

## Сравнительный анализ тепловых режимов электронного блока управления бортовой кислородной системы с высокоэффективным теплоотводом

*А.С. Кобзева<sup>1</sup>, А.С. Шалимов<sup>1</sup>, Ю.В. Маслов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный исследовательский университет «МИЭТ», Зеленоград, Москва

<sup>2</sup>АО «НИИ «Субмикрон», Зеленоград, Москва

**Аннотация:** В работе проводится анализ теплового режима высокофункционального бортового блока управления в корпусе из алюминиевого сплава АМгб и сравнение полученных данных с тепловым режимом блока с высокоэффективным теплоотводом из композитных материалов. Был проведен расчёт теплового поля блока средствами САПР, основанного на методе конечных элементов с тепловым приложением, с целью оценки его работоспособности при заданных граничных условиях. На основании сравнительного анализа различных теплоотводящих материалов базовой несущей конструкции была выбрана наименее теплонапряженная система.

**Ключевые слова:** тепловой режим, высокоэффективный теплоотвод, композитные материалы, бортовая аппаратура, кислородная система, метод конечных элементов, математическая модель, система автоматизированного проектирования, электрорадиоизделие, печатная плата.

### Введение

Современные тенденции повышения быстродействия и микроминиатюризации электронных средств увеличивают удельную тепловую нагрузку и усложняют проблему теплового конструирования, что приводит к необходимости внедрения в конструкцию новых высокотеплопроводных легких материалов.

Высокие температурные показатели могут привести к перегреву функциональной части устройства, что может сказаться на стабильности работы бортовой аппаратуры, так и на состоянии электрорадиоизделий (ЭРИ). Поэтому эффективный теплоотвод позволяет охладить электронные компоненты и системы, обеспечивая их надежную работу и безопасность полета [1].

Обеспечение эффективного теплоотвода напрямую зависит от материалов корпуса устройства. С этим уклоном для выбора наиболее подходящих и перспективных материалов с целью проектирования корпуса блока были взяты на рассмотрение данные механических характеристик основной группы конструкционных материалов, в частности, алюминиевый сплав АМГ6, а также композитный материал AlSiC в различных модификациях, используемых для корпусирования аппаратуры [2]. У титана, анодированного алюминия, магния МА2 и CFRP композитов значения теплопроводности отличаются на порядок от остальных материалов в худшую сторону, поэтому их необходимо исключить [3].

В сравнении остались сплав алюминия - АМГ6 и композиционный материал на основе алюминиевого сплава, армированного частицами карбида кремния - AlSiC. Данный материал сочетает в себе высокую теплопроводность и низкую плотность, что делает его предпочтительным материалом для применения в области аэро- и космической индустрии. В то время как алюминиевые сплавы, в частности АМГ6, также характеризуются низкой плотностью, они не сравнимы с AlSiC по теплопроводности. Это делает AlSiC более предпочтительным выбором для применения в высокотемпературных или электрически нагруженных приложениях, таких как бортовые аппараты в спутниках и космических кораблях.

Основными требованиями объекта разработки, содержащимися в техническом задании (ТЗ), являются обеспечение надёжности и устойчивости к внешним воздействующим факторам, при этом масса блока с электрическими соединителями должна быть не более 2,3 кг, а потребляемая мощность блока не должна превышать 15 Вт.

Условия эксплуатации блока и климатические условия характеризуются следующими параметрами, представленными в таб.1.

Таб.1. Основные внешние воздействующие факторы.

№	Внешний воздействующий фактор (ВВФ)	Характеристика внешнего воздействующего фактора	Максимальное значение (диапазон) ВВФ
1	Синусоидальная вибрация	Амплитуда ускорения, $\text{м/с}^2$ (g)	49,1 (5,0)
		Амплитуда перемещения, мм	2,5
		Диапазон частот, Гц	5-2000
2	Механический удар многократного действия	Пиковое ударное ускорение, $\text{м/с}$ (g)	58,8 (6,0)
		Длительность действия ударного ускорения, мс	20
		Число ударов	7000
3	Изменение атмосферного давления	Диапазон изменения давления, кПа (мм рт. ст.)	75,6 - 7,50 (567,3 - 56,3)
		Время изменения, с	0,5
4	Изменение температуры среды	Диапазон изменения температуры, °С	от минус 65 до 70

По своей сути электронный блок управления кислородной системы самолёта - это устройство, позволяющее управлять работой кислородно-дыхательной аппаратуры и диагностировать её работоспособность, посредством приёма сигнала текущего значения парциального давления кислорода в дыхательной газовой смеси (рис. 1).

