

УДК 539.3

# Изготовление и испытание тепловых макетов приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки, выполненных с применением плоских тепловых труб\*

П.О. Поляков<sup>1</sup>, Р.В. Горюнов<sup>2</sup>, Ю.О. Соляев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, 125993, Россия

<sup>2</sup>ПАО Радиофизика, Москва, 125480, Россия

<sup>3</sup>Институт прикладной механики РАН, Москва, 125040, Россия  
e-mail: p.o.polyakov@yandex.ru; radiofizika01@mail.ru; yurysolyaev@ya.ru

DOI: 10.34759/tpt-2020-12-8-340–350

Поступила в редакцию 04.08.2020

После доработки 03.09.2020

Принята к публикации 04.09.2020

Представлена методика изготовления и результаты испытаний тепловых макетов приемо-передающих модулей активной фазированной антенной решетки. Рассматриваются два варианта модулей X-диапазона со встроенными плоскими тепловыми трубами, используемыми в качестве теплораспределяющих оснований и располагаемыми снаружи корпуса или внутри под радиоэлектронной ячейкой. Испытания проведены в условиях применения жидкостной системы охлаждения при различных углах наклона тепловых макетов относительно направления действия силы тяжести. По результатам испытаний определено изменение температуры нагрева тепловыделяющих элементов модуля и поверхности тепловой трубы. Испытания показали возможность использования плоской тепловой трубы толщиной 2.2 мм для охлаждения приемо-передающих модулей с общей мощностью тепловыделения 80 Вт.

**Ключевые слова:** тепловая труба, приемо-передающий модуль, активная фазированная антенная решетка, тепловой макет, тепловые испытания.

## Введение

С повышением рабочей частоты такие характеристики активной фазированной антенной решетки (АФАР) летательных аппаратов (ЛА), как разрешающая способность, точность, помехозащищенность, устойчивость к ионизации атмосферы, могут быть существенно улучшены. Однако повышение частотных диапазонов неизбежно ведет к увеличению плотности тепловых потоков, реализующихся в процессе работы приемо-передающих модулей (ППМ). Фактически, улучшение технических характе-

ристик современных радиолокационных систем большой мощности, работающих в высокочастотных диапазонах, напрямую связано с возможностью создания эффективных систем охлаждения [1]. Одной из наиболее важных возникающих здесь задач является обеспечение интенсивного локального отвода тепла от электронных компонентов (в первую очередь от выходных усилителей мощности), перегрев которых приводит к снижению радиотехнических характеристик и срока службы АФАР. Применение тепловых труб (ТТ) для охлаждения радиоэлектронной аппаратуры позволяет обеспечить интенсивное локальное охлаждение греющихся элементов и последующую передачу

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант 20-01-00517.

выделяющегося тепла во внешнюю среду стандартными системами жидкостного или воздушного охлаждения.

В настоящее время актуальной является задача по созданию системы локального охлаждения ППМ АФАР с использованием плоских тепловых труб, встроенных непосредственно внутри корпуса приемо-передающего модуля. Такой вариант охлаждения представляется наиболее эффективным, поскольку позволит использовать предлагаемую систему охлаждения в условиях гравитации и перегрузок.

Можно отметить, что применение тепловых труб (крупногабаритных, цилиндрической формы или даже плоских) в различных системах терморегулирования [2], в том числе в АФАР космических аппаратов, известно достаточно давно [3–7]. Принцип работы тепловых труб основан на двухфазном механизме передачи тепла – конвекцией теплоносителя в паропроводе с его последующим возвратом капиллярными силами, действующими в пористой структуре – фитиле, нанесенном на внутренние стенки тепловой трубы [8–12]. Вследствие этого тепловые трубы обладают очень высокой эффективной теплопроводностью, особенно в условиях отсутствия гравитации, – до 20 000 Вт/(мК). У плоских тепловых труб, работающих в наземных условиях, эффективная теплопроводность несколько ниже, однако она примерно в четыре раза превышает теплопроводность меди при кажущейся плотности порядка алюминиевых сплавов [13]. По известным в литературных источниках данным тепловые трубы в составе наземных или бортовых АФАР, где действуют существенные гравитационные и инерционные нагрузки, практически не использовались ранее. Однако исследования, направленные на разработку подобных решений, проводятся. Например, относительно недавно был рассмотрен вариант бортовой авиационной АФАР, охлаждение которой реализовано с использованием плоских тепловых труб [14].

Задача настоящей работы – оценить возможность и эффективность применения плоских тепловых труб для охлаждения типового приемо-передающего модуля АФАР, работающего в составе наземных или бортовых систем. Предложены два варианта конструкций корпуса приемо-передающего модуля АФАР со встроен-

ными тепловыми трубами, которые были изготовлены и испытаны.

В настоящее время существует немало технических решений по охлаждению бортовых АФАР ЛА, которые применяются в военных истребителях, ЛА по типу ракет средней и малой дальности и др. Так, например, в бортовой АФАР Т-50 [15, 16] используется жидкостная система охлаждения, гидравлический канал которой заполнен охлаждающей жидкостью. Для эффективной работы внутри этой системы присутствует избыточное давление. В ЛА по типу ракет класса воздух-воздух и воздух-поверхность в головках самонаведения для эффективной работы для отвода тепла используется газообразный азот, который подается через азотовод из баллона носителя ракеты. Охлаждение устройств головки самонаведения достигается при помощи саморегулирующегося двухкаскадного микрохолодильника дроссельного типа, а поддержание температурного уровня обеспечивается наличием собственной автономной емкости для азота. Однако частым случаем поломок достаточно габаритных и/или сложных систем охлаждения [17] является подтекание жидкости с последующей разгерметизацией системы. Проблема также заключается в замене отдельных узлов, наличие крупногабаритного и тяжелого блока охлаждения, поломки которого и перегрев системы приводят к ухудшению радиотехнических характеристик и снижению времени наработки на отказ.

