

НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ БОЛЬШОГО СЕЧЕНИЯ С ВЫВОДОМ В АТМОСФЕРУ (обзор)

© 2025 г. А. А. Гришков^а, М. С. Воробьев^{а,*}, С. Ю. Дорошкевич^а, Н. Н. Коваль^а

^а Институт сильноточной электроники Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 635055, Томск, просп. Академический, 2/3

* e-mail: vorobyovms@yandex.ru

Поступила в редакцию 01.08.2024 г.

После доработки 31.10.2024 г.

Принята к публикации 19.12.2024 г.

Проведен анализ массива экспериментальных данных по выводу в атмосферу электронных пучков большого сечения при помощи низкоэнергетических (80–300 кэВ) электронных ускорителей, основанных на различных типах эмиссии: на термоэлектронной эмиссии, на взрывной электронной эмиссии, на основе различных разрядов с плазменным катодом и на основе высоковольтного тлеющего разряда. Ретроспективно показан и количественно оценен “эффект больших площадей”, заключающийся в уменьшении максимальной плотности тока электронного пучка, выведенного в атмосферу, при увеличении площади сечения пучка, но при сохранении условий стабильной генерации. Анализ полученных данных показывает наличие технологического ограничения по средней плотности мощности электронных пучков большого сечения, генерируемых низкоэнергетическими электронными ускорителями, которое составляет до 40 Вт/см² и связано со стойкостью тонких фольг для вывода электронных пучков из вакуума в атмосферу.

DOI: 10.31857/S0032816225020012, EDN: GITOXА

1. ВВЕДЕНИЕ

Различные технологии с использованием электронных ускорителей начали интенсивно разрабатываться с 1950-х годов, и с тех пор скорость внедрения электронных ускорителей в качестве промышленных или лабораторных инструментов неуклонно возрастает. На данный момент счет функционирующих электронных ускорителей по всему миру идет на тысячи, и оценить их точное общее количество не представляется возможным. По разным оценкам в год по всему миру может вводиться в эксплуатацию до нескольких сотен электронных ускорителей. Поскольку лабораторный или промышленный электронный ускоритель может эксплуатироваться десятки лет, а география использования, разнообразность конструкций и спектр задач этих ускорителей охватывают многие смежные области физики и технологии, это создает определенные трудности в классификации ускорителей и отслеживании динамики их развития. Кроме того, на современном уровне

развития ускорительного оборудования и рынка радиационных технологий сведения о параметрах новых моделей ускорителей часто являются закрытой коммерческой информацией. Следовательно, систематизация такого объема и характера информации является нетривиальной задачей. Данная работа посвящена анализу данных по истории развития и современному состоянию исследований лишь небольшой доли электронных ускорителей, а именно, ускорителей электронных пучков большого сечения (ПБС) с их выводом в атмосферу при помощи низкоэнергетических ускорителей электронов. При этом в общем случае под ПБС подразумеваются электронные пучки, в которых тепловые скорости эмитированных электронов не оказывают существенного влияния на распределение плотности тока по сечению пучка [1]. Отдельно следует отметить, что в обзоре не рассматриваются электронные пучки, сканируемые по большой площади.

Ретроспективно работа охватывает временной промежуток от момента создания первых

низкоэнергетических ускорителей электронных ПБС в начале 70-х годов до современных образцов лабораторного и промышленного оборудования. Значительная часть излагаемого в работе материала основана на известных монографиях и сборниках статей [1–8], специализированных аналитических отчетах по электронным ускорителям и их применению для радиационных технологий [9–12], в том числе из смежных научных областей [13–18], но относящихся к выбранной тематике. Кроме этого, значительная часть материалов взята из результатов исследований, опубликованных в отечественных и зарубежных журналах, докладах и трудах профильных конференций, патентной информации и прочих материалах по тематике электронных ПБС, выведенных в атмосферу, а также оригинальных работ авторов настоящего обзора.

В работе рассмотрены существующие электронные ускорители, различающиеся типами эмиссии электронов: основанные на термоэлектронной эмиссии, на взрывной электронной эмиссии, на основе различных разрядов с плазменным катодом и на основе высоковольтного тлеющего разряда (ВТР) или вторичной ионно-электронной эмиссии. Такое разделение не исключает наличие комбинированных ускорителей, в которых отдельные элементы или вспомогательные узлы могут обеспечиваться разрядами разных типов. Ввиду большого объема научно-технической и патентной литературы по данной тематике в большинстве случаев авторы вынуждены ограничиваться лишь ссылкой на соответствующие публикации с параметрами ускорителей без анализа технических деталей, кроме отдельных случаев, где акцентировано внимание на уникальных особенностях конструкции ускорителей или на достижении рекордных значений по тем или иным параметрам (сечение пучка, средняя мощность, плотность тока и т. д.).

В работе использованы параметры и режимы эксплуатации следующих ускорителей электронных ПБС:

- электронные ускорители Института сильноточной электроники (ускорители серии “SINUS”, “ДУЭТ”, “Гелион” и др.) на основе взрывной электронной эмиссии [19–34], на основе плазменных катода и анода [35–50] и на основе ВТР [51–54];

- электронные ускорители НИИЭФА им. Д.В. Ефремова [11, 55] на основе термокато-

дов [56–61], на основе взрывной электронной эмиссии [62–64] (серии “Геза”) и на основе ВТР (“Озонатор”, “ТУР-М”, “МЛТК-50” и др.) [65–72];

- электронные ускорители Института электрофизики на основе взрывной электронной эмиссии [73, 74] и на основе плазменных катода и анода [75, 76];

- электронные ускорители различных фирм на основе термокатодов [77–89] (Energy Sciences Incorporated серии Electrocurtain, Selfshield, EPZ и прочие ускорители класса Electrocurtain, используемые сторонними организациями), ускорители Broadbeam Equipment [90], ускорители НИИ “Титан” и ВЭИ им. В.И. Ленина [91–95], ускорители ГОИ им А.А. Вавилова [96], ускорители Advanced Electron Beams [97–103], ускорители LEA Institute of Surface Modification Advanced [104–106], отпаянные пушки НПП “Исток” [107];

- ускорители Systems, Science and Software на основе взрывной электронной эмиссии [108, 109];

- ускорители с плазменным катодом: от Technion Israel Institute of Technology [110, 111] и Московского государственного технологического университета “СТАНКИН” [112];

- ускорители Fraunhofer Institute for Organic Electronics: e-ventus, WESENITZ, TORUS и др. [113–117];

- прочие ускорители на основе термокатодов [118–124], взрывной электронной эмиссии [125–129], с плазменными катодом и анодом [130–132] и ускорители на основе ВТР [133–142].

