

## Расчетное и экспериментальное исследование электронно-оптических систем низкоэнергетичных электронных ускорителей с пучком большого сечения

© С.Л. Косогоров

Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова,  
196641 Санкт-Петербург, Россия  
e-mail: slkosogorov@mail.ru

(Поступило в Редакцию 30 июля 2010 г. В окончательной редакции 21 октября 2010 г.)

Описан ускоритель электронов на основе термоэмиссии с пучком большого сечения, работающий в непрерывном режиме. Приведены результаты расчетов электронно-оптических систем ускорителя триодного и тетродного типа по предложенной инженерной методике. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных параметров ускорителя.

### Введение

Широкоапертурные низкоэнергетичные электронные ускорители, генерирующие пучки большого сечения, находят широкое применение в различных технологиях. Их принципиальной особенностью является возможность одновременного облучения поверхностей либо газовых объемов большого поперечного сечения для использования как в радиационных технологиях, так и в других целях (плазмохимические реакторы, газовые электроионизационные лазеры). Широко известны ускорители данного типа на основе ряда протяженных проволочных термоэммиттеров с планарными электронно-оптическими системами (ЭОС) [1,2].

В данной работе представлены результаты расчетных и экспериментальных исследований широкоапертурного термоэмиссионного ускорителя с ЭОС триодного и тетродного типа и проведено их сравнение. Ускоритель генерирует низкоэнергетичный (до 200 keV) электронный пучок большого сечения. В отличие от ранее исследованных систем ускоритель работает в непрерывном режиме. Кроме того, ускоритель в работе [1] был выполнен с триодной ЭОС, в которой сетка находится под потенциалом катода (неуправляемый триод), а в работе [2] в тетроде обе сетки находятся под различными положительными потенциалами и вторая сетка выполнена в виде перфорированной круглыми отверстиями плиты. В рассматриваемом ускорителе сетки выполнены в виде ряда нитей либо стержней.

Особенностью рассматриваемого ускорителя является возможность его работы как с триодным, так и с тетродным типом электронно-оптической системы. При этом система питания существенных изменений не требует и имеет один канал управляющего сеточного напряжения.

### Описание модели широкоапертурного ускорителя

На первом этапе нами испытывались ЭОС триодного типа. Конструктивная схема ускорителя с триодной ЭОС

представлена на рис. 1, на рис. 2 — схема с тетродной ЭОС, размеры указаны в миллиметрах. В вакуумной камере 1 ускорителя на проходном высоковольтном изоляторе 2 установлен катодно-сеточный блок. В катодно-сеточном блоке имеются плоский тепловой экран (спре-

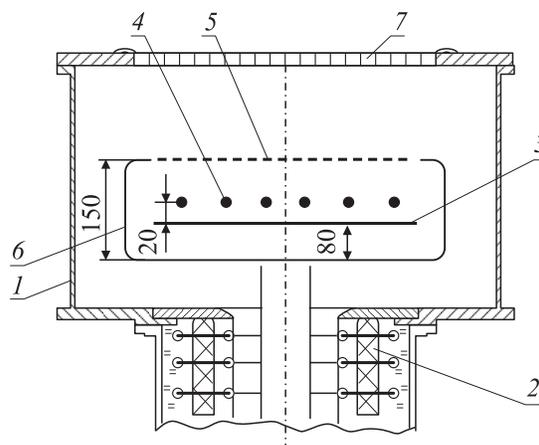


Рис. 1. Конструктивная схема ускорителя с триодной ЭОС.

