

УДК 621.384.659

## СРАВНЕНИЕ ШИРОКОАПЕРТУРНЫХ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧНЫХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОНОВ НА ОСНОВЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ТЛЕЮЩЕГО РАЗРЯДА С УСКОРИТЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ПРОТЯЖЕННЫХ ТЕРМОЭМИТТЕРОВ

© 2020 г. Г. А. Баранов<sup>b</sup>, В. А. Гурашвили<sup>a</sup>, И. Д. Джигайло<sup>a,\*</sup>, О. В. Комаров<sup>b</sup>, С. Л. Косогоров<sup>b</sup>,  
В. Н. Кузьмин<sup>a</sup>, В. С. Немчинов<sup>a</sup>, В. И. Сень<sup>a</sup>, Н. А. Успенский<sup>b</sup>, В. Я. Шведюк<sup>b</sup>

<sup>a</sup> ГНЦ РФ “Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований”  
Россия, 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, владение 12

<sup>b</sup> НИИ электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова  
Россия, 196641, Санкт-Петербург, Металлострой, дорога на Металлострой, 3

\*e-mail: dji@triniti.ru

Поступила в редакцию 20.11.2019 г.

После доработки 20.11.2019 г.

Принята к публикации 28.11.2019 г.

Рассмотрен широкоапертурный низкоэнергетичный ускоритель электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (в.т.р.) в сравнении с ускорителями на основе ряда протяженных термоэммиттеров. Приведены основные конструктивные особенности и достоинства ускорителей с в.т.р. Показана возможность получения в них высокой плотности выведенного за фольгу тока электронного пучка,  $56 \text{ мкА/см}^2$ , и достаточно высоких, по сравнению с ранее достигнутыми, значений коэффициента вывода пучка, 35%. Полученные характеристики сравнимы с параметрами ускорителей на основе ряда протяженных термоэммиттеров. Продемонстрирована возможность работы ускорителя с в.т.р. как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме без изменения его конструкции. Проведены исследования различных ион-электронных оптических систем ускорителей с в.т.р. и показаны преимущества систем щелевого типа.

DOI: 10.31857/S0032816220030027

Разработка электроионизационного способа накачки газовых лазеров [1–3] обусловила повышенный интерес к источникам внешней ионизации на основе пучков быстрых электронов – широкоапертурным электронным ускорителям. Основной их особенностью является возможность синхронного облучения пучком электронов обрабатываемых поверхностей площадью до нескольких тысяч квадратных сантиметров либо газовых объемов большого сечения, что делает привлекательным их использование в тонкопленочных и объемных электронно-химических и плазмохимических технологиях.

Наибольшее распространение приобрели ускорители, в которых получение и формирование пучка электронов обеспечивается в планарных электронно-оптических системах с катодом в виде ряда протяженных прямонакальных дискретных термоэммиттеров, выполненных обычно из вольфрамового сплава [4, 5]. Так, в работе [5] описан ускоритель с триодной электронно-оптической системой, генерирующий в непрерывном режиме электронный пучок сечением  $40 \times 50 \text{ см}^2$  и устой-

чиво работающий со средней плотностью выведенного тока  $80 \text{ мкА/см}^2$  при ускоряющем напряжении 185 кВ и коэффициенте вывода пучка 46%. Под коэффициентом вывода пучка подразумевается отношение величины тока электронного пучка, выведенного из ускорителя, к величине тока электронов, падающих на устройство вывода – опорную решетку с фольгой.

Наряду с ускорителями на основе термоэммиттеров, широкое применение находят ускорители электронов на основе высоковольтного тлеющего разряда (в.т.р.) [6–8].

Принцип действия этих ускорителей (рис. 1) основан на использовании явления ион-электронной эмиссии, возникающей при бомбардировке холодного катода в.т.р. (металлической пластины из нержавеющей стали) быстрыми ионами высоковольтного тлеющего разряда [9, 10]. Ионы извлекаются из области прианодной плазмы, генерируемой с помощью вспомогательного разряда, ускоряющим полем катода в.т.р., провисающим в отверстия в аноде в.т.р.

