

Система термостабилизации в приемо-передающей аппаратуре

Л. В. Глазунова

Аспирант Донского государственного технического университета,
г. Ростов-на-Дону

Введение.

Приемо-передающая аппаратура входит в состав активной фазированной антенной решетки (АФАР). Увеличение мощностей АФАР при общей тенденции уменьшения массогабаритных характеристик требует внедрения новых конструктивно-технологических решений, направленных на стабильную работу устройств. Важным фактором в обеспечении заданных электрических параметров АФАР является поддержание температуры приемо-передающей аппаратуры в диапазоне $0...70^{\circ}\text{C}$. При этом необходимо учесть, что работу системы термостабилизации серьёзно усложняет высокая плотность упаковки элементов АФАР, сопряжённая с эксплуатацией устройства при пониженном атмосферном давлении (до 0,2 атм.) и высокой амплитудой колебания температуры окружающего воздуха ($-50...+65^{\circ}\text{C}$).

Технология АФАР имеет одну ключевую проблему. Из-за недостатков микроволновых транзисторных усилителей эффективность передатчика модуля — типично меньше чем 45 %. В результате АФАР выделяет большое количество теплоты, которая должна быть рассеяна. Традиционное охлаждение воздухом, используемое в авиатехнике, плохо подходит при высокой плотности упаковки элементов АФАР, в результате чего современные АФАР охлаждаются жидкостью [1]. Однако труднодоступное расположение тепловыделяющих элементов внутри герметизированных модулей вызывает сложность в обеспечении подачи жидкости к тепловыделяющему элементу и организации подключения трубопровода модуля к магистрали СТС. Кроме этого, в случае отказа блока невозможно оперативно выполнить его замену из-за необходимости остановки функционирования СТС и отключения её от модуля. Существует вероятность попадания охлаждающей жидкости на аппаратуру, что может привести к выходу ее из строя. Поэтому применена двухконтурная система термостабилизации приемо-передающей аппаратуры, основанной на жидкостном и испарительно-конденсационном методах охлаждения. Принцип работы системы изображен на рис. 1.



Рис. 1. Структурная схема отвода тепла двухконтурной СТС бортовой АФАР

Целью работы является разработка нового эффективного способа термостабилизации приемо-передающей аппаратуры наряду с повышением технологичности обслуживания АФАР и уменьшением массогабаритных характеристик.

Конструкция двухконтурной СТС приемо-передающей аппаратуры.

АФАР включает более 500 приемо-излучающих модулей, аппаратуру обработки сигнала и систему электропитания. АФАР имеет 4500 теплонагруженных элементов по 10-20 Вт каждый.

Тепловые трубы (ТТ), образующие испарительно-конденсационный контур модулей, соединяют пространственно разделенные источник теплоты (сверхмощные транзисторы) и сток теплоты (холодную плиту, прилегающую к радиатору жидкостного охлаждения), а также электрически изолирует корпус от транзисторов с помощью компаунда и лакового покрытия поверхности ТТ без компаунда [2]. Жидкость ОЖ-65 является диэлектриком. Так, с помощью тепловых трубок, встроенных в корпус модулей, исключена возможность утечки охлаждающей жидкостью в блоке.

В процессе разработки первого контура было учтено, что тепловая мощность от источников тепла должна отводиться при наименьшем переходном сопротивлении с температурным градиентом не менее 15 °С. Конструкция блоков и модулей спроектирована так, что зоны испарения и конденсации тепловых труб составляют 4-5 см² каждая. Для минимизации зазора между тепловыделяющими элементами и тепловыми трубами, а также уменьшения теплового сопротивления их сопрягаемые поверхности обработаны тонким слоем термопроводящей пасты (рис. 2).