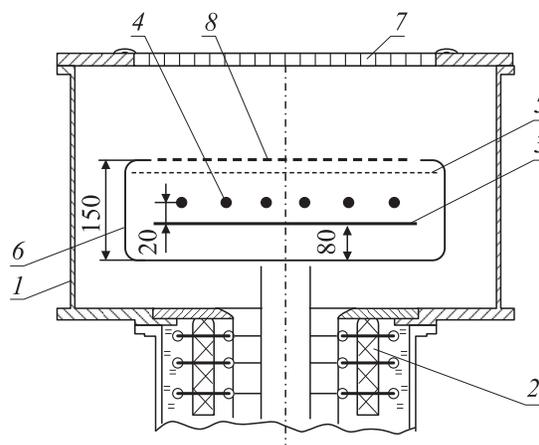


Рис. 2. Конструктивная схема ускорителя с тетродной ЭОС (8 — формирующая сетка).

дер) 3, ряд проволочных эмиттеров из торированного вольфрама 4, размещенных с определенным шагом, управляющая сетка 5 в виде параллельных стержней диаметром 3 мм из вольфрама, расположенных с шагом 9 мм. Элементы катодного блока заключены в электростатический экран 6. С целью снижения температурных поводок при работе ускорителя конструкция катодного блока выполнена секционированной. Это повышает надежность ускорителя и стабильность его параметров. Анодом ускорителя является выпускное окно 7 сечением  $500 \times 400$  мм, состоящее из опорной решетки и фольги из сплава АМг-2н толщиной 30 мкм. Охлаждаемая опорная решетка выполнена из хромистой бронзы, перфорирована щелевыми отверстиями и имеет геометрическую прозрачность 64%. Выпускное окно рассчитано на вывод электронного пучка с плотностью до  $100 \mu\text{А}/\text{см}^2$ .

Рабочее давление в вакуумной камере ускорителя в диапазоне  $3 \cdot (10^{-5} - 10^{-3})$  Па поддерживается двумя магнитоэлектрическими насосами НМД-0.4 и одним титановым абсорбированным электродуговым испарителем разработки НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

Высоковольтное питание обеспечивалось от высоковольтного каскадного выпрямителя ИВН 300/0.5, также разработанного в НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

## Инженерная методика расчета параметров ускорителя

Расчет параметров триодной или тетродной ЭОС проводился в соответствии с общей теорией многосеточных ламп [3,4]. Для определения катодного тока тетрод сводится к эквивалентному диоду, анод которого располагается в плоскости первой сетки с действующим потенциалом  $U_{d1}$  и площадью поверхности  $F_{\text{эф}}$ . Выражение для закона степени 3/2 имеет вид:

$$I_k = 2.33 \cdot 10^{-6} k \frac{F_{\text{эф}}}{z_{g1}^2} U_{d1}^{3/2}. \quad (1)$$

Здесь  $k$  — коэффициент, учитывающий отличие системы от идеальной, его численное значение было определено нами ранее в предварительных экспериментах и принято равным 0.5 для аналогичных систем;  $z_{g1}$  — расстояние катод–первая сетка;  $U_{d1}$  — действующий потенциал в плоскости первой сетки. Значение  $F_{\text{эф}}$  — в нашем случае для планарных систем с дискретными протяженными эмиттерами длиной  $h$ , расположенными с шагом  $a$ , количеством  $N$  — определяется как

$$F_{\text{эф}} = 4hz_{g1}[(N-1)a/2z_{g1} + 1]. \quad (2)$$

Действующий потенциал анода эквивалентного диода равен

$$U_{d1} = \frac{U_{g1} + D_1 U_{g2} + D_1 D_2 U_a}{1 + qD_1}, \quad (3)$$

где  $U_{g1}$ ,  $U_{g2}$ ,  $U_a$  — потенциалы первой, второй сеток и анода соответственно;  $D_1$ ,  $D_2$  — проницаемость первой

и второй сеток;  $q = (z_{g2}/z_{g1})^{4/3}$ ;  $z_{g2}$  — расстояние катод–вторая сетка.