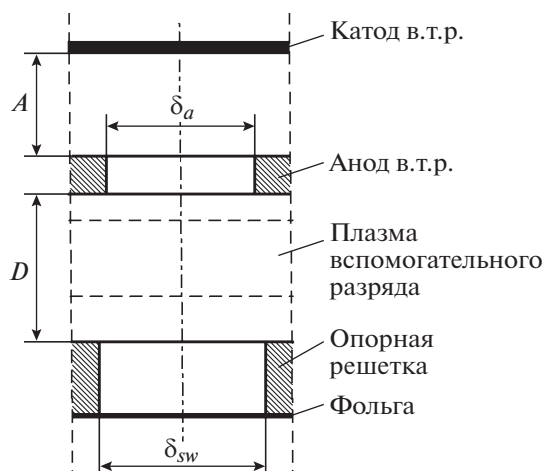


Рис. 1. Элементарная ячейка ускорителя на основе в.т.р.  $A$ ,  $D$  – ускоряющий и дрейфовый промежутки соответственно.

При этом в промежутке “анод–катод” зажигается самостоятельный высоковольтный тлеющий разряд, в поле которого происходит ускорение и перезарядка ионов, которые при бомбардировке катода вызывают эмиссию электронов. Последние ускоряются этим же полем и, пройдя ускоряющий и дрейфовый промежутки, через фольгу выводятся из ускорителя. В работе [10] показано, что теоретически при обеспечении соосности отверстий в аноде  $\delta_a$  и опорной решетке  $\delta_{sw}$  (см. рис. 1) можно получить высокие значения коэффициента вывода пучка, поскольку потери пучка электронов при прохождении такой структуры будут минимальными.

В состав ускорителя на основе в.т.р. входят: катод в.т.р. – металлическая пластина, находящаяся под потенциалом ускоряющего напряжения; анод в.т.р. – перфорированная пластина под “земляным” потенциалом; устройство вывода пучка электронов, состоящее из опорной решетки с фольгой. Анод делит объем ускорителя на два промежутка: ускоряющий  $A$ , в котором происходит ускорение ионов к катоду и электронов в обратном направлении, и дрейфовый  $D$  – зону горения вспомогательного разряда. Катод и анод в.т.р., а также опорная решетка образуют ион-электронную оптическую систему (и.э.о.с.).

Одним из основных преимуществ ускорителей в.т.р. является диапазон рабочего давления в вакуумной камере, составляющий  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  Торр, что позволяет существенно упростить систему откачки по сравнению с ускорителями с термокатадами, где рабочее давление  $10^{-6}$ – $10^{-7}$  Торр.

Важнейшим достоинством ускорителей на основе в.т.р. является конструкция катодного узла, в качестве которого используется металлическая пластина. Она достаточно проста по сравнению

со сложным катодно-сеточным блоком ускорителей на основе термоэмиссии, содержащим ряд протяженных проволочных термоэмиттеров и две сетки с системами компенсации термоудлинения. При этом требуются независимые источники питания накала и сеточного управления.

Катод ускорителя в.т.р., в отличие от термоэмиттеров, не чувствителен к аварийным прорывам атмосферы, его долговечность и надежность на несколько порядков выше аналогичных характеристик термоэмиттеров, в случае необходимости легко обеспечивается возможность его принудительного охлаждения. Кроме того, он обладает значительно более высокой устойчивостью к вибрационным нагрузкам, что имеет существенное значение при использовании ускорителей в транспортируемых вариантах электрофизических установок.

Таким образом, конструкция ускорителей такого типа определяет более высокую надежность его эксплуатации при меньшей стоимости изготовления по сравнению с ускорителями на основе термоэмиттеров. Также принцип действия ускорителя в.т.р. позволяет формировать не только плоские потоки электронов, но при необходимости делать их цилиндрическими с углом обработки внешних или внутренних цилиндрических поверхностей до  $180^\circ$ .

Система питания ускорителей на основе в.т.р. имеет один высоковольтный канал ускоряющего напряжения. Питание вспомогательных источников, обеспечивающих управление током ускорителя, осуществляется со стороны земляного потенциала, в то время как питание катодов и сеточное управление в ускорителях на основе термоэмиттеров осуществляются под полным ускоряющим напряжением.

Изложенные далее результаты исследований являются продолжением разработок широкоапертурных ускорителей на основе в.т.р., представленных в работах [11, 12].

В [11] описан широкоапертурный ускоритель ТУР-М на основе высоковольтного тлеющего разряда, разработанный для целей радиационных технологий. Ускоритель, генерирующий в импульсно-периодическом режиме выведенный электронный пучок сечением  $190 \times 30$  см<sup>2</sup> и мощностью до 6 кВт, имел ион-электронную оптическую систему с перфорацией анода в.т.р. и опорной решетки круглыми отверстиями диаметром 6 мм, расположенными в порядке плотной гексагональной упаковки (сотового типа).

