

УДК 621.384.8

**Н.П. Овсянников, А.Е. Малютин, А.А. Фефелов**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ**  
**ИОННОГО ПОТОКА ПОЛЕВОГО ИСТОЧНИКА ИОНОВ**

*Предложена математическая модель полевого ионного источника с многоострийным электродом на основе углеродных волокон. Теоретически определён ряд параметров ионного потока. Предложена методика исследования параметров потока полевого ионного источника путём анализа изображения полевого многоострийного электрода в автоионном микроскопе. Исследуется интегральное угловое распределение потока и проводится анализ тонкой структуры потока.*

**Ключевые слова:** ионный источник, полевая ионизация, углеродные волокна, автоионный микроскоп

**Введение.** Исследования, направленные на создание эффективных, стабильных и технологичных полевых эмиссионных структур для решения задач формирования электронных и ионных пучков, с давних времен находятся в центре внимания научной общественности.

Для масс-спектрометрии остро стоит задача ионизации анализируемых газов без диссоциации. Эта задача может быть решена при использовании метода полевой ионизации молекул, что обусловлено рядом преимуществ этого метода ионизации по сравнению с другими. Полевая ионизация является мягким методом ионизации, при котором диссоциация анализируемых соединений мала. При этом в масс-спектрах полевой ионизации можно ожидать наличия интенсивной линии молекулярных ионов. При использовании этого метода ионизации возможно достижение наиболее высокого коэффициента ионизации для молекул с малым потенциалом ионизации, что может значительно увеличить возможности масс-спектрометрического анализа органических соединений, который обычно затруднен.

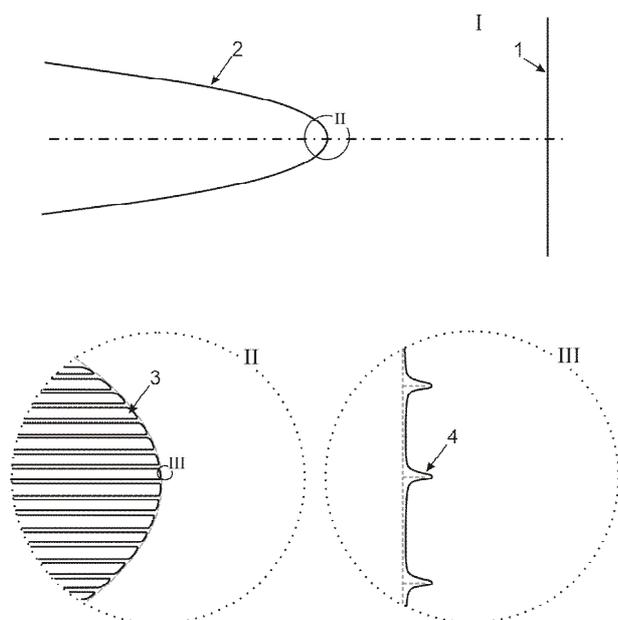
В качестве эмиттеров полевых источников ионов перспективно использование пучков углеродных волокон. Использование углеродных волокон в качестве полевых источников электронов хорошо известно. Доказана возможность их стабильной работы в условиях технического вакуума. Устойчивая эмиссионная способность углеродных волокон обеспечивается их внутренней структурой, где вытянутые вдоль оси фибриллы, выходящие на торцевую поверхность углеродных волокон, являются естественными эмитирующими элементами. Стабильное и высокое значение формфактора поля обеспечивается микрорельефом торцевой поверхности волокон и использованием специальных методов формовки эмитирующей поверхности [1].

Эти уникальные эмиссионные свойства углеродных волокон определили выбор эмиссионных структур при разработке полевых источников ионов на основе пучков углеродных волокон.

