

Тепловой анализ коллектора ЛБВ средней мощности сантиметрового диапазона

И.А. Алмаев^{1,2}, А.Б. Данилов², А.Ю. Мирошниченко¹

¹Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина

²АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз»

Аннотация: В данной работе представлен расчет теплового режима коллектора ЛБВ средней мощности сантиметрового диапазона. Описывается конструкция двухступенчатого коллектора со специальной оптикой для уменьшения обратных электронов и оптимизации токооседания. Конструкция включает в себя два радиатора охлаждения различных размеров, имеющих ребра охлаждения. Охлаждение коллектора воздушное. Сопоставлены результаты расчета теплообмена данного коллектора с экспериментальными данными. Приведены результаты моделирования при различном объемном расходе охлаждающего воздуха

Ключевые слова: радиатор охлаждения; ЛБВ; двухступенчатый коллектор; теплообменный анализ

1. Введение

Для оптимальной работы электровакуумного усилителя необходимо иметь оптимальную систему охлаждения. Отведение тепла при уменьшении массы и габаритов конструкции является одной из первоочередных задач. Очень важным аспектом является не только уменьшение температуры рабочих деталей и поверхностей, но и стабилизация их теплового режима. Особенно это необходимо для усилителей непрерывного действия со средней и высокой выходной мощностью, а также приборов субмиллиметрового и миллиметрового диапазона (из-за малых размеров элементов конструкции).

На сегодня существует несколько программ для расчета тепловых параметров различных вакуумных приборов такие как ANSYS, CST MPHYSICS STUDIO [1,2]. Некоторые результаты моделирования процессов теплообмена представлены в работах [3-7]. Достоинствами моделирования является способность прогнозировать выходные параметры конструкций до изготовления образцов. В тоже время конструктивные особенности приборов, технологическая специфика их изготовления сложны для моделирования. Учет большинства отклонений от идеального значения приводит к громоздкости модели и увеличению необходимых вычислительных мощностей и времени на расчет.

2. Результаты моделирования

В данной работе рассматривался тепловой режим коллектора ЛБВ с непрерывной выходной мощностью 150 Вт.

Коллектор представляет собой металлокерамическую конструкцию. Электроды имеют вид деталей вращения с припаянными кольцами для получения необходимой электронно-оптической линзы. Втулки отделены от экрана керамическими стержнями. Втулки и экран выполнены из вакуумной меди. Материал стержней – оксид бериллия. На оболочке закреплены два радиатора из алюминиевого сплава с плоскими ребрами.

Расчет теплового режима проводился в среде Solidworks Flow simulation [8]. Эта программа проводит расчет на основе уравнения Навье-Стокса. Для решения задачи стационарная математическая модель физических процессов дискретизируется по пространству. Чтобы выполнить эту дискретизацию, вся рабочая область покрывается

расчетной сеткой, грани которой параллельны координатным плоскостям. Flow simulation использует метод конечных объемов, поэтому значения независимых переменных рассчитываются в центрах ячеек и расчетная сетка описывается ее ячейками, а не узлами [9].

В среде Solidworks была создана модель рассматриваемого коллектора (рис. 1). Конструкция дополнена схематической моделью замедляющей системы и электронной пушки для более точного определения потока воздуха при охлаждении конструкции. Систему замыкает имитация кожуха с адиабатическими стенками. Для ускорения расчета из модели были исключены детали, практически не влияющие на конечный результат, но имеющие малые размеры. Их присутствие в модели привело бы к увеличению количества ячеек и, следовательно, повышению времени расчета. Одними из таких деталей являются траверсы, прикрепленные к электродам.

Для более точного вычисления теплового режима необходимо учитывать распределение электронов по поверхности коллектора, полученное при расчете электронно-оптическом или экспериментально. Однако для оценки влияния охлаждающего воздуха на теплообмен и учитывая стационарность задачи распределением электроном можно пренебречь. Такое допущение также позволяет уменьшить время расчета.

