

Моделирование нестационарного теплового режима работы коллектора электронно-оптической системы с учетом неравномерного токооседания*И. В. Куликова*

Описывается разработанное программное обеспечение, позволяющее моделировать нестационарные тепловые режимы коллекторов электронно-оптических систем (ЭОС). Программное обеспечение (ПО) построено на методе контрольных объемов. В качестве источников тепла выступают результаты трехмерного траекторного анализа, выполненные в программном комплексе для статического анализа ЭОС. Это позволяет задавать неравномерное токооседание электронных пучков в коллекторах и более точно рассчитывать их тепловые режимы. Разработан алгоритм сглаживания точечных источников на сложной поверхности по гауссиане с заданными параметрами. Это решило проблему нефизичных всплесков температуры при мелкой сетке на коллекторе и небольшого числа траекторий. В разработанном ПО можно использовать граничные условия I, II и III рода, а так же различные материалы. Временные диаграммы тепловых нагрузок можно задавать с неравномерным шагом по времени. В качестве пре- и постпроцессора использован Gmsh.

Ключевые слова: тепловой режим коллектора, метод крупных частиц, метод контрольных объемов.

Ссылка: Куликова И. В. // Прикладная физика. 2019. № 3. С. 92.

Reference: I. V. Kulikova, Prikl. Fiz., No. 3, 92 (2019).

Введение

Отработанный электронный пучок несет в себе большую энергию, особенно в мощных электровакуумных приборах, которая преобразуется в тепло в коллекторе. И зачастую, именно тепловой режим коллектора определяет такие параметры вакуумных приборов как скважность и время импульса [1–3].

Расчет теплового режима коллектора электровакуумного прибора сопряжен с рядом трудностей, особенно для многолучевого прибора [4–7]. Это связано с проблемой передачи распределения плотности мощности элек-

тронного пучка, оседающего на стенки коллектора, в программные комплексы, предназначенные для расчета тепловых режимов. Кроме того, расчет самой плотности мощности также сопряжен с проблемами. Программное обеспечение для расчета статических режимов электронно-оптических систем (ЭОС) построено на самосогласованном решении уравнения Пуассона и уравнения движения крупных заряженных частиц [8, 9, 2]. Решением данной задачи являются траектории, ток и энергия крупных частиц и распределение потенциала в ЭОС с учетом заряда электронного пучка. Из этих данных для дальнейшего расчета теплового режима коллектора можно получить координаты пересечения траектории частицы с поверхностью коллектора и тепловую мощность, выделяющуюся в данной точке $\langle x, y, z, w \rangle$. Также в ходе постобработки можно рассчитать распределение плотности мощности по поверхности, которое зависит от количества траекторий, метода и параметров

Куликова Ирина Владимировна, вед. инженер, к.т.н.
АО «НПП «Исток» им. Шокина».
Россия, 141190, Московская обл., г. Фрязино, Вокзальная ул., 2а, корп. 1.
Тел.: 8(495) 465-86-66, 8(985) 516-47-47.
E-mail: cuttlefish99@mail.ru

Статья поступила в редакцию 8 апреля 2019 г.

сглаживания и будет привязано к элементам некоторой поверхностной сетки, в общем случае отличной от расчетной [4, 5]. К сожалению, процедура передачи информации о токооседании в существующие пакеты для решения тепловых задач связан с рядом технических проблем, решение которых по сложности сопоставимо с разработкой специализированного решателя уравнения теплопроводности, в котором требуемый интерфейс сопряжения электронно-оптической и тепловой задач будет реализован требуемым образом.

Поэтому задача по разработке программного обеспечения на основе метода контрольных объемов для решения нестационарного уравнения теплопроводности для 3D задач с возможностью загрузки источников тепла из программ моделирования электронной оптики в виде $\langle x, y, z, w \rangle$ достаточно актуальна. Это позволит учитывать неравномерное токооседание электронных пучков на стенки коллектора и оценивать локальный перегрев его внутренней поверхности. Данная статья посвящена решению указанной проблемы.

Математическая постановка

Для описания процессов теплопереноса в теле коллектора использовалось трехмерное нестационарное уравнение теплопроводности в интегро-дифференциальном виде [10]:

$$\int \rho c \frac{\partial T}{\partial t} dV - \oint k \nabla T \vec{dS} = - \int f dV \quad (1)$$

где ρ – плотность; c – удельная теплоемкость; k – коэффициент теплопроводности; T – температура; t – время; f – плотность мощности; ∇ – оператор набла; V – объем; S – площадь.

