электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 12, декабрь 2015

УДК 536.248.2

Численное моделирование термического сопротивления тепловых трубок в системе охлаждения блока радиоэлектронной аппаратуры

Темирханов Т.Г., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им Н. Э. Баумана,
Аэрокосмический факультет
timurtemirkhanov@mail.ru

Научный руководитель: Щеглов Г.А., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им Н. Э. Баумана,
«Аэрокосмические системы»
kafsm2@sm.bmstu.ru

Введение

Актуальной проблемой эксплуатации современной электронной аппаратуры является обеспечение нормального теплового режима работы (далее НТРР). Существующие в настоящий момент системы охлаждения принято разделять на две основные группы: пассивные системы охлаждения; активные системы охлаждения. Для пассивных методов характерен естественный путь отвода тепла - конвекцией, теплопроводностью и излучением. В активных методах используется принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, термоохладителей или омывающих жидкостей [1]. В таблице 1 представлены результаты обзора современных систем охлаждения [1].

Таблица 1

Особенности современных систем охлаждения

Охлаждение	**Преимущества**	**Недостатки**
Принудительное воздушное	Низкая цена	Большой объем, необходимость распределения тепла, высокое тепловое сопротивление, акустические шумы
Жидкостное	Малый объем, гибкая конфигурация, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Необходим насос, система трубопроводов, возможность утечек жидкости, высокая цена
Тепловые трубки	Малый объем, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Ограниченная теплонесущая способность, высокая цена, сложная конструкция
Термоэлектрическое	Малый объем, низкое тепловое сопротивление	Ограниченная теплонесущая способность, низкая эффективность

Для реального блока радиоэлектронной аппаратуры (далее блок РЭА), описанного ниже, в работе был проведен анализ возможных вариантов обеспечения НТРР. Результат анализа возможных вариантов обеспечения НТРР:

- Применение в данной системе принудительного воздушного охлаждения невозможно в виду больших габаритов вентилятора и отсутствия выходных отверстий в блоке РЭА.
- Применение в данной системе жидкостного охлаждения невозможно в виду большой массы и больших габаритов насоса.
- Применение в данной системе термоэлектрического охлаждения невозможно в виду малой эффективности данной системы без применения принудительного воздушного охлаждения.

Исходя из проведенного анализа, следует, что для обеспечения НТРР для блока РЭА необходимо использовать систему охлаждения на тепловых трубках.

Тепловая трубка (далее ТТ) — испарительно-конденсационное устройство для передачи тепла, в котором осуществляется перенос скрытой теплоты парообразования за счет испарения жидкости в зоне подвода тепла и конденсации ее паров в зоне отвода, а замкнутая циркуляция теплоносителя поддерживается действием капиллярных или массовых сил [2]. Принцип работы ТТ представлен на рис.1.

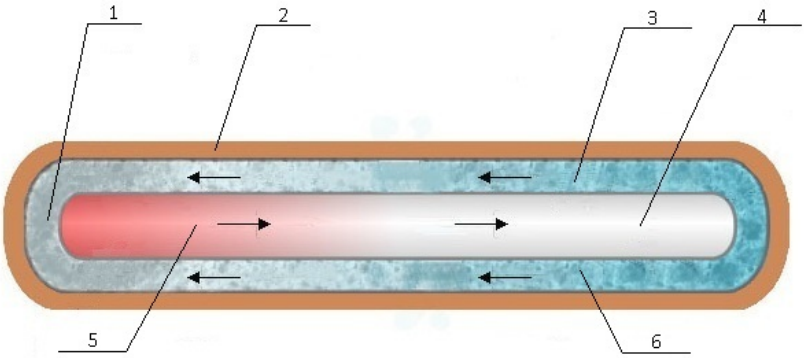


Рис. 1. Принцип работы тепловой трубы: 1 – фитиль; 2 – контейнер; 3 – зона конденсации; 4 – полость пара; 5 – поток пара; 6 – поток жидкости

Главным параметром, характеризирующим эффективность теплоотвода системы охлаждения, является термическое сопротивление — способность тела (его поверхности или какого-либо слоя) препятствовать распространению теплового движения молекул. Термическое сопротивление сложной системы равно сумме термических сопротивлений её частей, каждое из которых определяется формулой [3]:

$$R_t = \frac{T_2 - T_1}{P}, \qquad (1)$$

где: R_t — тепловое сопротивление на участке тепловой цепи, К/Вт; T_2 — температура начала участка, К; T_1 — температура конца участка, К; P — тепловой поток, протекающий через участок цепи, Вт.

Для ТТ тепловое сопротивление численно равно температурному напору [4], необходимому для передачи единичного теплового потока (равного 1 Вт/м²) к поверхности тела или через слой вещества.

