

Моделирование системы жидкостного охлаждения коллектора многолучевого клистрона с отдельными полостями

А.В. Галдецкий, Н.К. Приступчик, И.В. Куликова, А.Н. Юнаков, С.В. Евсеев

АО «НПП «Исток» им. Шокина»

Аннотация: в работе рассматривается жидкостная система охлаждения коллектора сверхмощного многолучевого клистрона с отдельными полостями для парциальных лучей. Моделирование теплового режима проведено с учетом неравномерного токооседания в коллекторе. Предложенный коллектор с отдельными полостями снижает перегрев на 30%, а массогабаритные показатели более чем в 2 раза по сравнению с коллектором с общей полостью.

Ключевые слова: многолучевой клистрон, тепловой режим коллектора, метод трубок тока, метод конечных элементов.

Увеличение выходной мощности при уменьшении массогабаритных показателей - одно из важных направлений в проектировании электровакуумных приборов (ЭВП) СВЧ (клистроны, лампы бегущей волны и т.д.). На этом пути разработчики сталкиваются с увеличением плотности мощности тепловыделения и проблемами эффективного отвода тепла [1–3]. Поэтому всё большее внимание уделяется моделированию систем жидкостного охлаждения. Одним из самых теплонагруженных узлов ЭВП СВЧ является коллектор. В многолучевых приборах электронные пучки, зачастую, неравномерно оседают на рабочую поверхность коллектора, который может быть как с индивидуальными полостями для каждого пучка, так и с общей полостью для всех пучков [3]. Коллектор с общей полостью имеет серьезный недостаток, обусловленный влиянием большого пространственного заряда многолучевого потока в общей полости, что может приводить к появлению отраженных электронов и паразитным колебаниям в электронном потоке. Поэтому в работе рассматривается конструкция коллектора с отдельными полостями и водяным охлаждением, представленная на рисунке 1. Стрелками указано направление течения жидкости.

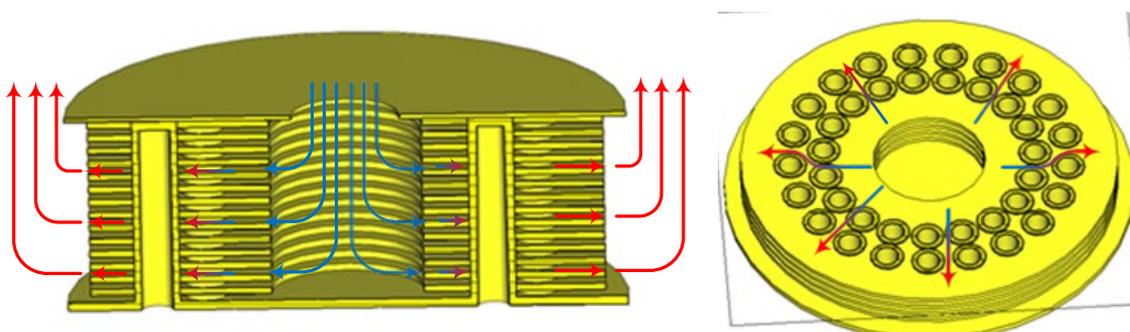


Рисунок 1. Конструкция многолучевого коллектора с ребрением.

Задача решалась в три этапа:

1) траекторный анализ процесса транспортировки электронного пучка, позволивший определить распределение плотности мощности, падающей на поверхность коллектора;

2) CFD-расчёт поверхностного коэффициента теплопередачи (α), характеризующего конвективный теплоотвод на поверхностях, разделяющих жидкость и твёрдое тело;

3) анализ распределение температуры с учетом полученного неравномерного распределения тепловой нагрузки и конвективного теплоотвода.

Результатом решения электронно-оптической задачи, являются данные, представляющие собой таблицу, с координатами точек пересечения отдельных траекторий (трубок тока) с рабочими поверхностями коллектора, а также мощностями, переносимыми этими траекториями [3]. Генерация функции распределения мощности на основе этих данных подразумевает усреднение с переменным масштабом, что в общем случае является непростой задачей. В используемой нами САЕ-системе эта задача не решена, поэтому нет возможности импорта распределения мощности тепловыделения. В принципе, можно импортировать эту мощность, как набор точечных источников, но имеется ограничение на максимально допустимое количество импортируемых точечных источников. Кроме того, даже при достаточно большом числе траекторий (порядка нескольких тысяч), требуется «сглаживать» точечные источники на поверхности коллектора [4], чтобы не получить изрезанного профиля температуры, что непросто.