Время каждого вычисления составило не более 50 минут. При условии определенной сложности конструкции и трудности расчета теплопередачи такое малое время расчета дает преимущество для оценки и расчета распределения внешнего потока воздуха и эффективности радиатора.

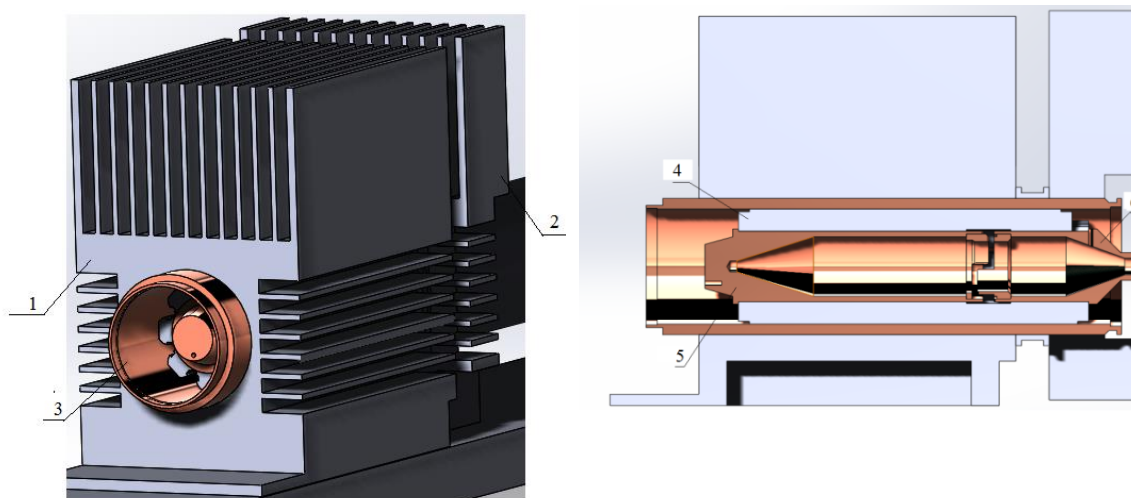


Рисунок 1. Исследуемая модель коллектора с радиатором охлаждения: 1 – большой радиатор охлаждения; 2 – малый радиатор охлаждения; 3 – внешняя оболочка (экран) коллектора; 4 – опорные керамические стержни; 5 – втулка второго коллектора; 6 – втулка первого коллектора

Был рассчитан тепловой режим коллектора с различными начальными условиями. При расчете принято, что источником тепла является внутренняя поверхность электродов. Режим выбран из условия статической (без подачи входной мощности) работы ЛБВ по результатам экспериментально определенного распределения тока по ступеням коллектора. Сгенерированная сетка модели имела 57260 целых ячеек в твердом теле, 225976 в пространстве и 184012 частичных ячеек.

Тепловой поток достигает своего максимума в месте соединения поддерживающих керамических стержней и экрана (рис. 2). Это следствие малой площади соприкосновения этих деталей и большого градиента температуры между втулками коллектора и радиатором.

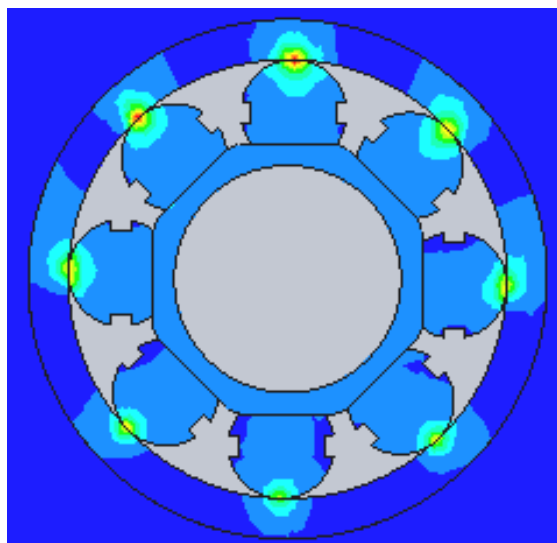


Рисунок 2. Интенсивность теплового потока в коллекторе

Экспериментально была измерена температура на внешней поверхности радиаторов исследуемой конструкции при работе ЛБВ в статическом режиме. Температура окружающей среды составила 20°C. Параметры эксперимента приведены в таблице 1. Объемный расход воздуха составил 180 м³/ч.