Определение количественного значения термического сопротивления ТТ для обеспечения НТРР блока РЭА крайне сложная задача. Для ее решения необходимо

определить тепловой поток P формулы (1). Методика экспериментального определения теплового потока описана в работе [4]. Теоретические основы определения теплового потока подробно описаны в работе [3].

Целью данной работы является определение значения теплового сопротивления ТТ, обеспечивающего НТРР, на основе численного моделирования работы блока РЭА.

Численное исследование термического сопротивления тепловых трубок позволяет решить следующие задачи:

- Для разработчика РЭА – возможно ли обеспечить НТРР при данной конструкции блока. Параметрические исследования модели позволяют определить оптимальные параметры геометрии/материала узлов конструкции блока.
- Для разработчика ТТ – определение геометрических параметров/материалов/ технологии изготовления ТТ.

Ввиду высокой цены и долгого времени изготовления ТТ, знание термического сопротивления позволяет минимизировать материальные и временные затраты разработчика РЭА на корректировку конструкции блока, а разработчику ТТ – на разработку и изготовление ТТ.

Постановка задачи

Рассматривается блок РЭА внешний вид которого представлен на рис. 2. Конструктивно блок, имеющий габариты (Длина x Ширина x Высота) 270мм x 174мм x 82мм, состоит из: верхней крышки, двух рамок с радиаторами, двух рамок без радиатора, нижней крышки. Рамки конструкции блока скреплены четырьмя винтами. Каждая рамка включает в себя модульную плату. Платы соседних модулей соединены между собой проходными разъемами, которые обеспечивают связь каждого модуля с каждым.

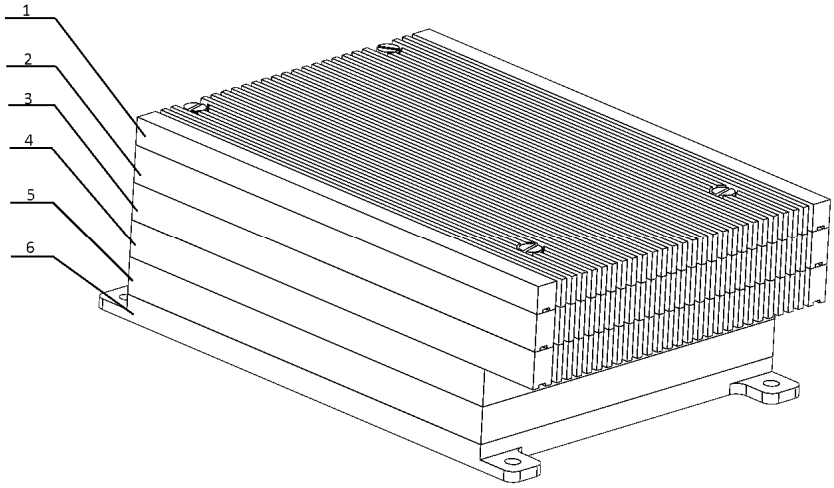


Рис. 2. Внешний вид блока РЭА: 1 – верхняя крышка; 2 – рамка с радиатором I; 3 – рамка с радиатором II; 4 – рамка без радиатора I; 5 – рамка без радиатора II; 6 – нижняя крышка

Для модульных плат с радиаторами необходимо обеспечить НТРР при работе чипа с большой мощностью тепловыделения. Модульные платы с рамками в упрощенном виде (не учитываются элементы с малой тепловой мощностью) показаны на рис. 3 и рис. 4.

