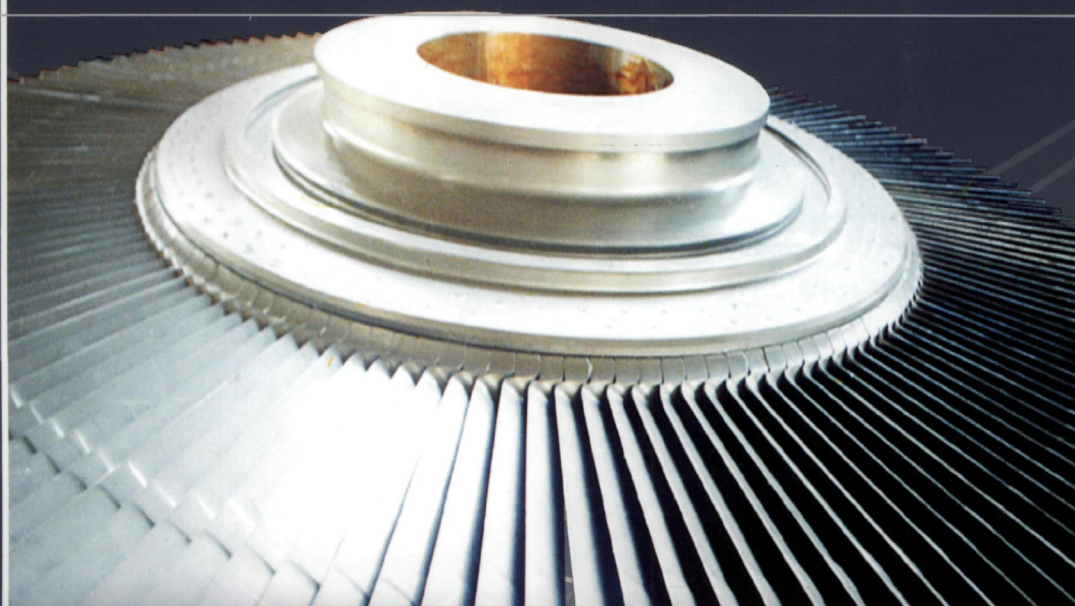


научно-производственный и информационный журнал

# Компрессорное и энергетическое машиностроение

№2(2)

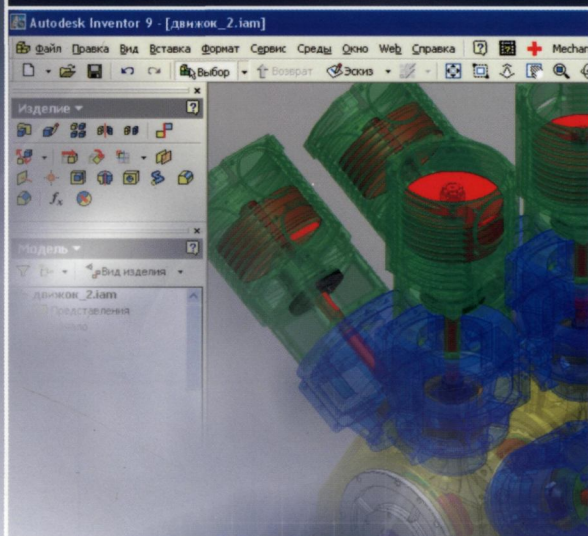
Декабрь 2005



САПР  
поршневых  
компрессорных  
машин

Стр.75

ОАО "НПАО ВНИИкомпрессормаш"



