаты экспериментов и их обсуждение

При помощи разработанной компьютерной модели КВО, состоящей из радиатора башенного типа с горизонтально установленными алюминиевыми ребрами, пронизанными медными прутками диаметром 6 мм, и вентилятора, осуществляющего обдув воздухом со скоростью 0–1,7 м/с,

установлено, что процессор при увеличении его мощности от 20 до 120 Вт охлаждается недостаточно эффективно (рис. 2).

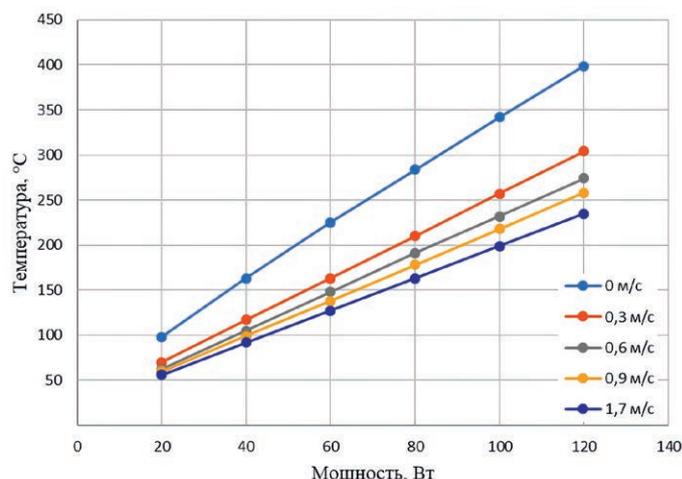


Рис. 2. Зависимость температуры теплоотвода от мощности процессора в случае отсутствия тепловых трубок и наличия дополнительного обдува

Fig. 2. Temperature dependence of heat spreader on processor power in the absence of heat pipes and the presence of additional airflow

Согласно результатам моделирования, максимально теплонагруженная область – это теплоотвод радиатора. В частности, при моделировании радиатора с медными прутками без дополнительного обдува при мощности процессора 20 Вт теплоотвод нагревается до 97,81 °С, что является предельным значением температуры процессора и свидетельствует о неэффективном использовании радиатора. В случае дополнительного обдува воздухом со скоростью 1,7 м/с (при мощности процессора 120 Вт) теплоотвод нагревается до 234,30 °С, что значительно превышает предельное значение температуры процессора и свидетельствует не только о неэффективном использовании радиатора, но и может привести к катастрофическому отказу самого процессора (рис. 3).

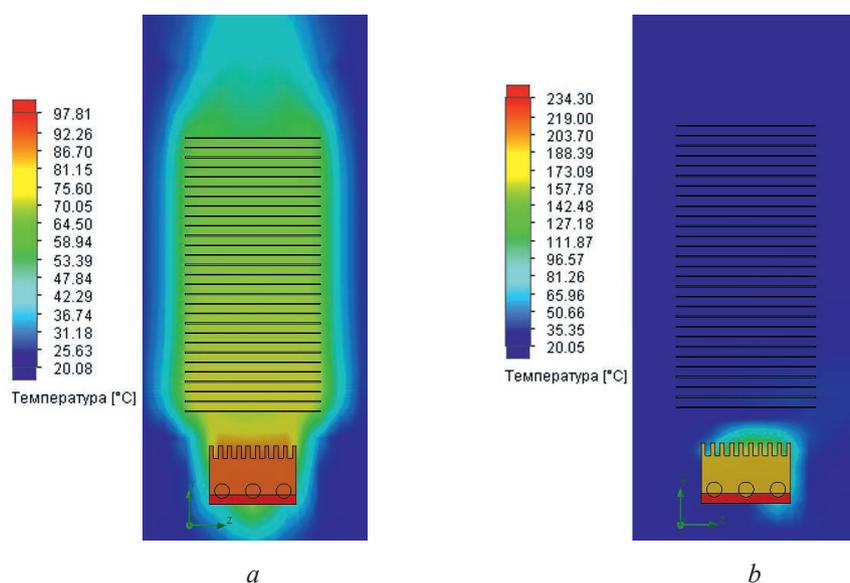


Рис. 3. Модель радиатора с медными прутками без обдува при мощности процессора 20 Вт (a) и результаты моделирования охлаждения процессора с обдувом воздухом со скоростью 1,7 м/с при мощности процессора 120 Вт (b)

Fig. 3. Model of a heatsink with copper bars without airflow at a processor power of 20 W (a) and the results of a processor cooling simulation with airflow at a speed of 1.7 m/s at a processor power of 120 W (b)

Полученные в первом эксперименте значения температур свидетельствуют о том, что разработанная модель радиатора неэффективна при проектировании системы охлаждения процессоров. Поэтому необходимо применение дополнительных мер по организации отведения тепловой энергии от него, в частности, использование тепловых трубок вместо медных прутков для передачи большего количества тепла.