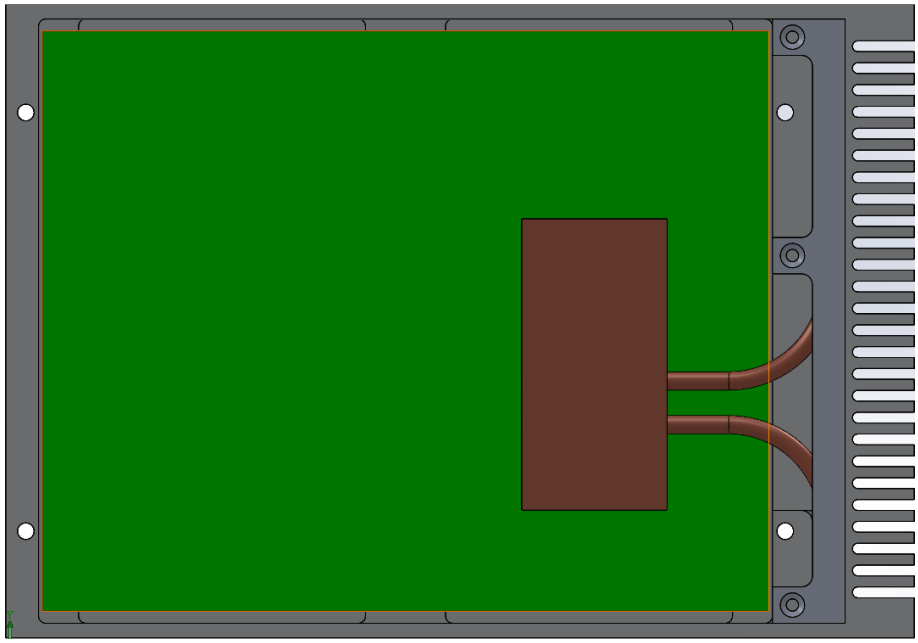


Рис. 3. Модульная плата в рамке с радиатором I

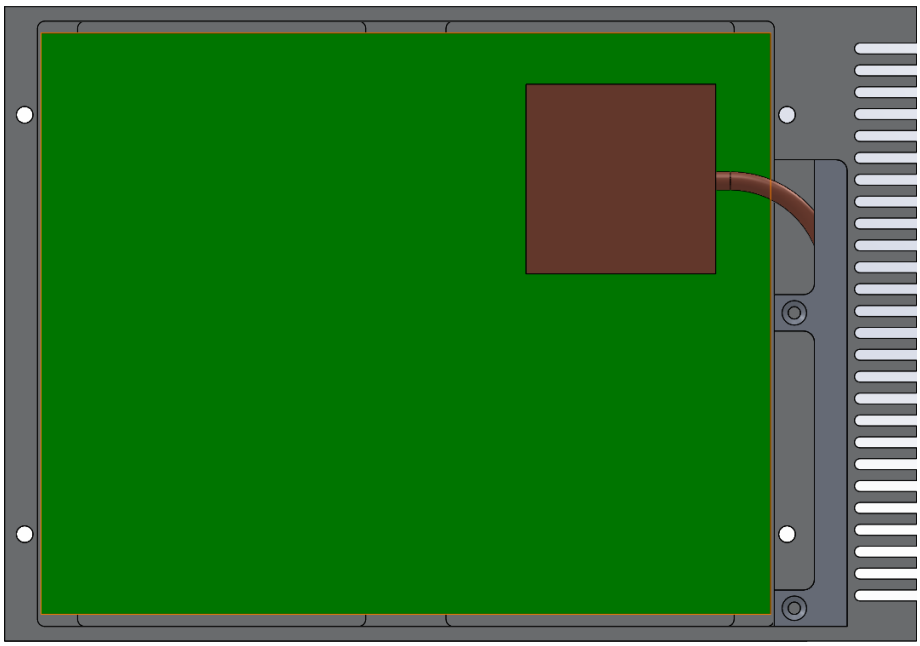
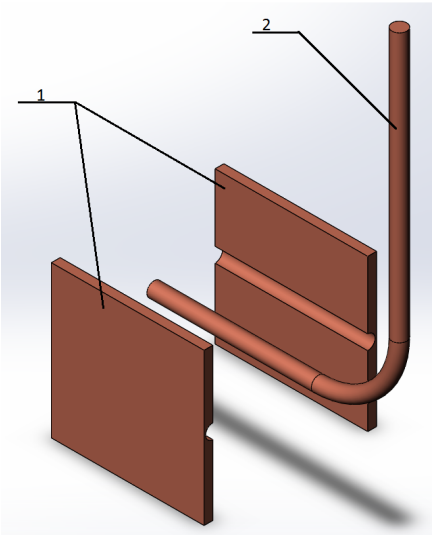
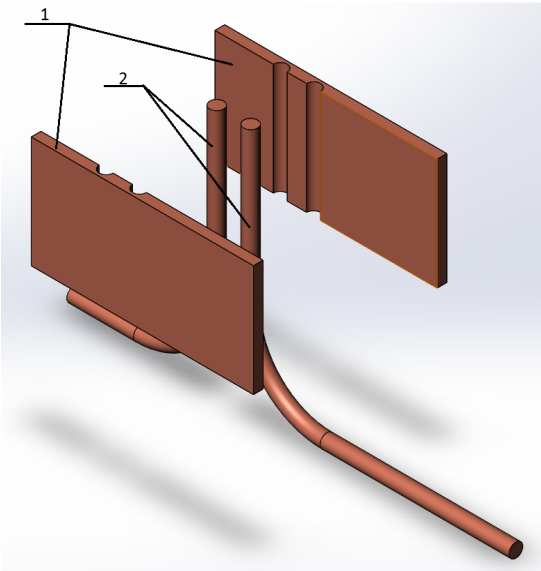