*Международная конференция  
поддержала инициативу  
"Укрросметалла"*

Стр.8

*Проблемы  
энергосбережения  
в компрессоростроении*

Стр.20

*Новые технологии  
модификации  
поверхности*

Стр.78

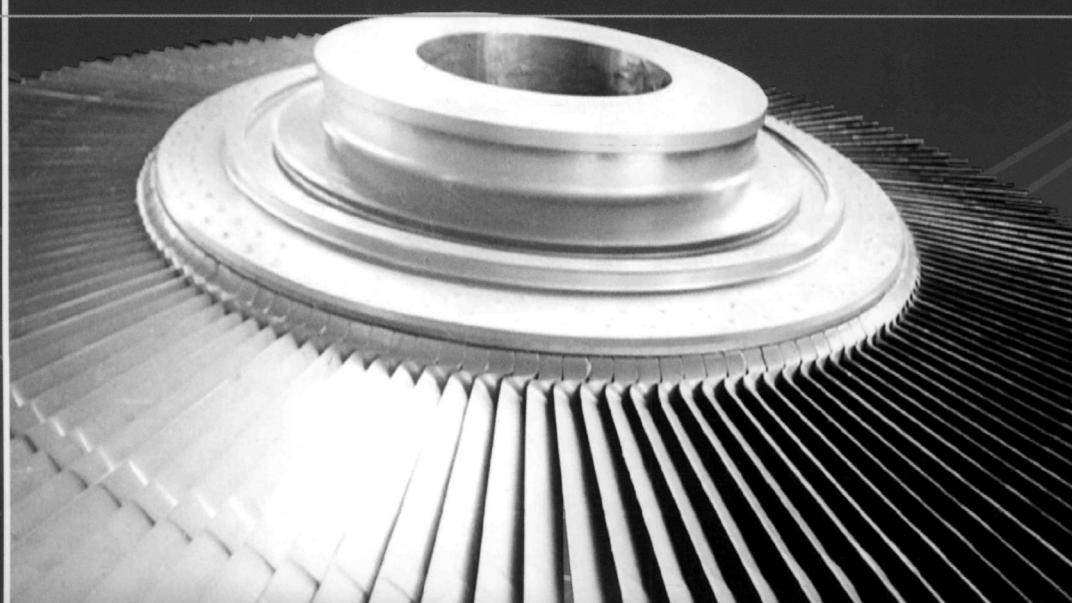


научно-производственный и информационный журнал

# Компрессорное и энергетическое машиностроение

№2(2)

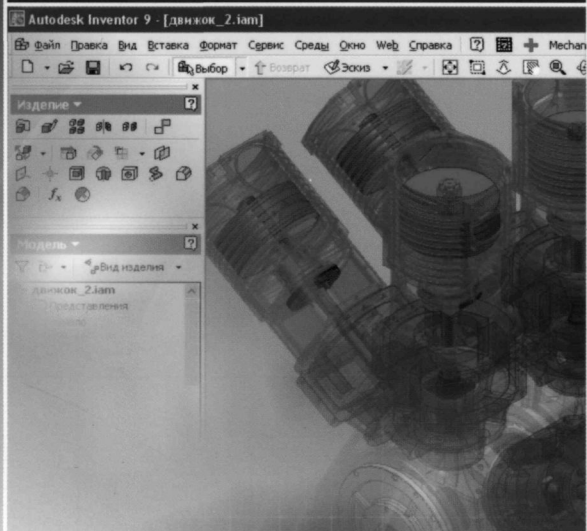
Декабрь 2005



**САПР  
поршневых  
компрессорных  
машин**

Стр.75

ОАО "НПАО ВНИИкомпрессормаш"



*Международная конференция  
поддержала инициативу  
"Укрросметалла"*

Стр.8

*Проблемы  
энергосбережения  
в компрессоростроении*

Стр.20

*Новые технологии  
модификации  
поверхности*

Стр.78

тов подтверждена путем сравнения экспериментальных данных с теоретическим численным анализом статических характеристик аксиально-симметричных электронных пучков.

### 1. Методика экспериментальных исследований.

На рис.1 представлена универсальная схема измерений параметров ленточных и аксиально-сим-

Г. С. Воробьев, д. ф.-м. н., А. А. Дрозденко (Сумский государственный университет),  
А. Г. Пономарев, к. ф.-м. н. (Институт прикладной физики НАН Украины), К. А. Пушкарев, к. ф.-м. н.

## Перспективы применения переходного излучения в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков

**В настоящее время электронные пучки широко используются в различных по назначению промышленных технологических установках для нагрева, плавления, сварки, распыления и изменения структуры различных материалов, обработки и модификации поверхностей, для физических исследований. С расширением областей применения электронных пучков меняются их функции и требования, предъявляемые к параметрам пучков и электроно-оптических систем.**

Известно, что протяженный электронный пучок является главным рабочим элементом многочисленных и разнообразных по типам приборов СВЧ (клистронов, ламп бегущей волны и др.), в которых он выполняет задачу преобразования энергии внешних источников питания в энергию СВЧ-колебаний. Все требования к таким приборам связаны с обеспечением наибольшей эффективности процесса преобразования, т.е. получения большой колебательной мощности, высокого КПД, большого коэффициента усиления и т.д. В связи с этим требуется максимальная информация о пространственной конфигурации электронного пучка при конструировании усилителей и генераторов СВЧ. Проведенный в [1,2] анализ показывает, что наиболее перспективным является использование переходного излучения, возникающего при падении электронов на металлическую мишень.