Решением, аналогичным рассматриваемому в настоящей работе, являются результаты, представленные в работе [18], в которой для повышения эффективности охлаждения ППМ авторы проводят исследования корпусов (размеры 490×275×52 мм) со встроенными ребрами охлаждения и с применением тепловых труб. Результаты численного моделирования температурного поля (CFD-modeling) корпуса-радиатора ППМ без и с учетом тепловых труб показали, что при одинаковой скорости воздушного потока (9 м/с) максимальная температура в местах установки СВЧ-элементов снизилась на 20.3°C (с 73°C до 52.7°C) из-за добавления тепловых труб, что эквивалентно уменьшению температуры кристалла с 160°C до 139.7°C.

Предложенный в настоящей работе способ заключается в разработке систем эффективного локального охлаждения радиоэлектронных

элементов бортовых АФАР [19, 20]. Применение тепловых труб, обладающих высокой эффективной теплопроводностью и устанавливаемых непосредственно под тепловыделяющими элементами печатных плат ППМ АФАР, должно позволить реализовывать методы эффективного распределения тепловых потоков от малоразмерных кристаллов транзисторов по большой площади поверхности усилительных модулей с дальнейшей передачей тепла в систему охлаждения второй ступени.

### Исходные данные

Предложены варианты конструкций корпусов ППМ X-диапазона со встроенными плоскими тепловыми трубами. Данные варианты выполнены на основе существующих конструкций, габаритные размеры которых  $427 \times 204 \times 30$  мм. Суммарная мощность тепловыделения ППМ составляет 80 Вт. Для этой мощности были применены тепловые трубы производства ООО «НПО «Центротех». Наиболее теплонагруженные элементы расположены в передней части усилительного модуля со стороны излучателей – это предварительный и выходной усилители. Для изготовления и испытания тепловых макетов были разработаны тепловая и принципиальная электрическая схемы (рис. 1), а также инструкции для проверок их на работоспособность.

Вариант конструкции 1 предполагает размещение с внешней стороны корпуса ППМ двух тепловых труб для отведения тепла от зон наибольшего теплового нагружения. Вариант

конструкции 2 конструктивно отличается от предыдущего тем, что две тепловые трубы расположены во внутренней части корпуса ППМ.

### Описание изготовления тепловых макетов

#### Подготовка к электромонтажу

На начальном этапе были подготовлены эскизные чертежи и написана САМ-программа для числового программного управления (ЧПУ) станком. В качестве оборудования для фрезерования корпусов был использован вертикальный фрезерный обрабатывающий центр с ЧПУ «HURCO VTXU».

Перед операцией фрезерования было решено несколько задач по разработке САД-чертежей для макетов корпусов, анализу САД-деталей и получению от центра ЧПУ данных о типе материала и размерах, конвертации (при помощи САМ-программы) цифрового объекта в понятные станку команды в формате G-code. Корпуса были подготовлены с пазами  $74 \times 354$  мм каждый, в которых должны располагаться тепловые трубы (рис. 2).

В целях изоляции тепловой трубы от основания корпуса в центральной (адиабатической) зоне было подготовлено дополнительное углубление 1.5 мм. Для окончательной установки тепловых труб проведены подготовительные операции (слесарная, гидропескоструйная, электрополировочная). Были притуплены острые кромки, закручены каленые втулки в местах сквозных отверстий у основания корпуса, а также были размечены и просвер-

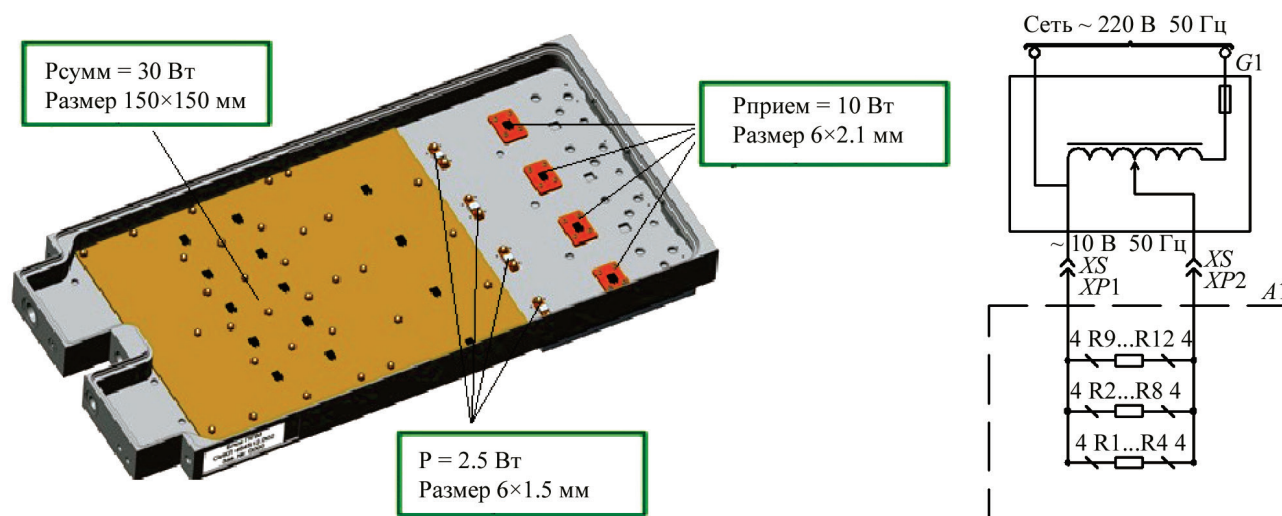


Рис. 1. Тепловая (слева) и принципиальная электрическая (справа) схемы тепловых макетов

лены дополнительные отверстия, нарезаны резьбы М2.5 для крепления дополнительных усиливающих профилей, нарезана резина ИРП 195×20×2 для безопасной фиксации ТТ. При гидropескоструйной операции (очистке) были обработаны все поверхности корпусов, т.е. при подаче водяной струи под высоким давлением с абразивом, не повреждая тем самым корпус, были удалены мелкие загрязнения, стружка. При электрополировке с учетом заранее разработанной специальной инструкции были обработаны усиливающие профили для ТТ в целях повышения коррозионной стойкости, а также защиты отдельных поверхностей от загрязнений и различных химических веществ. В зонах прижатия тепловой трубы к основанию корпуса на подготовленные участки был нанесен почти прозрачный слой теплопроводной пасты «Keratherm» толщиной не более 0.05 мм. Заявленный производителем коэффициент теплопроводности пасты  $\lambda = 8-10 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ . Такая толщина необходима в целях уменьшения термосопротивлений на тепловом переходе между корпусами ППМ и тепловыми трубами.