Рис. 4. Модульная плата в рамке с радиатором II

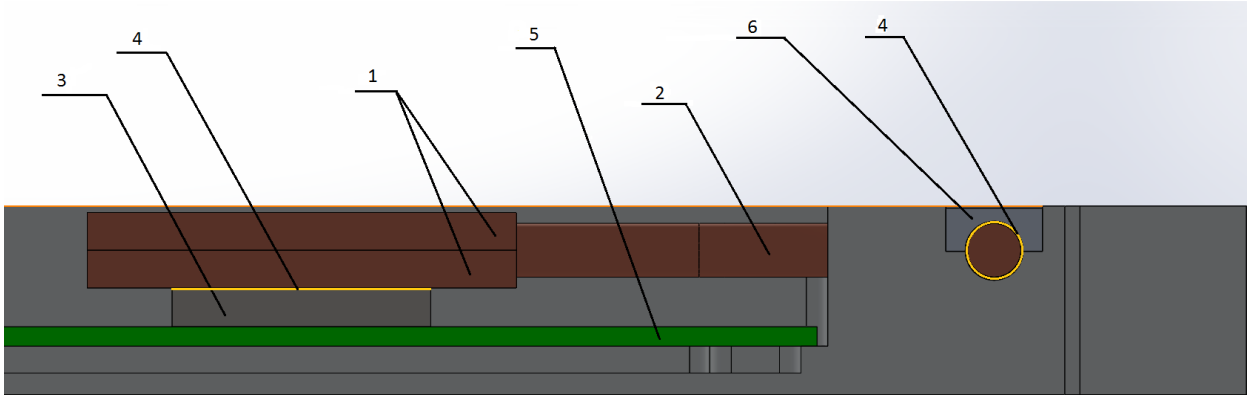
Внешний вид систем охлаждения для модульных плат представлен на рис. 5. Конструктивно система охлаждения для рамки с радиатором I состоит из: двух прижимных пластин; двух ТТ; корпуса блока и прижима блока. Система охлаждения для рамки с радиатором II имеет аналогичную конструкцию, но имеет в составе одну ТТ.



а)



б)



в)

Рис. 5. Внешний вид модуля охлаждения на тепловых трубках: а) прижимные пластины и тепловая трубка рамки I; б) прижимные пластины и тепловые трубки рамки II; в) система охлаждения для модульных плат (в разрезе); 1 – прижимные пластины; 2 – тепловая трубка; 3 – чип; 4 – термопаста; 5 – печатная плата; 6 – прижим рамки.

На рис. 6 представлена расчетная схема теплового сопротивления модуля охлаждения в рамке. Тепловое сопротивление между кристаллом чипа (A), окружающей средой (B) и внутренней средой блока (C) складывается из: теплового сопротивления кристалл-корпус (Rк.к); теплового сопротивления корпус-пластина (Rк.п); теплового сопротивления пластина-ТТ (Rп.тт); теплового сопротивления пластина-внутренняя среда блока (Rп.вн_ср); теплового сопротивления ТТ-корпус блока (Rтт.к); теплового сопротивления корпус блока-окружающая среда (Rк.окр_ср). Параметры расчетной схемы приведены в Таблицах 2,3.

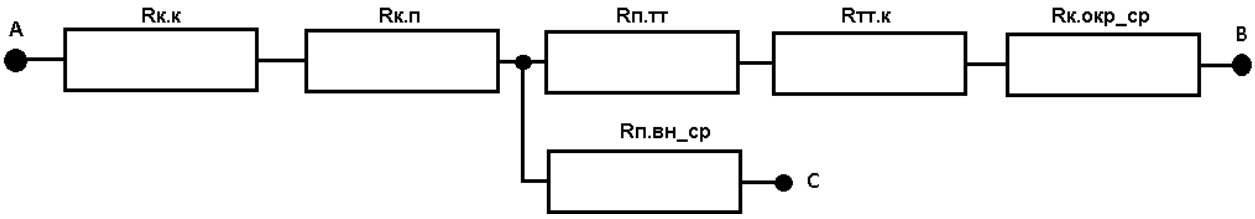


Рис. 6. Расчетная схема теплового сопротивления для модуля охлаждения в рамке

Таблица 2

Материалы модели

Элемент блока РЭА	**Материал**
Верхняя крышка	Сплав алюминия 1060
Рамка	Сплав алюминия 1060
Нижняя крышка	Сплав алюминия 1060
Чип	Кремний
Термопаста	КПТ-8
Тепловая трубка	Медь
Прижимная пластина	Медь
Модульная плата	Стеклотекстолит FR-4
Винт	Легированная сталь

Таблица 3

Параметры модели

Параметр	**Значение**
Атмосферное давление, Па	98658,28
Температура окружающей среды, °С	Варьируется
Температура стенок блока, °С	Варьируется
Температура элементов блока, °С	Варьируется
Скорость течения воздуха вне блока, м/с	0
Коэффициент конвективной теплоотдачи корпуса РЭА – внешняя/внутренняя среда (воздух), Вт/м²*К	20
Коэффициент конвективной теплоотдачи прижимная пластина – внутренняя среда, Вт/м²*К	20
Мощность тепловыделения чипа, Вт	Варьируется
Тепловое сопротивление ТТ, К/Вт	0,34

Для численного моделирования системы охлаждения блоков в работе использовались пакеты расширения для Solid Works 2014. Параметры модели задаются для каждого расширения отдельно. Flow Simulation используется для моделирования процесса теплообмена в ТТ методом конечного объема. Полученный результат экспортируется стандартными средствами Solid Works 2014 в пакет Simulation, где проводится моделирование теплообмена в твердых телах методом конечного элемента и

расчет конвективной теплопередачи согласно параметрам модели (см. Таблицу 3). Сетка во Flow Simulation, имеющая 31824 ячеек, построена с применением разрешения узких каналов и тонких стенок. Сетка в Simulation, имеющая 47298 элементов второго порядка, построена на основе кривизны с максимальным и минимальным размером элемента 19,48 мм и 3,90 мм соответственно.