В качестве граничных условий применили граничные условия I, II и III-го рода [10]:

$$T(\Omega) = T_{\Omega} \quad (2)$$

$$k \frac{\partial T(\Omega)}{\partial n} = q \quad (3)$$

$$k \frac{\partial T(\Omega)}{\partial n} = \alpha (T(\Omega) - T_{env}) \quad (4)$$

где Ω – поверхность; q – поверхностная плотность мощности; n – нормаль к поверхности; α – коэффициент теплоотдачи; T_{env} – температура окружающей среды.

Уравнение (1) с граничными условиями (2)–(4) было решено методом конечных элементов на неравномерной тетраэдрической сетке (рис. 1). В качестве сеточного генератора, пре- и постпроцессора использовалась программа GMSH (лицензия GNU GPL) [11].

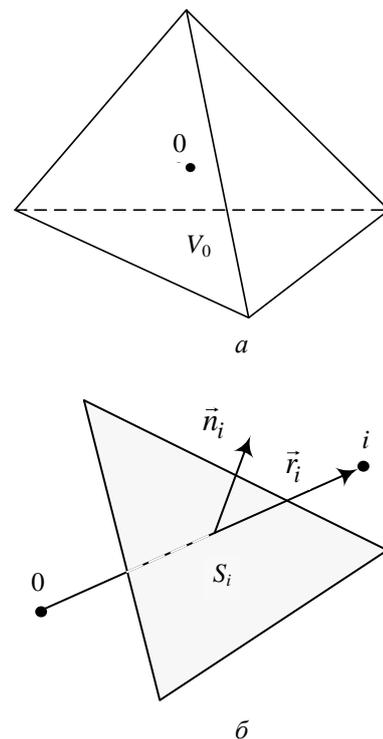


Рис. 1. Контрольный объем (а) с обозначением нормали к поверхности между двумя соседними элементами и радиус вектор (б), поверхность.

Дискретный аналог уравнения (1) для тетраэдра (количества граней 4) будет иметь следующий вид:

$$\rho c \frac{T_0 - T'_0}{\Delta t} V_0 - \sum_{i=1}^4 k \frac{T_i - T_0}{\vec{n}_i \times \vec{r}_i} S_i = -f V_0 \quad (5)$$

где T'_0 – температура элемента на предыдущем временном шаге; T_0, T_i – температура на текущем временном шаге для элемента 0 и i ; $\vec{n}_i \times \vec{r}_i$ – скалярное произведение нормали к площадке S_i и радиус вектора, соединяющего центры соседних элементов (см. рис. 1).

Поскольку уравнение теплопроводности описывает закон сохранения энергии, то граничное условия I-го рода будет дописано в уравнение (5) в следующем виде:

$$k \frac{T_{\Omega} - T_0}{\vec{n}_i \times \vec{r}_{\Omega}} S_i. \quad (6)$$

Граничное условие II-го рода будет добавлено в уравнение 5 в правую часть как слагаемое $-w$, если на границе есть источник, или опущено, если граница теплоизолирована. Тепловой поток от падающего электронного пучка учитывается граничным условием II рода и рассчитывается следующим образом: мощность каждой отдельной траектории распределяется на поверхность элемента, на которую эта траектория упала. В случае попадания на одну поверхность нескольких траекторий их мощность суммируется. При таком подходе размер элементов ограничивается количеством траекторий, т. е. размеры элементов должны быть соизмеримы с расстоянием между траекториями, что не всегда приемлемо. Поэтому был разработан алгоритм сглаживания, позволяющий использовать более мелкую сетку при небольшом количестве траекторий.

Конвективный поток тепла с поверхности, описываемый выражением (4), в дискретном виде будет следующим:

$$-S_{\Omega} \alpha T_0 + S_{\Omega} \alpha T_{env}. \quad (7)$$

При заполнении матрицы коэффициентов СЛАУ индекс «0» заменялся на « i », а « i » на индекс « i j », где i – это номер текущего элемента и номер строки, j – номер соседнего элемента и номер столбца.

Алгоритмы и реализация

Полученная по выражениям (5)–(7) СЛАУ имеет диагональное преобладание, благодаря нестационарной составляющей.