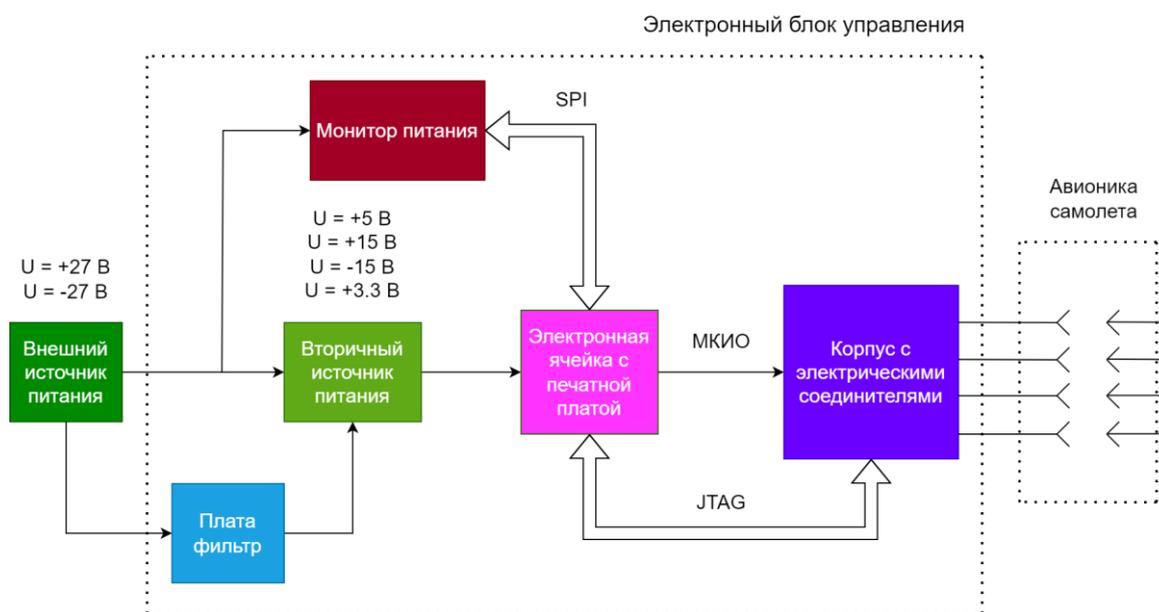


Рис. 1. – Блок-схема электронного блока управления бортовой кислородной системы с высокоэффективным теплоотводом

Работа электронного блока управления осуществляется посредством подачи напряжения с внешнего источника питания. В дальнейшем питание поступает на плату фильтра, устраняя наводящиеся шумы и пульсации и стабилизируя питающее напряжение, а также вторичный источник питания, преобразующий напряжение в необходимое по параметрам состояние для функционирования ячейки. Ячейка электронного блока обеспечивает взаимодействие летательного аппарата с бортовой авионикой по интерфейсам мультиплексного канала информационного обмена (МКИО).

Питание вторичного источника питания осуществляет от первичной сети напряжением постоянного тока 27 В с допустимым в диапазоне от 18 до 33 В. Здесь существует возможность контроля величины напряжения посредством снятия показаний с цепи питания и передачи показаний через интерфейс SPI, посредством использования схемы монитора питания.

Конструкция разрабатываемого блока управления (рис. 2) представляет собой металлический корпус с расположенной в нём ячейкой и платой фильтра питания, соединяемых с внешними разъёмами.

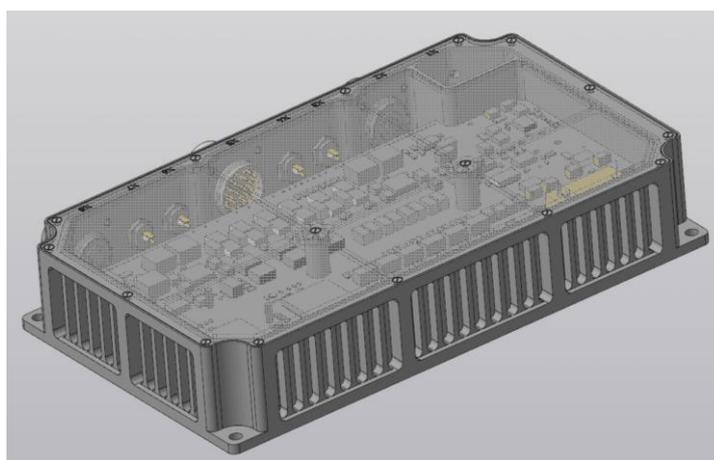


Рис. 2. - Трёхмерная модель блока

Проблематика теплоотвода в бортовой аппаратуре самолета заключается в том, что при работе электронных систем происходит выделение значительного количества тепла, которое нужно эффективно отводить, чтобы избежать перегрева и выхода из строя оборудования [4].