В данной работе, на примере использования переходного излучения для диагностики высокоинтенсивных электронных пучков в приборах СВЧ, показан диапазон возможностей такого метода. Достоверность полученных результа-

метричных электронных пучков фотометодом [3,4].

Электронный пучок 1 формируется пушкой 2, установленной с возможностью углового перемещения относительно плоскости подвижной мишени 3. Значение угла  $\alpha$  определяется из условия,  $\alpha \geq \arcsin(L/R)$ , где  $L$  – длина рабочей поверхности мишени;  $R$  – характерный размер пучка по сечению.

Для заданного режима работы пушки подвижная мишень устанавливается в исходное положение, определяемое равенством токов на ней и на подвижной мишени 4, что свидетельствует о расположении нижней границы мишени 3 на оси пучка. Устанавливая подвижную мишень для заданных сечений электронного пучка, производят

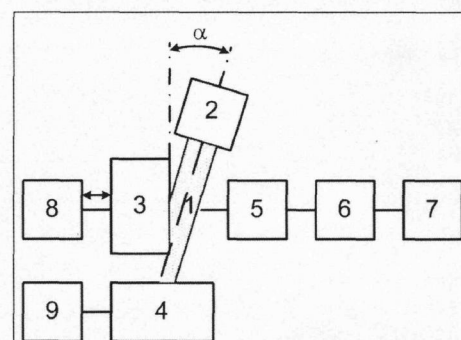


Рис. 1. Структурная схема измерения параметров электронных пучков



фиксирование токов на обоих мишенях измерителями 8 и 9, регистрируя через фильтры 5 и оптическую систему 6 интенсивность переходного излучения на приемнике 7.

В качестве приемника излучения могут быть использованы фотокамера [2-4], телевизионная камера [5], фотоэлектронный умножитель либо приборы с твердотельными датчиками изображения, например, приборы с зарядовой связью. Выбор приемника излучения определяется требованиями, предъявленными к анализу электронного пучка: точности измерений, скорости обработки данных, наглядности получения информации и т.д. Типом приемника излучения определяется также методика обработки следа свечения пучка на мишени в процессе проведения серии измерений по определению геометрических размеров поперечных сечений пучка и распределения плотности тока в абсолютных значениях.

Так, например, при использовании фотокамеры для проведения серии измерений изображение следа свечения пучка фиксируется на фотопленке и обрабатывается по специальной методике [2,3]. Затем с помощью измерительного комплекса, включающего в себя микроденситометр и сопряженную с ним управляющую вычислительную машину, производят расшифровку фотоизображений. Такой метод регистрации позволяет получать с высокой точностью сведения о структуре электронного пучка. Так, для получения полного распределения плотности тока по сечению пучка обрабатывается 104 точек изображения (100 строк по 100 измерений), при этом максимальная относительная ошибка достигает 0,13. Однако указанный метод обладает низкой оперативностью получения данных.

Скорость обработки существенно увеличивается, если исключить процессы обработки пленки, а регистрировать излучение сразу же после оптической фокусировки, например, цифровой фотокамерой, подключенной напрямую к современному высокопроизводительному компьютеру, управляющая программа которого позволяет проводить анализ изображения переходного излучения в автоматическом режиме и накапливать результаты измерений. Однако и этот метод регистрации обладает недостатками, связанными с выбором типа цифровой камеры, которая должна обладать профессионально-качественной оптической системой и требуемым диапазоном и линейной зависимостью светочувствительности матрицы.

## 2. Результаты экспериментальных исследований.

В вакуумной электронике КВЧ в основном используются ленточные и аксиально-симметричные электронные пучки. Так, например, в устройствах типа ГДИ и ЛОВ применяются ленточные электронные пучки, формируемые электронно-оптической системой диодной пушки с магнитным ограничением потока (рис. 2а).