При изготовлении корпусов для тепловых макетов были обеспечены шероховатость посадочных мест под тепловые трубы не хуже Ra 0.8, плоскостность с допусками  $0.05^{+0.01}_{-0.03}$  мм, а также разработаны дополнительные усиленные места для крепления тепловых труб к основанию корпуса и их плотной фиксации, обеспечивающие выдерживание в будущем различных динамических нагрузок в составе ППМ АФАР (рис. 3).

### Электромонтаж

На основании тепловой и принципиальной электрической схем перед проведением объемного монтажа тепловых макетов было подго-



Рис. 2. Внешний вид одного из тепловых макетов в процессе механической (фрезерной) обработки

товлено по четыре малогабаритных электронных SMD-элемента – пленочные резисторы MP725. Эти резисторы с низким профилем обеспечивают мощность каждого до 25 Вт при комнатной температуре +25°C. Корпус MP725, выполненный по типу D-ПАК, имеет основание в виде медной подложки (1 мм), которая удобна для установки резисторов методом пайки, а также служит основанием для отведения тепла. В зависимости от заранее заданных уровней мощности, теплонагруженные элементы (укрупненные резисторы) были подобраны таким образом, чтобы в связке с источником подаваемой мощности они работали по типу каскада, выполняя на отдельных узлах определенную функцию. Другими словами, необходимо было создать на каждом участке корпуса ППМ определенную мощность тепловыделения. Кроме MP725 в тепловых макетах были применены восемь резисторов в корпусе AXIAL по типу RFP. Эти резисторы отличаются компактным исполнением (2.5×5 мм) и достаточной мощностью рассеивания (до 50 Вт).

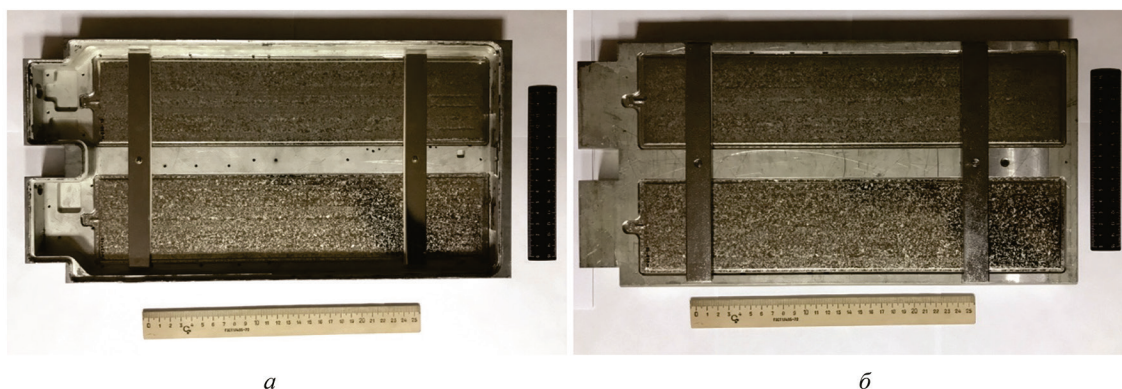


Рис. 3. Корпуса для тепловых макетов после монтажа тепловых труб с внутренней (а) и внешней (б) сторон. Внешний вид

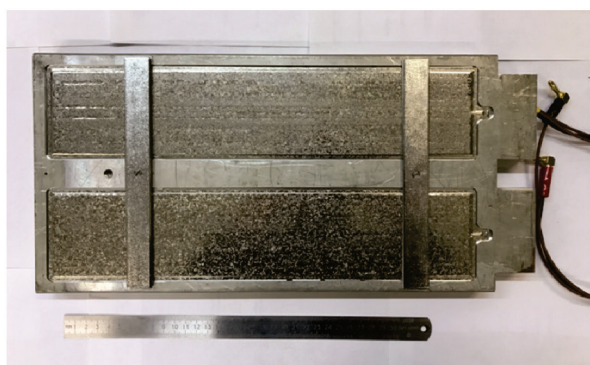
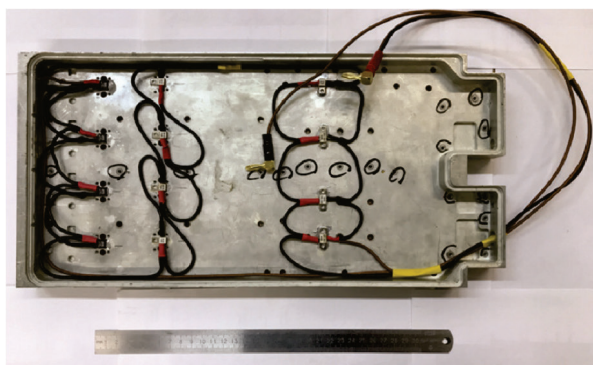


Рис. 4. Вариант конструкции 1 с внешним расположением тепловой трубки

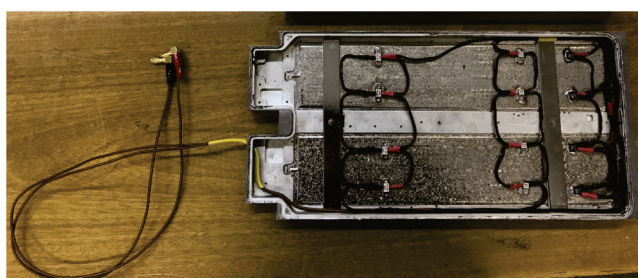


Рис. 5. Вариант конструкции 2 с внутренним расположением тепловой трубки

Суммарная мощность тепловыделения резисторов МР725 для каждого теплового макета составляет 40 Вт, RFP – также 40 Вт. Таким образом, суммарная мощность тепловыделения резисторов R1–R12 составляет 80 Вт, что соответствует суммарной мощности тепловыделения аналогичного ППМ.