Амплитуда импульсов ускоряющего напряжения достигала 250 кВ, частота следования импульсов составляла 100 Гц при длительности импульса 30 мкс, плотность тока выведенного пучка электронов в импульсе – 2 мА/см<sup>2</sup>, что соответствовало среднему по времени значению плотно-

сти тока  $6 \text{ мкА/см}^2$ . Значения коэффициента вывода пучка достигали 25%. Ускоритель был установлен в пилотную технологическую линию по радиационному отверждению мономер-олигомерных композиций на различных материалах на Тверском комбинате “Искож”, прошел 72-часовые сдаточные испытания и использовался для отработки различных радиационных технологий.

В работе [12] представлен широкоапертурный электронный ускоритель на основе в.т.р. для экспериментального образца генератора озона нового типа на основе несамостоятельного продольного объемного разряда в газоразрядной камере. Генератор озона разрабатывался для очистки воды на водоочистных сооружениях.

В ускорителе применена и.э.о.с. с перфорацией анода и опорной решетки соосными рядами щелей (щелевого типа) и с каналами охлаждения между рядами. Ускоритель имел круглое выводное окно диаметром 50 см с площадью апертуры  $\sim 2000 \text{ см}^2$ . Работа ускорителя обеспечивалась в технологическом импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов 100 Гц и длительностью импульса 25 мкс в течение 4 ч. Амплитуда ускоряющего напряжения 220 кВ, амплитуда тока выведенных электронов до 13 А в импульсе, что соответствовало импульсной плотности тока  $6.5 \text{ мА/см}^2$  или ее среднему значению за период  $\sim 16 \text{ мкА/см}^2$ . Коэффициент вывода пучка составлял 32%.

В данной работе представлены результаты исследований широкоапертурного низкоэнергетичного ускорителя электронов на основе в.т.р. На рис. 2 приведена конструктивная схема ускорителя.

В вакуумной камере 3 на высоковольтном проходном изоляторе 4 размещается катод в.т.р. 1, рабочая часть которого представляет собой металлическую пластину. Анод в.т.р. 2 находится под потенциалом “земли” и делит объем ускорителя на два промежутка: ускоряющий А и дрейфовый D. Рабочие зоны анода в.т.р. и опорной решетки 5, на которой лежит фольга 6, перфорированы соосными отверстиями. Опорная решетка с фольгой является выводным устройством ускорителя с сечением выведенного электронного пучка  $30 \times 45 \text{ см}^2$ .

При зажигании вспомогательного разряда и подаче на катод в.т.р. высокого напряжения в ускоряющем промежутке загорается несамостоятельный высоковольтный тлеющий разряд. При этом его напряжение пробоя (максимальное значение удерживаемого напряжения) соответствует левой ветви кривой Пашена [13].

Несамостоятельный в.т.р. обеспечивается поджигаемым в дрейфовом промежутке вспомогательным разрядом. Для генерации плазмы использован тлеющий вспомогательный разряд с тонкопроволочными анодами как обеспечивающий наиболее

