

УДК 004.942

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗДУШНЫХ СИСТЕМ  
ОХЛАЖДЕНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ****Дорофеев Дмитрий Вячеславович,**

инженер-электронщик кафедры Электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, e-mail: watson213@yandex.ru

**Кострин Дмитрий Константинович,**

д.т.н., профессор кафедры Электронных приборов и устройств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», Санкт-Петербург, e-mail: dkkostrin@mail.ru

**Аннотация**

Одним из основных решений проблемы перегрева электронных компонентов является использование систем активного и пассивного охлаждения. Правильный выбор и проектирование таких устройств требует понимания тепловых процессов и анализа распределения температуры и воздушного потока. В работе рассматривается моделирование работы систем охлаждения электронных компонентов в программном комплексе SolidWorks с модулем Flow Simulation, позволяющим провести детальный тепловой анализ. Результаты компьютерного моделирования выявили несколько слабых мест в конструкции системы, которые ограничивают ее эффективность. Для повышения производительности системы охлаждения и улучшения теплоотвода целесообразно рассмотреть ряд инженерных улучшений, основанных на анализе полученных карт температурных полей, скоростей и траекторий воздушных потоков.

**Ключевые слова:** перегрев, система охлаждения, компьютерное моделирование, распределение температуры, воздушный поток.

**COMPUTER SIMULATION OF AIR COOLING SYSTEMS FOR ELECTRONIC  
COMPONENTS****Dorofeev Dmitri Vyacheslavovich,**

Electronics Engineer, Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, e-mail: watson213@yandex.ru

**Kostrin Dmitri Konstantinovich,**

D.Sc. (Eng.), Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices, Saint Petersburg State Electrotechnical University "LETI", Saint Petersburg, e-mail: dkkostrin@mail.ru

ABSTRACT

One of the main solutions to the problem of overheating of electronic components is the use of active and passive cooling systems. The correct choice and design of such devices requires an understanding of thermal processes and an analysis of temperature distribution and airflow. The paper considers modeling the operation of electronic component cooling systems in the SolidWorks software package with the Flow Simulation module, which allows detailed thermal analysis. The results of computer modeling revealed several weaknesses in the system design that limit its effectiveness. To improve the performance of the cooling system and increase the heat sink, it is advisable to consider a number of engineering improvements based on the analysis of the obtained maps of temperature fields, velocities and trajectories of air flows.

---

**Keywords:** overheating, cooling system, computer simulation, temperature distribution, air flow.

---

### Введение

Современные электронные устройства характеризуются плотным размещением компонентов и высокой суммарной мощностью, что приводит к значительному тепловыделению в процессе их работы [1, 2]. Перегрев электронных компонентов может вызвать снижение их производительности, уменьшение срока службы или даже полный выход из строя [3]. Поэтому обеспечение эффективного теплоотвода является одной из ключевых задач при проектировании электронной аппаратуры [4–6].

Одним из решений данной проблемы является использование систем активного и пассивного охлаждения, таких как радиаторы, вентиляторы, тепловые трубки и другие конструктивные элементы [7, 8]. Правильный выбор и проектирование таких устройств требует понимания тепловых процессов и анализа распределения температуры и воздушного потока.

В связи с этим возрастает значение методов компьютерного моделирования, позволяющих проводить виртуальные эксперименты, оптимизировать геометрию охлаждающих элементов и предсказывать поведение системы при различных условиях эксплуатации. Одной из наиболее эффективных и универсальных платформ для данных целей является система автоматизированного проектирования SolidWorks, в частности модуль Flow Simulation, который предоставляет средства для трехмерного моделирования теплообмена и движения воздуха [9].

### Цель исследования

В данной работе рассматривается моделирование работы воздушных систем охлаждения электронных компонентов в среде SolidWorks. В ходе исследования будут рассмотрены особенности конструкции таких систем, проведен анализ распределения температуры и воздушного потока, а также выполнена оптимизация параметров системы охлаждения для достижения наилучших теплотехнических характеристик.