В такой пушке применяется L-катод, позволяю-

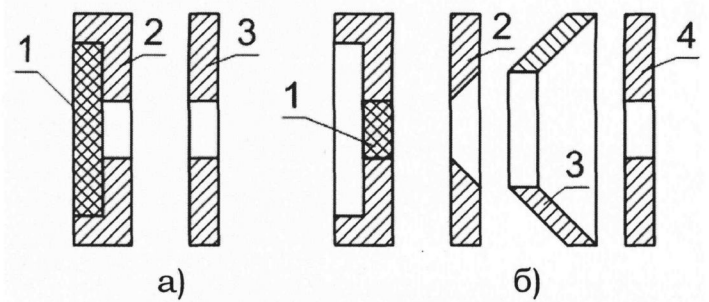


Рис. 2. Схематическое изображение ЭОС исследуемых электронных пучков: 1 - катод; 2 - прикатодные электроды; 3 - первый анод; 4 - второй анод

щий в зависимости от размеров эмитирующей части получать токи пучка  $I = 10-200$  мА при анодном напряжении  $U = 1000-4000$  В и индукции фокусирующего магнитного поля  $B = 0.3-0.6$  Тл. Так как такая электронно-оптическая система полностью помещается в магнитное поле, то электроны в пучке под воздействием тех или иных причин уже на выходе из катода имеют составляющие скорости, перпендикулярные магнитному полю, и движение их происходит по винтовым траекториям, а контур электронного пучка периодически пульсирует относительно некоторого равновесного уровня [6]. Поэтому информация о пучке важна как в максимуме, так и в минимуме статических пульсаций.

Аксиально-симметричные электронные пучки в основном используются в усилителях миллиметрового диапазона волн. В таких устройствах пучок формируется трехэлектродной пушкой (рис. 2б) со сходящейся оптикой и вводится в замедляющую систему, где фо-

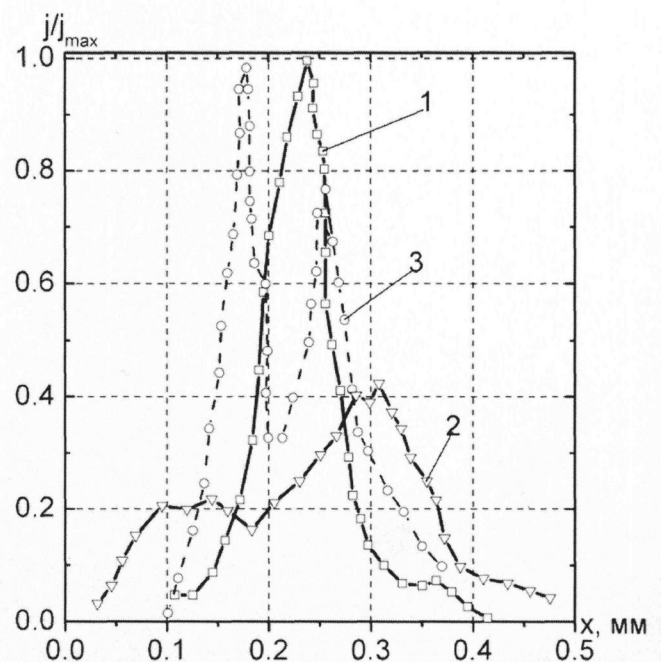
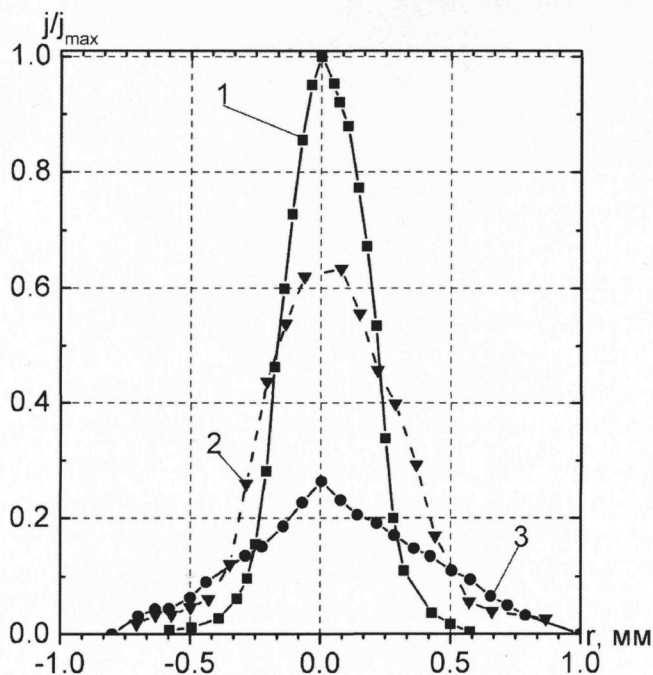