Следовательно, для предотвращения перегрева аппаратуры следует продумать наиболее эффективный теплоотвод, который бы позволил охлаждать электронные компоненты, обеспечивая их стабильное функционирование во время полета.

С помощью инструментов конечно-элементного анализа, основанных на методе конечных элементов (МКЭ), можно проводить сложные исследования в области прикладной физики, направленные на получение научно-обоснованных решений, которые помогут создавать модели теплофизических процессов [5].

Для проведения моделирования свойств объекта исследования была разработана его математическая модель (ММ), позволяющая проанализировать и предсказать поведение реальной системы при различных условиях эксплуатации.

Проведение теплового расчёта происходило с помощью системы автоматизированного проектирования (САПР), основанной на методе конечных элементов с тепловым приложением. Данная программа позволяет решать задачи электростатики и стационарной теплопроводности, посредством численного решения уравнения Лапласа в однородном случае (при отсутствии источника тепла или зарядов) или уравнение Пуассона в случае наличия источника тепла или заряда [6,7].

Цель исследования теплового режима состояла в определении температуры воздуха в блоке и температуры поверхности каждого элемента. Ставилась задача нахождения количественной зависимости температур элементов от мощности, выделяемой в каждом элементе, размеров блока и размещения элементов в блоке.

Главным методом обеспечения нужного теплового режима является достижение теплового динамического равновесия, при котором выделяемая энергия в электронном блоке равна количеству рассеиваемой теплоты [8].

---

При построении тепловой модели рассматривался установившийся тепловой режим, при этом металлическая рама корпуса считалась изотермичной, а температура каждого электронного компонента была одинаковой внутри всего корпуса. Считалось, что для платы электронного блока тепловая мощность была равномерно распределена, причем контакт механической рамы с платой имел состояние, приближенное к идеальному. Конвекция и излучение внутри и снаружи блока не рассматривалась.

При создании тепловой модели был использован установившийся тепловой режим. Металлическая рама корпуса считалась изотермической, а температура каждого электронного устройства была одинаковой внутри корпуса. Тепловая мощность на плате была равномерно распределена, а контакт между рамой и платой считался идеальным.

Материалы, составляющий конструкцию и их теплофизические характеристики, использовавшиеся при построении тепловой модели блока:

- а) АМг6, обладающего теплопроводностью  $\lambda_{\text{АМг6}} = 122 \text{ Вт/мК}$ .
- б) АlSiС, обладающего теплопроводностью  $\lambda_{\text{АlSiС}} = 180 \text{ Вт/мК}$ .
- в) стеклотекстолит (печатные платы)  $\lambda_{\text{ст}} = 0,4 \text{ Вт/мК}$ .

В рамках теплового моделирования конструкция ПП может быть представлена в качестве однородного материала с анизотропной теплопроводностью, где значение коэффициента теплопроводности отличается по отношению к ПП [9].

Так были определены параметры плат устройства электронного блока:

1) Плата управления электронным блоком: многослойная (6 слоев), изготовленная на основе стеклотекстолита, фольгированного с двух сторон медью, и стеклоткани. Общая толщина платы составила:  $\delta = 1,9 \text{ мм}$ .

2) Плата фильтра имеет многослойную структуру: многослойная (4 слоя), изготовленная на основе стеклотекстолита, фольгированного с двух сторон медью, и стеклоткани. Общая толщина платы составила:  $\delta = 1,6 \text{ мм}$ .

---

Медь имеет высокий показатель теплопроводности, при этом толщина слоя меди невелика ( $\delta$  меди = 35 мкм). Отсюда, беря в расчет, что моделирование теплопроводности платы проводится в направлении, перпендикулярном слоям, использовалась теплопроводность материала стеклотекстолита.

Теплопроводность платы в направлении вдоль слоев была вычислена с учетом количества слоев стеклотекстолита  $n$  по формуле (1):

$$\lambda = \frac{\lambda_{\text{меди}} 2n\delta_{\text{меди}} + \lambda_{\text{ст}}(\delta_{\text{платы}} - 2n\delta_{\text{меди}})}{\delta_{\text{платы}}}, \quad (1)$$

где  $\lambda_{\text{меди}} = 400$  Вт/мК.

В результате, теплопроводность 6-и слойной платы управления поперек слоев составила - 29,8 Вт/мК, а теплопроводность 4-х слойной платы фильтра поперек слоев составила - 35,3 Вт/мК.