При помощи ранее разработанной модели конструкции радиатора башенного типа с алюминиевыми ребрами, которые пронизаны тремя тепловыми трубками диаметром 6 мм без дополнительной системы принудительного охлаждения, установлено, что работа системы охлаждения в пассивном режиме может использоваться только при низких мощностях (около 20 Вт). Необходимо принудительное охлаждение для рассеивания большего количества тепла. По результатам моделирования построен график зависимости температуры теплоотвода от мощности процессора при пассивном охлаждении (рис. 4).

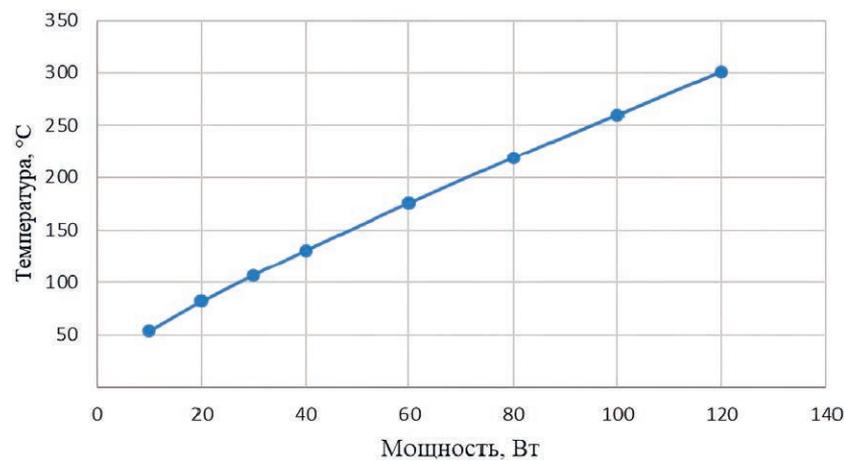


Рис. 4. Зависимость температуры теплоотвода от мощности процессора при пассивном охлаждении

Fig. 4. Temperature dependence of heat spreader on processor power with passive cooling

На основании результатов моделирования можно сделать вывод, что температура от поверхности процессора эффективно отводится и распределяется по всей поверхности башенного радиатора, а не концентрируется только в области теплоотвода (рис. 5).

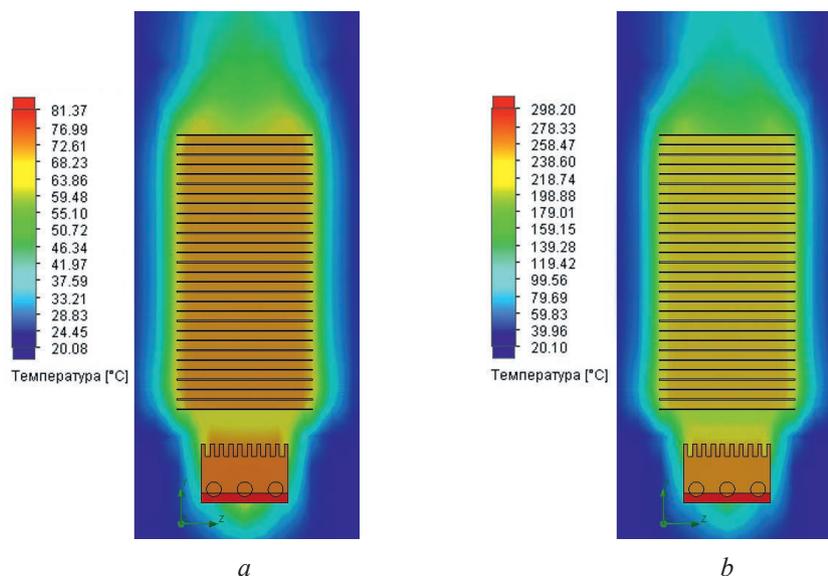


Рис. 5. Результаты моделирования охлаждения процессора мощностью 20 Вт (a) и 120 Вт (b) при помощи радиатора с тепловыми трубками без дополнительной системы вентиляции

Fig. 5. Results of the simulation of processor cooling with a power of 20 W (a) and 120 W (b) using a heatsink with heat pipes without an additional ventilation system