Конечно, не все существующие ускорители электронных ПБС нашли свое отражение в обзоре в полном объеме. Авторы заранее приносят извинения коллегам, если их ускорители или результаты исследований не нашли в этом обзоре должного, на их взгляд, отражения. Часть работ (особенно начального периода) на настоящий момент сложно включить в анализ из-за низкого уровня оцифровки или их отсутствия в публичном доступе. Кроме того, поиск работ по данной теме осложнен тем фактом, что на заре развития ускорителей ПБС не было устоявшейся терминологии, и в литературе можно встретить самые разные обозначения этого типа ускорителей: “Electron flood gun”, “Electron shower”, “E-Gun”, “Electron acceleration tubes”, “Extended-dimension beam”, “Electrocurtain”, “Broad beam”, “Large

area electron accelerators” и т.д., что, безусловно, затрудняет их поиск. Кроме того, выбор ускорителей для анализа определялся, в том числе, и принадлежностью авторов к определенной научной школе. Однако большое количество проанализированных источников и временной охват позволяют рассчитывать на то, что параметры ускорителей, которые по каким-то причинам не попали в обзор, все равно находятся в рамках тех же тенденций и могут позволить лишь уточнить те или иные диапазоны параметров, но кардинальным образом не могут повлиять на выводы работы. Большой временной интервал и количество работ можно считать репрезентативными для того, чтобы отразить качественные изменения в параметрах ускорителей или направлениях исследований, которые позволили систематизировать научные результаты.

В отличие от других обзоров по тематике ПБС, которые содержат таблицы параметров и примеры конкретных ускорителей, целью данной работы является создание “карты параметров”, которая в первую очередь помогла бы ориентироваться в этой задаче как разработчикам ускорителей электронов (поскольку такая работа и такой способ анализа в этом направлении проводятся впервые), так и специалистам, использующим электронные ПБС для решения фундаментальных и прикладных задач для радиационных технологий. Ввиду того, что многие параметры ускорителей приходится оценивать из нескольких разных источников и патентов, такой вариант представления результатов кажется оптимальным. Есть все основания полагать, что проведенная работа поможет ответить на ряд вопросов о текущем состоянии ускорителей электронных ПБС, направлениях развития, наличии конкуренции (как внутренней, так и внешней) и сделать прогноз на ближайшую перспективу развития различных типов ускорителей, генерирующих электронные ПБС.

2. АНАЛИЗ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСКОРИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОННЫХ ПБС

2.1. Рабочий диапазон ускоряющих напряжений

Любой лабораторный или промышленный электронный ускоритель имеет широкий набор параметров, которые зависят от типа электронного эмиттера и определяют его функциональность. Из-за большого разнообразия в номенклатуре электронных ускорителей с катодами

на основе различных типов эмиссии необходим алгоритм их сравнения друг с другом. В связи с этим в первую очередь требуется определить рабочий диапазон параметров, внутри которого расположены анализируемые авторами ускорители. Разумно оттолкнуться от макропараметров, которые удобны для анализа независимо от типа эмиттера. Это ускоряющее напряжение, площадь пучков, выводимых в атмосферу, ток электронного пучка или плотность тока, мощность, длительность импульса, коэффициент неоднородности и т.д.

Низкоэнергетическими ускорителями принято считать ускорители с максимальной энергией электронов пучка, выведенного в атмосферу, в диапазоне 100–300 кэВ [10, 11]. Выбор нижней границы диапазона обусловлен тем, что вывод электронного пучка в атмосферу осуществляется через выпускное фольговое окно, которое разделяет область низкого давления, где осуществляются генерация и транспортировка электронного пучка, и пространство более высокого давления, в котором электронный ПБС взаимодействует с объектом облучения и чаще всего осуществляется измерение его параметров. Порог минимальной энергии электронов для их прохождения через тонкие фольги (из бериллия, алюминия, титана, нержавеющей стали или различных сплавов) для большинства анализируемых работ составляет примерно 80 кэВ. При меньшей энергии электронов потери в выводной фольге и атмосфере делают использование электронного пучка нерентабельным. Для верхней границы диапазона энергий электронов нет единого мнения относительно амплитуды ускоряющего напряжения. Например, ускорители на основе взрывоэмиссионных катодов, которые используют импульсы напряжения с амплитудой 300 кВ и более, требуют усиленной радиационной защиты, что переводит их в иной класс оборудования, который не будет рассматриваться в рамках данной работы. В данном анализе авторы ограничились эмпирическими соображениями и удобством унификации для анализа, поэтому в работе рассматриваются ускорители электронных ПБС, рабочий диапазон энергий которых лежит в интервале 80–300 кэВ.

Также стоит отметить, что помимо перечисленных электронных ускорителей на основе различных типов эмиссии, в этом диапазоне напряжений присутствуют и другие типы ускорителей электронных пучков, например, класс линейных

электронных ускорителей, ускорители с магнитно-связанной системой постоянного тока, ускорители на основе трансформатора с изолированным магнитопроводом и другие [9–11, 18, 143, 144]. Несмотря на то, что эти ускорители могут функционировать при напряжениях ниже 300 кВ и иметь большие площади обработки (т. е. они попадают в исследуемый диапазон), в рамках этой работы они рассматриваться не будут, поскольку для этого класса оборудования в основном используются схемы со сканирующим электронным пучком малой площади.

2.2. Сечение пучков, выводимых в атмосферу

На рис. 1 представлено распределение площади сечений электронных пучков, выведенных в атмосферу, для анализируемых ускорителей электронных ПБС. Максимальное сечение электронного пучка, выведенного в атмосферу, который описан в литературе и включен в настоящий обзор, составляет около 10 м^2 [1, 108, 129]. Минимальное сечение электронного ПБС – это эмпирическая величина, которая связана в том числе и с максимальными плотностями тока, о чем будет сказано ниже. В работе авторы ограничились электронными ПБС, сечение которых, по их мнению, пригодно для решения производственных задач и составляет не менее 100 см^2 . Также важно отметить, что в работе не акцентируется внимание на форме сечения пучка: в анализе

использовались ускорители, генерирующие прямоугольные и ленточные пучки, пучки круглого сечения и ускорители с радиальной геометрией (как с радиально сходящимися, так и с радиально расходящимися электронными пучками).

