

## ПРОБЛЕМА ТЕПЛОТВОДА ПРИЁМО-ПЕРЕДАЮЩИХ МОДУЛЕЙ И АФАР С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ ТЕПЛООВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О.И. Крахин,

Московский авиационный институт (ГТУ)

В.П. Радченко

ОАО "Радиофизика"

*Рассматривается проблема обеспечения охлаждения ФАР при высокой плотности теплового потока (более 100 Вт/см<sup>2</sup>), что особенно важно при переходе в более высокий частотный диапазон, когда габариты элементной базы и соответственно модулей уменьшаются, а тепловыделения практически не меняются. Проведён анализ возможности построения жидкостной системы на основе ряда жидкостей, в том числе специально синтезируемых и не традиционных. Рассмотрены возможности применения в жидкостной системе пьезокерамических микронасосов. Установлено, что замкнутая жидкостная система на основе жидкости, обладающей высокой теплопроводностью (температуропроводностью) может обеспечивать тепловой режим при плотности теплового потока  $q$  более 200 Вт/см<sup>2</sup>.*

*Анализ испарительных систем, показал, что в условиях действия гравитационного поля требуется тщательный подход при выборе рабочей жидкости и конструкции пористого фитиля с учетом влияния гравитации.*

*Выполнены исследования образцов керамических материалов с высокой относительной пористостью с целью их применения в качестве пористого фитиля испарительных систем.*

ФАР в отличие от других типов антенн включают в себя элементы РЭА, в которых лишь несколько процентов подводимой мощности расходуется на полезное преобразование сигнала, а остальная часть выделяется в виде тепловой энергии.

Поэтому в АР важной является задача обеспечения требуемого температурного режима. С этой целью предусматривается охлаждение, что приводит к увеличению веса и габаритов. В зависимости от плотности теплового потока, т. е. теплового потока, проходящего через единицу поверхности элементов или блоков применяются те или другие системы охлаждения. При переходе в более высокий частотный диапазон габариты элементной базы и соответственно модулей уменьшаются, а тепловыделения практически не меняются. Поэтому плотности теплового потока возрастают, а места для размещения системы охлаждения становятся существенно меньше.

В тех случаях, когда из какого-либо небольшого пространства необходимо отвести теплоту в окружающую среду, а поверхность теплового контакта ограничена, могут использоваться следующие системы охлаждения: жидкостные с использованием жидкости с высокой теплоёмкостью, испарительные системы охлаждения (тепловые трубки), термоэлектрические модули (элементы Пельтье), а также их комбинации.

В случае применения жидкостной системы охлаждения в условиях ограниченного пространства отвод тепла осуществляется в основном с помощью жидкости, протекающей по каналам, стенки которых должны иметь хороший тепловой контакт с теплонагруженными элементами. При этом охлаждающая жидкость должна принудительно циркулировать между теплонагруженной зоной и холодильником.

Конструкция системы охлаждения представляет собой герметичный корпус в частности, в виде параллелепипеда, выполненный из металла с высокой теплопроводностью (например, из меди) и разделенный продольной перегородкой в средней части. Образованные таким образом два внутренних канала, связанные между собой в зонах нагрева и охлаждения обеспечивают непрерывную циркуляцию хладагента.

Тепловой расчёт основывается на общем уравнении теплопередачи. В общем случае отвод тепла осуществляется за счет конвекции, излучения и теплопроводности.

$$N_s = N_k + N_u + N_m \quad (1)$$

где  $N_s$ ,  $N_k$ ,  $N_u$ ,  $N_m$  – соответственно мощность источника и мощности отводи-мые конвективно жидкостью, излучением и теплопроводностью.

При условии обеспечения надёжного теплового контакта между теплонагруженными элементами и корпусом системы жидкостного охлаждения теплом отводимым излучением можно

пренебречь. Тогда теплоотвод будет осуществляться теплопроводностью по стенкам корпуса и, в основном, за счет конвекции жидкости. Поэтому главная задача заключается в обеспечении циркуляции жидкости с помощью насоса, обладающего требуемой производительностью при минимальных габаритах, позволяющих разместить его в корпусе системы охлаждения.

Для оценки требуемой производительности будем считать, что всё тепло отводится жидкостью. Тогда вся мощность источника идет на повышение теплосодержания жидкости.