В частности, при моделировании радиатора с медными прутками без дополнительного обдува при мощности процессора 20 Вт теплоемник нагревался до 97,81 °С, а с использованием тепловых трубок – до 81,37 °С. В случае дополнительного обдува воздухом со скоростью 1,7 м/с (при мощности процессора 120 Вт) теплоемник нагревался до 234,30 °С, а при использовании тепловых трубок без дополнительного обдува – до 298,2 °С. Таким образом, использование только тепловых трубок в башенном радиаторе для охлаждения процессора при его мощности 20 Вт является эффективным, но нецелесообразным из-за больших массогабаритных размеров. При мощности процессора 120 Вт данный радиатор уже не справляется с поставленной задачей, поэтому необходимо дополнительно использовать вентилятор.

При помощи разработанной компьютерной модели башенного радиатора определена предельная скорость движения воздушного потока для эффективного отведения тепла от радиатора по сформированным межреберным тепловым каналам. Это позволяет установить зависимость влияния скорости движения газовой среды на эффективность рассеивания тепловой энергии с радиатора и выбрать вентилятор для лучшего отведения тепловой энергии. Согласно рис. 6, зависимость температуры теплоемника от скорости воздушного потока имеет логарифмический вид, и дальнейшее увеличение скорости не дает значительного снижения температуры. Также это подтверждается тем, что на практике в персональных компьютерах используются вентиляторы, создающие воздушный поток, скорость которого редко превышает 2 м/с, т. е. входят в зону почти линейного падения температуры. Это обусловлено тем, что уже при относительно невысокой скорости воздуха тепловое сопротивление между ребрами радиатора и средой уменьшается настолько, что снижать его дальше не целесообразно, а разность температур при этом составляет несколько градусов.

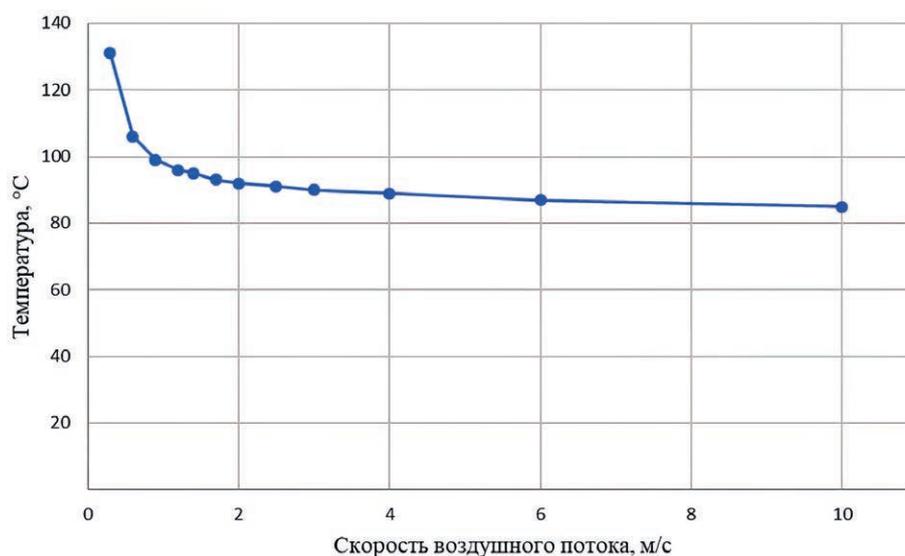


Рис. 6. Зависимость температуры теплоемника от скорости воздушного потока при мощности процессора 100 Вт
Fig. 6. Heat spreader temperature versus airflow rate at 100 W processor power

Согласно рис. 7, обдув вентилятором приводит к значительному снижению температуры радиатора, а именно: при мощности процессора 100 Вт температура процессора составляет 136,69 °С для скорости воздуха 0,3 м/с, 92,41 °С – для 1,7 м/с и 83,83 °С – для 10 м/с. Падение температуры на 31,34 °С происходит при изменении скорости воздуха на 1,4 м/с, и на 9,5 °С – при изменении скорости на 8,3 м/с.

По результатам экспериментов установлено, что наиболее эффективно использовать КВО, состоящие из радиаторов башенного типа с установленными тепловыми трубками и вентилятором для охлаждения процессоров. Определена предельная мощность рассеивания тепловой энергии от процессора при различных режимах его эксплуатации (от 20 до 100 Вт), полученная в результате моделирования радиатора в случае поэтапного увеличения скорости его обдува от 0 до 1,7 м/с (табл. 1).