### Материалы и методы исследования

По данным Института инженеров электротехники и электроники около 55 % отказов электронных устройств связано с тепловыми перегрузками, что подчеркивает критическую важность применения охлаждающих систем. Основная задача систем охлаждения заключается в поддержании теплового баланса: количество тепла, выделяемого в процессе работы компонентов, должно быть отведено в окружающую среду таким образом, чтобы температура устройств оставалась в пределах, установленных производителем. Теплообмен осуществляется за счет трех основных физических процессов: теплопроводности, конвекции и теплового излучения. Системы охлаждения подразделяются по способу отвода

тепла на пассивные и активные, а по типу теплоносителя на воздушные, жидкостные, иммерсионные и термоэлектрические [4, 7].

Программный комплекс SolidWorks с модулем Flow Simulation позволяет на этапе проектирования провести детальный тепловой анализ систем охлаждения. В рамках моделирования строится трехмерная геометрия охлаждающей системы, задаются ее физические параметры, такие как свойства материалов, тепловые нагрузки, скорости потоков, условия окружающей среды, решаются задачи теплообмена методом конечных объемов. Результаты визуализируются в виде тепловых карт, графиков распределения скоростей и температурных полей, что позволяет выявить узкие места конструкции и оптимизировать ее форму и конфигурацию. Компьютерное моделирование позволяет значительно сократить время разработки, снизить затраты на создание прототипов и провести серию виртуальных испытаний до изготовления изделий.

В данной работе в качестве объекта для исследования выбрана широко распространенная система активного воздушного охлаждения центрального процессора, которая состоит из несколько ключевых элементов: теплосъемной площадки, тепловых трубок, радиатора и вентилятора с крыльчаткой, создающего поток воздуха через ребра радиатора и обеспечивающего эффективный отвод тепла [10].

#### Результаты и их обсуждение

Для анализа работы системы охлаждения была создана трехмерная модель, включающая: радиатор, выполненный в виде набора алюминиевых ребер, вентилятор диаметром 92 мм с семью лопастями стандартной формы, основание и элементы крепления (рис. 1). При создании модели были заданы материалы (алюминий для радиатора, пластик для крыльчатки вентилятора), а также тепловая нагрузка, соответствующая тепловыделению центрального процессора. В качестве граничных условий задавалась скорость вращения вентилятора (600 об/мин) и температура окружающей среды (25 °С).

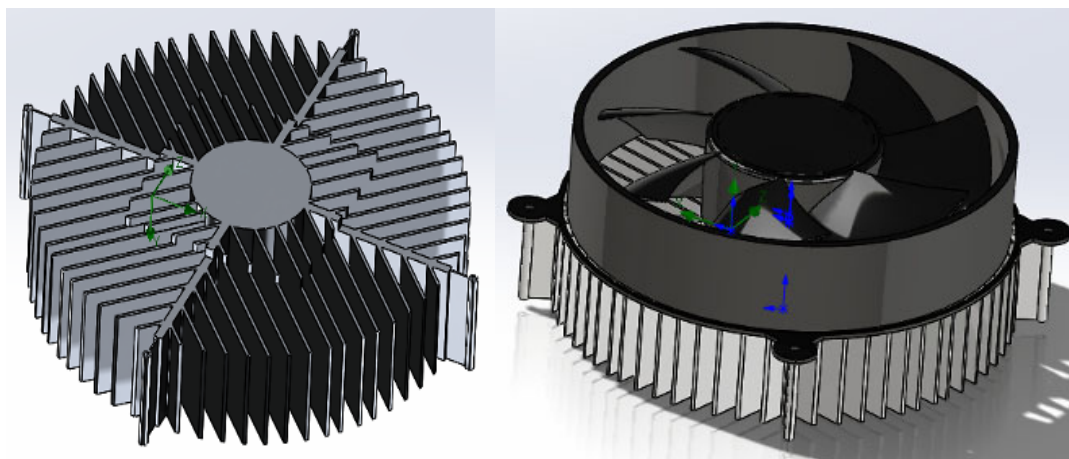


Рис. 1. Трехмерная компьютерная модель вентилятора (разработано авторами в среде SolidWorks)

При проектировании учитывались реальные размеры компонентов, характерные для типичных систем охлаждения центральных процессоров. Для повышения точности моделирования была произведена детализация геометрии лопастей вентилятора и ребер радиатора.

При проведении моделирования особое внимание необходимо уделить распределению воздушного потока и направлению движения воздуха, что критически влияет на эффективность охлаждения. Рассмотрим работу вентилятора системы охлаждения в диапазоне 600–2000 об./мин. Изменение скорости вращения вентилятора

позволяет оценить, насколько эффективно система охлаждения справляется с отводом тепла в разных режимах нагрузки (рис. 2). При низких оборотах вентилятора основной теплоотвод осуществляется за счет естественной и частично принудительной конвекции, тогда как при повышении оборотов увеличивается объем прокачиваемого воздуха и, соответственно, эффективность охлаждения.