Таблица 1. Режим работы коллектора при эксперименте

| Укл1, кВт | Укл1, кВт | Икл1, мА | Икл2, мА |
|-----------|-----------|----------|----------|
| 4,2 | 2,2 | 40 | 160 |

С помощью термопары измерялась температура на поверхности радиатора в нескольких точках. Точки измерения температуры были выбраны на поверхности обоих радиаторов охлаждения.

Далее были сопоставлены результаты расчета модели и эксперимента (табл. 2). При расчете мощность, рассеиваемая на первом и втором коллекторе, была принята 168 Вт и 352 Вт соответственно.

Таблица 2. Результаты расчета температуры коллектора и измерения при проведении эксперимента

| Параметр | Расчет | Эксперимент |
|---|--------|-------------|
| Температура на поверхности радиатора 1 коллектора | 64°C | 70°C |
| Температура на поверхности радиатора 2 коллектора | 82°C | 88°C |

Экспериментальные данные очень близки данным расчетной модели. Различия могут возникать из-за неточного учета соединения деталей в образце, а также погрешности измерения при определении значений напряжений токов и температур.

В дальнейшем была рассчитана зависимость температуры на поверхности радиаторов у основания ребер от объемного расхода воздуха (рис. 3). Из графика видно, что при высоком значении объемного расхода воздуха температура обоих радиаторов одинакова. Но при уменьшении расхода, температура большого радиатора становится выше чем у малого. При этом критерий Прандтля остается на одном уровне при различном расходе воздуха и принимает значение около 69. Это происходит вследствие различной тенденции уменьшения турбулентности. Такой эффект приводит к изменению неподвижного слоя у поверхности радиатора. А ввиду малого коэффициента теплопроводности воздуха тепловой поток уменьшается, что и приводит к ухудшению передачи тепла.