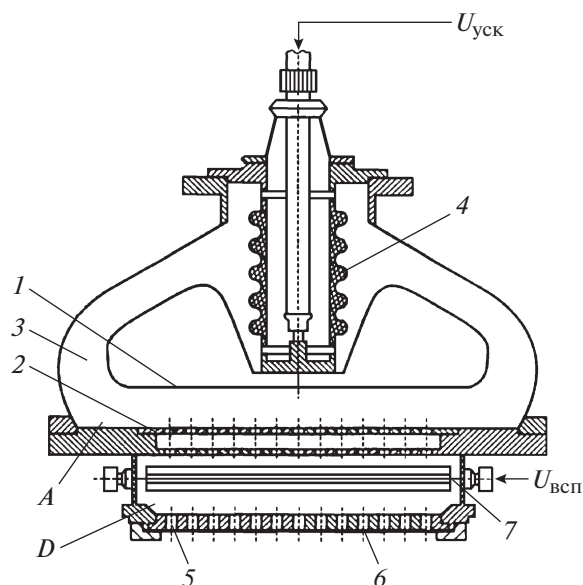
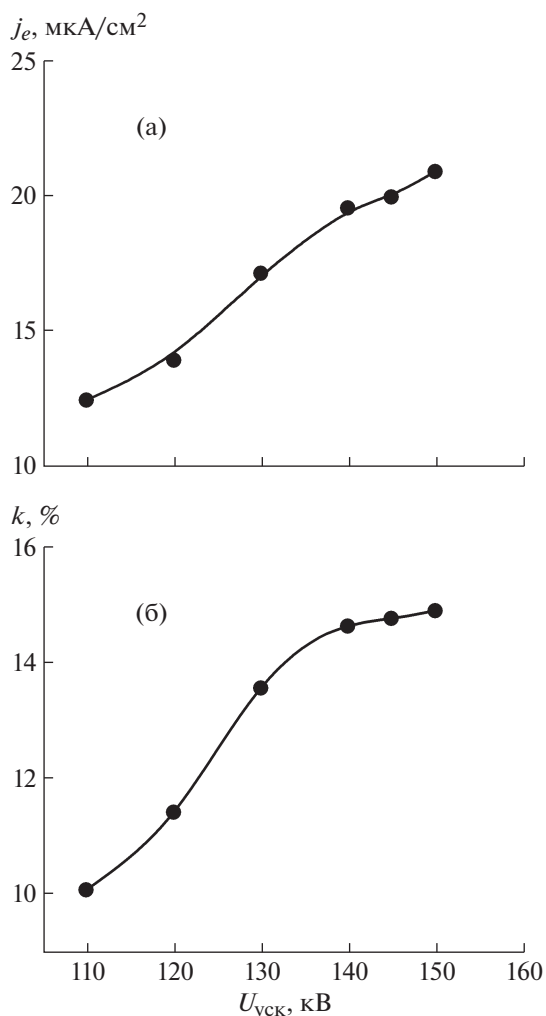


Рис. 2. Схема ускорителя на основе в.т.р. 1 – катод в.т.р.; 2 – анод в.т.р.; 3 – вакуумная камера; 4 – высоковольтный проходной изолятор; 5 – опорная решетка; 6 – фольга; 7 – анод вспомогательного разряда; А, D – ускоряющий и дрейфовый промежутки соответственно;  $U_{\text{уск}}$  – ускоряющее напряжение;  $U_{\text{всп}}$  – напряжение вспомогательного разряда.

высокую эффективность при относительно простом конструктивном решении. Катодом вспомогательного разряда являются стенки вакуумной камеры в дрейфовом объеме, анодом 7 служат один или несколько электродов в виде тонких вольфрамовых нитей диаметром 0.35 мм, на которые подается напряжение зажигания 1–2 кВ. После зажигания вспомогательного разряда напряжение горения составляет 50–800 В в зависимости от условий: давления, рода газа, наличия дополнительных источников электронной подсветки. В данном ускорителе использованы два источника вспомогательного разряда, расположенные по краям апертуры электронного пучка за ее пределами, с анодами, установленными параллельно длинной стороне выводного устройства.

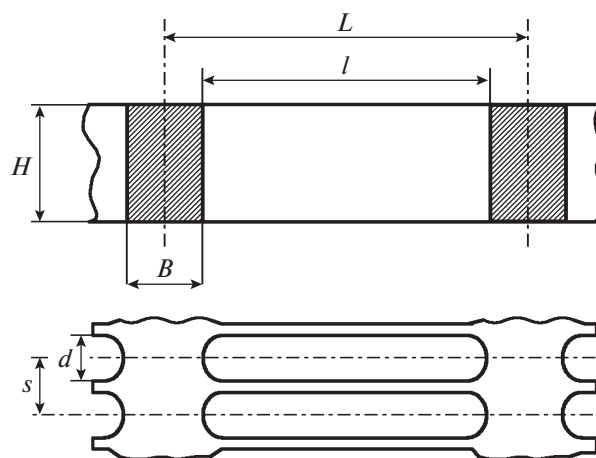
Для повышения устойчивости горения вспомогательного разряда и расширения его рабочего диапазона по давлению использованы дополнительные источники электронной подсветки в виде отрицательно смещенных относительно “земли” термоэммитеров. Последние расположены в непосредственной близости от каждого анода вспомогательного разряда и имеют собственные источники питания накала и отрицательного смещения.

В проведенных исследованиях использованы различные варианты ион-электронных оптических систем и рассмотрена возможность работы как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме.



**Рис. 3.** Зависимости средней плотности тока  $j_e$  выведенного электронного пучка (а) и коэффициента вывода  $k$  (б) от ускоряющего напряжения  $U_{уск}$  для ион-электронной оптической системы сотового типа.