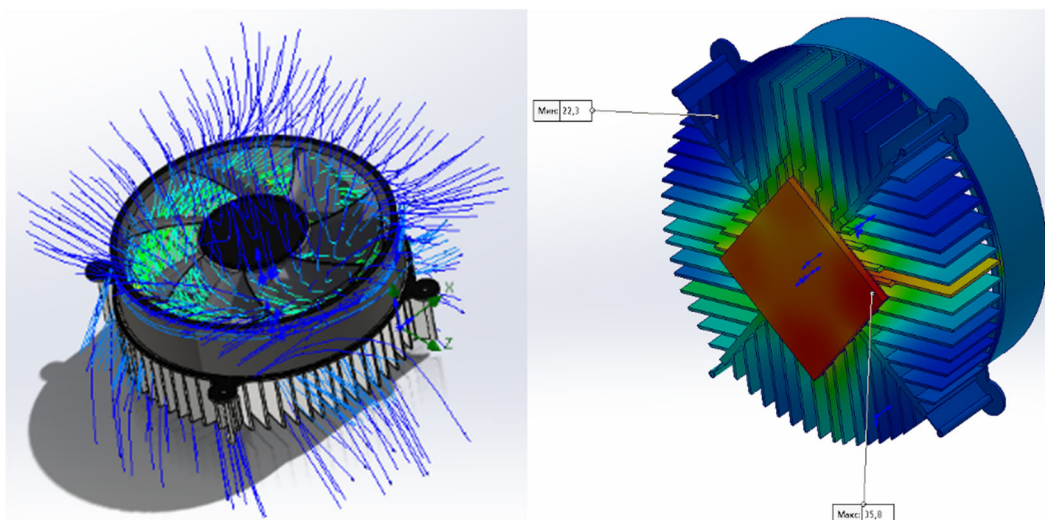


Рис. 2. Воздушный поток через радиатор (слева) и распределение температуры по процессору и радиатору (справа) (получено авторами в среде SolidWorks)

Анализ карт полей скоростей и траекторий потоков, полученных с применением модуля Flow Simulation пакета SolidWorks, показывает, что воздушный поток состоит из основного потока, проходящего сквозь ребра радиатора, зон с рециркуляцией (вблизи основания радиатора и на краях радиатора), где поток теряет скорость, что снижает эффективность охлаждения, турбулентных областей, возникающих из-за формы крыльчатки, углов ребер и геометрических особенностей конструкции.

Равномерность распределения потока по поверхности радиатора напрямую влияет на эффективность теплоотвода. Наличие застойных зон и недостаточная скорость потока в отдельных участках радиатора приводит к локальным перегревам и снижению эффективности всей системы. На рис. 3 приведена зависимость температуры от скорости вентилятора, по ним можно сделать ожидаемый вывод о том, что при увеличении количества оборотов вентилятора, увеличивается продув радиатора и уменьшается температура центрального процессора. Однако при высоких оборотах вентилятора увеличиваются шумы, что является достаточно неблагоприятным фактором. Проведение подобного анализа позволяет определить оптимальный режим работы вентилятора, при котором достигается баланс между уровнем шума и тепловой производительностью системы.