Для расчета проницаемости сеток тетрод разбивается на эквивалентные триоды, состоящие из сетки, проницаемость которой находим, и двух ближайших электродов, определяемых как катод и анод. Для определения проницаемости первой сетки, если коэффициент заполнения  $\sigma_1 \ll 1$ , можно воспользоваться формулой Шоттки [4]:

$$D = \frac{-\ln(\pi\sigma_1)}{2\pi(z_a - z_g)/p}, \quad (4)$$

где  $z_a$  — расстояние катод–анод в рассматриваемом эквивалентном триоде;  $z_g$  — расстояние катод–сетка эквивалентного триода;  $\sigma_1$  — коэффициент заполнения первой сетки. Для сетки в виде ряда параллельных стержней коэффициент заполнения определяется как

$$\sigma_1 = 2c/p, \quad (5)$$

здесь  $2c$  — диаметр стержней сетки;  $p$  — их шаг.

Для высоких коэффициентов заполнения сетки  $\sigma \geq 0.3$  формула (4) неприменима, поэтому для определения проницаемости второй сетки в тетроде либо первой сетки в триоде, имеющих в наших конструкциях коэффициент заполнения  $\sigma \approx 0.4$ , необходимо использовать для расчета проницаемости формулу Оллендорфа [4]:

$$D = \frac{F1}{\frac{6.28d_{ag}}{p} - F2}, \quad (6)$$

где

$$F1 = -\ln \pi\sigma + \frac{1}{2} F2 - \frac{z^2}{2 + 1.2z^2};$$

$$F2 = \frac{6z}{1 + z - \frac{0.21z^4}{7/4 + z^3}}; \quad z = \frac{1}{12} (\pi\sigma)^2.$$

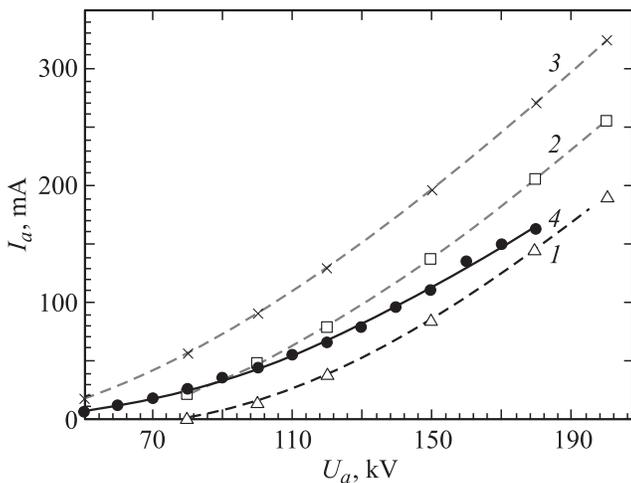
Учитывая изложенное выше и пользуясь выражениями (1)–(6), запишем для рассматриваемого тетрода закон степени 3/2:

$$I_k = 2.33 \cdot 10^{-6} k \frac{4kz_{g1}[(N-1)a/2z_{g1} + 1]}{z_{g1}^2} \times \left( \frac{U_{g1} + D_1 U_{g2} + D_1 D_2 U_a}{1 + qD_1} \right)^{3/2}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет определить зависимость катодного тока  $I_k$  от ускоряющего напряжения  $U_a$  в системах как триодного, так и тетродного типа ЭОС.

## Обсуждение результатов экспериментов и сравнение с расчетными характеристиками

Для описанного ускорителя с триодной ЭОС снималась анодная вольт-амперная характеристика — зависимость тока, падающего на опорную решетку (тока



**Рис. 3.** Расчетные (1 —  $U_g = -60$ , 2 —  $U_g = -45$ , 3 —  $U_g = -20$  V) и экспериментальные (4 —  $U_g = -20$  V) характеристики ускорителя с триодной ЭОС.

нагрузки  $I_a$ ) от ускоряющего напряжения  $U_a$  при фиксированном сеточном потенциале. Полученные результаты приведены на рис. 3, там же даны расчетные кривые, полученные на основании формулы (7).