В настоящее время разработана методика полевой ионизации в потоке газа на эмиттерах на основе систем углеродных волокон [2]. Однако сложной проблемой в создании ионных источников этого типа является разработка систем формирования ионных пучков, имеющих необходимые для масс-спектрометрии параметры. Для решения этой задачи остро стоит вопрос анализа параметров ионных потоков, таких как угловое распределение и тонкая структура потока. Теоретический анализ параметров ионных потоков требует построения достаточно сложной математической модели. Актуальность экспериментального определения этих параметров определяется тем, что при теоретическом анализе ионных потоков основное влияние оказывают допущения о форме эмиссионных центров [3].

**Математическая модель.** В связи со сложностью многоострийной электродной системы на основе углеродных волокон для теоретического рассмотрения создаваемого ей электрического поля необходимо принять ряд предположений, упрощающих анализ этой системы.

Во-первых, разделим эту систему на три подсистемы в соответствии с характерными размерами полеобразующих элементов (рисунок 1). Первый уровень системы – макроструктура (I) – образован сеткой 1 и огибающей пучка углеродных волокон 2 и имеет характерный размер порядка 0,1 мм. Второй уровень системы – мезоструктура (II) – образован углеродными волокнами 3, торцы которых соответствуют огибающей 2, и имеет характерный размер порядка 1 мкм, что соответствует диаметру углеродных



**Рисунок 1 - Структурные уровни многоостриевой электродной системы на основе углеродных волокон:**

**I – макроструктура;**

**II – мезоструктура;**

**III – микроструктура;**

**1 – выходная сетка ионного источника;**

**2 – пучок углеродных волокон;**

**3 – углеродное волокно;**

**4 – фибрилла**

волокон. Третий уровень системы – микроструктура (III) – образован отдельными выступами на поверхности торца углеродного волокна (фибриллами), которые являются эмиссионными центрами, и имеет характерный размер порядка  $100 \text{ \AA}$ . Таким образом, видно, что характерные размеры каждой подсистемы различаются на 2-3 порядка, что и оправдывает раздельное их рассмотрение.

Во-вторых, ионный или электронный пучок на выходе источника можно рассматривать как эмиссионное изображение поверхности многоостриевый электрода. Следует ожидать, что структура пучка будет соответствовать структуре электрического поля. Микроструктура эмиссионного изображения будет образована эмиссионными пятнами, возможно перекрывающимися, которые создаются отдельными эмиссионными центрами – фибриллами. Эти эмиссионные пятна будут формировать группы, соответствующие отдельным углеродным волокнам. Общее (усреднённое) распределение тока в пучке будет определяться полем макроструктуры. Именно этот уровень структуры наиболее важен для ионного источника. Так как на выходе этого источника можно ожидать сравнительно не-

большой поперечный размер ионного пучка при значительном угле разлёта, то наибольшее значение для анализа будет иметь оценка угловой расходимости пучка. Следует также отметить, что распределение ионов по энергиям определяется особенностями физического механизма полевой ионизации [3]. Наблюдается небольшой дефицит энергии ионов, связанный с тем, что они образуются на расстоянии от поверхности, превышающем некоторое критическое значение. С ростом расстояния вероятность ионизации быстро падает, причём спад является очень узким с типичной полушириной в 1 эВ.

В-третьих, предположим, что в результате формовки огибающая пучка углеродных волокон примет форму эквипотенциальной поверхности в системе тонкое остриё – плоскость, то есть будем рассматривать пучок углеродных волокон как одиночное остриё. При расчёте поля одиночных острий их форма часто принимается параболической, гиперболической или «шар на конусе». Мюллер и Цонг [3] указывают, что форма острия практически не сказывается на зависимости тока от напряжения, но существенно влияет на угловое распределение. Таким образом, по совпадению экспериментальных и теоретических данных по угловому распределению можно судить о правильности сделанного предположения о форме острия.