Ввиду этих особенностей, для решения 3D задачи теплопроводности при тепловых расчётах коллекторов с учетом неравномерности токооседания было разработано специализированное ПО «Гидра» [4–6], где был реализован импорт распределения мощности тепловыделения. Ввиду того, что гидродинамический модуль в «Гидре» пока не реализован, поверхностный коэффициент теплопередачи $\alpha \left[\frac{\text{кВт} \cdot \text{м}^2}{\text{К}} \right]$, зависящий от геометрии и расхода жидкости, но не от тепловой нагрузки, рассчитывался в CFD-решателе Ansys CFX. Результаты расчета представлены на рисунке 2. Видно, что коэффициент α варьируется в широких пределах, поэтому в тепловых расчётах на 3-м этапе для оценки наихудшего распределения температуры принимается заниженное по отношению к среднему значению коэффициент α .

Охлаждение поверхностей в ПО «Гидра», омываемых жидкостью, моделировалось граничными условиями 3-го рода с коэффициентом теплопередачи $\alpha = 3 \text{ [кВт/(м}^2 \cdot \text{К)]}$ и температурой жидкости 60 °С.

Тепловой анализ проводился для одного парциального коллектора. Радиаторные ребра были разрезаны на середине их толщины и на срезах были заданы граничные условия симметрии (теплоизолированные поверхности). Источники тепла – импортированное облако точек пересечения траекторий с поверхностью коллектора [4]. Распределение плотности мощности представлено на рисунке 3.

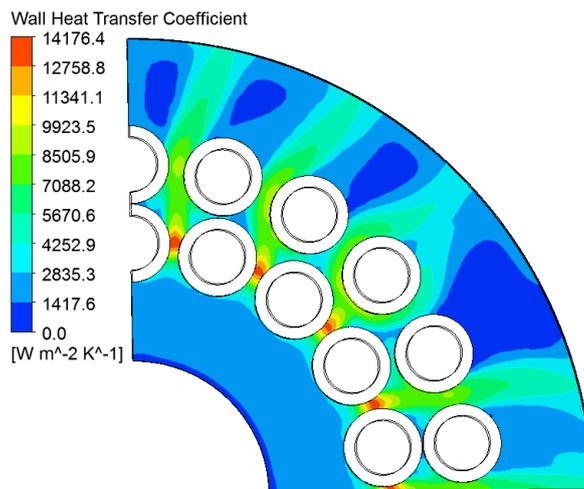


Рисунок 2. Поверхностный коэффициент теплопередачи.

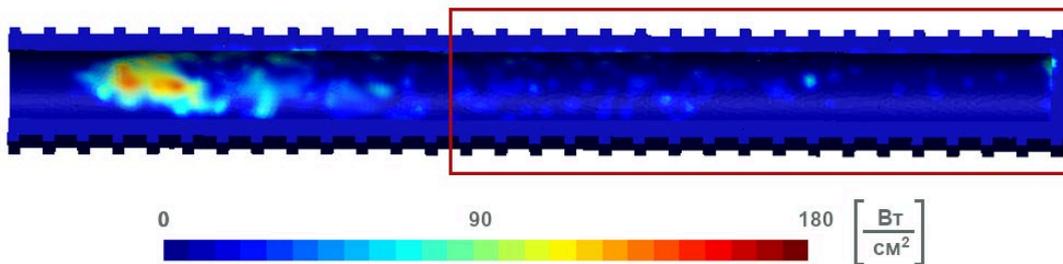


Рисунок 3. Распределение плотности мощности по внутренней поверхности частичного коллектора.