Для варианта конструкции 1 установка резисторов производилась при помощи оловянно-свинцово-кадмиевого припоя ПОСК 50-18 ГОСТ 21930–76 с температурой плавления 145°C и жидкого флюса, который в большинстве случаев применяется для деталей, чувствительных к перегреву. Для варианта конструкции 2 установка резисторов производилась непосредственно на тепловые трубы, в связи с чем было принято решение использовать припой ПОИН 52 с низкой температурой плавления (порядка 130°C).

Отличительной особенностью второго варианта конструкции является то, что при установке резисторов на тепловые трубы создается сложность в нагреве припоя. Разрешенная температура нагрева тепловых труб составляет 100°C, после чего может произойти понижение эффективности их работы с последующей разгерметизацией. В связи с этим было принято решение нагревать тепловую трубу на термо-

столе до разрешенной температуры и доводить температуру плавления припоя ПОИН 52 точно, т.е. непосредственно в месте установки резисторов. Данная операция проводилась при помощи паяльной станции с выставлением нужной температуры паяльника с острым жалом.

Соединение резисторов выполнено по параллельной схеме подключения. Для проведения объемного монтажа применялся медный посеребренный провод с пленочной изоляцией типа МП 37-12 ТУ 16.505.191. Соединение проводов с резисторами осуществлялось при помощи припоя Прв КР2 ПОССу-61-0,5 ГОСТ 21931–76 с жидким флюсом, после чего места пайки были защищены трубкой типа ТВ-40 ГОСТ 19034–82. Жгуты электрического монтажа были закреплены по месту в отдельных точках клеем ВК-9.

Конструктивное исполнение тепловых макетов (рис. 4 и 5) выполнено по аналогии с конструктивным исполнением ППМ. Внутреннее устройство закрывается термопластичной прозрачной пластиковой крышкой (оргстеклом).

### Испытание тепловых макетов

Проведены расчеты для оценки эффективности охлаждения изготовленных с использованием плоских тепловых труб тепловых макетов, а также проведена проверка эффективности предложенных вариантов конструкций на тепловых макетах ППМ АФАР.

Для проведения испытаний использовался источник постоянного тока QJ3050E 30V-20A, к которому поочередно присоединялись тепловые макеты. Для измерения температуры были выбраны контактный измеритель температуры UT322 и портативный тепловизор Testo 865 с разрешением экрана 160×120. Для каждого

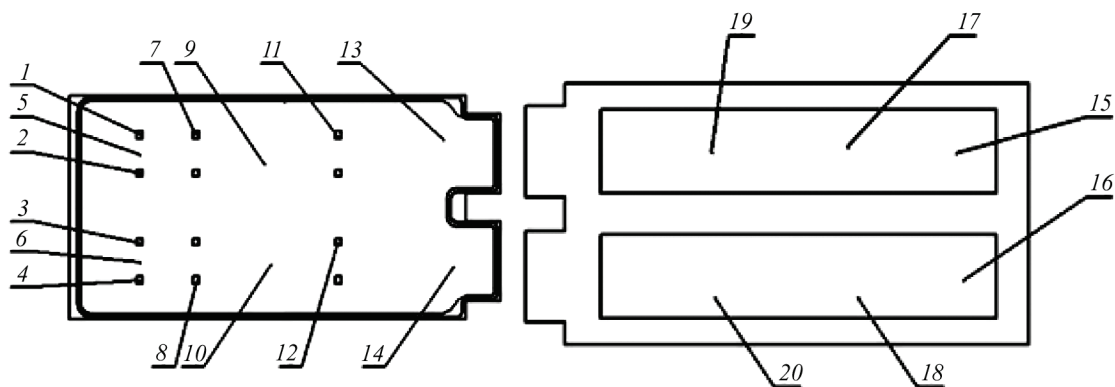


Рис. 6. Вариант конструкции 1 с внешним расположением тепловой трубки. Схема расположения контрольных точек

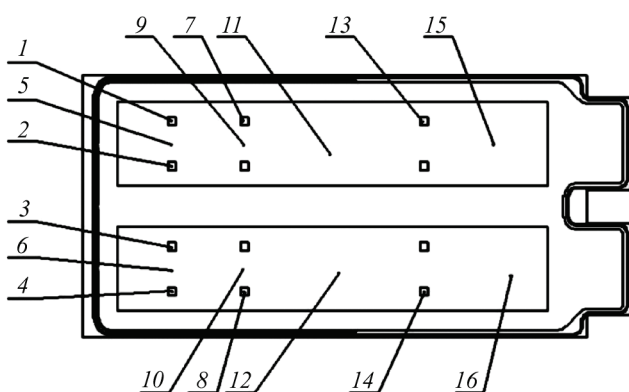


Рис. 7. Вариант конструкции 2 с внутренним расположением тепловой трубки. Схема расположения контрольных точек

материала был задан свой коэффициент излучения  $\epsilon$ . Все средства измерения имеют свидетельства, подтверждающие сроки поверки и аттестации. В связи с тем, что корпус теплового макета имеет покрытие сплавом олово–висмут, являющимся сильным отражателем длинноволнового инфракрасного излучения с низким  $\epsilon$ , что сильно затрудняет определение температуры, было принято решение приклеить к измеря-

емому объекту на отдельных участках термостойкую полиамидную ленту ( $\epsilon = 0.95$ ) с рабочей температурой до  $300^{\circ}\text{C}$ , обеспечив тем самым расположение контрольных точек для измерения температуры (рис. 6 и 7). Для основных тепловыделяющих элементов по данным нормативных источников был задан коэффициент излучения  $\epsilon = 0.97$ .