Количество ненулевых недиагональных элементов в матрице **A** ограничено числом соседних элементов и не превышает 4. Поэтому для сокращения объема памяти матрица **A** хранилась в виде вектора **Aii** состоящего из диагональных элементов и динамического массива **Aij**, содержащего пары $\langle a_{ij}, j \rangle$, состо-

ящие из ненулевых значений коэффициентов матрицы и номера столбца в котором этот элемент находится.

СЛАУ решалась методом Гаусса–Зейделя.

В качестве pre- и post-процессора была использована программа Gmsh [11]. Язык программирования – Go.

Адекватность разработанного ПО была проверена на тестовой задаче, имеющей аналитическое решение. Погрешность результатов моделирования относительно аналитического решения не превышала 0,5 % даже для грубой сетки.

Входными данными для программы являются:

- файл, содержащий информацию о сетке (узлы, элементы, ярлыки для граничных условий и материалов) в формате *.msh [11];
- файл со списком координат и мощности в виде x, y, z, w ;
- файл, связывающий ярлыки с типом граничных условий и значениями коэффициентов и параметров, физические величины материалов, точность решения СЛАУ, параметры сглаживания точечных источников по поверхности коллектора.

Внутренняя поверхность коллектора зачастую имеет сложную форму и для ее адекватного описания требуется мелкая сетка. При передаче источников тепла и небольшом числе траекторий возникает необходимость размазывания источников по поверхности коллектора. Был разработан простой алгоритм, позволяющий двумя параметрами (P, N) сгладить точечный источник тепла по поверхности коллектора по гауссиане, где P = 0...1 – количество энергии, передаваемое в соседние ячейки; N > 0 – количество элементов от центрального элемента поверхности на которые будет размазан источник тепла. Для более наглядной демонстрации работы алгоритма, он представлен на языке Matlab для одномерного случая (число соседних элементов равно 2) для различных вариантов (P, N) с 2-мя точечными источниками (рис. 2).

Для неструктурированной сетки на поверхности коллектора алгоритм будет фактически таким же, только необходимо иметь данные о номерах соседних элементов. Для

триангулярной поверхностной сетки число соседей будет три и менее.

На рис. 3 показаны результаты оседания неравномерно распределенной мощности электронного потока, полученной из программы моделирования электронной оптики [4, 5] в виде массива координат точек пересечения траекторий с поверхностью коллектора и мощности, несущей каждой траекторией, без сглаживания и со сглаживанием мощности по внутренней поверхности коллектора. На рис. 4 представлены результаты расчета температурного поля в коллекторе для варианта со сглаживанием мощности и без.

```

N = length(Fnew);
for n=1:N
    DF=zeros(J,1);
    DF=DF - Fnew.*P;
    for i=2:J-1
        DF(i-1) = DF(i-1) + Fnew(i)*P/2;
        DF(i+1) = DF(i+1) + Fnew(i)*P/2;
    end
    Fnew=Fnew+DF;
end
    
```

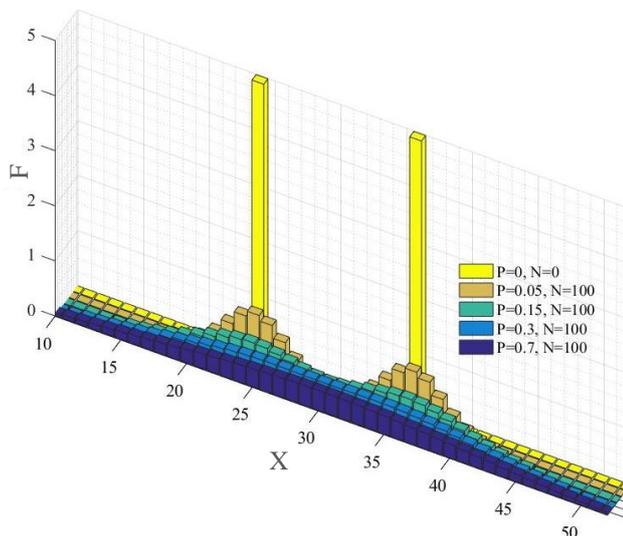


Рис. 2. Результаты работы алгоритма сглаживания для 2 точечных источников на отрезке для различных значений P и N.