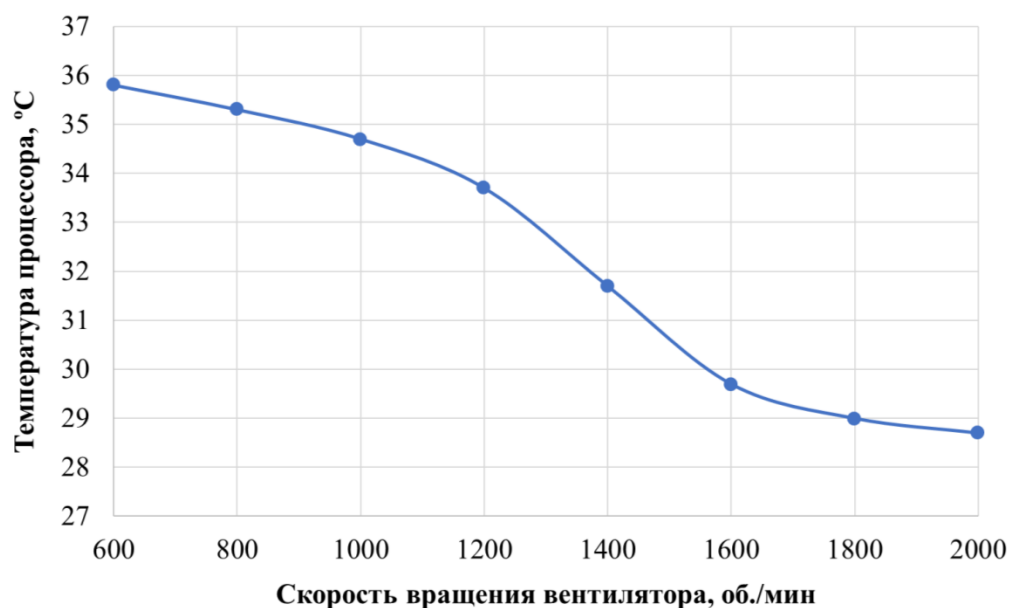


Рис. 3. Зависимость температуры центрального процессора от скорости вращения вентилятора системы охлаждения (составлено авторами в программе Excel по результатам моделирования в среде SolidWorks)

Важной характеристикой вентилятора является создаваемый им воздушный поток, т. е. показатель количества воздуха, которое вентилятор способен прокачать за определенное время. Обычно мощность воздушного потока достигается благодаря крыльчатке с большим количеством лопастей особой формы. Они должны быть узкими и частыми, что позволяет создавать направленные и узкие потоки. Еще одним важным показателем является создаваемое вентилятором статическое давление, т. е. показатель напора воздуха, который может создать вентилятор. Чем он выше, тем лучше вентилятор справляется с продувкой в условиях высокого сопротивления, например, при прокачке воздуха через радиатор. При проведении расчетов было получено значение статического давления около 7 Па, что является невысоким показателем. Качественные вентиляторы способны создавать давление в диапазоне от 12 до 30 Па.

Рассмотрим влияние материала радиатора на охлаждение, для чего изменим параметра материала с алюминия на медь. При проведении моделирования получено снижение температуры на величину, достигающую в 4 °C. При этом применение меди вместо алюминия не всегда целесообразно из-за большего веса и стоимости первой. Также изготовление радиаторов из меди сложнее и, как следствие, дороже. Алюминиевые радиаторы можно легко получить за счет экструзии или придать им сложную форму, в то время как применение меди может потребовать намного более сложных производственных процессов.

В рамках данной работы также были проведены эксперименты по измерению температуры центрального процессора при различных конфигурациях системы охлаждения. Целью эксперимента является оценка влияния отдельных элементов охлаждающей системы (радиатора, вентилятора, термопасты) на эффективность теплоотвода от центрального процессора. Измерения проводились на рабочем стенде, состоящем из материнской платы с установленным процессором, стандартного вентилятора и средств мониторинга температуры [11].

Эксперимент выполнялся в несколько этапов, каждый из которых включал внесение изменений в конструкцию системы охлаждения и последующее измерение температуры процессора в стабильном состоянии при одинаковых условиях окружающей среды (температура помещения 22 °C, отсутствие сквозняков и дополнительных источников

тепла). Для некоторых конфигураций системы охлаждения были получены следующие значения температуры центрального процессора:

- без радиатора, вентилятора и термопасты – 91 °С;
- с радиатором, без вентилятора и термопасты – 55 °С;
- с радиатором и вентилятором, без термопасты – 47 °С;
- с радиатором, вентилятором и термопастой – 36 °С.

Полученные данные хорошо коррелируют с полученными в результате моделирования значениями, а также подтверждают, что каждый из компонентов системы охлаждения (радиатор, вентилятор, термопаста) вносит существенный вклад в снижение температуры процессора. Особенно важным является применение термопасты, которая обеспечивает минимальное тепловое сопротивление на границе процессор–радиатор [12, 13].