В ходе моделирования на стадии препроцессорной подготовки были заданы основные константы, типы элементов, свойства материалов, зависящие от температуры: модуль нормальной упругости (модуль Юнга), коэффициент Пуассона, коэффициент температурного расширения, показатели плотности, теплопроводности и удельной теплоемкости.

Основой теплового анализа являются уравнения теплового баланса, которые составлены в соответствии с законом сохранения энергии. С помощью решения задач методом конечных элементов (МКЭ) становится возможным сгенерировать поле температуры, которое будет применяться в целях определения тепловых параметров иного рода [10].

Тепловой расчёт производился в условиях, близких к эксплуатационным. Следует отметить, граничные условия включали постоянную температуру ( $t = 70^\circ\text{C}$ ), которую предполагалось приложить к нижней стороне корпуса электронного блока, при этом конвекция и излучение внутри и снаружи электронного блока не учитывались.

В целях проведения теплового расчета была задействованы данные (таб.2) наиболее теплонагруженных ЭРИ, отражающая их мощностные показатели при условии теплового равновесия.

Таб.2. Показатели мощности тепловыделения на основных электрорадиоизделиях (ЭРИ) блока управления кислородной системы.

Обозначение ЭРИ	Мощность каждого элемента, Вт
1986BE1T	0,936
5559ИН74T	1
1485НК4T	0,8
1345АП7T	0,55
КР142ЕН5	5
МДМ10-3Е01515ВУП	10

В результате расчётов были получены температурные поля блока в корпусе из АМгб (рис. 4, а), а также в корпусе из Al-SiC (рис. 4, б).

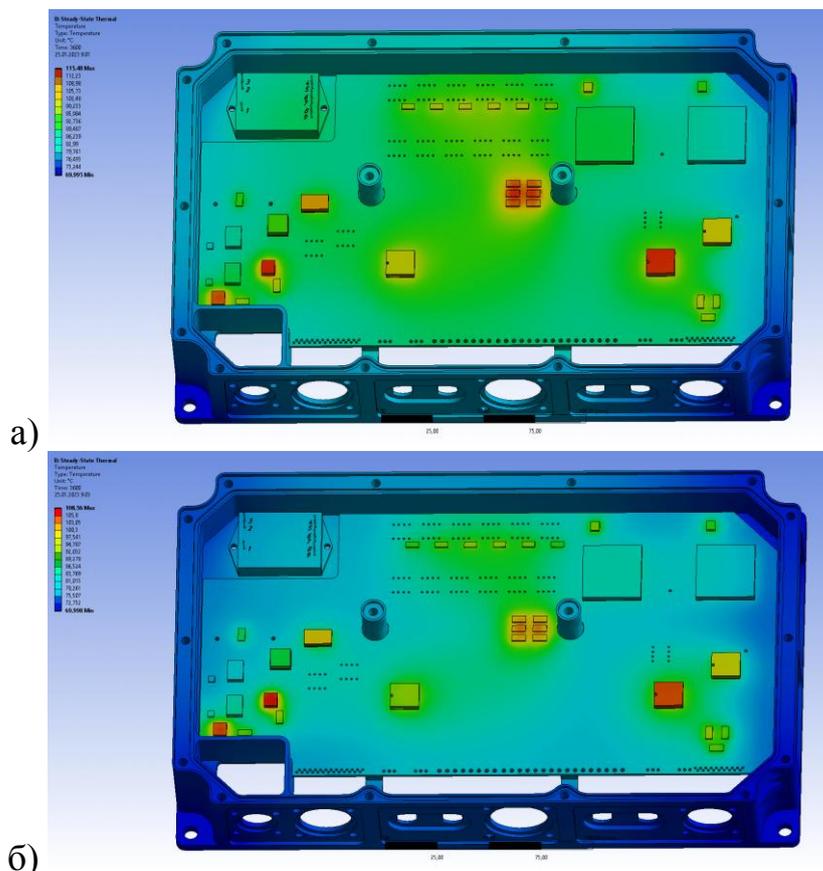


Рис. 4. – Тепловое поле блока в корпусе из материала:  
 а) АМгб ( $T_{max}=115^{\circ}C$ ); б) AlSiC ( $T_{max}=108^{\circ}C$ )

Проведённые расчеты показывают, что во время работы блока в корпусе из алюминиевого сплава АМгб не будет обеспечиваться температурный режим, отвечающий нормам технических условий электронных компонентов, что приводит к необходимости внедрения в конструкцию новых высокотеплопроводных легких материалов, что особенно перспективно для тех случаев, когда не имеется возможности компоновки всех греющихся компонентов вблизи зоны теплоотвода. В данном случае это позволяет значительно снизить перегрев отдельных компонентов, расположенных вдали от корпуса.