Отсюда можно получить необходимую производительность:

$$L = \frac{N}{C_p \rho (T_g - T_c)} \quad (2)$$

где

$L$  – объёмный расход жидкости,  $м^3/с$ ,

$C_p$  – удельная теплоемкость,  $\frac{Вт \cdot с}{кг \cdot град}$ ,

$\rho$  – удельная плотность жидкости,  $кг/м^3$ ,

$T_g$  и  $T_c$  – температура на входе и выходе нагретой зоны соответственно.

В качестве хладагента в замкнутых системах охлаждения чаще всего используется антифриз в виде 45-процентного раствора воды в этиленгликоле, который имеет следующие

теплофизические характеристики [1]:  $\rho = 1080 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $C_p = 3100 \frac{Вт \cdot с}{кг \cdot град}$ , теплопроводность  $\lambda =$

$0,31 \frac{Вт}{м \cdot град}$ , кинематическая вязкость  $\nu = 2,5 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Если, например, в теплонагруженной зоне выделяется 300 Вт, полагая разность температур на выходе на входе равной  $50^{\circ} \text{C}$  из (2.) получаем минимально необходимую производительность равною порядку  $L_p = 10 \text{ мл}/\text{с}$ .

Режим движения жидкости в канале определяется главным образом числом Рейнольдса, который, в свою очередь, зависит от размеров сечения канала. В антеннах рассматриваемого частотного диапазона размер сечения канала может составлять порядка 1...3 см.

Обычно различают четыре закона теплообмена, соответствующим четырём режимам движения [2]: плёночный режим, ламинарный режим (закон  $1/8$ ), переходный между ламинарным и турбулентным (закон  $1/4$ ) и турбулентный.

При полученных значениях производительности и размеров сечения канала можно ожидать, что будет иметь место плёночный режим или ламинарный в начальной стадии, при котором у поверхности образуется почти неподвижная плёнка нагретой жидкости и поэтому интенсивность теплообмена очень мала.

В этом случае проблема может решаться, во-первых, подбором жидкости, обладающей высокой теплопроводностью (температуро-проводностью) и, во-вторых, повышением температурного напора, т.е. разности температур между теплонагруженной зоной и холодильником. В области создания жидкости с повышенной теплопроводностью в настоящее время проводятся исследования как в России, так и за рубежом. Так по имеющимся опубликованным данным, ученые Ричард Вильямс (Richard Williams) и Юлон Дин (Yulong Ding) путем растворения наночастиц в воде или других жидкостях создали так называемые «наножидкости», которые могут передавать тепло в четыре раза быстрее, чем другие жидкости.

Эксперименты проводили с 2% водным раствором NaOH, 1% NH4Cl в воде, этиловым спиртом и деионизованной водой (в порядке снижения проводимости).

Аналогичные результаты были получены нами при разработке и исследовании графитовых коллоидов на спиртовой основе с размером частиц графита порядка 10 нм. Однако, создание коллоидов с нужными характеристиками и решение соответствующих технологических задач требует специальных исследований. В то же время, очевидно, что разрешение этой задачи может позволить повысить эффективность жидкостной системы охлаждения в рассматриваемой области на порядок.

При создании системы охлаждения рассматриваемого типа важное (если не решающее) значение имеет выбор или специальная разработка насоса.

В настоящее время промышленность выпускает насосы всех типов, начиная от миниатюрных микронасосов для медицинской техники и кончая гигантскими осевыми насосами для ирригационных систем и энергетики.

По принципу действия и назначению выпускаемые и разрабатываемые сегодня разнообразны. Так по принципу действия различают мембранные, поршневые насосы, ротационно-пластинчатые, шестерёнчатые, шнековые и др. Области насосов также довольно широки. Насос производительностью 0,1 л/с относится к категории мини-насосов. Выпускаемые и разрабатываемые мини-насосы и микронасосы в основном предназначены для применения в вакуумной технике, в системах охлаждения вычислительной техники и для бытового использования.

Поиск выпускаемых мини-насосов, имеющих требуемую производительность, массогабаритные и эксплуатационные характеристики, не дал положительных результатов, что возможно можно объяснить отсутствием их востребованности. С другой стороны, проблема разработки такого насоса, на наш взгляд, технически разрешима.