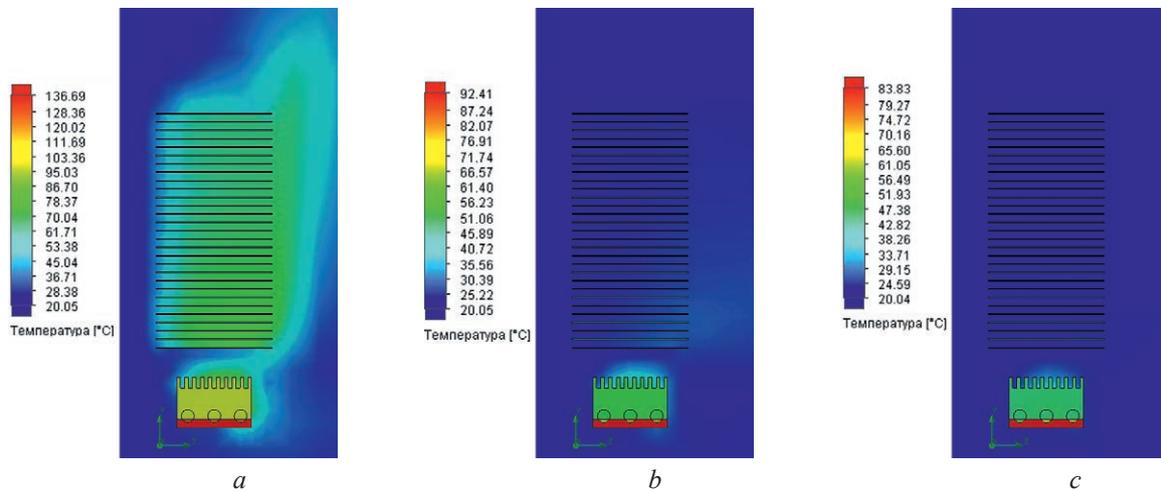


Рис. 7. Результаты моделирования охлаждения процессора при его постоянной мощности 100 Вт для скорости движения воздуха, м/с: *a* – 0,3; *b* – 1,7; *c* – 10

Fig. 7. Processor cooling simulation results at a constant power of 100 W for at air speeds, m/s: *a* – 0.3; *b* – 1.7; *c* – 10

Таблица 1. Результаты расчета температуры процессора при различных значениях скорости обдува радиатора и мощности процессора
Table 1. Results of calculating the processor temperature for various values of the heatsink blowing speed and processor power

Мощность, Вт / Power, W	Обдув, м/с / Airflow, m/s					
	0	0,3	0,6	0,9	1,3	1,7
Температура процессора, °C / Processor temperature, °C						
20	82	42	37	36	32	35
40	131	66	54	51	50	49
60	176	89	72	67	67	64
80	219	113	88	83	80	78
100	260	137	105	98	95	93

Исходя из результатов расчетов, можно сделать вывод, что наиболее эффективным кулером воздушного охлаждения будет башенный радиатор с тепловыми трубками и вентилятором, обдувающим процессор мощностью 60 Вт воздухом со скоростью от 1,3 м/с (рис. 8).

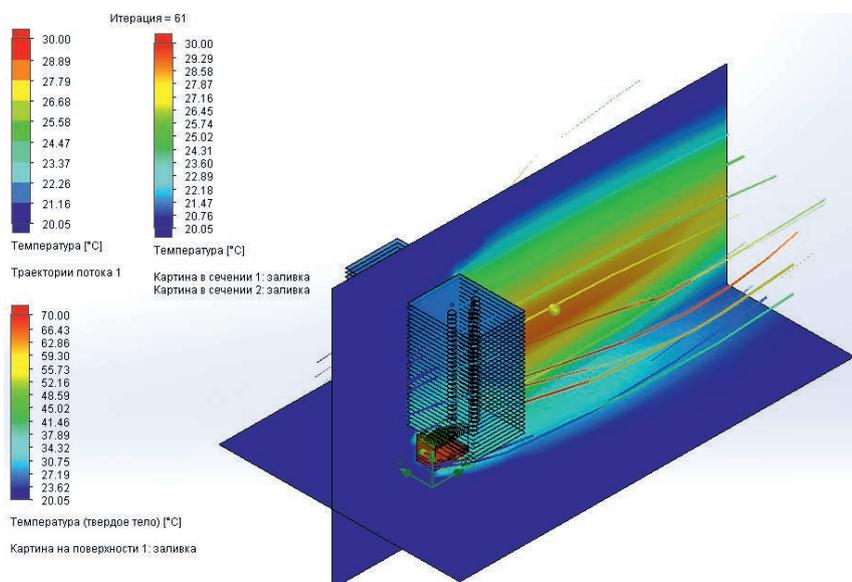


Рис. 8. Тепловая картина сформированной вентилятором воздушной массы, обдувающей со скоростью 1,3 м/с процессор мощностью 60 Вт

