

## МЕТОДИКА РАСЧЁТА ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ СВЧ МОДУЛЕЙ ПРИ ОТБРАКОВОЧНЫХ ИСПЫТАНИЯХ

© К. Н. Колпаков

ОАО «НПП «Пульсар», 105187, г. Москва, Окружной пр., 27

Рассматривается методика расчёта теплового режима СВЧ модулей при испытаниях под тепловой и электрической нагрузкой. Для описания процессов теплообмена предлагается использование критериальных уравнений подобия. Предполагаемые результаты позволят распространить методику расчёта на разные типы и размеры СВЧ модулей, что даст значительный экономический эффект.

**Ключевые слова:** критериальные уравнения подобия, конвективный теплообмен, СВЧ модуль, коэффициент теплообмена, скорость потока охлаждающего воздуха, температура корпуса

**Сведения об авторах:** Колпаков Константин Николаевич, аспирант, kolpakov@pulsarnpp.ru

## METHOD OF CALCULATING THE THERMAL REGIME OF SOLID-STATE MICROWAVE MODULES DURING SCREENING TESTS

K. N. Kolpakov

JSC «S&PE «Pulsar», 105187, Moscow, Okružhnoy proezd, 27

We consider the scheme for calculating the thermal conditions of the microwave modules when tested under heat treatment and electrical load. The use of equations similarity criteria is proposed to describe the processes of heat exchange. Obtained results allow us to extend the calculation scheme to microwave modules of different types and sizes, which will make a significant economic effect.

**Keywords:** criteria of similarity for equations, convective heat transfer, microwave modules, heat transfer coefficient, the speed of the cooling air flow, case temperature

**Data of authors:** Kolpakov Konstantin Nikolaevich, postgraduate, kolpakov@pulsarnpp.ru

### Введение

Для повышения качества и надёжности выпускаемых твердотельных СВЧ модулей на конечных стадиях технологического процесса изготовления проводятся предварительные отбраковочные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами.

Наиболее эффективным методом технологической тренировки является испытание под совмещённой тепловой и электрической нагрузкой. Испытываемое изделие помещают в тепловую камеру, в которой создаётся и поддерживается требуемый те-

пловой режим. Методика и режимы испытаний разрабатываются на основании требований, установленных в технических условиях (ТУ) для данного типа модуля.

Для проведения технологической тренировки и для испытаний СВЧ модулей создаётся устройство, имитирующее воздействие внешних факторов на СВЧ модуль. Расчёт и разработка автоматизированной системы, обеспечивающей требуемый тепловой режим при испытаниях модуля, требует решения ряда расчётных и технических задач, в частности, анализа и расчёта сложных процессов теплообмена между потоком возду-

ха и соприкасающейся с ним поверхностью корпуса прибора. Проведение исследования теплового взаимодействия между потоком воздуха и СВЧ модулем включает в себя как экспериментальное измерение распределения температуры по объёму, так и разработку теоретической модели, описывающей процесс теплообмена.

В режиме вынужденной конвекции основным параметром, влияющим на температуру корпуса испытуемого прибора (при заданной электрической мощности модуля), является скорость потока воздуха. В связи с этим при разработке системы воздушного охлаждения главной задачей является определение оптимальных параметров потока воздуха.

### Методика расчёта

Методам расчёта тепловых режимов РЭА посвящены как отечественные, так и зарубежные работы [1, 2].

Теплообмен – достаточно сложный процесс, зависящий от многих параметров. При проведении многофакторных оптимизационных расчётов процессов теплообмена при вынужденной конвекции важной задачей является моделирование таких процессов.

Предлагаемый подход к физическому моделированию основан на использовании методов теории подобия. Обоснование выбранной структуры уравнений подобия требует учёта всех существенных условий подобия тепломассопереноса. Для решения этой задачи важно выбрать основные параметры процесса и зависящие от них вторичные, то есть установить иерархию значимых параметров исследуемых процессов. В этом состоит содержание нового подхода к построению уравнений подобия для решения задач конвективного теплообмена. Для выявления роли различных факторов требуются как теоретические исследования, так и экспериментальное подтверждение применимости используемых моделей. Очевидным достоинством подхода, основанного на использовании методов теории подобия, является возможность использования результатов, полученных при экспериментальном исследовании конкретного типа изделий, на из-

делия других типов, что особенно важно в случаях, когда эти изделия имеют большие геометрические размеры либо, наоборот, очень малые. Таким образом, стоимость проведения испытаний снижается.