При проведении исследований номинальная погрешность измерения напряжения источника постоянного тока QJ3050E 30V-20A составила  $\pm 0.4$  В, контактного измерителя температуры UT322 –  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  и тепловизора Testo 865 –  $\pm 0.12^{\circ}\text{C}$ .

Были проведены два варианта испытаний тепловых макетов – при установке жидкостного теплообменника с внешней стороны корпуса в зоне конденсации и в зоне испарения тепловой трубки (рис. 8). При этом макеты располагались вертикально, под углом  $55^{\circ}$  и горизонтально.

Тепловые макеты испытывались при подаваемой мощности 85 Вт.

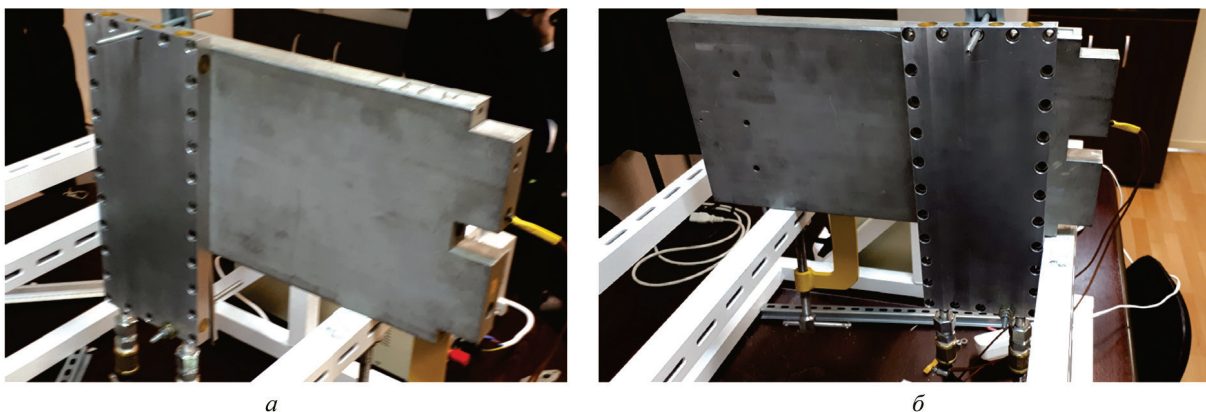


Рис. 8. Вариант крепления жидкостного теплообменника с внешней стороны корпуса ППМ в зонах испарения (а) и конденсации (б) ТТ

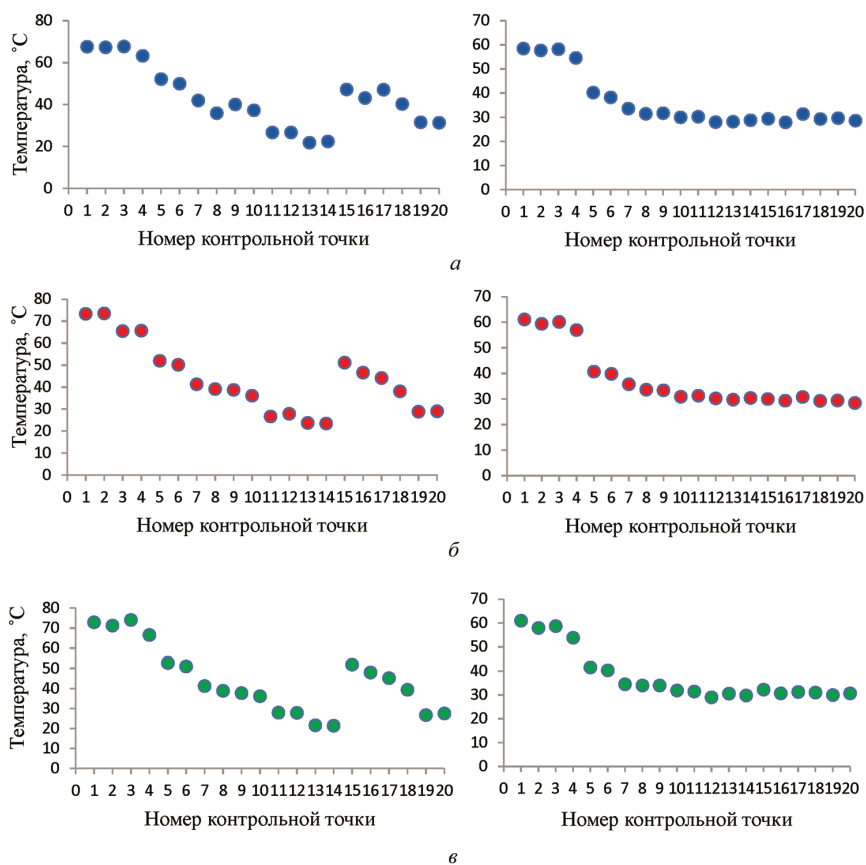


Рис. 9. Измеренные температуры варианта конструкции 1 с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (слева) и в зоне испарителя (справа): *a* – при горизонтальном расположении; *б* – при угле наклона 55°; *в* – при вертикальном расположении