В-четвёртых, пренебрежём мезоструктурой, образованной углеродными волокнами, и будем рассматривать совокупность макро- и микроструктур – выступы на поверхности огибающей пучка. Рассмотрение поля мезоструктуры является наиболее сложной задачей, не сводимой к аналитическому решению, в то же время характер его влияния достаточно понятен. С одной стороны, возникает усиление напряжённости поля на торцах углеродных волокон. При исключении мезоструктуры из рассмотрения, этот коэффициент усиления переносится на поле микроструктуры, требуя завышенного коэффициента усиления от фибрилл. Этот эффект может быть учтён при рассмотрении поля микроструктуры. С другой стороны, поле мезоструктуры влияет на эмиссионное изображение. Как уже говорилось выше, эмиссионные пятна отдельных центров, находящихся на поверхности одного волокна, будут образовывать группу. Кроме того, так как торцевая поверхность углеродного волокна не совпадает точно с поверхностью огибающей, будет существовать как вариация эмиссионной яркости групп, так и искажение их формы. Однако всё это не будет сказываться на интересующем нас усреднённом угловом распределении. На основании этого исключение

мезоструктуры из рассмотрения является оправданным.

В-пятых, при рассмотрении поля микро-структуры будем считать поверхность эмиссионного центра эквипотенциальной поверхностью системы «ребро на плоскости» и не будем учитывать взаимную экранировку фибрилл. Обоснованность первой части предположения определяется структурой торцевой поверхности углеродного волокна. Фибриллы представляют собой чешуйки, выступающие над поверхностью торца волокна, протяжённость их в одном направлении больше, чем в другом, что позволяет рассматривать их как планарную систему. Вторая часть предположения обосновывается тем, что из огромного количества фибрилл, находящихся на торцевой поверхности волокна, будут наиболее эффективно работать те, напряжённость поля которых выше. Самой высокой напряжённость будет у эмиссионных центров, экранировка которых незначительна или отсутствует совсем. Таким образом, фибриллы со значительной экранировкой можно исключить из рассмотрения.

**Результаты моделирования.** Предложенная математическая модель позволяет найти аналитическое выражение для потенциала электрического поля микроструктуры:

$$V(x,y) = \sqrt{\frac{\sqrt{(x^2 - y^2 + h^2)^2 + (2xy)^2} - (x^2 - y^2 + h^2)}{2}}, \quad (1)$$

где  $V$  в вольтах, а  $x, y$  – координаты,  $h$  – высота фибриллы, нормированные на величину  $s = 1 B/E_0$ ,  $E_0$  – напряжённость поля микроструктуры в области эмиссионного центра.

Анализ движения заряженных частиц в поле микроструктуры показал, что отдельный эмиссионный центр создаёт пучок заряженных частиц, в котором скорость разлёта, то есть составляющая скорости частиц, перпендикулярная к оси пучка, ограничена по величине. Максимальная нормированная скорость разлёта определяется нормированной высотой фибриллы. Эта зависимость может быть аппроксимирована выражением:

$$v_{\max} = 1,255h^{0,459}. \quad (2)$$

Эмиссионный центр можно рассматривать как точечный источник, находящийся на поверхности образующего макроструктуру электрода, то есть огибающей пучка углеродных волокон. Заряженные частицы, эмитируемые этим центром, имеют составляющие начальной скорости касательные к поверхности электрода. Максимальное значение этих скоростей опреде-

ляется удельным зарядом частицы, высотой фибриллы и напряжённостью поля макроструктуры  $E_0$  в области эмиссионного центра. Подобный подход существенно упрощает моделирование полевого источника ионов.

В предложенной модели полевого ионного источника электрическое поле, создаваемое макроструктурой, также может быть найдено аналитически:

$$U = U_0 \frac{\ln\left(\frac{1+v}{1-v}\right)}{\ln\left(\frac{1+v_0}{1-v_0}\right)}, \quad (3)$$

где  $v$  – параметр, определяющийся выражением

$$v(r,z) = \sqrt{\frac{(F^2 + r^2 + z^2) - \sqrt{(F^2 + r^2 + z^2)^2 - 4F^2 z^2}}{2F^2}}. \quad (4)$$

Так как потенциал определяется только значением параметра  $v$ , то эквипотенциальные поверхности в этой системе соответствуют поверхностям  $v = \text{const}$ . Поверхность огибающей пучка углеродных волокон соответствует  $v_0 = \text{const}$ . Геометрические параметры  $v_0$  и  $F$ , определяющие форму пучка, могут быть найдены по фотографии многоострийного эмиттера, сделанной с помощью микроскопа.