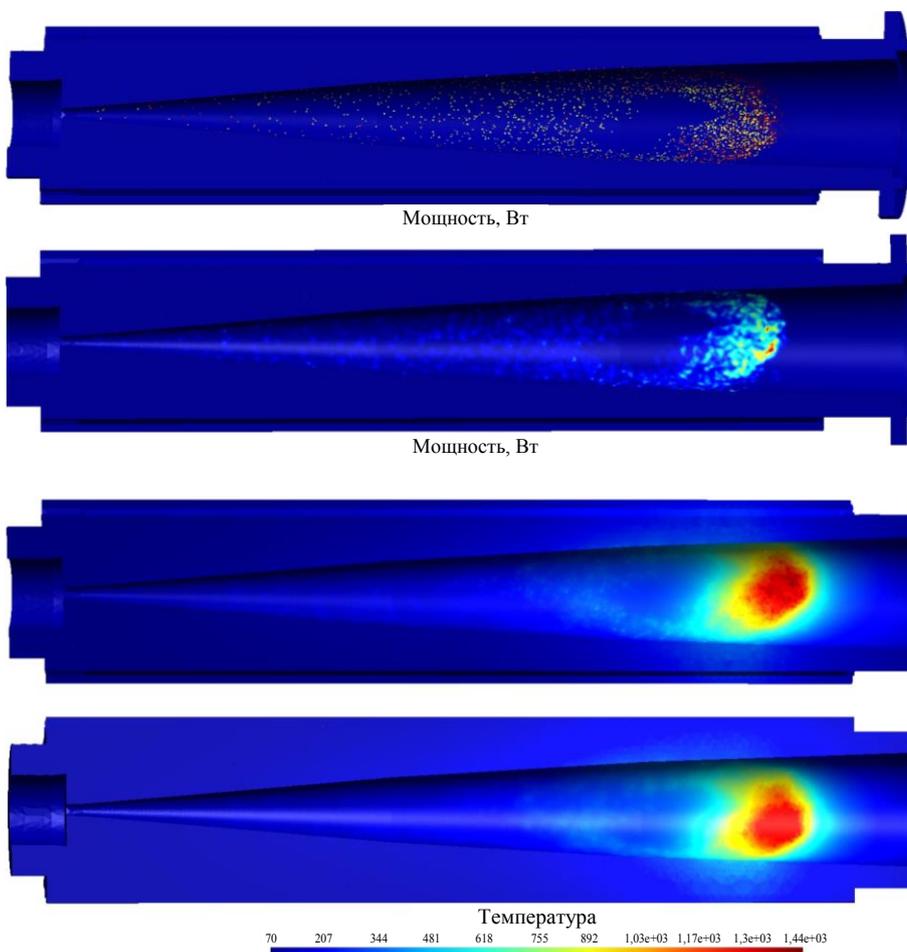


Рис. 3. Распределение мощности на поверхности коллектора без размазывания и с размазыванием ($P = 0,7, N = 8$).

Рис. 4. Распределение температуры в коллекторе, полученное с учетом неравномерного токооседания, без сглаживания источников и со сглаживанием.

Заключение

Таким образом, разработанное ПО можно использовать для моделирования тепловых режимов коллекторов в трехмерной постановке на треугольной сетке, в том числе для определения локальных перегревов в общих коллекторах многолучевых приборов. Моделирование коллектора в импульсном режиме позволит определять тепловые ограничения работы коллектора, влияющие на скважность и ширину импульса.

Разработанное ПО в качестве источников тепла использует результаты моделирования, полученные в электронно-оптической программе без постобработки. В нем реализован алгоритм размазывания точечных источников по поверхности любой формы на заданный радиус по гауссиане.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gilmour A. S, Klystrons Jr., Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons. – 2011 Artech House, 685 Canton Street Norwood, MA 02062. P. 859.
2. Hasina Khatun, Ranajoy Bhattacharya, Sudeep Sharan, Kapil Singhal, Uttam Gowswami, Anil Kumar,

Nitin Kumar, Udaybir Singh, Sinha A. K. // Vacuum. 2012. Vol. 86. P. 1465.

3. Rees D., Roybal W., Bradley III. J. / Proc. XX International Linac Conference, Monterey, California, Paper TNE12, 998–1000.

4. Духина Н. Г., Юнаков А. Н., Евсеев С. В. / Труды 25-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо-2015, Севастополь, 6–12 сентября 2015 г. С. 178–180.

5. Духина Н. Г., Юнаков А. Н., Евсеев С. В. / Труды 26-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». КрыМиКо-2016, Севастополь, 4–10 сентября 2016 г. Т. 2. С. 316–322.