Необходимо отметить, что анализ источников литературы, особенно серий обзорных работ и монографий, показывает, что в них часто описаны одни и те же установки, параметры которых дублируются из работы в работу. В представленном обзоре авторы старались использовать только оригинальное сообщение с параметрами ускорителя, если же в последующих публикациях производилась модификация оборудования, использовались другие режимы работы ускорителя или расширялся спектр задач по его использованию, то это отражалось на графиках в виде группы последовательных точек, когда один и тот же ускоритель используется в цикле работ на протяжении продолжительного времени. Например, это относится к ускорителям серии Sinus [25, 29–31, 34], ускорителю ДУЭТ [35–39], ускорителям серии Electrocutrain [77–79] и другим, для которых на графике на рис. 1 можно видеть несколько точек с одинаковым сечением пучка, последовательно расположенных на протяжении нескольких лет. С одной стороны, для анализа это создает противоречие, поскольку конструкционно установки часто не претерпевают существенных изменений, следовательно,

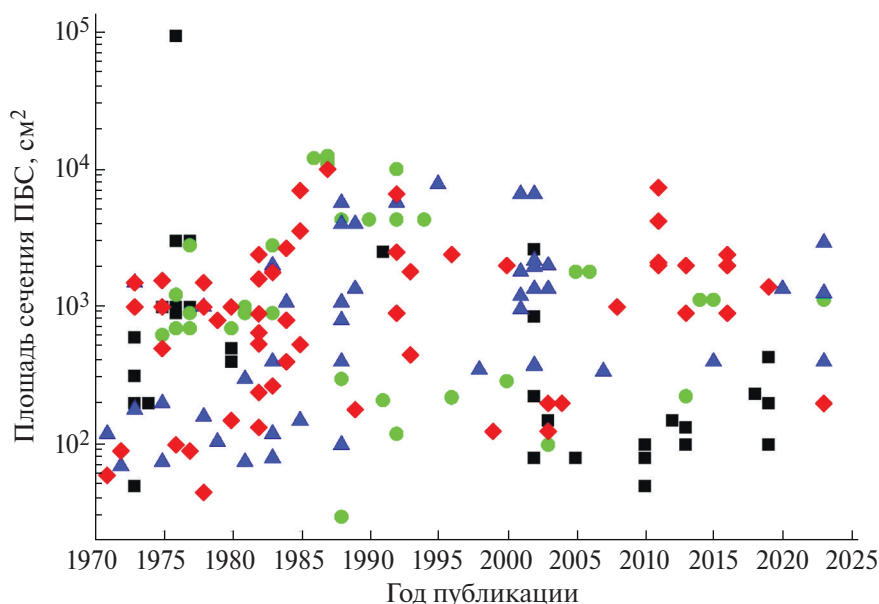


Рис. 1. Хронология развития ускорителей электронных пучков с точки зрения сечения выведенного электронного пучка в атмосферу: \blacklozenge – ускорители на основе термокатода, \blacksquare – ускорители на основе взрывной эмиссии, \bullet – ускорители с плазменным катодом и анодом, \blacktriangle – ускорители на основе ВТР.

получаются дублирующие характеристики и увеличение частоты упоминания конкретного ускорителя. Однако с точки зрения развития оборудования и технологий — это может говорить о том, что производители нашли и обосновали причины использования ускорителя для другой задачи или в других режимах эксплуатации. Очевидно, что у такого ускорителя есть научный или производственный задел, который позволяет его использовать с эффективными режимами облучения в рамках близкого диапазона параметров. Таким образом, если в литературе ускоритель появлялся в неизменном виде, то его параметры не наносились на график. Если же эксплуатационные параметры в публикации отличаются или описана какая-либо модификация ускорителя, то параметры пучка были отражены на графиках. Также важно отметить, что в работах, посвященных электронным пучкам большого сечения, нет единого формата представления результатов: в одних случаях приводятся максимально достигнутые параметры, в других — рабочий диапазон, в котором проводилось облучение объектов. В нашем анализе отдавалось предпочтение максимальным достигнутым значениям. В любом случае это субъективный выбор, который не может быть полностью исключен из анализа.

В целом, на полученном графике (рис. 1) наблюдается достаточно равномерное распределение ускорителей как по сечению, так и с точки зрения хронологии, что говорит о том, что нашу выборку ускорителей можно считать репрезентативной. Большая часть площадей сечений электронных пучков, выводимых в атмосферу, сосредоточена в интервале 10^2 – 10^4 см². При этом имеется большой промежуток между ускорителями с максимальным сечением пучка, которые имеют радиально расходящуюся геометрию [3, 108], и остальными ускорителями, которые на графике распределены достаточно равномерно.

2.3. Диапазон параметров по плотности тока ПБС

Для всех ускорителей электронов фундаментальными параметрами являются три величины: энергия электронов, ток электронного пучка и его сечение, которые определяют спектр возможных применений ускорителя и его производительность. Поскольку вывод электронного пучка в атмосферу обычно осуществляется через тонкую металлическую фольгу, которая закры-

вает перфорированную опорную решетку (с круглыми или щелевыми отверстиями) выводного окна, это накладывает ограничения на величины средней и импульсной плотностей энергии электронного пучка. Размеры отверстий в опорной решетке выбираются, исходя из двух противоречивых условий: отверстия должны быть минимального размера для обеспечения максимальной прочности фольги, выдерживающей перепад давлений между атмосферой и вакуумом, при этом отверстия должны быть как можно больше для обеспечения наибольшей геометрической прозрачности опорной решетки и максимального вывода тока электронного пучка в атмосферу [66, 76, 145, 146]. Чем больше мощность выводимого пучка, тем большая тепловая нагрузка будет приходиться на центр отверстий, что приведет к снижению механической прочности фольги в этой области, например, за счет деформации фольги вблизи ребер решетки или при превышении ее термической стойкости [76]. Для тонких фольг (15–50 мкм) из алюминия, титана или различных сплавов предельная максимальная плотность тока в импульсно-периодическом режиме при водном охлаждении опорной решетки может превышать 10 А/см² для нано- и субмикросекундного диапазонов длительностей. Проведенный анализ показывает, что такой порядок плотности тока для электронных пучков, выводимых в атмосферу, может достигаться для импульсных пучков малого сечения, сходящихся электронных пучков или сильноточных ускорителей на основе взрывной электронной эмиссии [38]. По максимальному току эти ускорители соответствуют токам, выводимым в атмосферу на уровне 1 кА и выше. Нижняя граница по плотности тока ограничена только общей эффективностью и рентабельностью использования конкретного ускорителя.

На рис. 2 приведено распределение ускорителей электронных ПБС, выводимых в атмосферу, в координатах максимальной плотности тока и максимального тока электронного пучка. Также на графике приведены границы рабочих диапазонов по этим параметрам для ускорителей с различными типами эмиссии. В таких координатах весь набор анализируемых ускорителей расположен в узком интервале, ограниченном двумя изолиниями равной площади, которые были определены ранее при анализе площади сечения электронных ПБС. Отдельные ускорители, которые расположены вне этого диапазона,