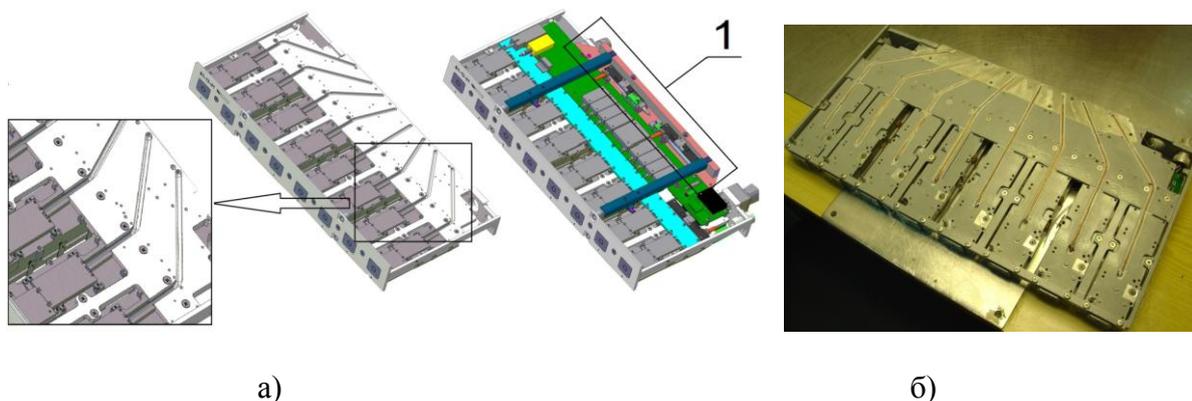


Рис. 2. Приемо-передающий модуль
(а – объемная модель; б – изготовленный модуль)

Расчет и проектирование. По результатам тепловых расчетов, проведенных автором на основе методики, описанной в [3], и в ходе испытаний макета модуля установлено, что в зоне охлаждения отвод тепла неэффективен (градиент температур более 20 °С) из-за недостаточного контакта корпуса модуля и тепловых труб, уложенных в фрезерованный канал (рис. 2, а), и большим тепловым сопротивлением на участке между охлаждаемой панелью макета и радиатором СТС, более 0,1 К/Вт. Для устранения вышеперечисленных недостатков в конструкцию блока включена дополнительная панель 1 на рис. 5б, что уменьшило тепловое сопротивление до 0,05 К/Вт и градиент температур до 15°С.

Особенностью второго контура является решение совместной задачи теплообмена и гидравлического сопротивления с нахождением их характеристик. Также решается вопрос о технологичности конструкции и удобства в эксплуатации. Расположение штуцеров для входа и выхода охлаждающей жидкости выполнено в нижней части радиатора СТС, что исключает попадание жидкости на аппаратуру.

СТС спроектирована так, что тепло, переданное тепловыми трубами, от охлаждаемой панели передается на радиатор СТС и отводится охлаждающей

жидкостью, циркулирующей по П-образному каналу. Тепловой поток второго контура можно рассчитать по формуле [4]:

$$Q = \alpha(Pe, Re, Pr, Gr) S \Delta t, \quad (1)$$

где α - коэффициент теплообмена, Вт/(м К); Pe - критерий Пекле, являющийся мерой отношения конвективного и молекулярного переноса тепла в потоке жидкости; Re - критерий Рейнольдса, характеризующий скорость и режим течения жидкости; Pr - критерий Прандтля, характеризующий физические свойства среды; Gr - критерий Грасгофа, характеризующий соотношение подъемной и вязкой сил при свободной конвекции в потоке жидкости; S - площадь поверхности теплообмена, м²; Δt - перепад температур между изотермическими поверхностями, °С.

По формуле (1) тепловой поток зависит от многих факторов. Из-за эксплуатационных и технологических ограничений можно варьировать только скоростью охлаждающей жидкости и площадью теплосъема.