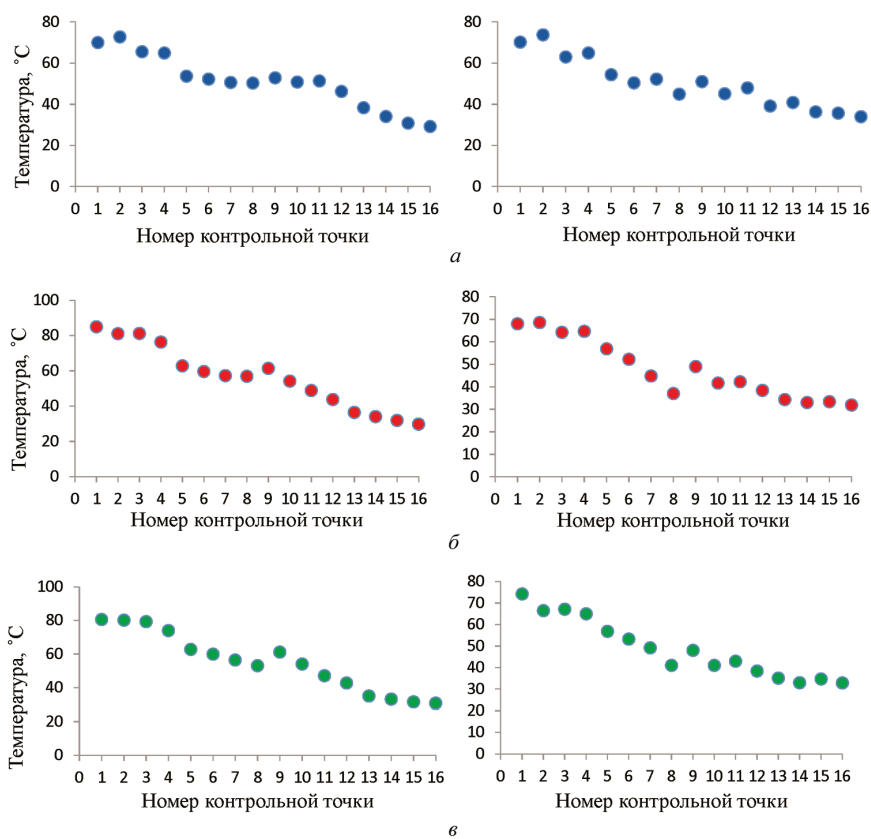


Рис. 10. Измеренные температуры варианта конструкции 2 с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (слева) и в зоне испарителя (справа): *a* – при горизонтальном расположении; *б* – при угле наклона 55°; *в* – при вертикальном расположении

На рис. 9 и 10 показаны измеренные в контрольных точках температуры для обоих вариантов конструкции при их различной ориентации в пространстве.

Максимальный нагрев зафиксирован в первой группе контрольных точек (с 1 по 6). Вторая (с 7 по 12) и третья (с 13 по 20, см. рис. 6 и с 13 по 16, см. рис. 7) группы нагреваются незначительно. Более эффективным является вариант расположения теплообменника в зоне испарения тепловых труб (в передней части макета) – в непосредственной близости от источника максимального тепловыделения.

Тепловой макет с вариантом конструкции 2 оказался менее эффективным с позиции теплоотвода.

Для определения эффективности работы тепловых труб были проведены испытания, в которых вместо тепловых труб установлены аналогичные по габаритам медные пластины (рис. 11). Использован корпус теплового макета с вариантом конструкции 1. Испытания проводились для аналогичных мощностей тепловыделения в контрольных точках для двух вариантов расположения теплообменника: в зоне конденсации и в зоне испарения (рис. 12).

### Выводы

Изготовлены варианты конструкции и проведены испытания тепловых макетов для организации эффективного локального охлаждения и перераспределения тепла в типовом модуле АФАР с применением плоских тепловых труб. Монтаж теплонагруженных элементов пайкой обеспечивает хороший тепловой контакт источника тепла и корпуса, а тепловые трубы в составе конструкции корпусов приемо-передающих модулей обеспечивают надежный тепловой контакт между корпусом и теплообмен-



Рис. 11. Вариант конструкции 1 с внешним расположением медных оснований

ником. Плоские тепловые трубы обеспечивают более эффективный отвод тепла по сравнению с медными пластинами во всех вариантах пространственного расположения теплового макета, включая вертикальное расположение и работу против сил гравитации. В рассматриваемых конструкциях применение тепловых труб является одним из наиболее предпочтительных вариантов реализации системы охлаждения, так как расстояние между приемо-передающими модулями в системах высокочастотного диапазона оказывается чрезвычайно малым, и реализация, например, воздушного охлаждения, может быть затруднительна. Применение встроенных тонких каналов жидкостного охлаждения в корпусах приемо-передающих модулей потенциально может быть альтернативой к предлагаемому решению, однако требует применения сложных технологических способов изготовления, например методами 3D-печати [21]. Сопоставление эффективности альтернативных

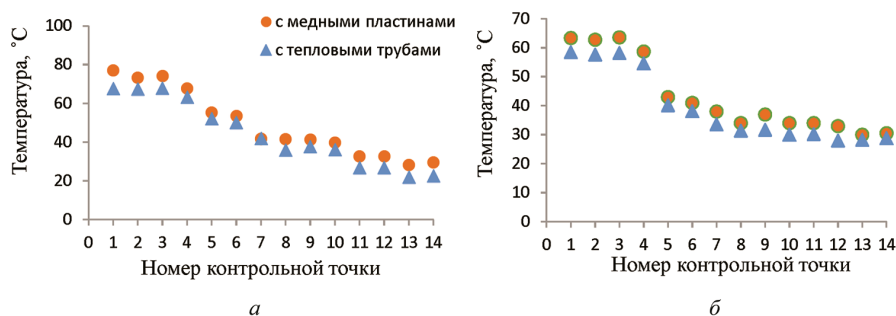


Рис. 12. Измеренные температуры варианта конструкции 1 с тепловыми трубами и с аналогичными им по размерам медными пластинами с жидкостным охлаждением в зоне конденсации (а) и в зоне испарителя (б)