Результаты моделирования

При верификации модели рассмотрены два режима работы блока РЭА, для которых известны результаты экспериментов, проведенных на кафедре ИУ-6. В Таблице 4 представлены результаты экспериментов для двух рассматриваемых плат с радиаторами. В таблице 5 показаны результаты моделирования режимов работы. Тепловые эпюры полученных результатов моделирования для таблицы 5 показаны на Рисунках 7-10. Расхождения, полученные экспериментальным и теоретическим методами, сведены в таблицу 6. Для интересующего нас режима работы ТТ расхождение между результатами эксперимента и моделирования составляет не более 6,2 %. Данный результат принят приемлемым для дальнейшего исследования поведения модели.

Таблица 4

Результаты эксперимента

Температура окружающей среды, °С	**Температура стенок блока, °С**	**Температура элементов блока, °С**	**Мощность тепловыделения чипа, Вт**	**Конечная температура прижимной пластины, °С**
Результаты эксперимента модульной платы в рамке с радиатором I				
25	25	25	16	52
65	65	65	16	84
Результаты эксперимента модульной платы в рамке с радиатором II				
25	25	25	16	73
65	65	65	16	97,8

Таблица 5

Результаты моделирования

Температура окружающей среды, °С	**Температура стенок блока, °С**	**Температура элементов блока, °С**	**Мощность тепловыделения чипа, Вт**	**Конечная температура прижимной пластины, °С**
Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором I				
25	25	25	16	48,8
65	65	65	16	86,73
Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором II				
25	25	25	16	64,42
65	65	65	16	102,68

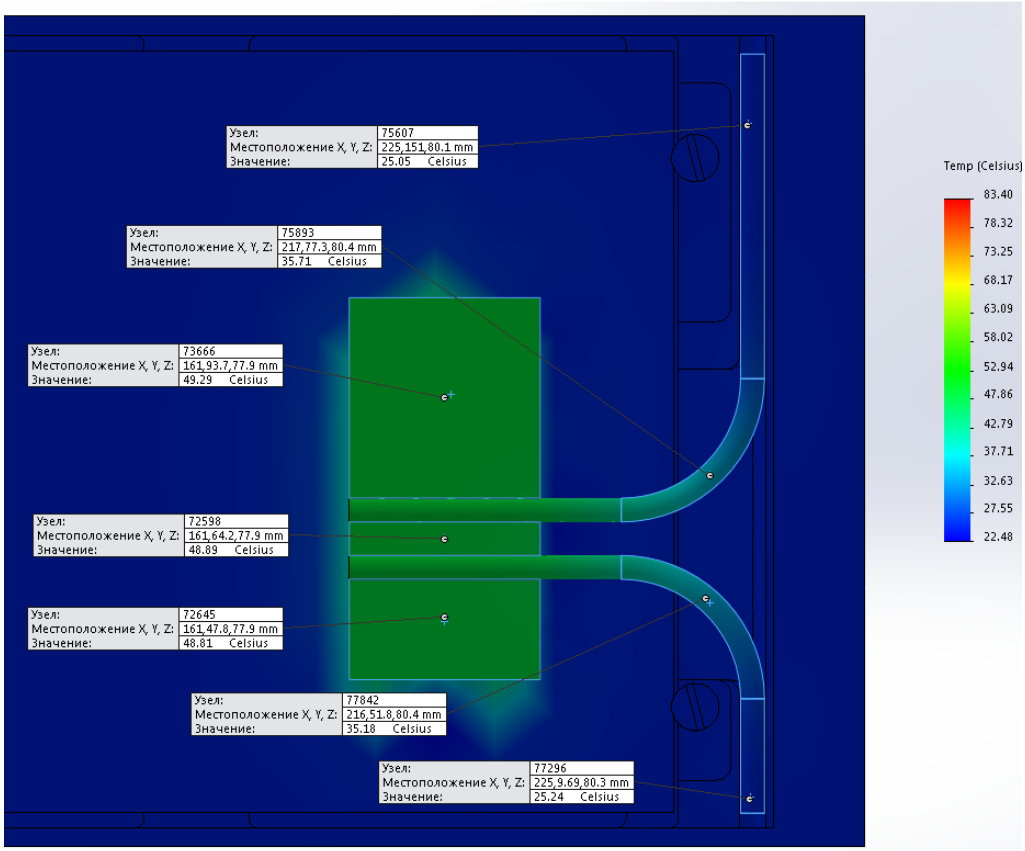


Рис. 7. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором I (Начальная температура 25 °С)