Рис. 3. Распределение плотности тока по толщине ленточного пучка в минимуме (1) и максимуме (2) статической пульсации при однородной эмиссии катода; (3) - неоднородная эмиссия



**Рис. 4. Распределение относительной плотности тока по диаметру аксиально-симметричного пучка в различных его сечениях**

кусируется периодическим магнитным полем. В таких пушках катод выполняется в виде зерна из вольфрамово-ниобиевой смеси с активированной поверхностью. Пушки такого типа позволяют формировать электронные пучки с диаметром в кроссовере порядка 0.3 мм, током пучка  $I = 1-25$  мА при ускоряющих напряжениях  $U = 2000-6000$  В. Поскольку в таких устройствах для оптимальной фокусировки пучка ввод его в магнитную систему должен осуществляться в области кроссовера, то информация о статических параметрах электронного пучка за вторым анодом является особенно важной при конструировании прибора.

Проведенные исследования распределения плотности тока электронных пучков описанных выше систем формирования показали, что плотность тока существенно неоднородна по площади поперечного сечения пучков. Причиной такой неоднородности являются поперечные скорости электронов, которые могут быть вызваны тепловыми эффектами, эффектами линзы анодного отверстия, пространственным зарядом и перекосом электродов пушки.

В частности, на рис.3 представлено распределение плотности тока по толщине ленточного пучка в минимуме (кривая 1) и максимуме (кривая 2) статической пульсации электронного пучка, формируемого диодной пушкой с плоской геометрией и катодом, не имеющим дефектов антиэмиссионного покрытия. При этом ток пучка составлял  $I = 32$  мА при анодном напряжении  $U = 2100$  В и индукции магнитного поля  $B = 0.31$  Тл. На этом же рисунке приведено распределение плотности тока электронного пучка в минимуме пульсации при высокой неоднородности эмиссии (кривая 3).

Из приведенных графиков видно, что даже в случае использования катода, не имеющего дефектов, плотность тока существенно неоднородна, что особенно проявляется в максимуме статической пульсации. Подобное явление наблюдается как при работе катода в режиме ограничения тока пространственным зарядом, так и в режиме полного отбора тока. Следовательно, неоднородность распределения плотности тока по сечению пучка может быть обусловлена как неоднородностью эмиссии катода, так и расслоением пучка в пространстве дрейфа, усиливающимся с ростом плотности тока. Этот факт указывает на то, что в тонких пучках с высокой плотностью тока одним из основных факторов, определяющих структуру пучка, являются силы пространственного заряда.

В значительно меньшей степени перечисленные выше факторы влияют на неоднородность плотности тока аксиально-симметричных электронных пучков, что связано со спецификой формирования таких пучков: аксиально-симметричная оптика, отсутствие магнитного поля в области формирования электронного пучка. Так, на рис.4 представлены распределения плотности тока в относительных единицах для трех поперечных сечений пучка. При этом электронная пушка работала в следующих режимах:  $I = 5$  мА, напряжение фокусирующего электрода  $U_0 = -40$  В, первого анода  $U_{A1} = 80$  В, второго анода  $U_{A2} = 2400$  В. Кривая 1 соответствует сечению электронного пучка, расположенному на расстоянии 4,4 мм от второго анода, остальные две характеристики построены для сечений, расположенных с интервалом 5,5 мм от первого сечения.

Из графиков видно, что, несмотря на наличие локальных и общих неоднородностей в распределении плотности тока по диаметру электронного пучка, они проявляются в значительно меньшей степени, чем для ленточных пучков.