Анализ движения в поле макроструктуры ионных и электронных пучков, создаваемых отдельными эмиссионными центрами, показал, что расстояние от оси системы, на котором пучок проходит через выходную сетку, практически линейно связан с положением эмиссионного центра. Угол  $\alpha$ , который выходящий пучок составляет с осью системы, определяется координатой  $R$  его выхода (нормированной на параметр  $F$ ). Эта зависимость хорошо описывается эмпирической формулой:

$$\alpha(R) = 50^\circ(1 - e^{-1,1R}). \quad (5)$$

Проводился также анализ распределения тока в электронных и ионных пучках, создаваемых в данной системе. Плотность автоэлектронного тока для отдельных эмиссионных центров определялась по уравнению Фаулера-Нордгейма:

$$j_e(x) = A \frac{E(x)^2}{e\varphi_0} \exp\left[-B \frac{(e\varphi_0)^{3/2}}{E(x)} \Theta\left(\frac{e^{3/2}\sqrt{E(x)}}{(e\varphi_0)\sqrt{4\pi\epsilon_0}}\right)\right]. \quad (6)$$

Плотность тока полевой ионизации [3]:

$$j_i = \frac{en_0 t v \alpha \epsilon_0}{\sqrt{2\pi m k T}} E(x)^2 \exp\left[-\frac{2\sqrt{em} V_i^{3/2}}{3\hbar E(x)} \sqrt{1 - \frac{eE(x)}{\pi\epsilon_0 V_i^2}}\right]. \quad (7)$$

Сравнение результатов моделирования распределения плотности автоэлектронного тока и тока полевой ионизации позволяет сделать ряд выводов. Во-первых, распределения обладают значительным сходством, что позволяет использовать для экспериментального измерения рас-

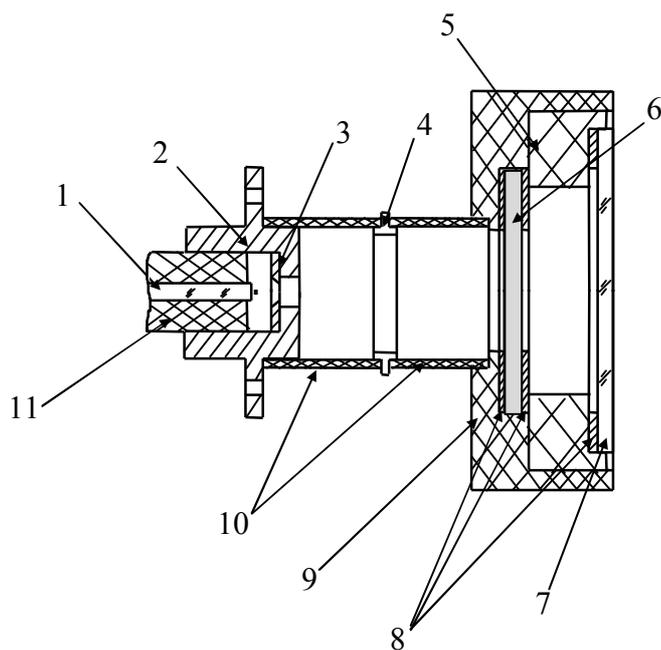
предела плотности токов автоэлектронный режим работы ионного источника, в котором проводить измерения значительно проще. Во-вторых, практически весь ток сосредоточен в пределах конуса с углом раствора  $30^\circ$ . В-третьих, распределение плотности тока может быть аппроксимировано выражением:

$$j = j_0 \exp(-a\alpha^3), \quad (8)$$

где  $a = 43 \text{ рад}^{-3}$ .

**Методика и результаты эксперимента.** Для исследования параметров ионного потока полевого источника разработана универсальная система, представляющая собой автоионный микроскоп с усилением яркости изображения (рисунок 1).