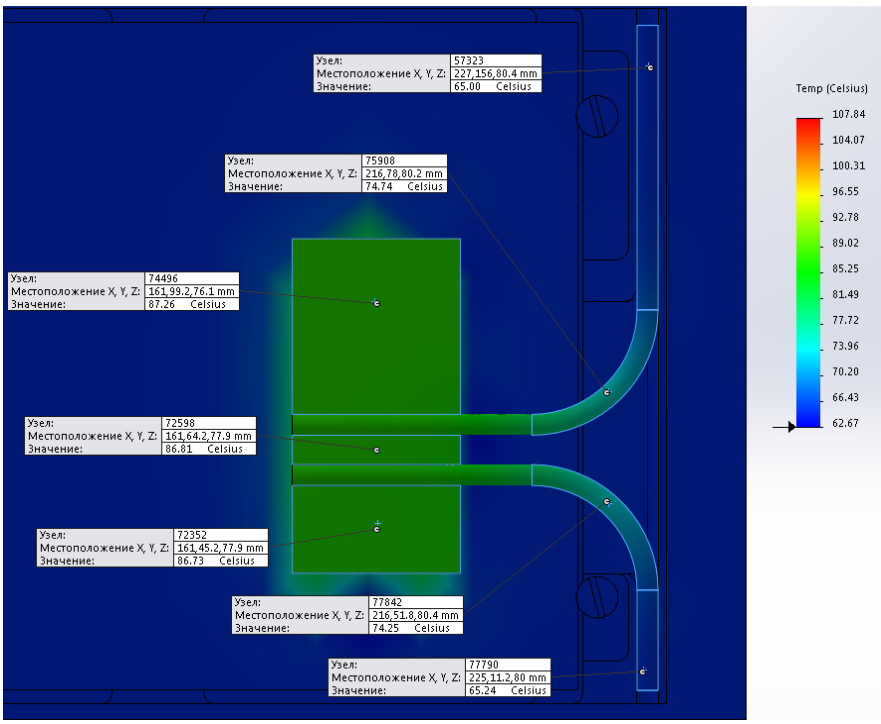


Рис. 8. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором I (Начальная температура 65 °C)

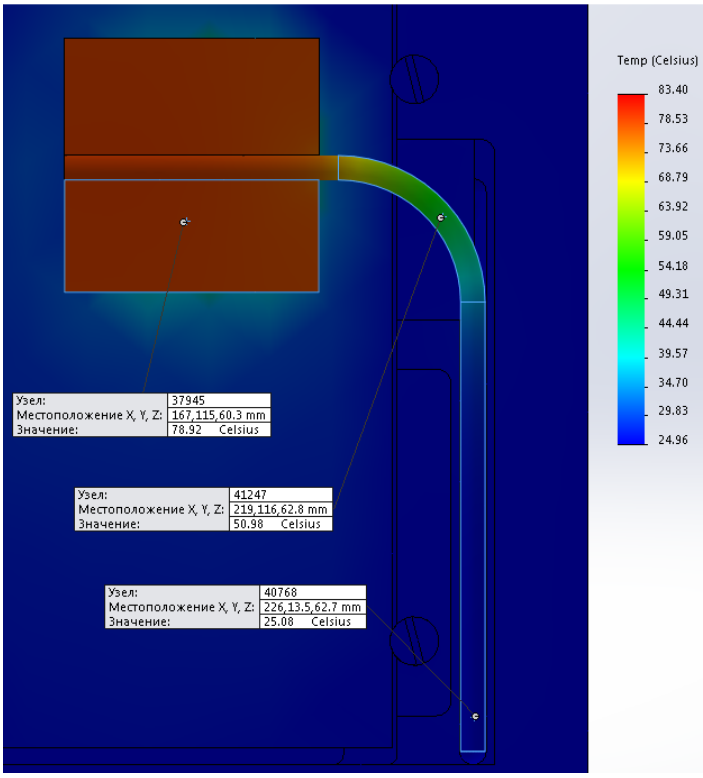


Рис. 9. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором II (Начальная температура 25 °C)