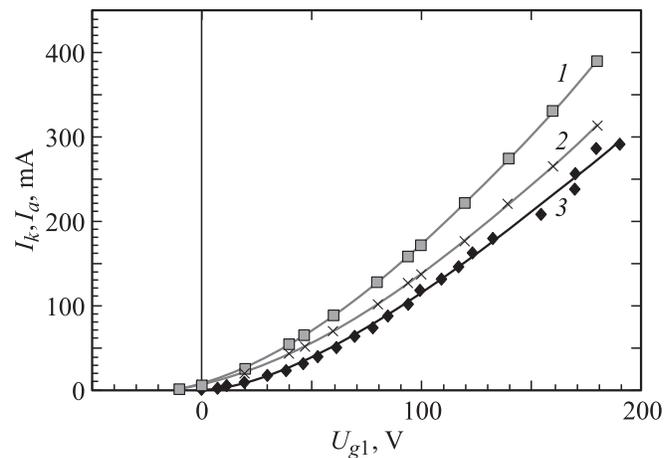
При сравнении расчетных и экспериментальных данных необходимо обратить внимание на следующее. В данных экспериментах нами не проводилось прямое измерение потенциала сетки под полным высоким напряжением. Рассматриваемый триод с управлением в области отрицательных сеточных напряжений включен по схеме с общей сеткой. В этом случае ток нагрузки (анодный ток) на выходном резисторе источника питания сетки  $R_{gk}$ , установленном параллельно промежутку сетка-катод, создает автоматическое отрицательное смещение, которое складывается с отрицательным напряжением уставки сетки, причем чем больше анодный ток, тем меньше (большое отрицательное значение) управляющий потенциал сетки. Это подтверждает более пологая экспериментальная кривая, пересекающая расчетные в соответствии с уменьшением эффективного сеточного напряжения. Можно ответить, что расчетная методика достоверно указывает требуемый рабочий диапазон сеточных напряжений, подтверждает полученную экспериментально тенденцию, однако численное сравнение расчетных и экспериментальных данных затруднено.

На рис. 3 по оси ординат приведено значение тока нагрузки  $I_a$ , которое при работе триода в области отрицательных сеточных потенциалов совпадает с током катода  $I_k$ , поскольку отсутствует перехват тока сеткой. Эксперименты подтвердили существенное влияние геометрии управляющей сетки на характеристики ускорителя с ЭОС триодного типа, как было видно из расчетов. Так, с сеткой из стержней диаметром 3 мм и шагом 7.5 мм в ускорителе не удалось получить ток нагрузки больше  $I_a = 180$  мА при полностью открытой

сетке, т.е. при установленном значении  $U_g = 0$ . Такой анодный ток обеспечивает автоматическое смещение на сетке в наших условиях около  $-55$  V. Расчеты показывают, что при  $U_a = 180$  кВ и  $U_g = -55$  V анодный ток составит  $I_a = 160$  мА. Для достижения требуемых параметров ускорителя по току нагрузки и выведенному току пучка  $I_{beam}$  в соответствии с расчетами нами была изменена конструкция управляющей сетки, увеличен шаг стержней до 9 мм, что позволило повысить значения этих параметров до  $I_a = 350$  мА и  $I_{beam} = 160$  мА. При этом среднее значение плотности тока выведенного пучка составило  $80 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , что является весьма успешным результатом для ускорителей подобного типа.

Нами также исследовался ускоритель с ЭОС тетродного типа (рис. 2). Катодно-сеточный блок тетродного типа кроме указанных для триода элементов содержит еще одну сетку — формирующую (8). Управляющая сетка в тетроде представляет собой ряд параллельно натянутых вольфрамовых нитей диаметром 0.35 мм. Формирующая сетка выполнена из вольфрамовых стержней диаметром 3 мм с шагом 7.5 мм. Формирующая сетка соединена с электростатическим экраном, спредером и одним из концов термоэммиттеров (с отрицательным потенциалом питания накала постоянным напряжением), что упрощает схему питания тетрода, поскольку отсутствует отдельный источник питания второй сетки. Управление током ускорителя — в области положительных потенциалов управляющей сетки. В этом случае ток катода не совпадает с током нагрузки, поскольку имеет место перехват части электронов с катода управляющей сеткой.