Исследовался вариант и.э.о.с. с перфорацией анода в.т.р. и опорной решетки соосными круглыми отверстиями диаметром 10 мм с перемычками между ними 1 мм, расположенными в порядке плотной гексагональной упаковки (сотового типа). Геометрическая прозрачность такой структуры составляет 75%. Предварительные эксперименты показали, что использование анода в.т.р. толщиной 3 мм с отверстиями вышеуказанного диаметра приводит к разрушению фольги в элементарной круглой ячейке выводного устройства (см. рис. 1), что свидетельствует о слишком высокой плотности электронного тока в ячейке. Для уменьшения плотности тока в ячейке необходимо снизить плотность тока ионов на катоде в пределах ячейки путем либо уменьшения диаметра отверстия в аноде в.т.р., либо увеличения толщины анода.



**Рис. 4.** Конструктивные характеристики анода в.т.р. и опорной решетки ускорителя с и.э.о.с. щелевого типа.

Использование анода, состоящего из двух пластин толщиной 3 мм каждая, перфорированных отверстиями диаметром 10 мм, с промежутком между пластинами 14 мм, привело к резкому уменьшению общего тока ускорителя. Для его увеличения был использован один анод с наложенной на него тонкой сеткой с квадратной ячейкой из проволоки диаметром 0.3 мм с шагом 0.7 мм, геометрической прозрачностью 49%. Такое техническое решение обеспечило уменьшение тока ионов на катод, кроме того, сетка фиксировала положение границы плазмы вспомогательного разряда, с которой происходит извлечение ионов. Однако дополнительная сетка, установленная на тонком аноде, резко уменьшила его суммарную геометрическую прозрачность, что исключило достижение высоких значений коэффициента вывода пучка.

На рис. 3 приведены примеры экспериментально полученных характеристик ускорителя с и.э.о.с. сотового типа. В непрерывном режиме работы ускорителя была получена плотность тока выведенного пучка до 22 мкА/см<sup>2</sup> при ускоряющем напряжении до 150 кВ и коэффициенте вывода пучка, не превышающем 15%. Точность измерения ускоряющего напряжения составляла  $\pm 2\%$ , плотности тока электронного пучка –  $\pm 5\%$ .

На следующем этапе исследовался вариант и.э.о.с. с щелевой оптикой. На рис. 4 представлена геометрия использованного варианта щелевой оптики.

Анод и опорная решетка перфорированы с шагом  $s$  рядами щелевых ячеек шириной  $d$  и длиной  $l$ . Длинные оси щелей параллельны длинной стороне выводного устройства. В перемычках шириной  $B$ , расположенных с шагом  $L$  между рядами щелевых ячеек, могут быть выполнены каналы

**Таблица 1.** Основные геометрические параметры и.э.о.с. щелевого типа

Элемент конструкции и.э.о.с.	$d$ , мм	$l$ , мм	$s$ , мм	$L$ , мм	$B$ , мм	$H$ , мм
Анод в.т.р.	6	70	10	80	10	10
Опорная решетка	7	68	10	80	12	25

охлаждения. В табл. 1 приведены геометрические характеристики анода и опорной решетки.

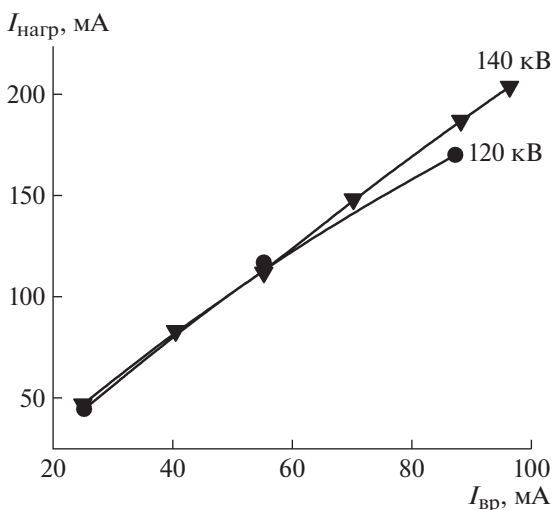
При установке анода относительно опорной решетки обеспечена соосность щелей в аноде и опорной решетке, а перемычка  $B$  в опорной решетке находится в “электронной тени” соответствующей перемычки в аноде в.т.р. Результаты исследования характеристик ускорителя с и.э.о.с. щелевого типа приведены на рис. 5–7.