Результаты компьютерного моделирования работы системы охлаждения выявили несколько слабых мест в ее конструкции, которые ограничивают эффективность. Для повышения производительности системы охлаждения и улучшения теплоотвода целесообразно рассмотреть ряд инженерных улучшений, основанных на анализе полученных карт температурных полей, скоростей и траекторий потоков воздуха:

- увеличение площади теплоотдачи радиатора, что может быть достигнуто путем увеличения количества ребер за счет уменьшения их толщины, увеличения высоты радиатора, а также использования многосекционной конструкции радиатора;

- оптимизация геометрии крыльчатки вентилятора, что может быть достигнуто путем увеличения количества лопастей вентилятора, изменения угла атаки лопастей для увеличения давления и скорости потока, использования лопастей с аэродинамическим профилем, который уменьшает сопротивление воздуха и повышает эффективность создания потока, добавления концентрирующего кольца вокруг лопастей для уменьшения утечки воздуха и направления потока строго через ребра радиатора;

- увеличение диаметра вентилятора, что может позволить увеличить объем прокачиваемого воздуха, снизить уровень шума за счет снижения скорости вращения при сохранении мощности воздушного потока, обеспечить более равномерное распределение воздушного потока по всей поверхности радиатора;

- добавление тепловых трубок, работающих на принципе фазового перехода жидкости внутри трубки, что обеспечивает быстрый перенос тепла от основания к ребрам радиатора;

- повышение качества теплового интерфейса, что может быть достигнуто путем использования высококачественной термопасты с высокой теплопроводностью, улучшения обработки поверхности основания радиатора (шлифовка, полировка) для уменьшения теплового сопротивления на границе контакта, применения медной пластины в основании радиатора вместо алюминия для повышения теплопроводности.

#### Заключение

В ходе проведения исследований была построена трехмерная модель воздушной системы охлаждения электронных компонентов, включающая радиатор, вентилятор и тепловую нагрузку, соответствующую реальным условиям эксплуатации центрального процессора. Проведен анализ формирования воздушных потоков, распределения температурных полей и выявлены особенности работы устройства в заданных режимах. Результаты компьютерного моделирования позволили визуализировать характер движения потоков воздуха, выявить зоны рециркуляции, области с низкими скоростями потока и локальные зоны перегрева.

Важным этапом работы стало сравнение результатов моделирования с измерениями температуры центрального процессора, полученными на лабораторном стенде. В процессе анализа установлено, что значения температур, рассчитанных в среде моделирования, отличаются от измеренных значений, что объясняется рядом факторов:

– моделирование предполагает упрощенные условия, где отсутствуют пылевые загрязнения, старение термопасты, колебания скорости вращения вентилятора и тепловое влияние соседних компонентов;

– измерения температуры с помощью датчиков отражают реальные эксплуатационные условия, включая влияние внешней среды, характеристики системы питания и наличие разнообразных шумов.

Таким образом, различия в результатах моделирования и реальных измерений являются следствием идеализации расчетной модели и отсутствия ряда внешних факторов, которые невозможно точно учесть в симуляции. Несмотря на это, моделирование позволяет получить качественное представление о распределении температурных полей и потоков воздуха, что особенно полезно на этапе проектирования систем охлаждения. Эти данные позволяют повысить надежность работы электронных компонентов, минимизировать риски перегрева и обеспечить более стабильную работу электронных систем.

#### Список литературы:

1. Ellison G.N. Thermal computations for electronics. Conductive, radiative, and convective air cooling. New York: CRC Press, 2020. 404 p.
2. Гончаров М., Дворников В. Моделирование тепловых режимов работы аппаратуры силовой электроники в среде SolidWorks Flow Simulation // Силовая электроника. 2010. № 25. С. 98–100.
3. Мадера А.Г. Тепловые процессы в электронных системах в условиях влияния эффекта тепловой обратной связи // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10, № 3-4. С. 144–151.
4. Системы охлаждения и термостатирования / А.В. Шарков, В.А. Кораблев, В.В. Герасютенко, Ю.П. Заричняк. СПб.: Изд-во Университета ИТМО, 2021. 89 с.
5. Компьютерные технологии в разработке электронных приборов и устройств / В.А. Герасимов, Д.К. Кострин, Л.М. Селиванов, А.А. Ухов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 164 с.
6. Алексеев В.Ф., Пискун Г.А., Лихачевский Д.В. Моделирование тепловых полей электронных систем в среде Ansys // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-3. С. 282–286.
7. Мадера А.Г. Моделирование сложных тепловых процессов в электронных системах методом обобщенного псевдорешения // Тепловые процессы в технике. 2019. Т. 11, № 8. С. 355–364.
8. Влияние печатных проводников на тепловой режим радиоэлектронных приборов / С.Ю. Сотникова, Н.А. Кононова, Л.Б. Ландер и др. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 10. С. 712–724.
9. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д., Шемелова О.В. Моделирование процессов гидродинамики и теплообмена в каналах сложной конфигурации с помощью программного модуля SolidWorks Flow Simulation // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17, № 14. С. 199–201.

