

**А.В. Коннов, А.П. Никитин, П.И. Акимов, В.И. Паницков,
И.С. Владыкина**

ФГУП "НПП "Торий"

Анализ теплового режима коллектора многолучевого клистрона с воздушным охлаждением

Проведен трехмерный траекторный анализ коллекторной системы 15-лучевого клистрона S диапазона. Получено распределение мощности электронного потока по поверхности коллектора. На основании этих данных проведен трехмерный расчет температурного поля на поверхности коллектора с принудительным воздушным охлаждением.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, коллектор, траекторный анализ, воздушное охлаждение, коэффициент теплоотдачи, тепловая нагрузка

Эскиз коллектора 15-ти лучевого клистрона с радиатором системы принудительного воздушного охлаждения представлен в продольном разрезе на рис. 1.

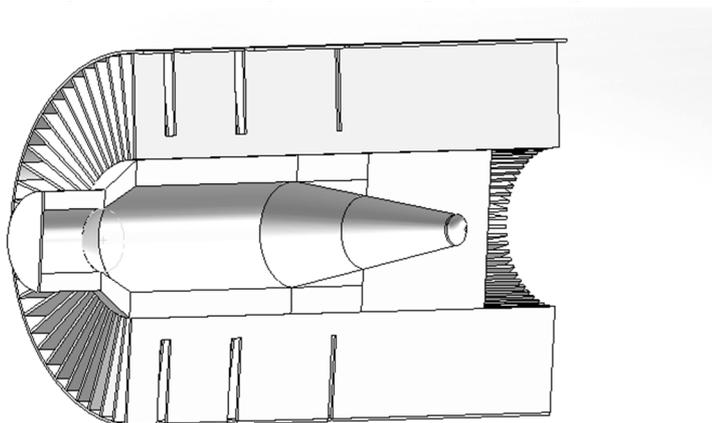


Рисунок 1

Из выходного резонатора клистрона в коллектор инжектируются две группы пучков, состоящих из 10 и 5 электронных пучков, которые расположены соосно по окружностям большего и меньшего радиусов соответственно (рис. 2). Энергия электронов каждого пучка 5.5 КэВ, а ток – 0.165 А. Коллектор находится под нулевым потенциалом. Распределение продольной компоненты магнитного поля вдоль оси коллектора представлено на рис. 3.

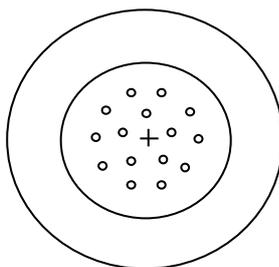


Рисунок 2

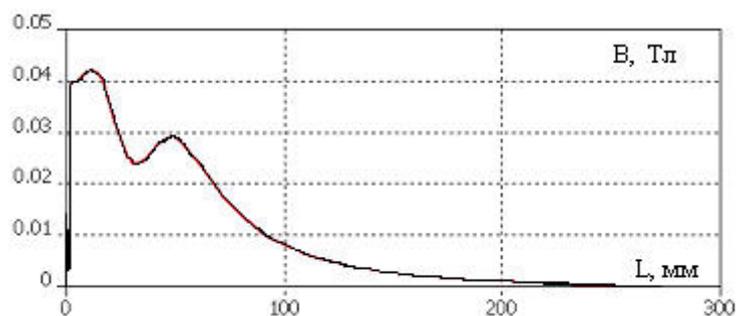


Рисунок 3

В траекторном анализе отраженные и истинно вторичные электроны не учитываются, так как не вносят заметного вклада в распределение удельной мощности пучков по поверхности коллектора.

Результаты трехмерного траекторного анализа представлены на рис. 4.

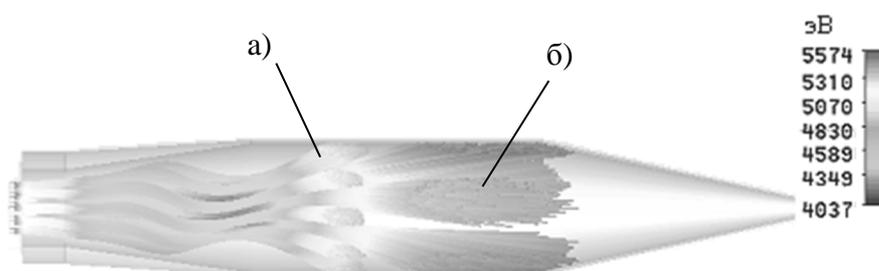


Рисунок 4

Как следует из представленного рисунка пучки внешнего а) на рис. 4, по отношению к оси симметрии коллектора, кольца оседают ближе к плоскости инжекции пучков и имеют менее размытые “изображения” на поверхности коллектора, чем пучки внутреннего кольца б). В области второго локального максимума продольного магнитного поля (рис.3) формируется область пониженного потенциала, вызванная повышением плотности пространственного заряда, вследствие сжатия пучков (рис.4). Для сравнения на рис.5 приведены траектории пучков с энергией инжекции 3.5 КэВ и разбросом продольных скоростей 50%, что соответствует пучкам, отдавшим энергию в выходном резонаторе клистрона. В этом случае пучки внешнего кольца практически равномерно распределяются по поверхности центральной части коллектора, а пучки внутреннего кольца – на его конической части.



Рисунок 5.