Испарительное охлаждение является разновидностью жидкостного охлаждения. Испарительное охлаждение обладает рядом преимуществ, к числу которых можно отнести:

- возможность отвода значительных мощностей рассеивания (до 400 Вт/см<sup>2</sup>);
- меньшие габариты системы охлаждения и количество циркулирующего теплоносителя, чем при других видах охлаждения;
- постоянство рабочей температуры в широком интервале отводимых мощностей и независимость её от температуры окружающей среды.

Особый тип испарительного охлаждения, который практически используется в радиоэлектронной аппаратуре это – испарительные трубки. Особенность этого вида охлаждения заключается в том, что в отличие от традиционного жидкостного охлаждения по замкнутому циклу находится в двух состояниях: жидкость – пар. Поэтому, чтобы обеспечить движение жидкости в трубке при любой ориентации в пространстве, нужно преодолеть силу тяжести, а движение пара вниз из нагретой зоны к холодильнику – направление теплового потока.

Испарительные трубки представляют собой полый тонкостенный металлический стержень, внутренние стенки которого покрыты пористым фитилём, способным насыщаться рабочей жидкостью и обладающим капиллярным эффектом. Таким образом, испарительная (тепловая) трубка (ТТ) состоит всего из трех элементов: корпус, рабочая жидкость, КПМ (капиллярно-пористый материал). Внутренний объём трубки заполнен воздухом при атмосферном давлении или разреженным.

Эффективность тепловой трубки зависит от выбора теплоносителя, материала и конструкции фитиля и давления/разрежения в полости трубки.

Выбор теплоносителя, материала и конструкции фитиля являются взаимосвязанными задачами. При заданном диапазоне рабочих температур ключевую роль играет материал и конструкция фитиля.

Для возврата конденсата в зону испарения могут использоваться гравитационные, капиллярные, центробежные, электростатические и т.д. силы. Большое распространение получили различные виды пористых фитилей, основанных на смачивании поверхности твердого тела жидкостью. Транспортировка жидкости обратно к испарителю в тепловой трубе представляет наиболее сложную техническую задачу. Это обусловлено тем, что задача по существу противоречива: уменьшение диаметра пор позволяет увеличить давление жидкости в столбе, но одновременно увеличивает сопротивление движению жидкости.

Улучшение работы классической тепловой трубы путём уменьшения радиуса пор малоэффективно, так как уменьшение радиуса пор при тех же размерах фитиля приводит к одновременному увеличению давления в трубке и уменьшению допустимого (максимального). Дальнейшее увеличение давления при данном радиусе пор  $r_{\text{пн}}$  возможно только путём улучшения смачивания фитиля.

Новым решением задачи может быть применение фитиля, выполненного из керамических материалов.

Учитывая взаимосвязь материала и конструкции фитиля с теплоносителем, были проведены экспериментальные исследования образцов нескольких видов керамик. Выбор керамических материалов осуществляли на основании параметров смачивания (диэлектрической проницаемости, близкой к соответствующему растворителю), открытой пористости и формуемости в виде стержней.

Наиболее высокие показатели по смачиваемости и, соответственно, столбу жидкости в капиллярной системе получены на керамике  $\text{Si}_3\text{N}_4$  электрофоретического осаждения. В дальнейшем планируется уточнить структурные характеристики пористости и оптимизировать размер пор в синтезированной керамике.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о возможности повышения эффективности жидкостных систем охлаждения в ФАР при плотности теплового потока порядка 100 и более  $\text{Вт/см}^2$  и жёстко ограниченном месте для их размещения, что является важнейшим условием создания антенн нового поколения.

### Литература

1. Справочник машиностроителя, т.2/ под ред. Н.С. Ачеркана, Машгиз, М. 1960 г.
2. П.П. Гель, Н.К. Иванов-Есипович. Конструирование радиоэлектронной аппаратуры. "Энергия" Л. 1972 г.

#### Авторы:

Д.т.н., проф. **О.И. Крахин**

МАИ (ГТУ), Волоколамское ш., д.4

125993 Москва

Тел./факс (499) 158-45-03

E-mail: [koi@mai.ru](mailto:koi@mai.ru)

Инженер **В.П. Радченко**

ОАО "Радиофизика"

ул. Героев Панфиловцев, 10

125363, Москва, а/я 1

Тел./факс (495) 494-02-23

E-mail: [koi@mai.ru](mailto:koi@mai.ru)