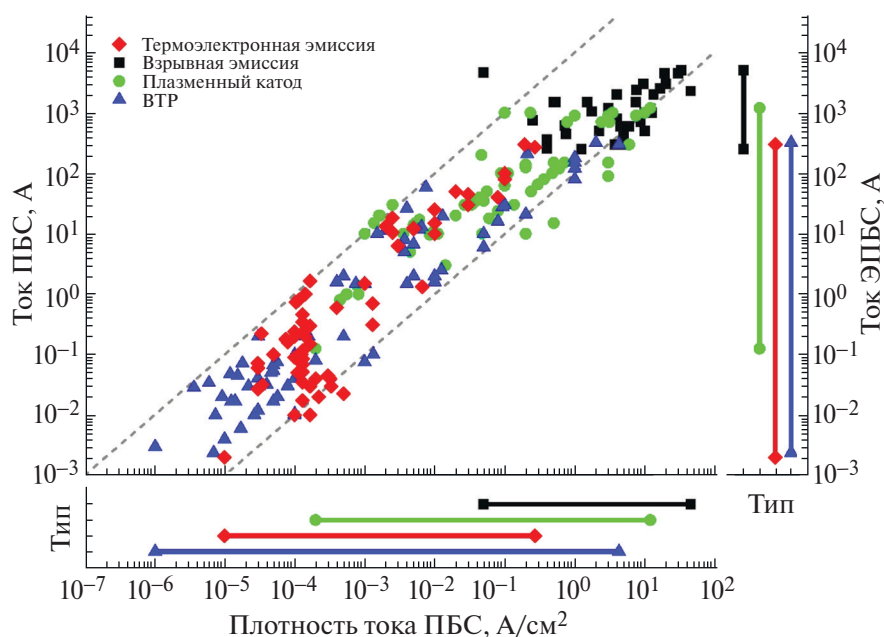


Рис. 2. Распределение ускорителей электронных ПБС, выводимых в атмосферу, в координатах плотности тока и максимального тока: \blacklozenge — ускорители на основе термокатодов, \blacksquare — ускорители на основе взрывной эмиссии, \bullet — ускорители с плазменным катодом и анодом, \blacktriangle — ускорители на основе ВТР, штриховые линии — изолинии с площадями 10^2 и 10^4 см^2 .

имеют сечение пучка чуть менее 100 см^2 или значительно большее, которое достигается использованием конструкции ускорителя с радиально сходящимся пучком [109, 129].

Известно, что предел по максимальной плотности тока электронного ПБС в непрерывном режиме, ограниченный термической стойкостью используемых тонких фольг в зависимости от конструкции выводных окон, составляет $0.1\text{--}0.2 \text{ мА/см}^2$ [12]. Как видно на рис. 2, именно этот диапазон плотностей тока соответствует границе между ускорителями на основе термокатодов и на основе взрывной электронной эмиссии. Из этого факта следует важный вывод: на настоящий момент (а на самом деле уже в середине 80-х годов) для ускорителей на основе термокатодов достигнуты плотности тока для непрерывных и импульсных режимов генерации, которые ограничивают плотность тока ПБС, выводимого в атмосферу, термической стойкостью тонких фольг, а не эмиссионными свойствами катода. Другими словами, мощность и производительность этих ускорителей ограничена не эмиссионными свойствами генератора пучка, а другими узлами ускорителя, или свойствами объектов облучения. Это важный вывод, поскольку одна из особенностей развития электронных ускорителей для получения ПБС состоит в том, что они начали развиваться практически одновременно

на основе эмиттеров различных типов, но на настоящий момент промышленными ускорителями преимущественно являются в основном ускорители на базе термокатодов и ВТР. На рис. 2 видно, что самый широкий диапазон по плотности тока и полному току электронного пучка имеют ускорители на основе ВТР. Это связано с тем, что для этих ускорителей получены устойчивые режимы эксплуатации как в непрерывном, так и в импульсно-периодическом режиме генерации ПБС. Управление током ПБС в этих ускорителях осуществляется за счет вторичных процессов. Это позволяет реализовывать более низкие концентрации эмиссионной плазмы и меньшие плотности тока как в непрерывном режиме, так и в импульсно-периодическом режиме, когда токи электронного пучка, выводимые в атмосферу, превышают аналогичные для ускорителей на основе термокатодов. Несмотря на то, что при использовании плазменных катодов нет физических ограничений для достижения меньшей плотности тока ПБС (менее 10^{-4} А/см^2), этот факт не нашел отражения в литературе, что, вероятнее всего, связано с нецелесообразностью использования плазменных катодов для решения задач, где эффективно себя зарекомендовали ускорители с термокатадами или на основе ВТР, удовлетворяющие требованиям производства как по достигаемому

эффекту от электронно-пучкового облучения, так и по стабильности, производительности и ресурсу.

Важно отметить, что большинство рассматриваемых ускорителей позволяет гибко менять условия генерации ПБС для того, чтобы максимизировать тот или иной параметр ускорителя. Если говорить о лабораторном оборудовании, то есть много примеров реализации минимальной неоднородности электронного ПБС в атмосфере за счет уменьшения эффективности вывода путем уменьшения размеров выводного фольгового окна, использования более толстой фольги, меньшего напряжения или увеличенного дрейфового пространства до объекта облучения. Реализация режимов генерации пучка, отличных от максимальных, будет приводить к смещению параметров ускорителей на представленном графике ниже и левее. Примером такого подхода могут служить работы [109, 129], где для ускорителя на основе взрывной электронной эмиссии в радиально расходящемся пучке были получены параметры плотности тока электронного пучка, которые расположены далеко от основной группы ускорителей. В рамках этой работы авторами подробно не анализируются ускорители по коэффициенту неоднородности для плотности тока, поскольку, во-первых, уже в конце 70-х годов ускорителями разных типов были достигнуты показатели по неоднородности пучка, близкие к единицам процентов [8, 10, 11], а во-вторых, если требования к однородности стоят на первом месте, то, как отмечалось выше, существуют надежные способы уменьшения эффективной площади облучения или мощности пучка для того, чтобы реализовать требуемый параметр.

Также на рис. 2 в верхней части графика при плотности тока 1 А/см^2 и выше видно, что точки на графике, которые описывают параметры ускорителей на основе взрывной эмиссии, смещаются ближе к нижней изолинии и, соответственно, имеют меньшее сечение пучка. Такой характер распределения связан с так называемым “эффектом большой площади”, который заключается в том, что при увеличении площади катода ускорителя устойчивыми режимами будут те, в которых плотность тока ниже. С ростом площади электронного пучка реализация стабильных и эффективных режимов работы ускорителя затруднена. Подробнее этот эффект хорошо виден на зависимостях максимального

тока и максимальной плотности тока электронов от сечения пучка, которые представлены на рис. 3а, б.

Для ускорителей, основанных на разных принципах эмиссии, причина уменьшения плотности тока с ростом сечения пучка может иметь как схожую, так и разную природу. Общими факторами, ограничивающими плотность тока пучка с увеличением его сечения, являются сложность в обеспечении электрической прочности основных узлов ускорителя и сохранение однородности условий генерации ПБС. Эффект уменьшения электрической прочности при увеличении площади электродов хорошо известен [147, 148], но для ускорителя в целом он имеет более комплексную природу, поскольку основан на совокупности многих факторов.