В статье представлены результаты моделирования тепловых режимов электронного блока для управления бортовой кислородной системой, которые показали, что обеспечение наилучшего теплосъема достигается за счет реализации конструкции с корпусом из композитных материалов на основе карбида кремния. Использование данного материала позволит достичь наилучших показателей надёжности для стабильной работы бортового электронного блока управления кислородной системы.

Таким образом, по результатам моделирования было установлено, что во время работы блока в корпусе из алюминиевого сплава АМгб не будет обеспечиваться требуемый температурный режим, отвечающий нормам технических условий электронных компонентов. Поэтому потребность в разработке новых решений и внедрения высокотеплопроводных материалов будет обладать дальним горизонтом действия.

### **Литература**

1. Дульнев Г.Н., Семенишин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – Ленинград: Ленинградское отделение, 1968. – С. 59-60.
2. Weyant J., Garner S, Johnson M. Occhionero M. Heat pipe embedded AlSiC plates for high conductivity - Low CTE heat spreaders // Thermal and

Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference. IEEE Xplore, 2010. pp. 2-4.

3. Материалы для электроники и приборостроения // ООО НПП «Металл Композит». URL: [metalcompozit.ru/materialyi-dlya-elektroniki-i-priborostroeniya](http://metalcompozit.ru/materialyi-dlya-elektroniki-i-priborostroeniya).

4. Гарсия В. Бортовые вычислительные комплексы с кондуктивным теплоотводом: пример конструктивной реализации на основе спецификации VPX REDI // Современные технологии автоматизации. – 2013. – С. 38-40.

5. Калганов А.А., Лисиенко В.Г., Калганова А.П. Методика моделирования тепловых процессов для радиоэлектронной аппаратуры // Инженерный вестник Дона. – 2020. – № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6500](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6500).

6. Жидков А.В., Крутова К.А., Миронов А.А., Чекмарев Д.Т. Численное решение трехмерных динамических упругопластических задач с использованием ажурной схемы метода конечных элементов // Проблемы прочности и пластичности. – 2017. – Т. 79, № 3. – С. 327-337.

7. Федорова Н.Н., Вальгер С.А., Данилов М.Н., Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – С. 210-211.

8. Богданов Ю.А., Квинт И.Э. Расчет тепловых режимов рамочных конструкций с теплоотводом на основании // Проектирование и технология электронных средств. М., 2007. – С. 11-12.

9. Карабан В.М., Сухоруков М.П., Морозов Е.А. Математические модели многослойных печатных плат для теплового моделирования электронных устройств и систем. – Доклады ТУСУРа, № 3, 2013. – С. 170-174.

10. Кравченко Г.М., Манойленко А.Ю., Литовка В.В. Применение параметрического проектирования при моделировании методом конечных элементов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5051](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5051).

---

## References

1. Dulnev G.N., Semenishin E.M. Teploobmen v radioelektronnykh apparatax. [Heat transfer in radio electronic devices]. 1968. pp. 59-60.
2. Weyant J., Garner S., Johnson M. Occhionero M. Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2010 12th IEEE Intersociety Conference. IEEE Xplore. 2010. pp. 2-4.
3. Materialy dlya elektroniki i priborostroeniya. [Materials for electronics and instrument making]. NPP «Metall Kompozit». URL: [metalcompozit.ru/materialyi-dlya-elektroniki-i-priborostroeniya](http://metalcompozit.ru/materialyi-dlya-elektroniki-i-priborostroeniya).
4. Garcia V. Sovremennye tekhnologii avtomatizacii. 2013. № 1. pp. 38-40.
5. Kalganov A.A., Kalganov V.G., Kalganova A.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2020. № 6. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6500](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N6y2020/6500).
6. Zhidkov A.V., Krutova K.A., Mironov A.A., Chekmarev D.T. Problemy prochnosti i plastichnosti. 2017. T. 79. № 3. pp. 327-337.
7. Fedorova N.N., Valger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. Osnovy raboty v ANSYS 17. [ANSYS 17 Basics]. 2017. pp. 210-211.
8. Bogdanov Yu.A., Kvint I.E. Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv. 2007. pp. 11-12.
9. Karaban V.M., Sukhorukov M.P., Morozov E.A. Doklady TUSURa, № 3, 2013. pp. 170-174.
10. Kravchenko, G.M., Manoilenko A.Yu., Litovka V.V. Inzhenernyj vestnik Dona. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5051](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5051).