Автоионный микроскоп содержит полевой ионный источник, представляющий собой многоострийную электродную систему (1) и модулятор (2), объединённые в единый узел, конструкция которого предложена в работе [2]. Поток заряженных частиц выходит из полевого источ-



**Рисунок 2 - Макет экспериментального узла для исследования параметров полевого ионного источника: 1 – многоострийная электродная система на основе углеродных волокон с углеродным волокном; 2 – модулятор; 3 – апертурная диафрагма; 4 – сетчатый электрод; 5 – спейсер; 6 – микроканальная пластина (МКП); 7 – люминесцентный экран; 8 – контактные пластины; 9 – корпус; 10 – керамические изоляторы; 11 – керамическая трубка**

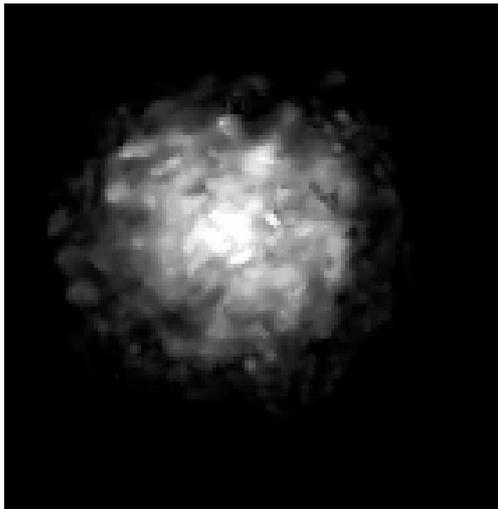
ника и, попадая на люминесцентный экран (7), возбуждает слой люминофора, при этом энергия заряженных частиц преобразуется в световую энергию. Однако эффективность передачи энергии люминофору экрана мала (обычно 0,1 – 1,0 %), поэтому для усиления эмиссионного изображения предложено использовать ионно-электронный преобразователь и вторично-электронный умножитель на основе микроканальной пластины (МКП) (6), размещённой перед экраном. Расстояние между микроканальной пластиной и люминесцентным экраном устанавливалось с помощью спейсера (5).

При использовании системы такого рода яркость эмиссионного изображения становится достаточной для наблюдения и для регистрации обычной фотографической техникой.

Предлагаемая система позволяет исследовать параметры источников с различными типами проточных многоострийных электродных систем [1] путём смены узла «эмиттер-модулятор» ионных источников. Исследование параметров потока заряженных частиц полевых источников может быть проведено при включении источника как в автоионном режиме, так и автоэлектронном, обеспечиваемом сменой полярности источников питания. Устройство помещалось в вакуумную камеру, оборудованную смотровыми окнами, обеспечивающую вакуум порядка  $10^{-6}$  торр. При работе в автоионном режиме через капиллярный натекаль ионного источника подавался изображающий газ.

На начальном этапе проводилась формовка эмиттирующей поверхности, целью которой является стабилизация формфактора поля  $\beta$  и достижения максимального значения эффективной эмиттирующей площади  $S_{\text{эфф}}$  по методике, предложенной в работе [1]. После завершения формовки эмиттера проводились калибровка поля и грубая оценка числа эмиссионных центров. При этом значение формфактора составляло величину порядка  $\beta = 10^4 \text{ см}^{-1}$ . Число эмиссионных центров грубо оценивалось по известным размерам фибрилл на поверхности углеродных волокон (10-100 Å) и эффективной эмиттирующей поверхности многоострийной системы углеродных волокон, ( $S_{\text{эфф}} \approx 10^{-9} \div 10^{-8} \text{ см}^2$ ), что составляло величину порядка  $10^4$  эмиссионных центров.

