

# Электронные и ионные пучки

УДК 621.384:537.533

## Формирование концентрированным электронным пучком тракта транспортировки в генераторе пучковой плазмы

Р. Н. Ризаханов

Исследовательский центр имени М. В. Келдыша (ФГУП "Центр Келдыша"),  
Москва, Россия

*Рассмотрена проблема транспортировки интенсивного электронного пучка в выводном устройстве генератора пучковой плазмы в условиях, когда непосредственно пучок прожигает себе тракт. Для определения диаметра отверстия, образующегося в тонкой пластине при воздействии теплового потока, решена стационарная задача теплопроводности. Особенности прожига анализируются путем сравнения пучков с различными распределениями — Гауссовым и платообразным. Получен критерий прожига, устанавливающий взаимосвязь между параметрами пучка и геометрическими и теплофизическими характеристиками пластин, обеспечивающими прожигание бесконечного числа пластин.*

Генераторы электронно-пучковой плазмы с выводом концентрированного пучка в плотную газовую среду находят широкое применение для решения различных научно-технических и технологических задач [1, 2]. Работа выводных устройств подобных установок (рис. 1) основана на транспортировке сфокусированного магнитной системой пучка сквозь прожигаемый им тракт [3, 4]. Тракт образован относительно тонкими перегородками, разделяющими шлюзовые камеры системы дифференциальной откачки.

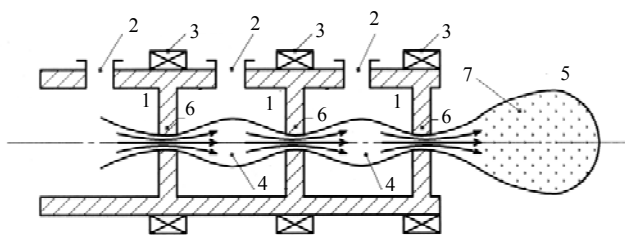


Рис. 1. Транспортировка пучка в генераторе пучковой плазмы:

- 1 — шлюзовые камеры выводного устройства; 2 — вакуумная откачка; 3 — магнитная система; 4 — электронный пучок;
- 5 — плотная газовая среда (технологический объем);
- 6 — прожигаемые перегородки; 7 — плазменное образование

Для определения размеров отверстий, прожигаемых пучком, в общем случае требуется совместное решение двух задач:

- 1) транспортировка пучка, подвергающегося диафрагмированию прожигаемым отверстием;
- 2) прожиг диафрагмированным пучком отверстий в следующих перегородках.

В рамках первой задачи определяются закономерности изменения распределения радиальной плотности тока пучка в процессе его распростра-

нения между перегородками. При этом следует учитывать гибель периферийных электронов на стенках исходной диафрагмы. Ясно, что информации, содержащейся в уравнении огибающей пучка [5], недостаточно для решения задачи в такой постановке. Необходимы модели, описывающие эволюцию внутренней структуры пучка.

Целью второй задачи является расчет размера отверстия, образующегося под воздействием пучка. В общей постановке — это нестационарная задача теплопроводности. Однако в рамках рассматриваемой проблемы задача упрощается до стационарного прожига тонкой пластины, в которой пренебрегается изменением температуры по толщине.

Метод расчета транспортировки диафрагмированного осесимметричного пучка, основанной на использовании функции яркости, разработан в [6]. Знание функции яркости в некотором сечении позволяет рассчитать параметры пучка (распределение плотности тока, огибающая и т. п.) во всем пространстве. В частности, показано, что в однородном магнитном поле фазовая (и, следовательно, пространственная) структура пучка периодически повторяется. Это означает, что перегородки, располагаемые в фокусах пучка, подвергаются воздействию тепловых потоков с одинаковыми радиальными распределениями, но обрезанными размерами предыдущей диафрагмы.

Рассмотрены особенности прожигания подобных перегородок в случаях платообразного и Гауссова распределений пучка. Перегородки представляют собой металлические пластины малой толщины, в которых можно пренебречь изменением температуры по толщине. Задача полагается

стационарной, пластины располагаются в фокусах пучка.

**Пучок с Гауссовым распределением**

Такой пучок в исходном сечении  $z = 0$  имеет распределение вида

$$q = q_0 e^{-r^2/a^2}, \tag{1}$$

где  $a$  — среднеквадратичный радиус пучка.

Стационарное уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = - \frac{q}{\lambda \delta} \tag{2}$$

с граничными условиями (рис. 2)

$$T(R) = 0, \quad T(r_0) = T_{sm}, \quad \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r_0} = 0, \tag{3}$$

где  $\lambda, \delta$  — коэффициент теплопроводности материала пластины и ее толщина, соответственно.

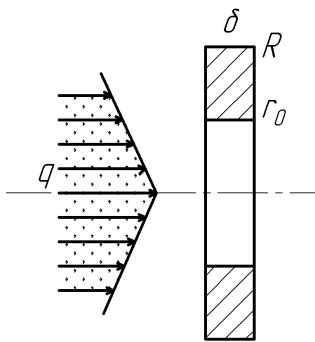


Рис. 2. Модель прожигания тонкой пластины

Граничные условия означают, что на внешней границе диска температура зафиксирована, а на радиусе прожига  $r_0$  температура равна температуре плавления материала  $T_{sm}$ . При этом из-за отсутствия тепловыделения в отверстии радиальный тепловой поток при  $r = r_0$  равен нулю.