Расчет тепловой нагрузки проведен для распределения пучков, представленного на рисунке 4. В общем случае трехмерный расчет теплового стационарного режима методом конечных элементов при учете реальной геометрии радиатора затруднен из-за необходимости измельчения сетки (большое число конечных элементов), и необходимости совместно решать систему уравнений гидродинамики и теплопередачи. Для упрощения задачи, поверхность теплосъема заменяется на эффективную. Для этой поверхности вводится средний эффективный коэффициент теплоотдачи поверхности $\bar{\alpha}_{ef}$:

$$\alpha_{ef} = \alpha_{Cu} \left(1 + 2 \frac{H}{d}\right), \quad (1)$$

$$\bar{\alpha}_{ef} = \frac{\alpha_{Cu} l_1 + \alpha_{ef} l_2}{l_1 + l_2}, \quad (2)$$

где α_{Cu} – коэффициент теплоотдачи плоской медной поверхности при заданной скорости обдува воздухом, имеющим заданную температуру, H – высота ребра радиатора, d – толщина ребра радиатора, l_1 и l_2 – дуги, на которую опирается ребро радиатора и дуговое расстояние между соседними ребрами, соответственно. Принятые обозначения поясняет рисунок 6, на котором приведен фрагмент радиатора с несколькими ребрами, общее число которых в рассматриваемой конструкции равно 60.

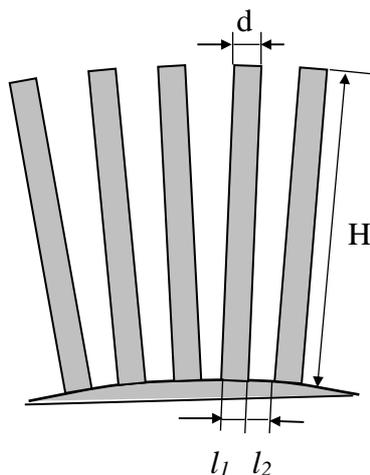


Рисунок 6

В такой постановке внешняя задача сводится к внутренней задаче для уравнения теплопроводности с относительно простой геометрией и умеренным числом конечных элементов (≈ 40000). В тепловой задаче размытые “изображения” парциальных пучков (рис. 4) аппроксимируются близкими к ним по форме эллиптическими областями (рис. 7), в которых равномерно распределена мощность каждого падающего парциального пучка (907 Вт).

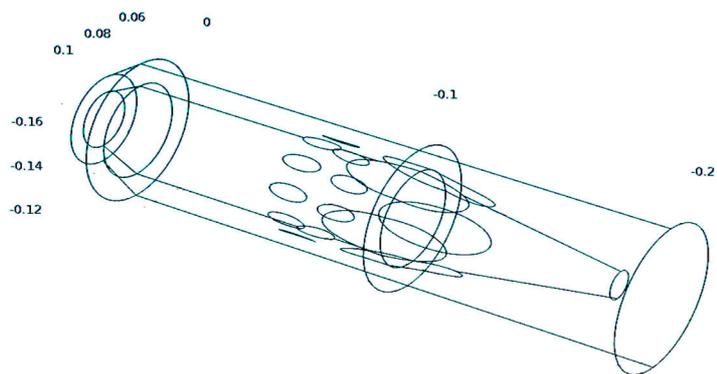


Рисунок 7

Экспериментально измеренный [1] коэффициент теплоотдачи медной плоской поверхности при скорости воздушного обдува 10.5 м/с и температуре воздуха 30°C равен 179 Вт/(м² град). При такой скорости обдува для рассматриваемой конструкции радиатора расход воздуха составляет 500 м³/час. При высоте ребер радиатора 41.5 мм, толщине – 1 мм и расстоянии между ребрами 2 мм, средний эффективный коэффициент теплоотдачи поверхности $\bar{\alpha}_{ef} = 5100$ Вт/(м² град).

На рисунке 8 для приведенных выше параметров модели представлено рассчитанное температурное поле на внутренней и внешней поверхностях коллектора. Очевидно, что более нагретыми оказались участки коллектора в месте оседания 10 пучков внешнего кольца. В этой части внутренней поверхности коллектора температура достигла 346°C.

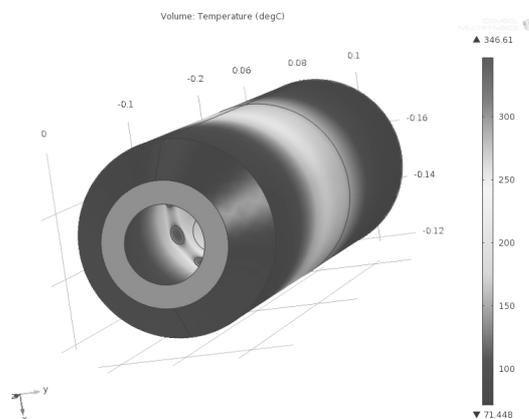


Рисунок 8

Таким образом, из проведенного траекторного и теплового анализа следует, что, предлагаемые условия воздушного охлаждения (размеры ребер радиатора, их количество, расход воздуха) являются достаточными для поддержания температурного режима коллектора ниже температуры текучести меди.

Библиографический список

1. М.А. Михеев, И.М. Михеева. Основы теплопередачи. М.: Госэнергоиздат, 1973