методов реализации систем охлаждения приемо-передающих модулей является задачей для дальнейшей работы авторов в области исследований и разработок теплоотводящих конструкций ЛА.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Крахин О.И., Радченко В.П., Венценовцев Д.Л. Методы создания системы отвода тепла теплонагруженных частей ФАР // Радиотехника. 2011. №10. С. 88–94.
2. Докучаев А.Е., Зинчук А.А. Экспериментальное исследование применения тепловой трубы в газогенераторе // Вестник Московского авиационного института. 2011. Т. 18. № 3. С. 89–96.
3. Амелин А.Н., Брунов Г.А., Иванов Н.Н., Ковалев В.С., Мошнеев А.А., Пичхадзе К.М., Полищук Г.М., Федоров О.С., Четверик В.Н. Космический аппарат и секция антенной фазированной решетки. Патент RU2333139C2. 2006. 21 с.
4. Parlak M., McGlen R.J. Cooling of high power active phased array antenna using axially grooved heat pipe for a space application // 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST), Istanbul. 2015. P. 743–748. DOI: 10.1109/RAST.2015.7208439
5. Крахин О.И., Радченко В.П. Проблемы теплоотвода приемо-передающих модулей и АФАР с высоким уровнем мощности // Сб. трудов XVII International conference magnetism, long and short-range spin-spin interaction 17, Москва, МЭИ (ТУ). 2009. С. 172–177.
6. Döring B.J. Cooling System for a Ka Band Transmit Antenna Array // Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Final Report IB554-06/02, 2005, 82 p.
7. Greda L.A., Dreher A. Tx-terminal phased array for satellite communication at Ka-band // 2007 European Microwave Conference. Munich. 2007. P. 266–269. DOI: 10.1109/EUMC.2007.4405177.
8. Li Y., He J., He H., Yan Y., Zeng Z., Li B. Investigation of ultra-thin flattened heat pipes with sintered wick structure // Applied Thermal Engineering. 2015. 86. P. 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.027>
9. Hack N., Unz S., Beckmann M. Ceramic heat pipes for high temperature application // Energy Procedia. 2017. V. 120. P. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.147>
10. Maydanik Y. Loop heat pipes // Applied Thermal Engineering. 2005. V. 25(5–6). P. 635–657. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010>
11. Reay D., Kew P. Heat Pipes – Theory, Design and Applications. Oxford OX2 8DP, USA: Butterworth-Heinemann, 2006. 397 p.
12. Khairnasov S., Naumova A. Heat pipes application in electronics thermal control systems // Frontiers in Heat Pipes. 2015. V. 6. Iss. 6. P. 1–14. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>.
13. Сайт проекта «Military embedded systems». <http://mil-embedded.com/eletter-products/break-thermal-barriers-in-radar-and-ew-system-with-thermacore-thermal-management-technologies/> (дата обращения 17 апреля 2019).
14. Zhang Wenxing, Wu Qiang, Zhao Shuwei. Thermal design of t/r modules in airborne phased array antenna // Proceedings of the 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference, 2017, pp. 415–418. DOI: 10.2991/jimec-17.2017.91
15. Синани А.И., Мосейчук Г.Ф., Князев В.М., Агеев П.А., Наркевич А.Л., Васин А.М., Седов В.В., Ломовская Т.А. Самолетная антенная решетка. Патент RU2453955. 2012.
16. Синани А.И., Мосейчук Г.Ф., Ломовская Т.А., Агеев П.А., Васин А.М., Седов В.В., Наркевич А.Л., Поляков В.Б., Давиденко А.Н. Самолетная антенная решетка. Патент RU2439758. 2012.
17. Павлов Д.В., Петров Д.С. Использование метода трехстадийной декомпозиции для моделирования системы терморегулирования космического аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2015. Т. 22. № 2. С. 42–54.
18. Nikolaenko Y.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F., Rohachov V.A. Improving air cooling efficiency of transmit/receive modules through using heat pipes // Thermal Science and Engineering Progress. 2019. V. 14. P. 100418. DOI:10.1016/j.tsep.2019.100418
19. Братчиков А.Н., Гордейчук Д.В., Орлов А.П. Оптические методы управления фазированными антенными решетками // Вестник Московского авиационного института. 2001. Т. 8. № 1. С. 74–82.
20. Малахов Р.Ю. Усилители мощности цифровых антенных решеток бортовых радиоэлектронных систем // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 1. С. 135–142.
21. Рабинский Л.Н., Токмаков Д.И., Соляев Ю.О. Изготовление корпуса приемо-передающего модуля АФАР со встроенными каналами охлаждения с использованием технологии SLM // СТИН. 2019. № 4. P. 11–14.

## Manufacturing and testing of the experimental models of transmit-receive modules of an active phased antenna array, made with flat pate heat pipes

P.O. Polyakov<sup>1</sup>, R.V. Goryunov<sup>2</sup>, Y.O. Solyaev<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993, Russia*

<sup>2</sup> *Public Joint Stock Company Radiophysics, Moscow, 125480, Russia*

<sup>3</sup> *Institute of Applied Mechanics RAS, Moscow, 125040, Russia*

*e-mail: p.o.polyakov@yandex.ru; radiofizika01@mail.ru; yurysolyaev@ya.ru*

Modern high-power and high-frequency radar systems require the development of new compact cooling systems with improved operating parameters. This paper presents a manufacturing technique and test results for the thermal models of transmit-receive modules (TPM) of an active phased antenna array in which the two-stage cooling system is realized. Two variants of

X-band modules with built-in flat plate heat pipes used as heat-spreading elements and located outside the casing of TPM or inside under the radio-electronic cell are considered. The tests were carried out under the conditions of usage of the external liquid-based cooling system at various angles of inclination of thermal models relative to the direction of gravity. Based on the test results, the change in the heating temperature of the active electronic elements of the module and of the surface of heat pipes was determined. Tests have shown the possibility of using of the flat plate heat pipes with a thickness of 2.2 mm for cooling a TPM with a total heat release power of 80 W even under the action of gravity. Maximum temperature of the electronic elements was not higher than allowable 75°C and 80°C for the cases of horizontal and inclined orientation of the models, respectively. To determine the efficiency of the heat pipes, a comparison was made, in which instead of heat pipes the solid copper plates of the same thickness and in-plane size were installed. Improvement of the cooling performance of the system with mounted heat pipes is shown and validated experimentally.