Обычно считают, что отвод тепла с поверхности корпуса изделия при обдувании газом осуществляется теплопроводностью, конвекцией и излучением. При рассмотрении таких процессов в качестве основного обычно принимается конвективный теплообмен. В этом случае количественной характеристикой процесса является коэффициент теплоотдачи, который рассчитывается как сумма двух коэффициентов теплоотдачи:  $a_{\Sigma} = a_k + a_{\text{л}}$ , где  $a_k$  учитывает действие конвективного теплообмена, а лучистый коэффициент теплоотдачи  $a_{\text{л}}$  учитывает излучение и поглощение тепловой энергии в виде электромагнитных волн ИК-диапазона.

Коэффициент теплоотдачи  $a_k$  обычно вводится в соответствии с законом Ньютона-Рихмана: тепловой поток  $Q$  от охлаждаемой поверхности к охлаждающей среде (в данном случае это воздух) пропорционален температурному напору – разности температур поверхности и воздуха:

$$Q = a_k \cdot S_L (T_{\text{пов}} - T_{\text{возд}}), \quad (1)$$

где  $S_L$  – площадь поверхности теплообмена ( $\text{м}^2$ ).

В некоторых случаях существенную роль может играть теплоотдача излучением. Поток  $E_{\text{л}}$  теплового излучения с единицы поверхности рассчитывается по формуле [3]:

$$E_{\text{л}} = \varepsilon c_0 [(T_{\text{возд}}/100)^4 - (T_{\text{пов}}/100)^4], \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  – степень черноты излучающей поверхности,  $c_0$  – излучательная способность абсолютно черного тела ( $\text{Вт}/\text{м}^2\text{К}^4$ ).

Соответственно для коэффициента  $a_{\text{л}}$  получаем [3]:

$$a_{\text{л}} = \varepsilon c_0 [(T_{\text{возд}}/100)^4 - (T_{\text{пов}}/100)^4] / (T_{\text{возд}} - T_{\text{пов}}). \quad (3)$$

Для описания процесса теплообмена часто используются обобщённые параметры, так называемые критерии подобия. В этом случае результаты измерений, проведённые с одним типом модуля, можно использовать для других типов модулей. В эксперименте измеряются физические величины, входящие в критерии подобия, описывающие данный процесс теплообмена. Далее результаты опыта описываются с использованием критериев подобия, и зависимость между критериями подобия представляется в виде критериальных уравнений. Это позволяет получить общие закономерности справедливые для всех процессов, подобных изучаемому. Таким образом, без дополнительных измерений можно, например, определить в явном виде, какое влияние на коэффициент теплоотдачи окажет изменение геометрических размеров системы.

Для случая конвективного теплообмена в качестве критериев подобия обычно принимаются число Рейнольдса (критерий Рейнольдса), число Пекле, число Прандтля, число Нуссельта [3].

Число Рейнольдса  $Re$  характеризует отношение силы инерции к силе вязкостного трения:  $Re = V/\gamma L$ , где  $V$  – скорость потока охлаждающего воздуха (м/с);  $\gamma$  – коэффициент кинематической вязкости охлаждающей среды (м<sup>2</sup>/с);  $L$  – характерный размер вдоль направления потока.

Число Пекле  $Pe = \gamma L/a_k$  характеризует отношение конвективных и кондуктивных потоков теплоты.

Критерий Прандтля  $Pr = Pe/Re = \gamma/a_k$  характеризует физические свойства жидкости или газа (значения этой величины в зависимости от температуры приводятся в справочниках) [3, 4].

Число Нуссельта  $Nu$  (критерий Нуссельта) характеризует интенсивность процесса теплообмена на границе «газ – обдуваемая поверхность». Эта величина представляет собой безразмерный коэффициент теплоотдачи [4]:

$$Nu = a_k L / \lambda_c, \quad (4)$$

где  $\lambda_c$  – теплопроводность газа.

Величина числа Нуссельта зависит от вида потока и его скорости.

В качестве иллюстрации приведён пример нахождения с помощью критериальных уравнений конвективного коэффициента теплоотдачи  $a_k$ .

Сначала из критериальных уравнений определяется число Нуссельта, являющееся, как отмечалось ранее, безразмерным коэффициентом теплоотдачи. В задачах конвективного теплообмена для расчёта среднего по поверхности критерия Нуссельта при вынужденной конвекции используются следующие уравнения подобия [3]:

$Nu = f(Re, Pe, Pr, Gr)$  – для ламинарного режима течения;

$Nu = f(Gr, Pr)$  – для переходного и турбулентного режимов течения.

Здесь  $Gr$  – число Грасгофа, влиянием которого можно пренебречь.