Наличие трех условий (3) для уравнения второго порядка не противоречит физической сути задачи. Дело в том, что неизвестной является также граничная координата  $r_0$ .

Общее решение задачи (2) имеет вид

$$T = \int \frac{dr'}{r'} \int \frac{q(r'') r'' dr''}{\lambda \delta} + c_1 \ln r + c_2, \tag{4}$$

где  $c_1, c_2$  — постоянные интегрирования.

Совместное решение уравнений (3) и (4) дает

$$T = T_{sm} + \frac{q_0 a^2}{4 \delta \lambda} \left[ E_i \left( - \frac{r^2}{a^2} \right) - E_i \left( - \frac{r_0^2}{a^2} \right) \right] - \frac{q_0 a^2}{2 \delta \lambda} \exp \left( - \frac{r_0^2}{a^2} \right) \ln \frac{r}{r_0},$$

где  $E_i(x)$  — интегральная показательная функция, а  $r_0$  находится приравниванием  $T$  нулю при  $r = R$ ; тогда получается следующая итерационная формула:

$$\frac{r_0}{a} = \sqrt{\ln \frac{2 \ln(R/r_0)}{G - E_i(-r_0^2/a^2) + E_i(-r_0^2/a^2)}}, \tag{5}$$

где  $G$  — безразмерный параметр

$$G = \frac{4 \delta \lambda}{q_0 a^2} T_{sm}.$$

Как правило,  $R \gg r_0, a \approx r_0$ , что при наличии двух логарифмов под знаком радикала обуславливает быструю сходимость итераций (5). В качестве первого приближения можно взять  $r_0 = a$ .

На вторую пластину, находящуюся в следующем фокусе электронного пучка, падает тепловой поток вида (1), но обрезанный радиусом  $r_0$

$$q = \begin{cases} q_0 e^{-r^2/a^2} & \text{при } r \leq r_0, \\ 0 & \text{при } r > r_0. \end{cases} \tag{6}$$

Тогда решение тепловой задачи в геометрии, представленной на рис. 3, следует искать в виде

$$T = \begin{cases} T_1 & \text{при } r_1 \leq r \leq r_0, \\ T_2 & \text{при } r > r_0, \end{cases}$$

причем

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_1}{dr} \right) = - \frac{q_0 \exp(-r^2/a^2)}{\lambda \delta}, \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_2}{dr} \right) = 0 \end{cases} \tag{7}$$

с граничными условиями

$$\begin{aligned} T_2(R) = 0; \quad T_2(r_0) = T_1(r_0); \quad \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r_0} = \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r_0}; \\ T_1(r_1) = T_{sm}; \quad \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r_1} = 0, \end{aligned} \tag{8}$$

где  $r_1$  — радиус прожигаемого в пластине отверстия.

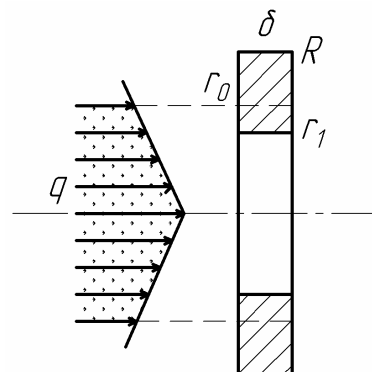


Рис. 3. Прожигание второй пластины

Система (7) интегрируется и вместе с (8) дает следующее уравнение для определения  $r_1$ :

$$\frac{r_1}{a} = \sqrt{\ln \frac{2 \ln(R/r_1)}{G - E_i(-r_1^2/a^2) + E_i(-r_0^2/a^2) + \exp(-r_0^2/a^2) \ln(R/r_0)}}$$

Многочисленное повторение решения задачи (6)–(8) позволяет определить радиус отверстия в пластине, находящейся в  $n$ -м фокусе пучка

$$\frac{r_n}{a} = \sqrt{\ln \frac{2 \ln(R/r_n)}{G - E_i(-r_n^2/a^2) + E_i(-r_{n-1}^2/a^2) + \exp(-r_{n-1}^2/a^2) \ln(R/r_{n-1})}}$$

где  $r_{n-1}$  — радиус отверстия в пластине с номером  $n - 1$ .

Найдем условие, при котором отверстия в пластинах  $n$  и  $n - 1$  были одинаковы, т. е.

$$r_{n-1} = r_n = r_k. \tag{9}$$

Получающееся при это равенство

$$\frac{r_k}{a} = \sqrt{\ln \left( \frac{1}{G} \ln \frac{R}{r_k} \right)} \tag{10}$$

имеет смысл, если

$$G < \ln(R/r_k).$$

Последнее соотношением может быть переписано в виде критерия

$$q_0 > \frac{4\delta\lambda T_{sm}}{a^2 \ln(R/r_k)}.$$

Он устанавливает взаимосвязь между параметрами пучка и теплофизическими характеристиками пластины, обеспечивающую прожигание бесконечного числа пластин, располагающихся в фокусах пучка. Критерий прожигания сохранит свой вид при замене  $r_k$  на  $a$ , если  $R \gg r_k \approx a$

$$q_0 > \frac{4\delta\lambda T_{sm}}{a^2 \ln(R/a)}. \tag{11}$$

Это условие, как правило, выполняется для большинства электронно-лучевых установок с выпуском концентрированного пучка в плотную среду.