Для термокатодов таким ограничивающим фактором является в первую очередь неоднородность эмиссии из-за использования протяженных одиночных или набора многоэлементных катодов. Ускорителям на основе разрядов различных типов свойственны наличие колебаний тока и напряжения, подвижность эмитирующей плазменной поверхности, другие локальные возмущения параметров эмитирующей плазмы. Особенно сильно эти эффекты проявляются при длительной эксплуатации ускорителя, когда такие неоднородности могут накапливаться. На рис. 3а, б видно, что для всех ускорителей на основе взрывной эмиссии, ВТР и плазменного катода с ростом сечения пучка его электронный ток или остается постоянным, или снижается, тогда как плотность тока снижается независимо от типа ускорителя. Сильнее всего этот эффект проявляется для ускорителей на основе ВТР и термокатодов. Для ускорителей на основе ВТР при увеличении сечения пучка резко возрастает вероятность перехода ВТР из несамостоятельной в самостоятельную форму горения с резким ростом тока в ускоряющем промежутке, иницирующим его электрический пробой. При изменении сечения пучка в пределах 10^2 – 10^4 см^2 плотность тока уменьшается на три порядка (10^1 – 10^{-2} А/см^2). Ситуация с ускорителями на основе термокатодов несколько иная – создание термокатодов с большой эмитирующей поверхностью технологически затруднено (в том числе за счет обеспечения мощной системы электропитания термокатодов с гальванической развязкой на полное ускоряющее напряжение). Из-за особенностей работы этого эмиттера и параме-

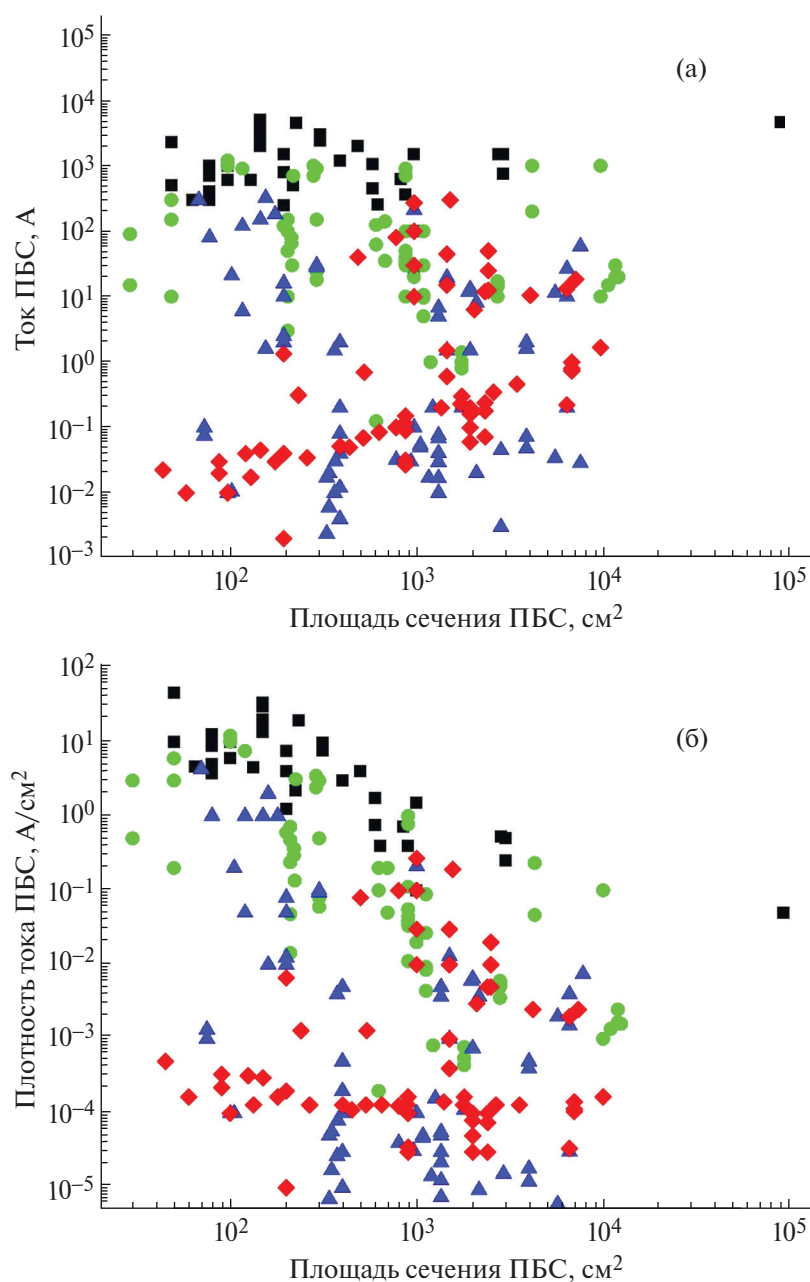


Рис. 3. Распределение ускорителей электронных ПБС, выводимых в атмосферу, в координатах сечения пучка и максимального тока (а) и сечения пучка и плотности тока (б): \blacklozenge — ускорители на основе термокатода, \blacksquare — ускорители на основе взрывной эмиссии, \bullet — ускорители с плазменным катодом и анодом, \blacktriangle — ускорители на основе ВТР.

тров эмиссионных токов, которые ограничены эмиссионной способностью катода и далеки от значений, ограниченных пространственным зарядом, максимум полного тока пучка достигается для ускорителей с сечением пучка порядка 10^3 см^2 и полным током на уровне 10^2 А и более. Эти параметры достигаются для ускорителей на основе термокатодов с многоэлементными эмиттерами [1, 120, 123]. При этом при увеличении сечения пучка на порядок максимальная

плотность тока уменьшается аналогично ускорителям на основе ВТР до 10^{-3} А/см^2 .

Ускорители на основе взрывной эмиссии демонстрируют поведение, аналогичное поведению ускорителей с плазменным катодом, — с ростом сечения пучка его максимальный ток практически не меняется, а плотность тока падает. При этом на графике видно, что минимальный градиент демонстрируют ускорители с плазменным катодом. Для ускорителей

на основе взрывной электронной эмиссии в области сечения пучков порядка 10^2 – 10^3 см² абсолютные значения полных токов превышают аналогичные для ускорителей с плазменным катодом, а на уровне сечения пучков порядка 10^4 см² они практически совпадают.

Таким образом, наш анализ показывает, что масштабирование систем генерации ПБС и увеличение сечения пучков, выводимых в атмосферу, эффективнее всего осуществляются при помощи использования эмиссии электронов из плазмы объемных разрядов низкого давления. Для этих ускорителей “эффект большой площади” проявляется гораздо слабее, чем для ускорителей на основе термокатодов, ВТР или даже взрывной эмиссии. Ускорители на основе взрывной эмиссии из-за распространения катодной плазмы и сложности в обеспечении однородной эмиссии с большой площади не могут быть использованы в непрерывном режиме, а их длительная эксплуатация в импульсно-периодическом режиме сопряжена с деградацией эмиссионных свойств катода и с требованием к их сравнительно частой замене, что подразумевает высокую цену обслуживания ускорителей этого типа и их сравнительно слабое внедрение в промышленных применениях по сравнению с ускорителями других типов. Этот вывод коррелирует с результатами анализа диапазона параметров ускорителей по плотности тока (рис. 2), где с ростом плотности тока ускорители на основе взрывной эмиссии смещаются к изолинии с меньшими значениями сечения пучка.