Как пример, для простого случая продольного обтекания пластины критерий Нуссельта определяется по формулам (полученным на основании опытных данных) [3]:

$$Nu = 0,57 \cdot Re^{0,5} \text{ для значений } Re < 4 \cdot 10^4;$$

$$Nu = 0,032 \cdot Re^{0,8} \text{ для значений } Re \geq 4 \cdot 10^4.$$

Скорость потока охлаждающего воздуха, входящая в число Рейнольдса, рассчитывается как отношение объёмного расхода воздуха  $G_p$  (м<sup>3</sup>/с) к свободной площади поперечного сечения канала  $S_k$  (м<sup>2</sup>) [5]:

$$V = G_p / S_k. \quad (5)$$

Искомый конвективный коэффициент теплоотдачи  $a_k$  рассчитывается исходя из вышеприведённого определения числа Нуссельта:  $a_k = Nu \cdot \lambda_c / L$ .

В случае принудительного воздушного охлаждения за температуру охлаждающего воздуха принимается средняя в пределах теплоотдающей поверхности температура  $T_{возд.ср}$  которая рассчитывается по формуле [6]:

$$T_{возд.ср} = T_{вход} + P / (2c_p \cdot GS_k), \quad (6)$$

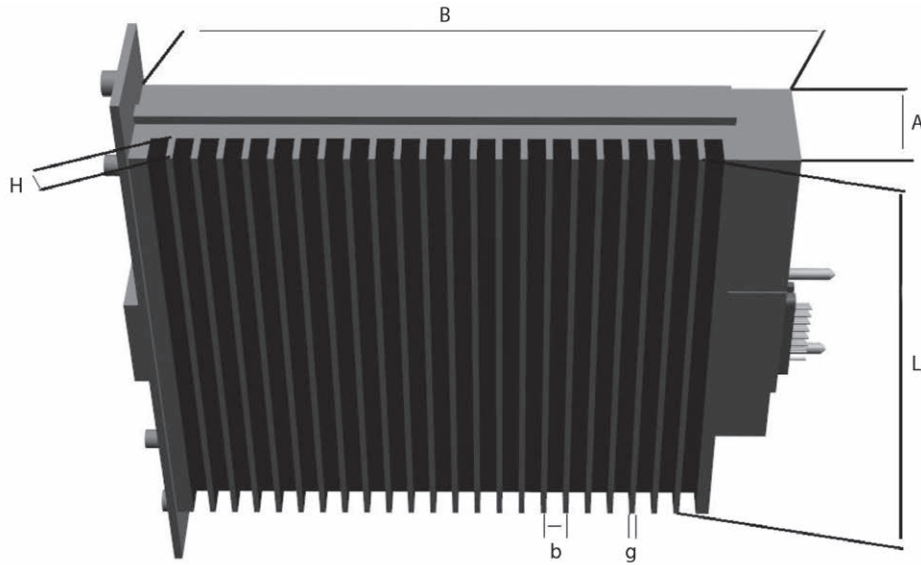


Рис. 1

**Твердотельный СВЧ модуль:**

**H** – высота ребра (мм), **B** – длина основания (мм), **A** – ширина основания (мм), **g** – ширина ребра (мм), **b** – расстояние между ребрами (мм), **L** – длина ребра (мм)

где  $P$  – мощность, рассеиваемая поверхностью корпуса (Вт);  $T_{\text{вход}}$  – температура охлаждающего воздуха на входе (К);  $c_p$  – удельная теплоёмкость воздуха при постоянном давлении (Дж/кг·К);  $G$  – массовый расход охлаждающего воздуха ( $\text{м}^3/\text{с}$ ).

При расчёте теплофизические свойства воздуха определяются для температуры  $T_{\text{вход}}$ . Рассмотрим расчёт для теплоотводящей поверхности, имеющей ребристый профиль. Мощность  $P$ , рассеиваемая такой поверхностью, равна [6]:

$$P = a_{\Sigma} \cdot (T_{\text{пов.ср}} - T_{\text{возд.ср}}) \cdot \xi \cdot S_{\Sigma}, \quad (7)$$

где  $T_{\text{возд.ср}}$  – средняя температура воздуха;  $T_{\text{пов.ср}}$  – средняя температура охлаждаемой поверхности;  $S_{\Sigma}$  – общая площадь поверхности, излучающей тепловой поток, определяемая из геометрии изделия (рис. 1);  $\xi$  – коэффициент эффективности ребра, характеризующий температурный перепад по ребру.