**Keywords:** flat heat pipe, transceiver module, active phased antenna array, thermal model, thermal tests.

## REFERENCES

1. **Krahin O.I., Radchenko V.P., Ventsenostsev D.L.** Metody sozdaniya sistemy otvoda tepla teplonagruzhennykh chastej FAR [Methods of creation of heat removal system of phased array antenna heatloaded parts]. *Radiotekhnika – Radioengineering*, 2011, no.10, pp. 88–94. In Russ.
2. **Dokuchaev A.E., Zinchuk A.A.** Eksperimental'noe issledovanie primeneniya teplovoj trubyy v gazogeneratore [Experimental study of the use of a heat pipe in a gas generator]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Aerospace MAI Journal*, 2011, vol. 18, no. 3, pp. 89–96. In Russ.
3. **Amelin A.N., Brunov G.A., Ivanov N.N., Kovalev V.S., Moiseev A.A., Pichkhadze K.M., Polishchuk G.M., Fedorov O.S., Chetverik V.N.** *Kosmicheskij apparat i sektsiya antennoj fazirovannoj reshetki* [Spacecraft and phased array antenna section]. Patent RU, no. 2333139, 2006, 21 p.
4. **Parlak M., McGlen R.J.** Cooling of high power active phased array antenna using axially grooved heat pipe for a space application. *7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST)*, Istanbul, 2015, pp. 743–748. DOI: 10.1109/RAST.2015.7208439.
5. **Krakhin O.I., Radchenko V.P.** Problemy teplootvoda priyomo-peredayushhikh modulej i AFAR s vysokim urovnem moshhnosti [Problems of heat dissipation of transmit-receive modules and AFAR with a high power level]. Proc. of XVII International conference. Magnetism, long and short-range spin-spin interaction, Moscow, MPEI, 2009, pp. 172–177. In Russ.
6. **Döring B.J.** *Cooling system for a Ka band transmit antenna array*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.: Final Report IB554-06/02, 2005, 82 p.
7. **Greda L.A., Dreher A.** Tx-terminal phased array for satellite communication at Ka-band. *2007 European Microwave Conference*, Munich, 2007, pp. 266–269, DOI: 10.1109/EUMC.2007.4405177.
8. **Li Y., He J., He H., Yan Y., Zeng Z., Li B.** Investigation of ultra-thin flattened heat pipes with sintered wick structure. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 86, pp. 106–118. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.027>
9. **Hack N., Unz S., Beckmann M.** Ceramic heat pipes for high temperature application. *Energy Procedia*, 2017, vol. 120, pp. 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.147>
10. **Maydanik Y.** Loop heat pipes. *Applied Thermal Engineering*, 2005, vol. 25, no. 5–6, pp. 635–657. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.07.010>
11. **Reay D., Kew P.** *Heat pipes – theory, design and applications*. Oxford OX2 8DP, USA: Butterworth-Heinemann, 2006. 397 p.
12. **Khairnasov S., Naumova A.** Heat pipes application in electronics thermal control systems. *Frontiers in Heat Pipes*, 2015, vol. 6, pp. 1–14. <http://dx.doi.org/10.5098/fhp.6.6>.
13. **Military embedded systems**. <http://mil-embedded.com/eletter-products/break-thermal-barriers-in-radar-and-ew-system-with-thermacore-thermal-management-technologies/> (accessed 17.04.2019).
14. **Zhang Wenxing, Wu Qiang, Zhao Shuwei.** Thermal design of T/R modules in airborne phased array antenna. *Proceedings of the 2nd Joint International Information Technology, Mechanical and Electronic Engineering Conference*, 2017, pp. 415–418. DOI: 10.2991/jimec-17.2017.91
15. **Sinani A.I., Moseichuk G.F., Knyazev V.M., Ageev P.A., Narkevich A.L., Vasin A.M., Sedov V.V., Lomovskaya T.A.** *Samoletnaya antennaya reshetka* [Aircraft antenna array]. Patent RU 2453955, 2012, 7 p.
16. **Sinani A.I., Moseichuk G.F., Lomovskaya T.A., Ageev P.A., Vasin A.M., Sedov V.V., Narkevich A.L., Polyakov V.B., Davidenko A.N.** *Samoletnaya antennaya reshetka* [Aircraft antenna array]. Patent RU 2439758, 2012, 6 p.
17. **Pavlov D.V., Petrov D.S.** Ispol'zovanie metoda trekhstadijnoj dekompozitsii dlya modelirovaniya sistemy termoregulirovaniya kosmicheskogo apparata [Using the three-stage decomposition method for modeling the thermal control system of a spacecraft]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Aerospace MAI Journal*, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 42–54. In Russ.
18. **Nikolaenko Y.E., Baranyuk A.V., Reva S.A., Pis'mennyi E.N., Dubrovka F.F., Rohachov V.A.** Improving air cooling efficiency of transmit/receive modules through using heat pipes. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2019, vol. 14, p. 100418. DOI:10.1016/j.tsep.2019.100418
19. **Bratchikov A.N., Gordeichuk D.V., Orlov A.P.** Opticheskie metody upravleniya fazirovannymi antennymi reshetkami [Optical control methods for phased antenna arrays]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Aerospace MAI Journal*, 2001, vol. 8, no. 1, pp. 74–82. In Russ.

20. **Malakhov R.Yu.** Usiliteli moshhnosti tsifrovyykh antennoykh reshetok bortovyykh radioelektronnykh sistem [Power amplifiers for digital antenna arrays of onboard radio electronic systems]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta – Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 1, pp. 135–142. In Russ.
21. **Rabinsky L.N., Tokmakov D.I., Solyaev Yu.O.** Izgotovlenie korpusa priemo-peredayushhego modulya AFAR so vstroennymi kanalami okhlazhdeniya s ispol'zovaniem tekhnologii SLM [Manufacturing of the housing of the AFAR transceiver module with built-in cooling channels using SLM technology]. *STIN*, 2019, no. 4, pp. 11–14. In Russ.