Проведенные исследования и оценки указывают на то, что предложенный метод позволяет исследовать электронные пучки диаметром порядка 0,1 мм при удельной мощности от единиц Вт/см<sup>2</sup> до сотен кВт/см<sup>2</sup>. При этом для фотометода нижний предел обусловлен временем экспонирования, не превышающим минуты, и может быть существенно снижен увеличением светосилы оптической системы. Верхний предел связан с нарушением однородности излучения, вызванным появлением микрофакелов, и может быть также расширен до 1000 кВт/см<sup>2</sup> за счет рассеяния мощности электронного пучка на большой площади мишени при наклонном движении электронов относительно ее плоскости.

### **3. Численный анализ распределения плотности тока в электронном пучке.**

При численном анализе параметров электронного пучка известными считаются геометрия электродов, величины потенциалов электродов, значение тока пучка, распределение плотности тока на эмитирующей поверхности, максимальный разброс электронов по энергии, средняя энергия вылета электронов и их

предельные угловые характеристики. Электрическое поле, обуславливающее поведение электронного пучка  $\vec{E}_\Sigma$ , состоит из составляющей поля электронно-оптических линз  $\vec{E}$  и составляющей поля самого электронного пучка  $\vec{E}_\Pi$ , вызванного распределением пространственного заряда:

$$\vec{E}_\Sigma = \vec{E} + \vec{E}_\Pi \quad (1)$$

Для электронно-оптических систем с аксиальной симметрией напряженность поля, создаваемого непрерывным электронным пучком, не имеет продольной составляющей, поэтому радиальная составляющая поля, обусловленная пространственным зарядом пучка, с некоторым приближением может быть представлена соотношением [7]:

$$E_{\Pi,r} = \frac{I \cdot r}{2\pi \cdot R^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot V} \quad (2)$$

где  $I$  – ток пучка;  $R$  – радиус огибающей поверхности пучка;  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная;  $V$  – средняя скорость движения электронов:

$$V = \left[ \frac{-2 \cdot Q \cdot (U - \tilde{U})}{m_0} \right]^{1/2} \quad (3)$$

где  $U - \tilde{U}$  – разность потенциалов, пройденная электронами;  $Q$  и  $m_0$  – заряд и масса электрона соответственно.

Нерелятивистское траекторное уравнение в цилиндрической системе координат в этом случае легко получить в следующем виде:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} = \frac{I + r'}{2(U - \tilde{U})} \cdot \left( \frac{I \cdot r}{2\pi \cdot R^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot V} - E_r(r, z) + r' E_z(r, z) \right) \quad (4)$$

где  $E_r(r, z)$  и  $E_z(r, z)$  – радиальная и продольная компоненты электрического поля электронно-оптических линз.

Если поперечные размеры пучка значительно меньше его продольных размеров, компоненты аксиально-симметричного поля представляются в виде степенных рядов от радиуса с коэффициентами, содержащими производные от распределения потенциала на оси прохождения пучка:

$$E_r(r, z) = U_0^{II}(z) \cdot \frac{r}{2} - U_0^{IV}(z) \cdot \frac{r^3}{16} + \dots \quad (5)$$

$$E_z(r, z) = -U_0^I(z) + U_0^{III}(z) \cdot \frac{r^2}{4} - \dots$$

Для определения распределения потенциала и его производных  $U_0^{(n)}(z)$  на оси системы применяется численный метод решения интегральных уравнений для теории потенциала.

В случае аксиально-симметричных полей, распределение потенциала может быть представлено в виде [7]:

$$U(r, z) = \frac{1}{\pi \varepsilon_0} \cdot \int_G \frac{r_i \cdot \sigma(r_i, z_i) \cdot K(t_i) \cdot d\tau}{\sqrt{(r + r_i)^2 + (z - z_i)^2}} \quad (6)$$

где  $\sigma(r_i, z_i)$  – поверхностная плотность зарядов;  $r_i = r_i(\tau)$ ,  $z_i = z_i(\tau)$  – параметрическое задание контура электродов электронно-оптических элементов;  $\tau$  – независимый параметр, описывающий длину контура электродов  $G$ ;

$$K(t_i) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\beta}{\sqrt{1 - t_i^2 \cdot \sin^2(\beta)}} \quad \text{– полный эллиптический интеграл первого рода;}$$

$$t_i = \frac{2 \cdot \sqrt{r \cdot r_i}}{\sqrt{(r + r_i)^2 + (z - z_i)^2}} \quad \text{– параметр эллиптического интеграла.}$$