На рис. 5 представлена управляющая характеристика ускорителя при различных ускоряющих напряжениях. Характеристика близка к линейной и демонстрирует хорошую управляемость тока ускорителя током вспомогательного разряда и слабую зависимость от величины ускоряющего напряжения, т.е. возможность независимой регулировки тока и энергии электронов пучка.

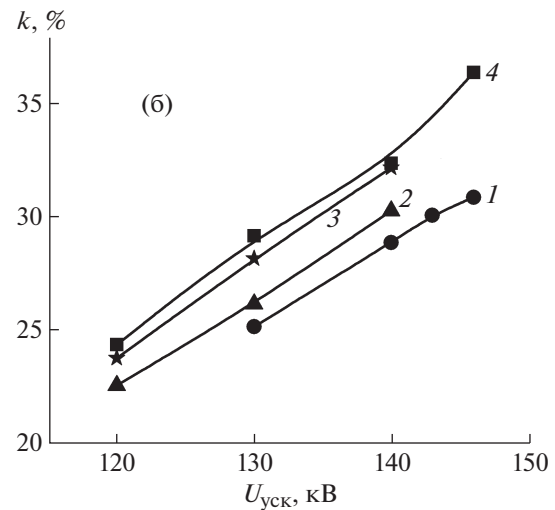
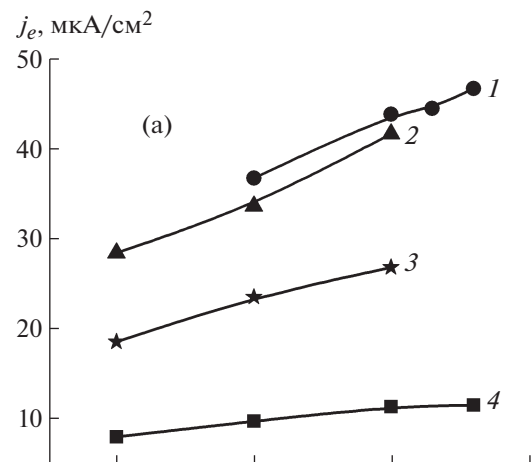
Рисунок 6 демонстрирует заметно более высокие значения плотности тока выведенного пучка и коэффициента вывода ускорителя с щелевой оптикой по сравнению с оптикой сотового типа — до  $47 \text{ мкА/см}^2$  и до 35% соответственно.

Результаты объясняются более выгодными оптическими условиями: отсутствием сетки, резко снижающей не только геометрическую прозрачность, но и соосность расположения диафрагм в оптической системе, а также выбранной толщи-

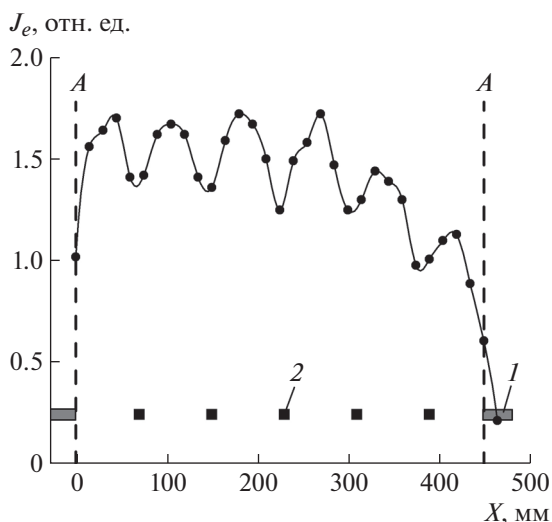
ной анода. При проведении исследований была получена средняя плотность выведенного тока  $j_{\text{max}} = 56 \text{ мкА/см}^2$  при ускоряющем напряжении 170 кВ, при этом ограничения по напряжению в непрерывном режиме работы ускорителя были связаны только с типом высоковольтного проходного изолятора и в разработанной конструкции не носили характера принципиальных ограничений высоковольтного тлеющего разряда.



**Рис. 5.** Зависимости тока ускорителя от тока вспомогательного разряда для и.э.о.с. щелевого типа при различных значениях ускоряющего напряжения (цифры у кривых).



**Рис. 6.** Зависимости плотности тока выведенного электронного пучка (а) и коэффициента вывода электронного пучка (б) от ускоряющего напряжения для и.э.о.с. щелевого типа при разных значениях тока вспомогательного разряда: 1 – 96; 2 – 88; 3 – 55; 4 – 25.5 мА.