Для оценки углового распределения потока заряженных частиц и его тонкой структуры проводился анализ эмиссионного изображения полевого источника, которое визуально наблюдалось на люминесцентном экране и фотографировалось цифровой фотокамерой (рисунок 3). Полученное цифровое изображение подвергалось компьютерной обработке в целях увеличения

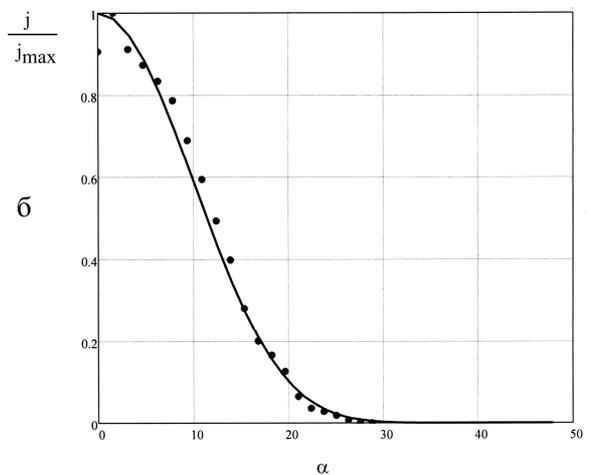
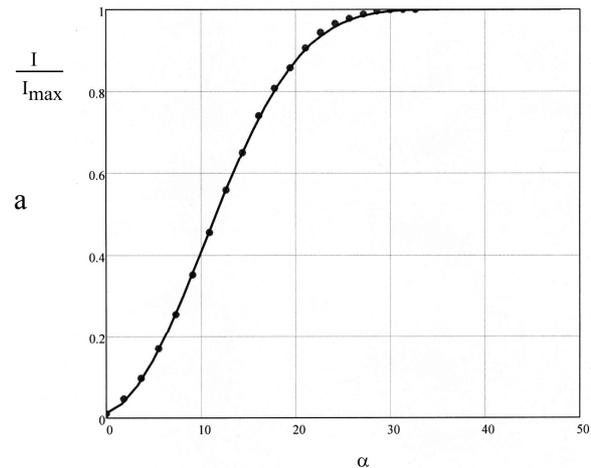


**Рисунок 3 - Фотография эмиссионного изображения многоострийного матричного электрода на основе углеродных волокон**

контрастности и выявления тонкой структуры.

Оценка углового распределения потока заряженных частиц проводилась по известной геометрии системы и измерениям эмиссионного изображения на экране, при этом эмиттер принимался за точечный источник. Угол наибольшего отклонения составил величину порядка  $30^\circ$ , что соответствует величине, предсказанной теоретической моделью. Плотность тока определялась по яркости эмиссионного изображения на фотографии. На рисунке 4 приведены графики углового распределения полного тока (а) и плотности тока (б). Результаты моделирования отображены сплошной линией, а результаты эксперимента – точками. Видно хорошее соответствие экспериментальных данных результатам теоретического расчёта, что говорит об адекватности предложенной модели ионного источника.

Для исследования тонкой структуры потока частиц разработана методика компьютерной обработки эмиссионного изображения полевого источника. Основной целью обработки являлось получение высококонтрастного изображения с ярко выраженными пиками, соответствующими локальным максимумам плотности, и затем построение трехмерного графика распределения интенсивности по площади его поперечного сечения. Характер изображения, которое должно иметь место при попадании пучка на экран, можно представить в первом приближении, если учесть, что пучок состоит фактически из отдельных струй электронов, эмитируемых различными эмиссионными центрами. Очевидно, что получаемое таким образом изображение должно представлять собой набор светящихся пятен



**Рисунок 4 - Распределение тока заряженных частиц, эмитируемых в конус с углом раствора  $\alpha$ , (а) и угловое распределение плотности тока (б) в выходном пучке ионного источника: сплошная линия – результаты моделирования, точки – экспериментальные данные**

(возможно накладывающихся друг на друга), каждому из которых можно поставить в соответствие эмиссионный центр. Реальное изображение, к сожалению, имеет более сложный характер, поскольку помимо основного свечения, вызываемого струями электронов, имеет место паразитная засветка люминофора отдельными электронами, отрывающимися от основной струи. Очевидно, что в среднем паразитное свечение будет больше в центре изображения, убывая по интенсивности к его краям. Наличие паразитного свечения является негативным фактором, снижающим контрастность и затрудняющим анализ изображения, поэтому первым этапом самого анализа стало подавление фоновой

засветки и увеличение таким образом контраста изображения. Представление изображения в формате битовой карты делает возможным проинвестировать его обработку по отдельным пикселям, а также по строкам и столбцам, что и было реализовано в программе обработки.