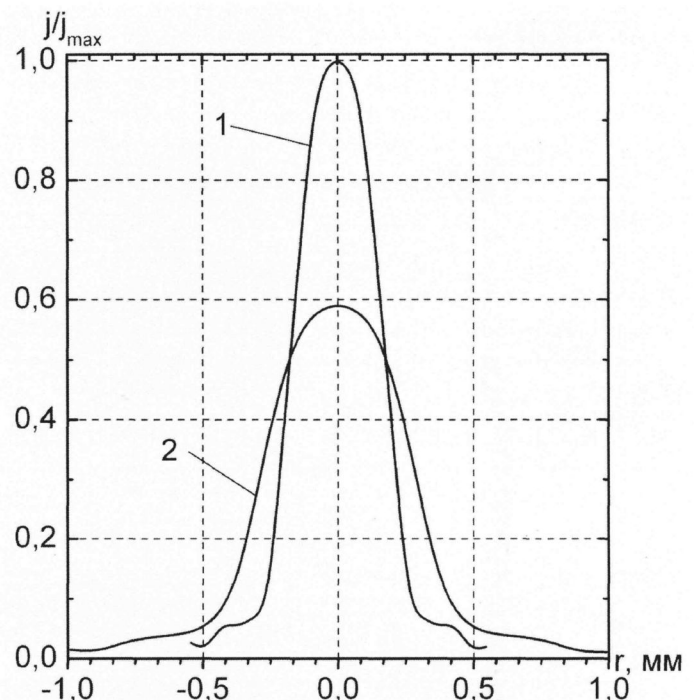
После дискретизации контура электродов  $\{\tau_j\}$  распределение плотности поверхностного заряда  $\sigma(r(\tau), z(\tau)) = \sigma(\tau)$  представляется в виде аппроксимации с помощью линейного сплайна  $\psi_j(\tau)$  по неизвестным дискретным значениям  $\sigma_j$ :

$$\sigma(\tau) = \sum_j \sigma_j \cdot \psi_j(\tau), \quad \psi_j(\tau_m) = \delta_{jm} \quad (7)$$

Применение метода коллокаций позволяет свести задачу (6), (7) к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $\sigma_j$ .

Преимущество применения интегрального метода заключается в том, что после того, как определены значения  $\sigma_j$ , вычисление производных от распределения потенциала на оси системы сводится к вычислению интегралов вида:

$$\frac{d^n U_0(z)}{dz^n} = \frac{1}{\pi \varepsilon_0} \cdot \int_G r_i(\tau) \cdot \sigma(\tau) \cdot \frac{d^n}{dz^n} \left( \frac{K(t_i)}{\sqrt{(r_i(\tau))^2 + (z - z_i(\tau))^2}} \right) \cdot d\tau \quad (8)$$



**Рис. 5. Результаты численного расчета распределений относительной плотности тока по диаметру аксиально-симметричного пучка: 1 – расстояние от анода 4,4 мм; 2 – расстояние от анода 9,9 мм**



В уравнении (4) неопределенным является радиус огибающей пучка  $R$ . Поэтому при вычислении организован итерационный процесс, на первом шаге которого считается, что ток пучка равен нулю. В произвольной итерации  $m$  уравнение (4) имеет вид:

$$\frac{d^2 r_m}{dz^2} = \frac{1+r'_m}{2(U-\tilde{U})} \cdot \left( \frac{I \cdot r_m}{2\pi \cdot R_{m-1}^2 \cdot \epsilon_0 \cdot V} - E_r(r_m, z) + r'_m E_z(r_m, z) \right) \quad (9)$$

Уравнение (9) с учетом соотношения (5) и результатов вычислений (8) является нелинейным по  $r$ , поэтому для его решения используется пошаговый метод Эверхарта [8]. Достоинство метода Эверхарта состоит в широком диапазоне изменения контрольного параметра, позволяющего выбрать оптимальный вариант затрат машинного времени и точности интегрирования. Для определения радиуса огибающей пучка расчет проводится для некоторого начального фазового множества из набора  $N$  частиц, которое генерируется случайным образом в плоскости эмитирующей поверхности. Для моделирования распределения плотности тока каждая из частиц начального фазового множества наделяется значением плотности тока. Огибающая пучка  $m$ -й итерации определяется из соотношения:

$$R_m(z) = \max_k(r_{m,k}(z)), \quad k=1, \dots, N.$$

Расчет проводится до выполнения соотношения:

$$\max_z |R_{m+1}(z) - R_m(z)| < \xi,$$

где  $\xi$  – задаваемая точность расчета.