Далее рассчитывается средняя температура охлаждаемой поверхности [6]:

$$T_{\text{пов.ср}} = P / (a_{\Sigma} \xi S_{\Sigma}) + T_{\text{возд.ср}}. \quad (8)$$

Коэффициент эффективности ребра  $\xi$  находится по формуле [7]:

$$\xi = th(m \cdot L) / (m \cdot L), \quad (9)$$

где  $th$  – гиперболический тангенс;  $m$  – вспомогательный коэффициент, рассчитываемый по формуле [7]:

$$m = \sqrt{(2a_{\Sigma}) / (\lambda_m g)}, \quad (10)$$

где  $\lambda_m$  – коэффициент теплопроводности материала поверхности корпуса.

Конфигурация поверхностей реальных модулей во многих случаях сложнее, и для описания процесса теплообмена необходимо использовать достаточно сложные уравнения подобия. Для нахождения их вида требуется выявление роли различных физических факторов, для чего необходимо проведение соответствующих исследований.

**Заключение**

Для описания процесса тепломассообмена предлагается физическое моделирование

с использованием методов теории подобия. Новизна подхода в решении этой задачи заключается в установлении роли различных физических параметров, влияющих на исследуемые тепловые процессы для различных конфигураций модулей, и соответствующее отражение в структуре уравнений подобия.

Исследование предполагает разработку модели, описывающей тепловые процессы с заданной степенью точности. При этом используется новый подход при составлении уравнений подобия – установление основных параметров исследуемого процесса и определение роли второстепенных факторов. Одновременно проводится экспериментальное изучение параметров, характеризующих тепловые процессы.

Далее производится сравнение полученных экспериментальных результатов с теоретическими. Уточнение и корректировка модели приведёт к созданию аналитической модели процесса теплообмена, описывающей тепловые процессы с заданной степенью точности. Полученная аналитическая модель будет использована при разработке автоматизированной системы теплообмена.

Внедрение полученных результатов на предприятии АО «НПП «Пульсар» приведёт к повышению качества и надёжности выпускаемой продукции.

### Литература

1. Глудкин О. П., Енголычев А. Н. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование: учеб. пособие для вузов // Под ред. А.И. Коробова – М.: Радио и связь, 1987. – С. 159-163.
2. Цирельман Н. М. Конвективный теплоперенос: моделирование, идентификация, интенсификация. – Уфа, 2015.
3. Кудинов А. А. Теплообмен: учеб. пособие. – М.: ИНФРА-М, 2015. – С. 140-155, 250-252.
4. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – М.: Энергия, 1973. – С. 32-59, 180-200.
5. Дульнев Г. И., Торановский И. П. Тепловые режимы электронной аппаратуры. – Ленинград: Энергия, 1971. – 248 с.
6. Клаус А. Д. Охлаждение электронного оборудования. – Ленинград: Энергия, 1971. – С. 152-156.
7. Роткоп Л. П., Спокойный Ю. П. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1976. – С. 64-74.
8. Кукателадзе С. С. Основы теории теплообмена. – Изд. 5-е перераб. и доп. – М.: Атомиздат, 1979. – С. 178-182.
9. РД В 319.02.24-99. Методы проведения отбраковочных испытаний.

### References

1. Gludkin O. P., Engolychev A. N. *Ispytaniya radioelektronnoy, elektronno-vychislitelnoy apparatury i ispytatelnoe oborudovanie* [Testing of electronic, computing equipment and testing equipment]. Moscow, Radio i svyaz Publ., 1987, pp. 159-163.
2. Tsirelman N. M. *Konvektivnyi teplomassoperenos: modelirovanie, identifikatsiya, intensifikatsiya* [Convective heat-and-mass transfer: simulation, identification, intensification]. Ufa, 2015.
3. Kudinov A. A. *Teploobmen* [Heat and mass exchange]. Moscow, INFARA-M Publ., 2015, pp. 140-155, 250-252.
4. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat energy]. Moscow, Energiya Publ., 1973, pp. 32-59, 180-200.
5. Dulnev G. I., Toranovsky I. P. *Teplovye rezhimy elektronnoy apparatury* [Thermal modes of electronic equipment]. Leningrad, Energiya Publ., 1971, 248 p.
6. Klaus A. D. *Okhlazhdenie elektronnoy oborudovaniya* [Cooling of electronic devices]. Leningrad, Energiya Publ., 1971, pp. 152-156.
7. Rotkop L. P., Spokoyniy Y. P. *Obespechenie teplovykh rezhimov pri konstruirovanii radioelektronnoy apparatury* [Thermal control in the design of electronic equipment]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976, pp. 64-74.
8. Kukateladze S. S. *Osnovy teorii teploobmena* [Basics of theory of heat transfer]. Moscow, Atomizdat Publ., 1979, pp. 178-182.
9. Guidance document В 319.02.24-99. Screening test methods.