Важным параметром любого устройства является его рентабельность, однако в рамках этой работы ускорители по подобным параметрам (например, по величине стоимости ускорителя на киловатт удельной мощности или любому подобному параметру) не оценивались. Тем не менее опосредованно эти данные также находят отражение на полученных графиках, поскольку они описывают реальные установки. Например, повышение силы тока экономически гораздо выгоднее, чем повышение ускоряющего напряжения, несмотря на то что повышение напряжения дает прямой прирост эффективности и коэффициента вывода электронного пучка в атмосферу. Капитальные вложения в источники питания (особенно короткоимпульсные), создание дополнительной радиационной защиты, которая, как правило, требуется для ускорителей на основе взрывной эмиссии (для

достижения однородности эмиссии эти ускорители тяготеют к более высоким напряжениям) значительно выше, чем для ускорителей других типов. Экстенсивный путь увеличения производительности, связанный с увеличением сечения электронных пучков, предпочтительнее, и по этому показателю ускорители на основе плазменных катодов и анодов обладают большими потенциальными возможностями. Эти ускорители включают в себя все преимущества термокатодных и взрывоэмиссионных ускорителей, комбинируя возможность эксплуатации в непрерывных режимах и высокие параметры по электронному току, по сечению пучка, выводимого в атмосферу, и по плотности тока с наименее выраженным эффектом падения плотности тока при увеличении сечения генерируемого электронного пучка.

2.4. Анализ импульсно-периодических ускорителей электронных ПБС

На начальном этапе развития ускорителей электронных ПБС, когда основными задачами для этого направления были накачка больших газовых объемов, модификация различных материалов, стерилизация и синтез в радиационно-химических реакциях, ключевым фактором для технологического применения этого типа ускорителей было достижение максимальной мощности пучка. Постепенное развитие и расширение спектра радиационных технологий привели к тому, что мощность пучка для ряда задач перестала быть решающим фактором. Особенно это относится к работам с биологическими объектами, для которых требуются специфические “деликатные” режимы облучения.

В рамках этого анализа рассмотрен не только достаточно большой промежуток времени (более 50 лет), но и различные классы оборудования: как промышленные (коммерческие), так и исследовательские. Из-за большого количества технических нюансов этих ускорителей, разных научных школ, которые легли в основу коллективов, занимающихся их разработкой, для описания характеристик такого оборудования используются разные параметры, для которых зачастую сложно проводить прямые сравнения. Кроме того, как отмечалось выше, часть данных о параметрах ускорителей является коммерческой информацией, и эти данные предоставляются только по запросу или авторы

предпочитают указывать в качестве параметров производные величины (рабочую дозу излучения в одном импульсе, скорость обработки в м/мин и т. д.). Далеко не всегда из этих параметров можно восстановить или оценить эквивалентную длительность импульса, так же, как и среднюю мощность или плотность мощности.

Важно отметить, что в общем случае ускорители, работающие с короткими длительностями импульса тока пучка (до наносекундного диапазона), могут достигать большей плотности и амплитуды полного тока, при этом они остаются в пределах тех же параметров, что и на рис. 2.

До этого момента авторы не разделяли ускорители по длительности импульса электронного пучка, ориентируясь на макропараметры, которые максимально открыты для анализа. На рис. 4 представлено распределение ускорителей электронов в координатах плотности тока, средней мощности и средней плотности мощности. Количество данных по ускорителям, представленным на этих графиках, меньше, чем на предыдущих, поскольку из рассмотрения были исключены моноимпульсные ускорители и ускорители, которые хоть и могут функционировать в непрерывном или импульсно-периодическом режиме, но время их непрерывной работы измеряется секундами или минутами, а их эксплуатационные характеристики ориентированы на специальные приложения и не подразумевают использования для решения длительных производственных задач для радиационных технологий.

На рис. 4а представлена зависимость средней плотности мощности электронного пучка, выведенного в атмосферу, от плотности тока электронного пучка. Большинство ускорителей на основе термокатодов и ВТР расположено в интервале двух изолиний с диапазоном напряжения 80–300 кВ. Эти условия соответствуют непрерывному режиму генерации. Остальные ускорители расположены правее. В общем случае для этих ускорителей справедливо, что меньшим длительностям импульса соответствуют большие плотности тока. На графике для нескольких ускорителей и их режимов работы показаны характерные длительности импульсов от 4.5 нс (ускоритель на основе взрывной эмиссии SINUS160 [30]) до 1 мкс (ускоритель с плазменным катодом [75]). Конечно, в каждом конкретном случае длительность импульсов и частота их следования может быть своя. Увеличение частоты генерации при сохранении

длительности импульса ведет к увеличению коэффициента заполнения и, следовательно, к увеличению мощности. Поэтому максимальная плотность тока может быть получена для ускорителя с не самой минимальной длительностью импульса, однако в целом для всех ускорителей свойственна именно такая закономерность.

Анализ зависимости средней мощности от плотности тока пучка показывает несколько иной вид (рис. 4б). Поскольку при определении мощности ускорителя важны конкретное сечение пучка и определенная длительность импульса, на этом графике нельзя нанести изолинии, как на диаграмме плотности мощности на рис. 4а или рис. 4в. Анализ этого графика показывает, что ускорители на основе термокатодов полностью закрывают весь диапазон рассматриваемых значений средних мощностей. Максимальным значениям для термокатодов соответствуют промышленные ускорители серии EPZ4 [79, 83] и ускорители Broadbeam Equipment [90]. Кроме того, по характеру распределения ускорителей видно, что увеличение плотности тока (сокращение длительности импульса) сопровождается уменьшением средней мощности выведенного электронного пучка. Для каждого конкретного ускорителя и типа эмиссии причина уменьшения средней мощности может быть своя: наличие фронта импульса и спада, в которых напряжение отличается от максимального, влияние инерционности системы, т. е. увеличения относительной доли времени выхода ускорителя на рабочий режим, наличие неустойчивостей при увеличении относительной плотности тока и т. д.