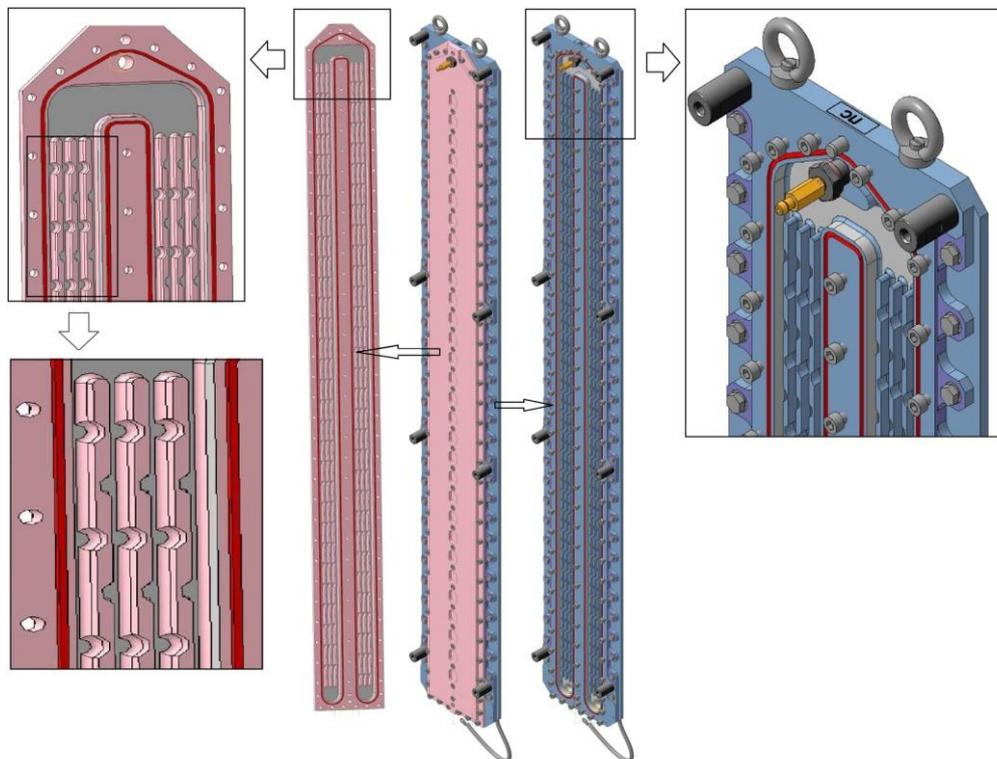


Рис. 3. Радиатор СТС АФАР

Для увеличения теплообмена необходимо уменьшить толщину ламинарного слоя или исключить его. Поэтому радиаторы спроектированы так, что потоки жидкости, попадающие в выборки (рис. 3), меняют направление движения по нормали к поверхности, перемешивая пограничный турбулентный слой с ламинарным. Кроме того, геометрия канала не усложняет процесс изготовления, что позволяет производить обработку одним инструментом, с минимальным количеством операций, повышая общую технологичность деталей.

Решая совместную задачу теплообмена и гидравлического сопротивления [5], получим следующие характеристики: для отведения радиатором СТС тепловой

мощности до 2500 Вт гидравлические потери в канале не должны превышать 0,2 МПа. Гидравлическое сопротивление определяется условиями движения охлаждающей жидкости и особенностями конструкции радиаторов СТС (см. рис. 3). По результатам расчетов и испытаний сопротивление радиаторов СТС на 30 блоков равно 0,02 МПа, а на 32 блока – 0,03 МПа, что не превышает допустимые значения, при этом температура в модулях не превышает 70 °С.

Площадь поверхности теплообмена радиатора на 30 блоков за счет добавления ребер охлаждения увеличилась с 0,229 м² до 0,437 м²; на 32 блока - с 0,273 м² до 0,503 м². В АФАР входит два радиатора СТС на 30 блоков и один - на 32 блока. Таким образом, теплоотвод стал эффективнее на 42%.

Общий вид фрагмента АФАР с двухконтурной СТС представлен на рис. 4.

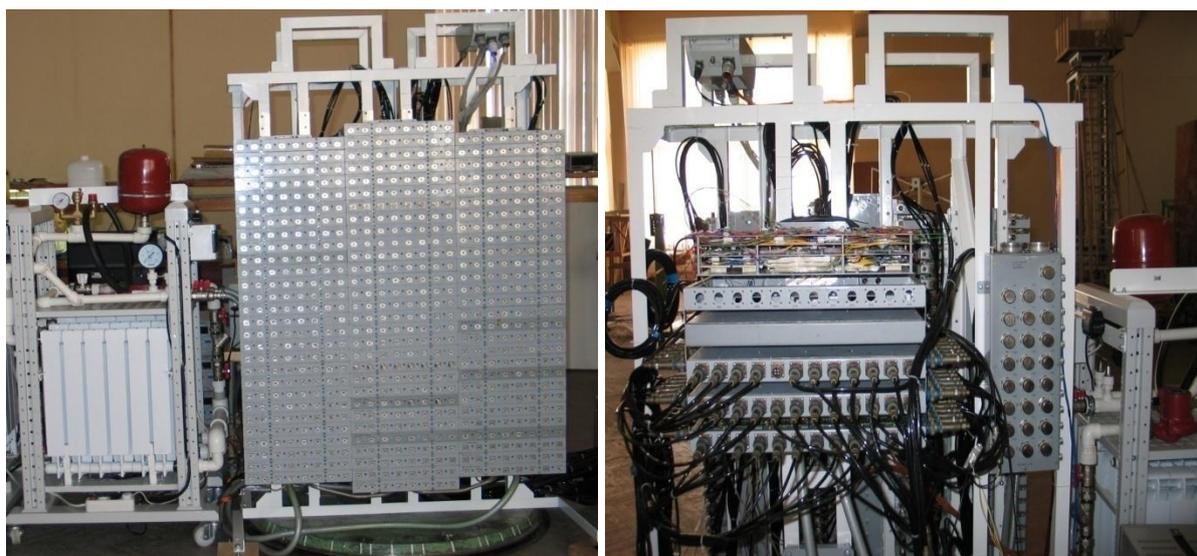


Рис. 4. Испытание фрагмента АФАР
(слева – вид спереди, справа – вид сзади)

Эксперимент.