На периферии изображения отдельные эмиссионные центры выделяются весьма эффективно. Однако в центре эмиссионной картины, где наблюдается значительное перекрытие эмиссионных пятен, не всегда удаётся добиться разделения. При этом интенсивность пятна и его площадь получается большей, чем для отдельного эмиссионного центра. Можно считать, что суммарная интенсивность этого пятна пропорциональна числу образующих его эмиссионных центров. Для определения эффективного числа эмиссионных центров подсчитывалась суммарная интенсивность всего эмиссионного изображения. Затем определялась средняя интегральная интенсивность пятна, образованного отдельным эмиссионным центром на краю эмиссионного изображения. Очевидно, что отношение этих величин представляет собой число действующих эмиссионных центров. Определённое таким образом число эмиссионных центров составило величину порядка  $6 \cdot 10^4$ .

**Обсуждение результатов.** Предложенная математическая модель полевого источника ионов с многоострийным электродом на основе углеродных волокон позволила существенно упростить моделирование работы источника. При анализе микроструктуры была создана модель отдельного эмиссионного центра, позволяющая по аналитическим формулам найти параметры создаваемого им потока заряженных частиц, исходя из параметров самого центра и напряжённости поля микроструктуры.

В результате анализа электрического поля и движения заряженных частиц на уровне макроструктуры были получены выражения, описывающие интегральные параметры пучка (без учёта его тонкой структуры). Определено распределение плотности тока в пучке, показано, что максимальный угол отклонения заряженных частиц от оси пучка составляет  $30^\circ$ . Однако, если ограничить радиус выходного отверстия в противозэлектроде по формуле (5) таким образом, чтобы наибольший угол отклонения составлял  $20^\circ$ , то из ионного источника можно вывести по-

рядка 90 % полного тока источника (рисунок 4).

Экспериментальные исследования потока заряженных частиц, проведённые с помощью автоионного микроскопа, показали хорошее соответствие результатов моделирования экспериментальным данным, что говорит об адекватности предложенной модели.

Для анализа тонкой структуры пучка применялся метод фотографирования эмиссионного изображения с последующей обработкой на ЭВМ. Показана принципиальная возможность использования этого метода для определения числа эффективных эмиттирующих центров. Найденное количество эмиссионных центров хорошо согласуется с данными, полученными для многоострийных эмиттеров на основе углеродных волокон по методике Фаулера-Нордгейма [1].

Анализ тонкой структуры пучка с помощью фотографирования эмиссионного изображения и последующей его обработки обладает рядом достоинств по сравнению с другими методами:

- не вызываются изменения поля, как при зондовых методах, так как нет непосредственного контакта с пучком;
- метод можно использовать как для электронных, так и для ионных пучков;
- так как современная техника ориентирована на цифровую информацию, то представление информации об изображении в цифровом виде также является достоинством.

Представленный метод оценки эффективной эмиттирующей площади по эмиссионным изображениям можно использовать в качестве дополнительного к основному методу Фаулера-Нордгейма.

#### **Библиографический список**

1. Овсянников Н.П., Малютин А.Е. Матричные эмиттеры на основе углеродных волокон для электронных и ионных источников // Вестник РГРТА. Вып 17. 2006. С.89-94
2. Овсянников Н.П., Малютин А.Е., Быстров М.Е. Полевой источник ионов на основе углеродных волокон // Научное приборостроение: Межвуз. сб. науч. трудов. Рязань. 1998. С.112-117.
3. Мюллер Э. В., Цонг Т. Т. Полевая ионная микроскопия, полевая ионизация и полевое испарение. — М.: Наука, 1980.