Для определения распределения плотности тока по диаметру электронного пучка при сравнении с экспериментом использовался метод сеточной ловушки частиц [9]. Суть метода состоит в поперечном пересечении электронного пучка сеткой с заданными размерами ячейки и дальнейшем подсчете количества плотности тока несущей каждой частицей, попавшей в ту или иную ячейку сетки. Таким образом происходит накопительный сбор информации о плотности распределения частиц в пучке. Сетка устанавливалась на расстояниях 4,4 мм и 9,9 мм от второго анода, что соответствовало приведенным ранее экспериментальным данным.

На рис. 5 представлены результаты численного расчета распределения относительной плотности тока по диаметру электронного пучка. Как видно из сопоставления рис. 4 и рис. 5, результаты экспериментальных исследований статических характеристик удовлетворительно согласуются с численным анализом, что подтверждает эффективность метода диагностики пучков по переходному излучению.

#### Заключение

Применение переходного излучения для исследования электронных пучков позволяет получить большой объем информации о структуре ленточных и аксиально-симметричных пучков, которая имеет основопола-

гающее значение при разработке и конструировании приборов СВЧ и другого рода электрофизических установок.

Апробация экспериментальных данных, путем сравнения с численным анализом характеристик электронных пучков, указывает на достоверность полученных результатов. Оценка предельных значений мощности исследуемых электронных пучков (от единиц Вт/см<sup>2</sup> до 100 кВт/см<sup>2</sup> и выше) указывает на возможность применения метода переходного излучения при диагностике высокоинтенсивных пучков, используемых в технологических установках по нанесению покрытий, электросварке и т.д.

#### Summary

In this paper is described method for measuring static characteristic of strip and axially symmetric high-intensive electron beams of microwave devices, based on using optical range transient radiation, which stimulated with falling electrons on metal target. Also algorithm of numerical computation is described. Comparison of theoretical calculation and experimental measuring of distribution of current density in cross-section beam point to validity of results.

#### Список литературы

1. Белоусов Е.В., Воробьев Г.С., Корж В.Г., Куц Р.И., Лысенко А.Н. Применение переходного излучения в диагностике высокоинтенсивных электронных пучков // Вестник СумГУ. – 1997. – № 1(7). – С.69 – 73.
2. Воробьев Г.С., Нагорный Д.А., Пушкарев К.А., Белоусов Е.В., Корж В.Г. Фотометод диагностики аксиально-симметричных электронных пучков // Изв. Вуз. Радиоэлектроника. – 1998. – №6. – С.59 – 64.
3. Балаклицкий И.М. и др. Фотометод исследования электронных пучков с высокой удельной мощностью // Изв. вузов. Радиоэлектрон., 1982, 25, №5. – С. 38 – 42.
4. Пат. 2008737С1 России, МКИ G01J9142, G01T1/29, опубликовано в Бюлл. РФ Изобретение №4 от 28.02.94».
5. Дисплейная система визуализации электронных пучков / Балаклицкий И.М., Бабичев С.А. и др. // Электроника миллиметровых и субмиллиметровых диапазонов. – Киев: Наук, думка, 1987. – С. 135 – 139.
6. Алямовский И.В. Электронные пучки и электронные пушки. -М.: Советское радио, 1966.
7. Силады М. Электронная и ионная оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 639с.
8. Бордовицына Т.В. Современные численные методы в задачах небесной механики. – М.: Наука, 1984. – 136с.
9. Воробьев Г.С., Пономарев А.Г., Дрозденко А.А., Крутько Ю.А. К вопросу оптимизации режимов работы трехэлектродной пушки ЛБВ // 15-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2005). – Севастополь: «Вебер». – 2005. – С. 212 – 213.