**Рис. 7.** Распределение плотности тока по сечению электронного пучка с и.э.о.с. шелевого типа вдоль оси по длинной стороне выводного окна. А-А – границы апертуры пучка; 1 – корпус опорной решетки; 2 – перемычки опорной решетки.

Это подтверждается проведением серии испытаний в импульсно-периодическом режиме работы ускорителя. При работе данного ускорителя без изменений конструкции с оптикой сотового типа и двойным анодом при питании от импульсных систем как по каналу ускоряющего напряжения, так и по каналу вспомогательного разряда были достигнуты плотности тока электронного пучка до  $5 \text{ мА/см}^2$  в импульсе при ускоряющем напряжении до 210 кВ с частотой повторения до 100 Гц импульсов длительностью 30 мкс.

Для оценки характера распределения плотности тока по сечению выведенного пучка электронов проведены измерения в режиме реального времени с помощью измерительной системы [14]. Датчиками тока в системе являлись цилиндры Фарадея со встроенным преобразователем отрицательных значений электронного тока в положительный потенциал, что позволяло компенсировать падение напряжения на датчике до потенциалов, близких к нулю, и обеспечивать корректную оценку тока электронного пучка в данной точке пространства. Эта отличительная особенность измерительной системы является принципиальной, в этом случае цилиндр Фарадея не накапливает заряд поглощенных электронов за время измерения и не вносит заметных искажений в измеряемую величину, поскольку его собственный потенциал близок к нулю. Результаты измерений для ускорителя с и.э.о.с. шелевого типа приведены на рис. 7.

Использовались 32 датчика, размещенных в измерительной матрице в два ряда, по 16 датчиков, с шагом 30 мм. Матрица с датчиками располагалась на расстоянии 15 мм от окна выводного

устройства вдоль его длинной стороны. Для получения результатов с большей пространственной точностью данные снимались последовательно, за несколько включений ускорителя с аналогичными параметрами со сдвигом линейки на полшага размещения датчиков, т.е. через 15 мм.

Провалы в распределении плотности тока на рис. 7 обусловлены “электронной тенью” от перемычек в аноде и опорной решетке, при увеличении расстояния от фольги выводного устройства до измерительной матрицы глубина провалов уменьшается.

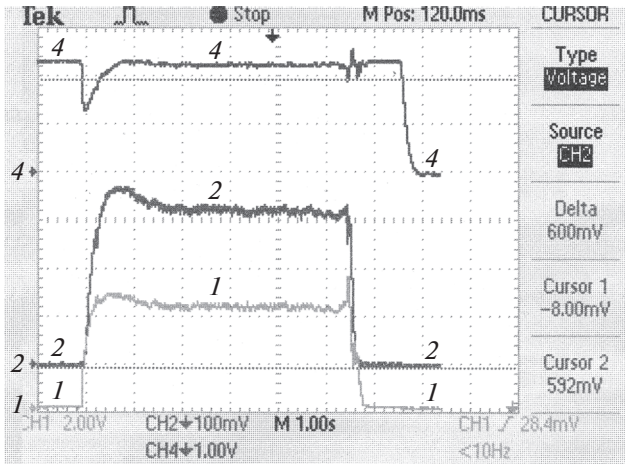
Приведем более подробное описание ускорителя в составе электрофизической установки. По результатам исследований показано, что ускоритель на основе в.т.р. обеспечивает генерацию электронного пучка сечением  $30 \times 45 \text{ см}^2$  как в импульсно-периодическом, так и в непрерывном режиме и может быть использован как для технологических, так и для иных применений. Устройство не предназначено для длительной непрерывной работы, поэтому охлаждение элементов и узлов ускорителя не предусмотрено.

Диапазон рабочих давлений  $8 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-3}$  Торр обеспечивался с помощью форвакуумного агрегата АД-150/25 с азотной ловушкой и натекателя рабочего газа (азот, гелий). Давление в камере измерялось вакуумметрическими датчиками ПМТ-4М и ПМИ-10-2.

Ускоряющее напряжение до 200 кВ с током до 300 мА в непрерывном режиме подавалось на ускоритель от каскадного высоковольтного генератора ГНК-0.2-0.3 по кабелю КПВ-1/300. Питание высоковольтного генератора – трехфазная сеть с частотой 400 Гц – обеспечивалось статическим преобразователем ПСЧ-50. Управляемый тиристорный регулятор, установленный по первичной стороне ГНК-0.2-0.3, обеспечивал компенсацию выходного напряжения при переходе от режима “холостого хода” работы выпрямителя к режиму работы с нагрузкой. Характерные осциллограммы работы ускорителя в непрерывном режиме приведены на рис. 8.