На рис. 4 представлены экспериментальная и расчетные управляющие характеристики ускорителя с тетродной ЭОС — зависимости тока нагрузки (эксперимент) и катодного тока (расчет) от напряжения на управляющей сетке при ускоряющем напряжении  $U_a = 170$  кВ. Как и в триоде, здесь также не проводились прямые измерения сеточного потенциала. Однако использована схема

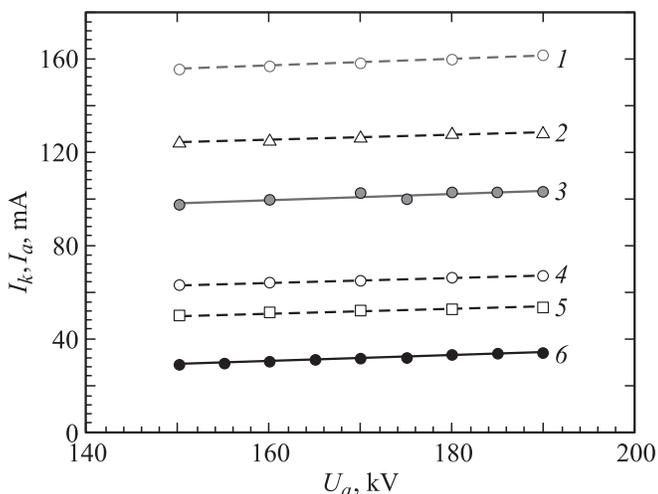


**Рис. 4.** Управляющие характеристики ускорителя с тетродной ЭОС: 1 — расчет  $I_k f(U_g)$  при  $k = 0.5$ ; 2 — 0.4; 3 — эксперимент  $I_a = f(U_{g1})$ .

включения с общим катодом, а влияние тока нагрузки на сеточный потенциал отсутствует. Оценка потенциала сетки проводилась с помощью предварительно проведенной калибровки выходного напряжения источника по первичной стороне разделительного сеточного трансформера.

Как уже упоминалось, значения анодного тока должны быть меньше значений катодного на величину потерь тока на первой сетке. Нами были проведены расчеты таких потерь по методике, изложенной в работе [5]. По результатам расчетов в рассматриваемых условиях определено, что кроме потерь на положительной сетке 6–7% существуют дополнительные потери катодного тока, также 6–7%, обусловленные движением частиц в тормозящем поле в промежутке между сетками и движением частиц вдоль катодов. Суммарные потери составляют 12–15% катодного тока. Учитывая это и пользуясь выражением (7) для расчета катодного тока, можно провести сравнение с экспериментом.

На рис. 4, 5 приведены расчетные кривые для двух значений коэффициента  $k$  в выражении (7). Расчетные данные при использовании значения  $k = 0.4$  лучше согласуются с экспериментом, чем при обычно используемом нами  $k = 0.5$ . При этом расхождение расчетов с экспериментами при рабочих сеточных напряжениях составляет 10–15%, заметно увеличиваясь в области малых потенциалов сетки. Однако необходимо отметить, что для инженерной методики расчета сложных электрофизических установок при их проектировании точность расчета диапазона рабочих токов и напряжений в 20–30% можно считать приемлемой. Сравнение данных, таким образом, позволило уточнить значение поправочного коэффициента в выражении для расчета катодного тока в планарных системах.