10. Тепловая модель радиаторов модулей электропитания электронных средств / А.Н. Семенов, Ю.Н. Кофанов, А.С. Роткевич, С.У. Увайсов // Качество. Инновации. Образование. 2015. № 12. С. 44-51.
11. Разработка электронного устройства для мониторинга физических параметров специализированных грузов при их транспортировке / А.А. Ухов, Д.К. Кострин, В.А. Герасимов и др. // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 3. С. 44-54.
12. Кондратенко В.С., Кадомкин В.В., Третьякова О.Н. Моделирование тепловых процессов в контактных зонах тепловыделяющих элементов // Прикладная физика. 2021. № 6. С. 83-92.
13. Анализ эффективности теплоотвода в тепловыделяющих устройствах при использовании различных термоинтерфейсов / С.А. Кудж, В.С. Кондратенко, В.В. Кадомкин, А.А. Высоканов // Известия высших учебных заведений. Электроника. 2020. Т. 25, № 4. С. 347-357.

### References:

1. Ellison G.N. Thermal computations for electronics. Conductive, radiative, and convective air cooling. New York: CRC Press, 2020. 404 p.
2. Goncharov M., Dvornikov V. Modeling of thermal modes of operation of power electronics equipment in the SolidWorks Flow Simulation environment // Power Electronics. 2010. № 25. P. 98-100.
3. Madera A.G. Thermal processes in electronic systems under the influence of the thermal feedback effect // Thermal Processes in Engineering. 2018. Vol. 10, № 3-4. P. 144-151.
4. Cooling and thermostating systems / A.V. Sharkov, V.A. Korablev, V.V. Gerasiyutenko, Yu.P. Zarichnyak. St. Petersburg: ITMO University Publishing House, 2021. 89 p.
5. Computer technologies in the development of electronic instruments and devices / V.A. Gerasimov, D.K. Kostrin, L.M. Selivanov, A.A. Ukhov. St. Petersburg: Publishing House of SPbETU "LETI", 2015. 164 p.
6. Alekseev V.F., Piskun G.A., Likhachevsky D.V. Modeling of thermal fields of electronic systems in the Ansys environment // Big Data and Advanced Analytics. 2020. № 6-3. P. 282-286.
7. Madera A.G. Modeling of complex thermal processes in electronic systems by generalized pseudo-solution method // Thermal Processes in Engineering. 2019. Vol. 11, № 8. P. 355-364.
8. The influence of printed conductors on the thermal regime of radioelectronic devices / S.Y. Sotnikova, N.A. Kononova, L.B. Lander et al. // Journal of Instrument Engineering. 2022. Vol. 65, № 10. P. 712-724.
9. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D., Shemelova O.V. Modeling of hydrodynamics and heat transfer processes in channels of complex configuration using the SolidWorks Flow Simulation software module // Bulletin of Kazan Technological University. 2014. Vol. 17, № 14. P. 199-201.
10. Thermal model of radiators for electronic power supply modules / A.N. Semenenko, Yu.N. Kofanov, A.S. Rotkevich, S.U. Uvaisov // Quality. Innovation. Education. 2015. № 12. P. 44-51.

11. Development of an electronic device for monitoring the physical parameters of specialized cargoes during their transportation / A.A. Ukhov, D.K. Kostrin, V.A. Gerasimov et al. // LETI Transactions on Electrical Engineering and Computer Science 2025. Vol. 18, № 3. P. 44-54.
12. Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Tretyakova O.N. Modeling of thermal processes in the contact zones of fuel elements // Applied Physics. 2021. № 6. P. 83-92.
13. Kudzh S.A., Kondratenko V.S., Kadomkin V.V., Vysokanov A.A. Analysis of the efficiency of heat sink in heat-generating devices when using various thermal interfaces // Proceedings of Universities. Electronics. 2020. Vol. 25, № 4. P. 347-357..