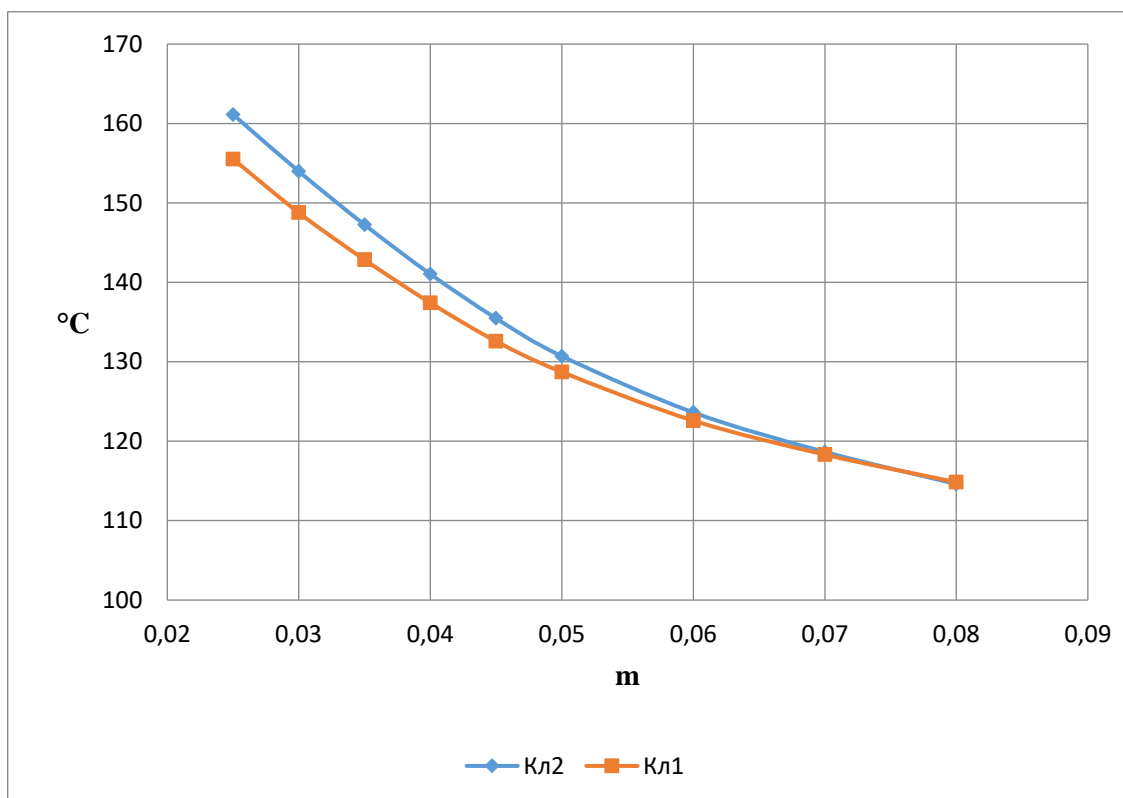


Рисунок 3. Зависимость температуры у основания ребер малого и большого радиатора от объемного расхода воздуха

3. Заключение

В ходе работы был рассчитан тепловой режим конструкции двухступенчатого коллектора с двумя радиаторами охлаждения. Такая конструкция применяется в лампах бегущей волны сантиметрового диапазона средней мощности. Результаты расчета были сопоставлены с экспериментом по измерению температуры на поверхности модели при работе ЛБВ в статическом режиме.

Результаты моделирования показали увеличение температуры на последующих радиаторах при уменьшении объемного расхода при постановке нескольких радиаторов последовательно от подачи охлаждающего воздуха. Это связано, в первую очередь, с увеличением приповерхностного неподвижного слоя охлаждающего воздуха и, соответственно, его невысоким значением коэффициента теплопроводности.

Ряд допущений для упрощения задачи (исключение определенных деталей из конструкции, минимально влияющих на тепловой режим; пренебрежение распределением электронов в коллекторе) заметно уменьшили время расчета. Для вычисления требовалось не более 50 минут. При этом полученные результаты расчета хорошо коррелируют с экспериментом.

Список литературы

1. <https://www.ansys.com/products/fluids>
2. <https://www.cst.com/products/cstmps>

3. PengXie, Li Xu, JieHao, Wenlong Chen, Hao Wang, Jianqing Li, Bin Li. Thermal Analysis of TWT Collector Using Finite Element Method. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015, 1-2.
4. Золотых Д.Н, Роговин В.И., Семенов С.О. Расчет теплового режима и термомеханического состояния коллекторных узлов с помощью программного комплекса ANSYS. Электронные приборы и устройства СВЧ. Изд-во ООО «Научная книга», Саратов, 2017.
5. Hooshmand M., Kadivar M.R, Soltani H. B., Jamilzadeh A.M Design and Thermal Analysis of Two Stage Depressed Collector for K-band TWT. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015, 1-2.
6. YUAN Guang-jiang, XIAO Liu, YI Hong-xia, WANG Li, LI Yan-wei, CHEN Zhi-liang, CAO Lin-lin, SHANG Xin-wen, SU Xiao-bao. Research on Radiator For Space Traveling Wave Tube. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC), 2015, 1-2.
7. Yuqin Liang, Hao Shao, Jun Sun, Xiaowei Zhang, Tao Xu, Wei Song, ShaofeiHuo. Study on the thermal process in intense relativistic electron collectors. IEEE International Vacuum Electronics Conference (IVEC) ,2015, 1-2.
8. <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
9. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. БХВ-Петербург, Санкт-Петербург, 2005, 800 с.