На рис. 4 в представлено распределение ускорителей в координатах средней мощности и средней плотности мощности. На рисунке видна характерная вертикальная граница в распределении ускорителей в области средней плотности мощности порядка (30–40) Вт/см², которая ограничена механической и термической стойкостями тонких фольг для вывода ПБС из вакуума в атмосферу. На рис. 4в видно, что лидирующие позиции по показателю мощности и плотности мощности заняты ускорителями на основе термокатодов. Именно это полученное распределение объясняет факт широчайшей номенклатуры ускорителей на основе термокатодов и их доминирование на рынке радиационных технологий; с ними только в области сечения пучка порядка 10³ см² и ниже могут конкурировать ускорители на основе ВТР и ускорители

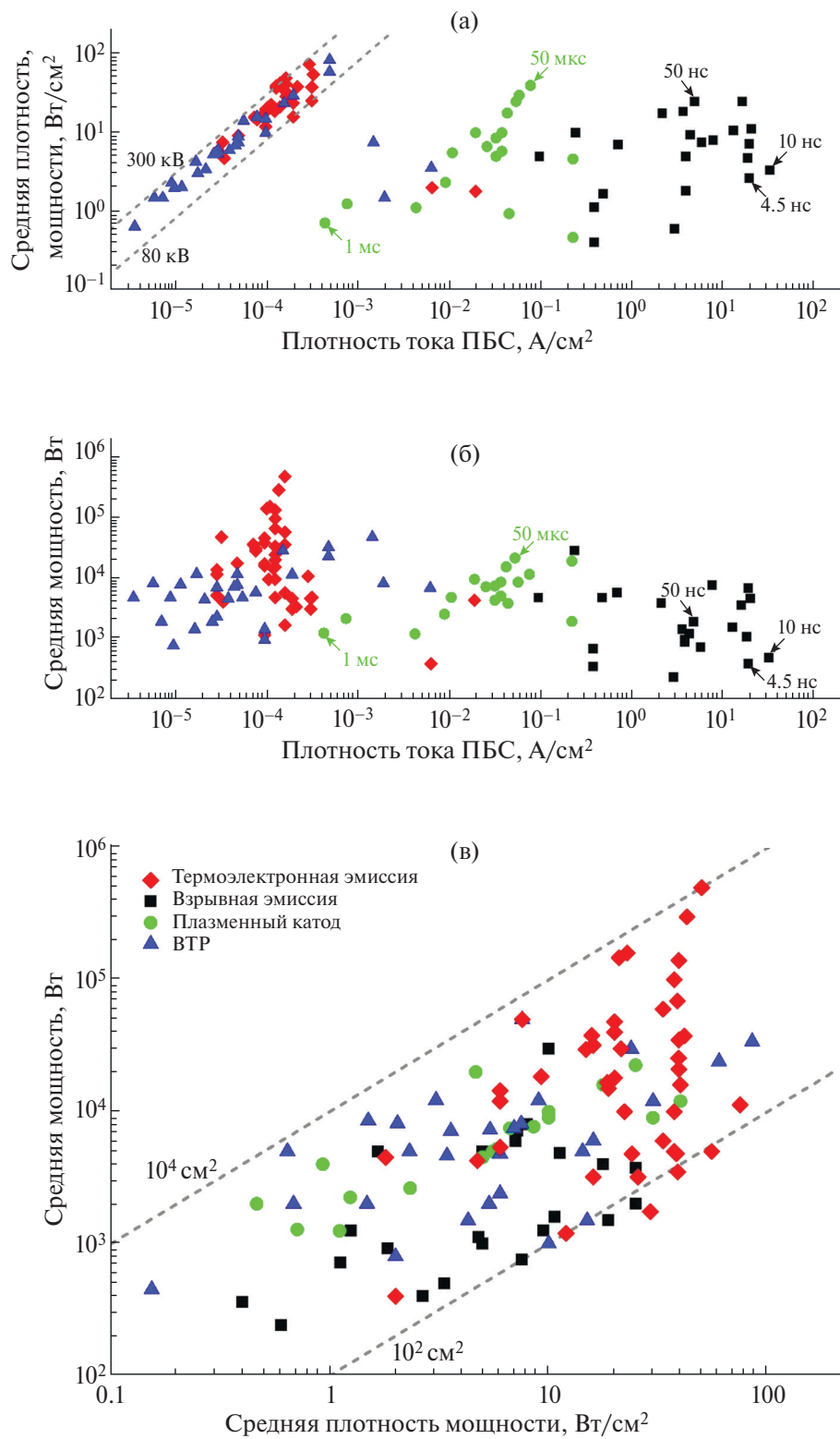


Рис. 4. Распределение ускорителей электронных ПБС, выводимых в атмосферу, в координатах средней плотности от мощности (а), средней мощности от плотности тока пучка (б) и средней плотности мощности от средней мощности (в): \blacklozenge — ускорители на основе термокатода, \blacksquare — ускорители на основе взрывной эмиссии, \bullet — ускорители с плазменным катодом и анодом, \blacktriangle — ускорители на основе ВТР, штриховые прямые — изолинии с максимальным напряжением 80 кВ и 300 кВ с площадями 10² и 10⁴ см².

с плазменным катодом, причем и те, и другие ускорители чаще имеют радиальную геометрию со сходящимся электронным пучком. На рис. 4в также видно, что ускорители, параметры которых близки к предельной плотности мощности и которые имеют сечение выведенного в атмосферу электронного пучка выше 10^3 см^2 , представлены только ускорителями на основе термокатодов. Это ускорители серий Electrocurtain, EPZ и Broadbeam Equipment [79, 83, 90]. В целом полученные распределения на этих графиках хорошо иллюстрируют следующий факт: с точки зрения рентабельности ускорителей, чем меньше длительность импульса, тем выше капитальные затраты на производство и эксплуатацию ускорителя, что объясняет распространенность ускорителей на основе термокатодов, которые эксплуатируются преимущественно в непрерывном режиме работы.

3. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ

Поскольку истории развития ускорителей с электронными ПБС посвящено достаточно большое количество обзоров и монографий [1–6, 8–12], нет необходимости подробно останавливаться на этом вопросе, обозначим только обнаруженные тенденции в конструировании ускорителей электронных ПБС. По результатам анализа работ была построена следующая хронология для ускорителей электронных ПБС (рис. 5).

Отталкиваясь от проведенного анализа по площади облучения (рис. 1), от максимального тока и максимальной плотности тока (рис. 3), необходимо отметить, что максимальные физические показатели по ряду выходных параметров ускорителей независимо от их типа эмиссии были достигнуты к середине 80-х годов. Рост площади облучения до 1 м^2 и более, достижение средних плотностей тока 0.1 мА/см^2 (при средней плотности мощности $30\text{--}40 \text{ Вт/см}^2$) в непрерывных режимах облучения и использование различных геометрий и форм зон облучения привели к формированию отдельного рынка электронных ускорителей. Если на заре развития этого направления многие авторы отмечали, что четкое разграничение областей применения и параметров ПБС, обеспечиваемых с помощью термокатодов, газоразрядных эмиттеров и катодов на основе взрывной электронной

эмиссии, затруднено в связи с продолжающимся интенсивным развитием техники формирования ПБС и непрерывным совершенствованием параметров соответствующих электронных ускорителей [3, 5, 8], то сейчас очевидно, что эволюция ускорителей, основанных на разной эмиссионной природе, пошла по разным путям. На рис. 5а, б можно заметить, что если провести огибающую по верхним или нижним значениям на графиках или провести линии среднего тренда, то для ускорителей на основе термокатодов и ВТР они будут направлены вниз, а для ускорителей на основе взрывной эмиссии и с плазменным катодом будут направлены горизонтально или вверх с небольшим углом.