Fig. 8. Thermal image of air mass formed by a fan blowing at a speed of 1.3 m/s on a 60 W processor

С увеличением мощности процессор достигнет критической температуры 100 °С и перегреется, вследствие чего сбросит свою тактовую частоту, что негативно отразится на его производительности. Наличие максимальной мощности напрямую связано с наличием определенного значения теплового сопротивления «процессор – среда», которое обусловлено и характеризуется конструкцией КВО, скоростью воздушного потока, проходящего через ребра радиатора, а также качеством контакта между процессором и теплосъемной пластиной. Если скорость воздушного потока с легкостью достигает оптимальных значений, то задача уменьшения других тепловых сопротивлений является более сложной и чаще всего требует значительного повышения стоимости кулера.

Заключение

1. Разработаны три модели кулеров с воздушным охлаждением: первая – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде медных прутков, вторая – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде тепловых трубок, третья – башенный радиатор с несущей конструкцией в виде тепловых трубок и вентилятором процессоров. Проведены эксперименты по определению эффективности отвода тепловой энергии от процессора при помощи вышеприведенных моделей, а также по определению необходимой скорости движения воздуха.

2. На основании исследований установлено, что наиболее эффективным способом охлаждения современных теплонагруженных элементов является использование башенных радиаторов с тепловыми трубками и вентилятором, осуществляющим обдув воздухом со скоростью не более 2 м/с.

Список литературы

1. Основы силовой электроники / А. И. Белоус [и др.]. М.: Техносфера, 2019. 424 с.
2. The Impact of ESD on Microcontrollers / G. A. Piskun [et al.]. Minsk: Kolorgrad, 2018. 184 p.
3. Remsburg, R. *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment* / R. Remsburg. NY: Springer New York, 1998. 589 p.
4. DeepCool. GAMMAXX 300 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.deepcool.com/products/Cooling/cpuaircoolers/2021/12125.shtml>. Дата доступа: 16.01.2023.
5. 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.
6. 3Dnews. Обзор процессора AMD Ryzen™ 7 5800X [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://3dnews.ru/1026573/obzor-amd-ryzen-7-5800x>. Дата доступа: 17.01.2023.
7. TehTab.ru. Коэффициент теплопроводности тепловых трубок [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/TableOfOverallCoefficientsForHeatExchangers>. Дата доступа: 17.01.2023.
8. Thermalinfo.ru. Теплопроводность термопаст, сравнение термопаст по теплопроводности и вязкости [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnenie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti>. Дата доступа: 17.01.2023.

References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Efimenko S. A., Pilipenko V. A. (2019) *Power Electronics Basics*. Moscow, Technosphere Publ. 424 (in Russian).
2. Piskun G. A., Alexeev V. F., Avakow S. M., Matyushkov V. E., Titko D. S. (2018) *The Impact of ESD on Microcontrollers*. Minsk, Kolorgrad Publ. 184.
3. Remsburg R. (1998) *Advanced Thermal Design of Electronic Equipment*. NY, Springer New York Publ. 589.
4. DeepCool. GAMMAXX 300. Available: <https://ru.deepcool.com/products/Cooling/cpuaircoolers/2021/12125.shtml> (Accessed 16 January 2023).
5. AMD. AMD Ryzen™ 7 5800X. Available: <https://www.amd.com/en/products/cpu/amd-ryzen-7-5800x> (Accessed 17 January 2023).
6. 3Dnews. AMD Ryzen™ 7 5800X Review. Available: <https://3dnews.ru/1026573/obzor-amd-ryzen-7-5800x>. (Accessed 17 January 2023).
7. TehTab.ru. Heat Pipes Heat Transfer Coefficient. Available: <https://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/ConvectionHeatTransfer1/TableOfOverallCoefficientsForHeatExchangers> (Accessed 17 January 2023).

8. *Thermalinfo.ru. Thermal Paste Heat Transfer Coefficient, Thermal Pastes Comparison by Thermal Transfer Coefficient and Viscosity.* Available: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/materialy-raznye/teploprovodnost-termopast-sravnienie-termopast-po-teploprovodnosti-i-vyazkosti> (Accessed 17 January 2023).

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в написание статьи.

Authors' contribution

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 of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Rybakov D. G., Student of 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