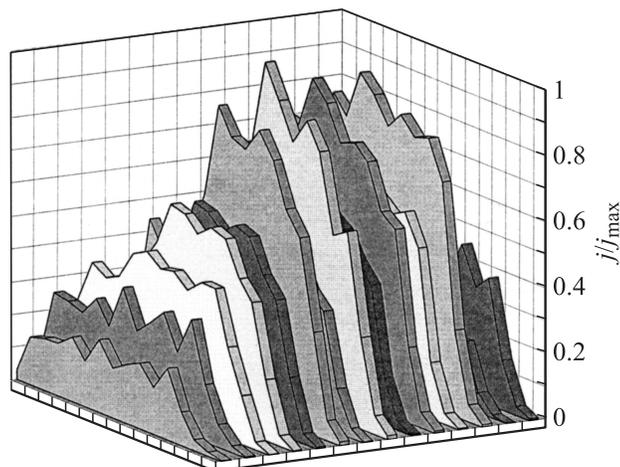
**Рис. 5.** Анодные характеристики ускорителя с тетродной ЭОС: о — расчет  $I_k = f(U_a)$  при  $k = 0.5$  и  $U_{g1} = 94$  В, Δ — расчет  $I_k(U_{g1})$  при  $k = 0.4$  и  $U_{g1} = 94$  В, о — расчет  $I_k = f(U_a)$  при  $k = 0.5$  и  $U_{g1} = 47$  В, □ — расчет  $I_k = f(U_a)$  при  $k = 0.4$  и  $U_{g1} = 47$  В, ● — эксперимент  $I_a = f(U_a)$  при  $U_{g1} = 94$  В, ● — эксперимент  $I_a = f(U_a)$  при  $U_{g1} = 47$  В.

Расчет также демонстрирует необходимость биполярного питания сетки для полного управления ускорителем: его запираение требует отрицательного напряжения, а для открытия необходимо положительное. Применяя в качестве запирающего отрицательный потенциал питания накала термоэмиттеров, прикладываяемый к формирующей сетке, можно использовать униполярное питание управляющей сетки. Необходимо отметить, что в рассматриваемом ускорителе термоэмиттеры имеют длину 420 мм и напряжение питания накала составляет 17 В. Таким образом, при переходе от триодной схемы ЭОС к тетродной достаточно поменять полярность сеточного напряжения (с отрицательной на положительную) и использовать в качестве запирающего напряжения нулевой потенциал на управляющей сетке.

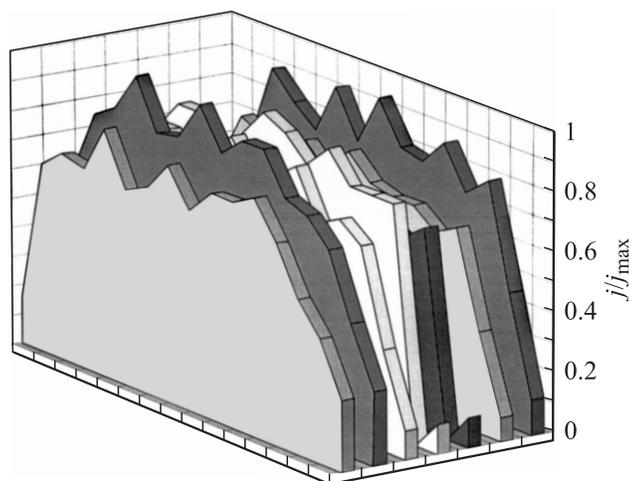
Экспериментальная анодно-сеточная характеристика ускорителя (рис. 4) демонстрирует возможность эффективной регулировки тока однополярным сеточным напряжением при такой схеме включения. На рис. 5 приведены экспериментальные и расчетные анодные характеристики ускорителя с тетродной ЭОС. Видно, что с ростом ускоряющего напряжения ток в ускорителе увеличивается незначительно, а величину тока определяет потенциал управляющей сетки. Это говорит о независимости регулировки тока и энергии электронного пучка в тетродных электронно-оптических системах, что является безусловным преимуществом тетродных ЭОС по сравнению с триодными. Расхождение расчетного катодного тока с учетом потерь в ЭОС по сравнению с измеренным током анода, на наш взгляд, можно объяснить следующим образом:

- тормозящее поле, обеспечиваемое приложением отрицательного потенциала питания накала термоэмиттеров к формирующей сетке, не было учтено в расчете;
- технические сложности прямого измерения потенциала управляющей сетки под высоким напряжением затрудняют проведение сравнительного анализа;
- при небольших значениях потенциала управляющей сетки в тетроде напряжение питания накала термоэмиттеров становится сравнимым с сеточным напряжением, это может существенно повлиять на токоотбор и не учтено в расчете.

Для ускорителя с триодной и тетродной ЭОС были сняты распределения плотности тока по сечению выведенного пучка. Методика измерения распределения подробно описана в [6]. На рис. 6 и 7 приведены типичные картины распределения плотности тока по сечению выведенного пучка из ускорителя с ЭОС триодного и тетродного типа. Сравнение распределений показывает, что в ускорителе с тетродной ЭОС может быть обеспечена более высокая однородность распределения плотности тока по сечению ( $\Delta j/j \leq \pm 10\%$ ). Это связано, на наш взгляд, с тем, что в ЭОС тетродного типа краевые эффекты оказывают значительно меньшее влияние на характеристики пучка (по периметру апертуры) вследствие наличия двух сеток. В ускорителе с триодной ЭОС вытягивание тока электронов обеспечивается полем анода, провисающим сквозь управляющую сетку,



**Рис. 6.** Профили плотности тока по сечению выведенного пучка в ускорителе с триодной электронно-оптической системой;  $j/j_{\max}$  — плотность тока выведенного пучка в относительных единицах.



**Рис. 7.** Профили плотности тока по сечению выведенного пучка в ускорителе с тетродной электронно-оптической системой.

на краях апертуры катодно-сеточного блока провисание электрического поля слабее. В тетродной ЭОС вытягивание электронов производится за счет потенциала управляющей сетки и влияние провисания поля анода сквозь две сетки значительно слабее.

## Заключение

Таким образом, по предложенной инженерной методике произведены расчеты электронно-оптических систем триодного и тетродного типа широкоапертурного ускорителя непрерывного действия на основе ряда дискретных протяженных термоэмиттеров. Методика позволяет рассчитать рабочие диапазоны токов и управляющих напряжений при разработке и проектировании ускорителей подобного класса с планарными электронно-

оптическими системами. Проведенные эксперименты позволили уточнить значение поправочного коэффициента в выражении для расчета катодного тока. Полученные экспериментальные результаты характеристики ускорителя удовлетворительно совпадают с расчетом.

Сделан вывод, что ускоритель с ЭОС тетродного типа обладает рядом достоинств по сравнению с аналогичным ускорителем с ЭОС триодного типа — в нем обеспечивается независимая регулировка тока и энергии электронного пучка, распределение плотности тока по сечению выведенного электронного пучка имеет более однородный характер.

## Список литературы

- [1] *Аброян М.А., Богомазов П.М., Зверев С.Ф.* и др. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 28–30.
- [2] *Аброян М.А., Богомазов П.М., Желтов В.А.* и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. „Электрофизическая аппаратура“. Л.: Энергоатомиздат, 1989. Вып. 24. С. 48–50.
- [3] *Кацман Ю.А.* Электронные лампы. М.: Высш. школа, 1979. 301 с.
- [4] *Клейнер Ю.Е.* Основы теории электронных ламп. М.: Высш. школа. 1974. 368 с.
- [5] *Аброян М.А., Зув Ю.В., Косогоров С.Л.* и др. // ЖТФ. 2003. Т. 73. Вып. 8. С. 98–104.
- [6] *Аброян М.А., Косогоров С.Л., Набокова* и др. // ПТЭ. 2007. № 4. С. 109–112.