6. Духина Н. Г., Куликова И. В., Приступчик Н. К. / Труды 28-й Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2018). Севастополь, 9–15 сентября 2018 г. С. 246–252.

7. Куликова И. В., Приступчик Н. К. / Тезисы докладов юбилейной научно-технической конференции, посвященной 75-летию АО «НПП «Исток» им. Шокина», Фрязино, 15–16 мая 2018 г. С. 49.

8. Журавлева В. Д., Семенов С. О. // Прикладная физика. 2006. № 3. С. 97.

9. Семенов С. О. // Прикладная физика. 2010. № 3. С. 96.

10. Patankar Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. – Publisher: CRC Press LLC. 1980.

11. Geuzaine C., Remacle J.-F. // International Journal for Numerical Methods in Engineering. 2009. Vol. 79. No. 11. P. 1309.

PACS: 02.70.Dh, 44.10.+i, 41.75.Fr

Simulation of non-stationary thermal mode of the collector with regard to a non-uniform current flow

I. V. Kulikova

Istok R&P Enterprise, JSC
Bld. 1, 2a Vokzalnaya st., Fryazino, Moscow Region, 141190, Russia
E-mail: cuttlefish99@mail.ru

Received April 8, 2019

In this work, the software for transient heating simulation of the electron vacuum device (EVD) collector was developed. The software was based on finite volume method. The input data (heat sources) are results of the 3D electron beam simulation (charged particle trajectories analysis). They are represented with the coordinates of the points where trajectories intersect the inner collector surface, and power W in the form of a quadruple (x, y, z, w) . An algorithm for smoothing singular sources on the collector's surface is based on Gaussian sampling functions. For such interpolation, the number of trajectories does not limit the size of the elements, i.e. the elements dimensions do not have to correlate with distances between the trajec-

tories. This take in to account non-uniform deposition of the electrons on the collector inner surface and significantly improve accuracy of temperature calculation, which is crucial in practice. As boundary conditions, software allows to define the temperature (Dirichlet boundary condition), the heat flux (Neumann boundary condition), and convection (Cauchy boundary condition). Waveforms defining heat sources can be set with an irregular time step. As pre- and post-processor was used Gmsh (a three-dimensional finite element mesh generator) for to prepare geometry, mesh and display results.

Keywords: thermal mode of the collector, large particles method, finite volume method.

REFERENCES

1. A. S. Gilmour, Jr. *Klystrons, Traveling Wave Tubes, Magnetrons, Crossed-Field Amplifiers, and Gyrotrons*. (2011 Artech House, 685 Canton Street Norwood, MA 02062). P. 859.
2. Hasina Khatun, Ranajoy Bhattacharya, Sudeep Sharan, Kapil Singhal, Uttam Gowswami, Anil Kumar, Nitin Kumar, Udaybir Singh, A.K. Sinha. *Vacuum* **86**, 1465 (2012).
3. D. Rees, W. Roybal, and III. J. Bradley, in *Proc. XX International Linac Conference, Monterey, (California)*, Paper THE12, P.P. 998–1000.
4. N. G. Dukhina, A. N. Yunakov, and S. V. Evseev, in *Proc. CriMiCo'2015*, (Sevastopol, Russia, September 6–12, 2015), pp. 178–180.
5. N. G. Dukhina, A. N. Yunakov, and S. V. Evseev, in *Proc. CriMiCo'2016*, (Sevastopol, Russia, September 4–10, 2016), vol. 2, pp. 316–322.
6. N. G. Dukhina, I. V. Kulikova, and N. K. Pristupchik, in *Proc. CriMiCo'2018*, (Sevastopol, Russia, September 9–15, 2018), pp. 246–252.
7. I. V. Kulikova and N. K. Pristupchik, in *Abstract of the anniversary scientific and technical conference dedicated to the 75th anniversary of the JSC "RPC "Istok" named after Shokin"*, (Fryazino, Russia, May 15–16, 2018), p. 49.
8. V. D. Zhuravleva and S. O. Semenov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 97 (2006).
9. S. O. Semenov, *Prikl. Fiz.*, No. 3, 96 (2010).
10. Suhas V. Patankar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*. (Publisher: CRC Press LLC. 1980).
11. C. Geuzaine and J.-F. Remacle, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* **79** (11), 1309 (2009).