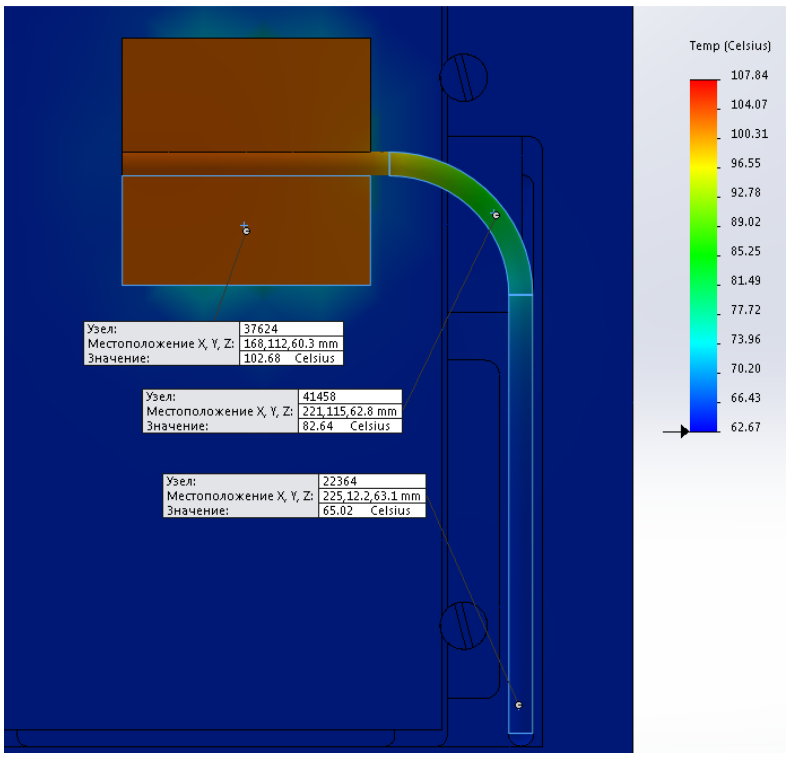


Рис. 10. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором II (Начальная температура 65 °С)

Таблица 6

Сводные результаты исследования

Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором I			
Начальная температура, °С	**Эксперимент, °С**	**Моделирование, °С**	**Разница, %**
25	52	48,8	6,2
65	84	86,73	3,3
Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором II			
Начальная температура, °С	**Эксперимент, °С**	**Моделирование, °С**	**Разница, %**
25	73	78,92	5,6
65	97,8	102,68	5,0

Для реального режима работы мощность тепловыделения чипа зависит от величины потребляемого тока. В ходе работы блока РЭА значение потребляемого тока варьируется в результате включения/выключения используемой периферии чипа. Для модульной платы рамки с радиатором I значение мощности изменяется в диапазоне 20 ÷ 25 Вт, для модульной платы рамки с радиатором II данной значение не превышает 16 Вт. В таблице 7 представлены результаты для реальных режимов работы блока РЭА.

Таблица 7

Результаты моделирования модульной для реальных режимов работы

Температура окружающей среды, °С	**Температура стенок блока, °С**	**Температура элементов блока, °С**	**Мощность тепловыделения чипа, Вт**	**Конечная температура прижимной пластины, °С**
Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором I				
65	65	65	20	92,12
65	65	65	21	93,50
65	65	65	22	94,80
65	65	65	23	96,16
65	65	65	24	97,55
65	65	65	25	98,74
Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором II				
65	65	65	16	102,68

Для обеспечения НТРР ТТ необходимо, чтобы температура чипа, а, следовательно, и температура прижимной пластины, была не более 85 °С. Согласно результатам таблицы 9 НТРР не обеспечивается ТТ с выбранным предварительно тепловым сопротивлением 0,34 К/Вт.

С целью определения значения термического сопротивления ТТ, обеспечивающего НТТР, построены модели системы охлаждения для реального режима работы в диапазоне значений 0,30 К/Вт ÷ 0,05 К/Вт с шагом 0,05. Минимальное значение 0,05 К/Вт обусловлено технологическими возможностями изготовления ТТ. Результаты моделирования представлены в таблице 8. Термические эпюры результатов моделирования отображены на рис. 11 и рис. 12.

Таблица 8

Результаты моделирования системы охлаждения блока при наилучших параметрах

Начальная температура, °C	**Тепловое сопротивление, К/Вт**	**Конечная температура прижимной пластины, °C**
Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором I		
65	0,05	80,33
Результаты исследования модульной платы в рамке с радиатором II		
65	0,05	84,15