При работе в импульсно-периодическом режиме использовался высоковольтный модулятор с выходным высоковольтным трансформатором, обеспечивающий ускоряющее напряжение до 220 кВ с током до 25 А в импульсе и частотой до 100 Гц.

Таким образом, по результатам исследований показана возможность получения в широкоапертурных ускорителях на основе в.т.р. высокой плотности выведенного за фольгу тока электронного пучка, до  $56 \text{ мкА/см}^2$ , и достаточно высоких коэффициентов вывода пучка, 35%, что превышает значения, ранее достигнутые на ускорителе этого типа. Полученные характеристики сравнимы с параметрами ускорителей на основе системы протяженных термоэммиттеров. Показаны ос-



**Рис. 8.** Характерные осциллограммы работы ускорителя в непрерывном режиме. 1 – ток ускорителя  $I_{\text{нагр}}$  (масштаб по вертикали 60 мА/деление); 2 – ток выведенного пучка с коллектора (12.3 мА/деление); 4 – ускоряющее напряжение  $U_{\text{уск}}$  (59.1 кВ/деление). Масштаб по горизонтали 1 с/деление.

новные конструктивные особенности и достоинства ускорителей с в.т.р. по сравнению с ускорителями на основе ряда протяженных термоэммиттеров. Продемонстрирована возможность работы ускорителя с в.т.р. как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме без изменения конструкции. Показаны преимущества ион-электронных оптических систем щелевого типа ускорителей с в.т.р. по сравнению с системами сотового типа.

В заключение необходимо отметить, что выбор того или иного типа широкоапертурного ускорителя электронов должен определяться отдельно в каждом конкретном случае в зависимости от технических требований, условий применения и целей использования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Басов Н.Г., Беленов Э.М., Сучков А.Ф., Данилычев В.А. // Квантовая электроника. 1971. № 3. С. 121.
2. Fenstermacher C.A., Nutter M.J., Rink J.P., Boyer K. // Bull. Amer. Phys. Soc. Ser. II. 1971. V. 16. № 1. P. 42.
3. Готов Е.П., Данилычев В.А., Чебуркин Н.В. // Труды ФИАН. 1983. Т. 142. С. 3.
4. Аброян М.А., Бодакин Л.В., Косогооров С.Л., Манукян Г.Ш., Шведюк В.Я., Джигайло И.Д., Красюков А.Г. // Сб. докладов “Десятого международного совещания по применению ускорителей заряженных частиц в промышленности и медицине”. (С.Петербург, октябрь, 2001) М.: ЦНИИАтоминформ, 2001. С. 422.
5. Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косогооров С.Л., Кузьмин В.Н., Сень В.И., Ткаченко Д.Ю., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2013. № 1. С. 81. <https://doi.org/10.7868/S0032816213010047>
6. Pigache D., Fournier G.A. // Vacuum Sci. Technol. 1975. V. 12. № 6. P. 1197.
7. Pigache D., Bonnet Y., Fournier G.A. // Proc. Intern. Conf. on phenom. in ionized gases. Minsk, 1981. P. 865.
8. Isaacs G.G., Jordan D.L., Dooley P.Y. // J. Phys. and Sci. Instrum. 1979. V. 12. P. 115.
9. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. // ПТЭ. 1984. № 4. С. 24.
10. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косогооров С.Л., Мотовилов С.А., Сиротинкин В.В., Шапиро В.Б. // ПТЭ. 1998. № 2. С. 83.
11. Аброян М.А., Баранов В.Е., Богомазов П.М., Косогооров С.Л., Плахотнюк В.П., Сиротинкин В.В., Сытых Д.С., Чумичев В.А., Шапиро В.Б., Шведюк В.Я. // В сб. “Тезисы докладов седьмого совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве” (С.-Петербург, июнь, 1992) М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. С. 18.
12. Аброян М.А., Косогооров С.Л., Мотовилов С.А., Туманов И.А., Шведюк В.Я. Разработка и исследование генератора озона на основе несамостоятельного разряда и пути повышения его эффективности // В кн. “Развитие и совершенствование способов и средств очистки и обеззараживания питьевых и сточных вод”. Вологда: Полиграфист, 2003. С. 65–70.
13. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.
14. Аброян М.А., Косогооров С.Л., Набокова И.В., Успенский Н.А., Чумичев В.А., Шапиро В.Б., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2007. № 4. С. 109.