### Пучок с платообразным распределением

Для проверки универсальности полученных соотношений имеет смысл исследовать прожиг системы пластин пучком с другим распределением, например платообразным

$$q = \begin{cases} q_0 & \text{при } r \leq a, \\ 0 & \text{при } r > a. \end{cases}$$

Тогда тепловая задача (7) формулируется как

$$\begin{cases} \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_1}{dr} \right) = -\frac{q_0}{\lambda \delta}, & r_1 \leq r \leq a; \\ \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT_2}{dr} \right) = 0, & r > a, \end{cases}$$

а граничные условия (8) как

$$\begin{aligned} T_2(R) = 0, \quad T_2(a) = T_1(a), \quad \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=a} = \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=a}; \\ T_1(r_1) = T_{sm}, \quad \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=r_1} = 0. \end{aligned}$$

Итерационная формула для радиуса отверстия, образующегося в пластине толщиной  $\delta$ , коэффициентом теплопроводности  $\lambda$ , имеет вид

$$\frac{r_1}{a} = \sqrt{\frac{1 + 2 \ln(R/a) - G}{1 + 2 \ln(R/r_1)}}.$$

Очевидно, отверстие в пластине с номером  $n$  связано с предыдущим соотношением

$$\frac{r_n}{a} = \sqrt{\frac{1 + 2 \ln(R/r_{n-1}) - G}{1 + 2 \ln(R/r_n)}}.$$

Найдем условие прожигания бесконечного числа пластинок, приравняв  $r_n = r_{n-1} = r_k$ , как в (9)

$$G < 1 + 2 \ln(R/r_k).$$

При  $R \gg r_k \approx a$  данное соотношение преобразуется к виду

$$q_0 > \frac{4\delta\lambda T_{sm}}{a^2 \ln(eR^2/a^2)}, \tag{12}$$

где  $e = 2,7128\dots$

При этом для определения радиуса установившегося отверстия (условие (9)) можно пользоваться формулой

$$\frac{r_k}{a} = \sqrt{1 - \frac{G}{1 + 2 \ln(R/a)}} \tag{13}$$

(аналог (10)).

Следует обратить внимание на существенные различия в видах зависимостей размеров установившихся отверстий от параметров пучка при различных их распределениях (выражения (10) и (13)). В то же время критерии прожигания (выраже-

ния (11) и (12)) совпадают с точностью до коэффициента. Данное обстоятельство позволяет ввести единый критерий прожига, например (11), для определения условий транспортировки пучка сквозь неограниченное число прожигаемых пластин.

Таким образом, исследованы закономерности прожигания пластин электронным пучком, имеющим различные распределения плотности тока, при условии, что пластины располагаются в фокусах пучка. Рассмотрены Гауссово и платообразное распределения. Выведен критерий прожига, устанавливающий взаимосвязь между характеристиками пучка и прожигаемых пластин, при которых возможно прожигание бесконечного числа пластин, расположенных в фокусах пучка. Показано,

что критерий прожига слабо зависит от вида распределения.

#### Л и т е р а т у р а

1. Горшков О. А., Ильин А. А., Ловцов А. С., Ризакханов Р. Н.// ПТЭ. 2002. № 2. С. 162.
2. Горшков О. А., Ильин А. А., Ловцов А. С., Ризакханов Р. Н.// Там же. 2003. № 1. С. 123.
3. Васильев М. Н., Коротеев А. С.// Там же. 1984. № 1. С. 154.
4. Коротеев А. С., Белогривцев В. М., Ризакханов Р. Н., Ярцев А. М. Вывод концентрированного электронного пучка в плотную газовую среду// Тез. докл. VII Всесоюз. симп. по сильноточной электронике. — Томск. 1988. Ч. 2. С. 263—265.
5. Lee E. P., Cooper R. K.// Particle Accelerators. 1973. V. 7. P. 83.
6. Rizakhanov R. N.// Изв. вузов. Сер. Физика. 2006. № 11. Приложение. С. 120.

Статья поступила в редакцию 25 января 2007 г.

## Transporting path formation by intensive e-beam in beam plasma generator

R. N. Rizakhanov

Keldysh Research Center, Moscow, Russia

*Problem of intensive e-beam transportation in beam plasma generator outlet unit under condition when e-beam burns the path itself was considered. Stationary thermal conductivity problem was solved in order to determine aperture diameter in thin baffle under thermal flux influence. Burning process peculiarities are analyzed through comparison of beams with different heat profiles — Gaussian and plateau. Burning criterion was found. It determines correlation between beam parameters on the one hand and geometric and thermo-physical baffles properties on the other that is necessary for burning of infinity number of baffles.*

\* \* \*