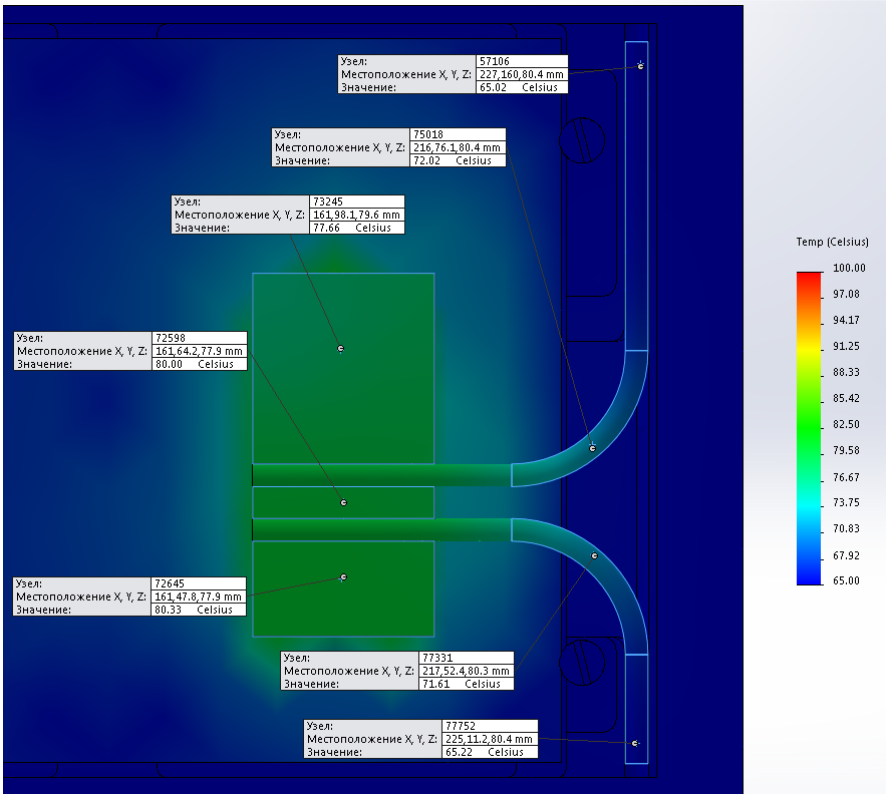


Рис. 11. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором I при тепловом сопротивлении ТТ = 0,05 К/Вт

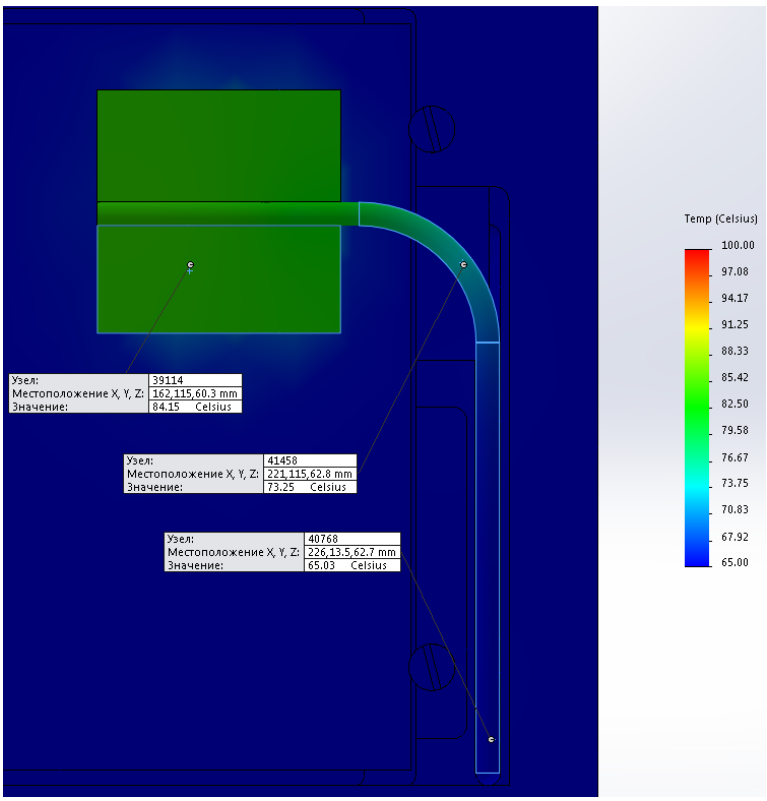


Рис. 12. Результаты моделирования модульной платы в рамке с радиатором II при тепловом сопротивлении ТТ = 0,05 К/Вт

Выводы

По результатам моделирования установлено, что НТРР для данной конфигурации системы охлаждения удается обеспечить на границе допустимого диапазона. Возможности ТТ, при этом достигли их физического предела. Для увеличения теплового сопротивления системы охлаждения можно предпринять следующие меры, повысив отводимую мощность: использовать ТТ с большим сечением; увеличить площадь радиатора рамки; увеличить площадь прижимных пластин рамки.

Список литературы

1. Меркульев А.Ю., Горячев Н.В., Юрков Н.К. Системы охлаждения полупроводниковых электрорадиоизделий // Молодой ученый. 2013. № 11. С. 143-145.
2. Ивановский М.Н., Сорокин В.П., Ягодкин И.В. Физические основы тепловых труб. М.: Атомиздат, 1978. 256 с.
3. Орлов М. Е. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: учебное пособие. Ульяновск: Ульяновский государственный технический университет, 2013. 204 с.

4. Алексеев С.В. Разработка и применение тепловых труб для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры // Наукоемкие технологии. 2013. № 9. С. 81-89.