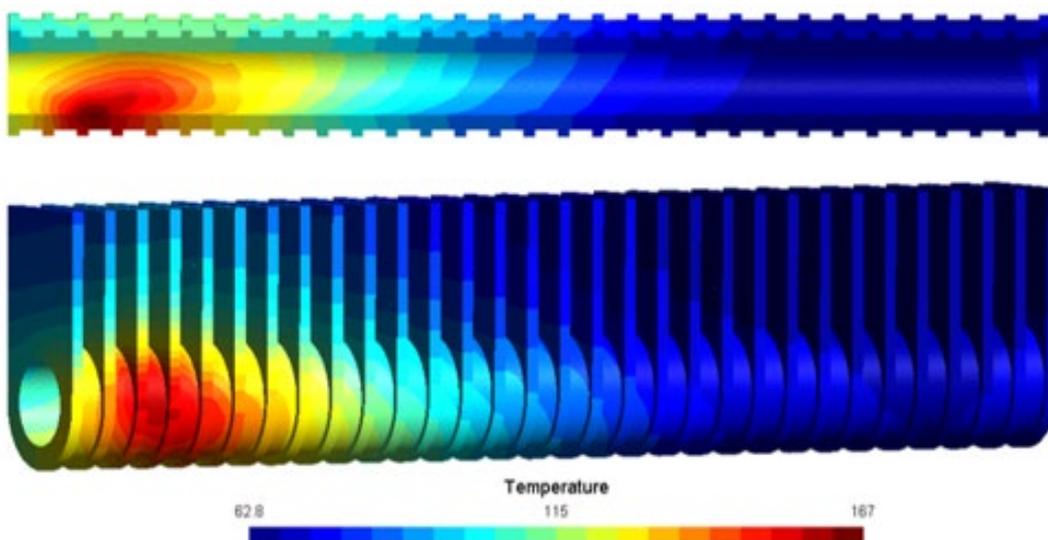


Рисунок 4. Распределение температуры в коллекторе.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования парциального коллектора с орребрением. Максимальная температура на поверхности составляет $T_{\max} = 167\text{ }^{\circ}\text{C}$ (перегрев $107\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для сравнения были проведены расчеты коллектора без орребрения, которые показали, что перегрев увеличился в 2 раза - $T_{\max}=272\text{ }^{\circ}\text{C}$, что неприемлемо, поскольку максимальная температура приближается к критической отметке $T_{\text{пред}} = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Заключение

По результатам проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. моделирование теплового режима коллектора с отдельными полостями и неравномерным токооседанием является задачей сопряжённого математического моделирования (задачей мультифизики) и требует проведения электронно-оптических, гидродинамических и собственно тепловых расчётов.
2. коллектор обеспечивает максимальную плотность тепловыделения в коллекторе $\approx 175\text{ Вт/см}^2$ и перегрев на уровне $\approx 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, что на $\approx 30\%$ лучше, чем в базовом варианте коллектора с общей полостью.
3. Длину парциального коллектора можно уменьшить почти в два раза (см. рисунок 3), что приведёт к уменьшению массы медной части коллектора минимум в 2 раза и увеличению поверхностного коэффициента теплоотдачи.

Список литературы

1. Куликова И. В. и др. Методика построения и расчета воздушной системы охлаждения специализированного СВЧ-блока // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2016. – № 1(528). – С. 70-74.
2. Приступчик Н. К. и др. Моделирование тепловых режимов работы приемопередающего модуля малогабаритной активной фазированной антенной решетки // Электронная техника. Серия 1: СВЧ-техника. – 2016. – № 1(528). – С. 86-94.
3. Духина Н. Г. и др. Моделирование теплового режима коллектора многолучевого клистрона с учетом неравномерного токооседания // (КрыМиКо'2018): Материалы конференции, Севастополь, 09–15 сентября 2018 года. Том 1. – Севастополь: ФГАОУ ВО «СевГУ», 2018. – С. 246–252.
4. Куликова И. В. Моделирование нестационарного теплового режима работы коллектора электронно-оптической системы с учетом неравномерного токооседания // Прикладная физика. – 2019. – № 3. – С. 92-97.
5. Куликова И. В. и др. Разработка программного обеспечения для 3D моделирования тепловых режимов коллекторов // Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции, посвященной 75-летию АО «НПП «Исток» им. Шокина». 15-16 мая 2018, г. Фрязино. С 49.
6. C. Geuzaine and J.-F. Remacle. Gmesh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. International Journal for Numerical Methods in Engineering 79(11), pp. 1309-1331, 2009.