Для заключения об эффективности принятых конструктивно-технологических решений проведены испытания фрагмента АФАР. Автором разработаны методика и программа испытаний и стенд «Система жидкостного охлаждения», который имитирует работу реальной системы термостабилизации АФАР (см. рис. 4, слева). Принципиальная схема стенда изображена на рис. 5. Получены следующие значения: при температуре жидкости 25±1 °С, расходе 25 л/мин, гидравлическое сопротивление равно радиаторов СТС на 30 блоков равно 0,02 МПа, а на 32 блока – 0,03 МПа, при этом температура в модулях не превышает 80 °С.

Сравнивая результаты расчетов и эксперимента, получены различия в температурах блока. Это, скорее всего, является следствием недостаточно точного моделирования условий контакта или технологических недостатков: большей шероховатости и зазора между сопрягаемыми контактами. Тем не менее, полученные значения температур не превышают допустимые по техническому заданию.

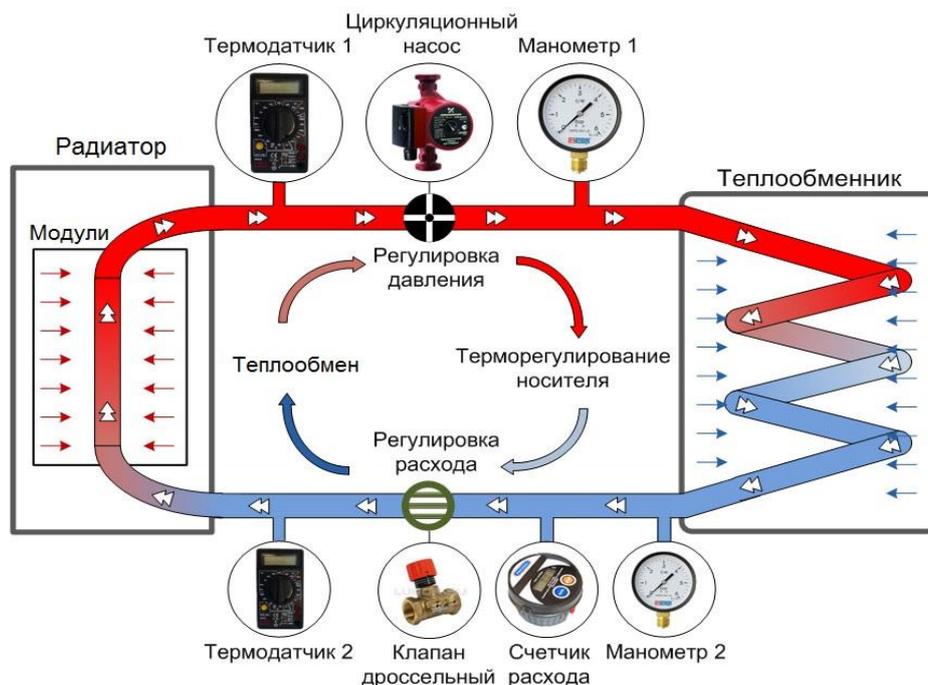


Рис. 5. Стенд для испытаний «Система жидкостного охлаждения»

Выводы:

1. Ряд конструктивно-технологических преимуществ перед аналогами СТС с жидкостным охлаждением: разработанная СТС является эффективным теплоотводом и обладает диэлектрическими свойствами. Применение разработанной системы позволяет: охлаждать бортовую аппаратуру, эксплуатирующуюся в суровых климатических условиях, при пониженном атмосферном давлении; уменьшить массу на 30%, сократить габариты блоков; повысить ремонтпригодность и обслуживание АФАР.

2. Проведенные расчеты и испытания в части гидравлического сопротивления и охлаждения фрагмента АФАР с использованием имитатора системы жидкостного охлаждения, позволяют утверждать, что применение двухконтурной системы термостабилизации, основанной на испарительно-конденсационном и жидкостном методах охлаждения, является эффективным способом отвода тепла.

Литература

1. И. В. Глушицкий, И. И. Зайченко, Л. М. Лапин, В. Ф. Холодов. Проблемы отвода тепла в элементах активных антенных решеток. — Научные технологии, 2005, т. 6, № 2.
2. John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V. A heat transfer textbook. — 3rd. ed. — Cambridge, MA: Phlogiston Press, c2003. — p.760.
3. А. Н. Соловьев, Л. В. Глазунова. Моделирование процесса охлаждения РЭА в SolidWorks // Вестник ДГТУ, 2010. — Т.10 №4 (47) — С. 446-473.
4. И.Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. — М., «Машиностроение», 1995. — 559 с.
5. Гидродинамика и тепломассообмен с поверхностью раздела / Л.П. Холпанов, В.Я. Шкадов. — М.: Наука. — 1990. — 271 с.