Для создания этого распределения по ускорителям электронных ПБС на основе термокатодов в первую очередь использовались работы, описывающие историю их развития в связи с появлением в начале 70-х годов интереса к созданию широкоапертурных ускорителей внешней ионизации на основе пучков быстрых электронов. Интерес к таким ускорителям был связан, с одной стороны, с открытием электроионизационного способа накачки газовых лазеров и, с другой стороны, с потребностями производства экономичным и технологичным способом отверждения тонких полимерных покрытий: защитных, декоративных, клеевых и множества других. В качестве иллюстрации развития этого класса ускорителей можно привести ускорители серии Electrocurtain [77–79], которые уже к середине 80-х годов вышли на средние линейные плотности тока на уровне 5.5 мА/см . Разработчики этой серии ускорителей используют для описания своих ускорителей параметр линейной плотности тока (поскольку большинство ускорителей имеют ленточный тип выводного окна), и данная величина линейной плотности тока соответствует средним плотностям мощности на уровне $30\text{--}40 \text{ Вт/см}^2$.

Формирование рынка промышленных электронных ускорителей и сосредоточение в нескольких компаниях большей части оборудования для промышленных применений привели к тому, что, начиная с конца 80-х годов, информация о широкоапертурных ускорителях электронов на основе термокатодов стала появляться в научной печати гораздо реже. Данный факт находил отражение в разных монографиях и аналитических обзорах, например, в работах [10, 11]. Фактически можно говорить о том, что сфера

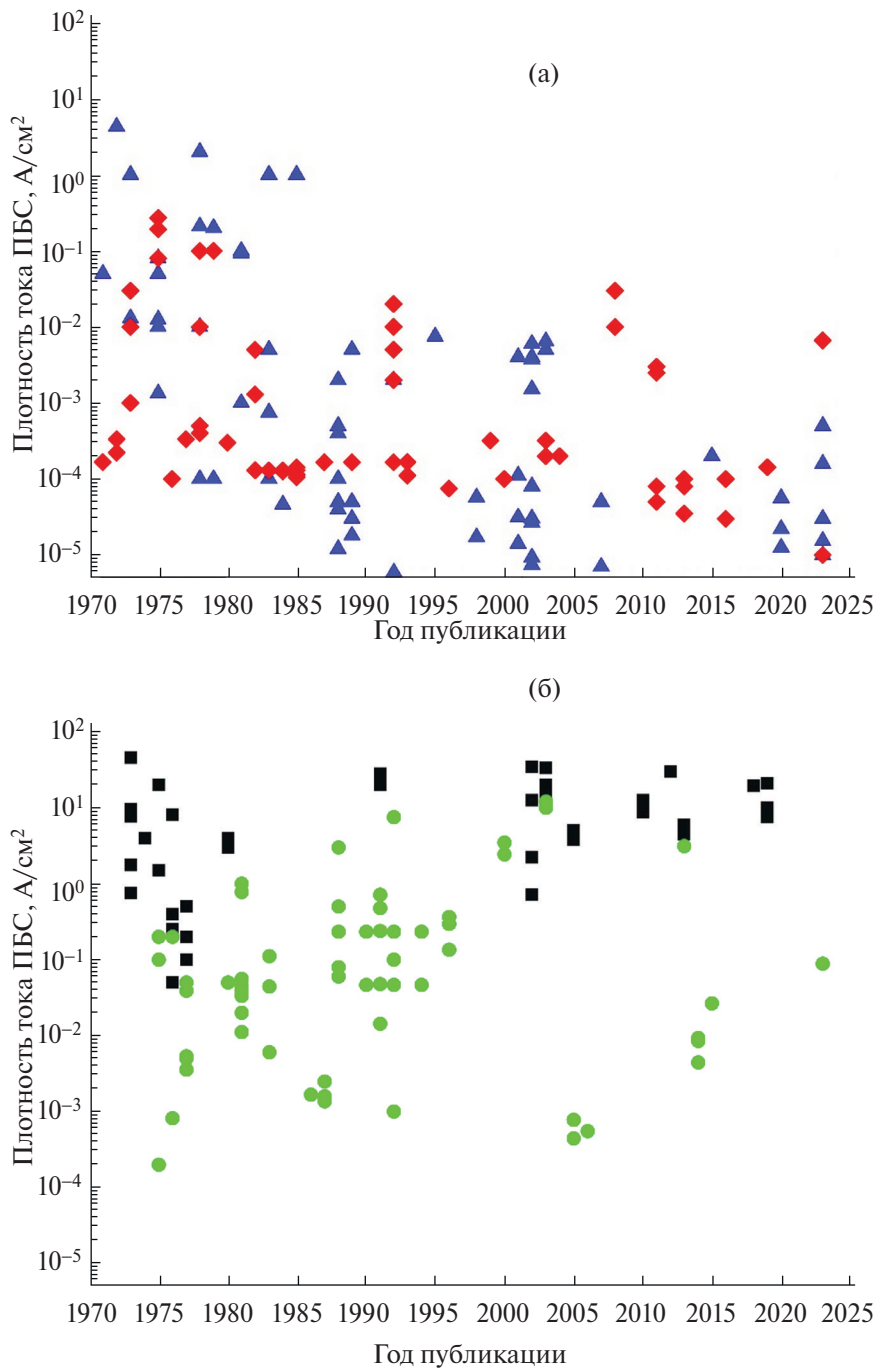


Рис. 5. Хронология развития ускорителей электронных ПБС с точки зрения максимальной плотности тока электронного пучка, выведенного в атмосферу, для ускорителей на основе термокатодов и ВТР (а), и для ускорителей на основе взрывной эмиссии и ускорителей с плазменным катодом (б): \blacklozenge — ускорители на основе термокатода, \blacksquare — ускорители на основе взрывной эмиссии, \bullet — ускорители с плазменным катодом и анодом, \blacktriangle — ускорители на основе ВТР.

создания и использования ускорителей электронных ПБС разделилась на две части: исследовательско-лабораторные и промышленные ускорители. Такое деление не обязательно означает, что производители промышленных ускорителей не ведут собственных научных исследований

или не используют в них данных других научных групп. Речь идет о том, что немногочисленные новые научные публикации этого класса ускорителей стали связаны в основном не с исследованием новых физических явлений для развития научного направления, а с готовыми решениями

для усовершенствования работы, повышения управляемости выходными параметрами или ликвидации слабых мест оборудования, выявленных в ходе длительной эксплуатации отдельными пользователями [60, 70, 119].

Аналогичная ситуация наблюдается для ускорителей на основе ВТР. Ввиду спада научного интереса к задачам электроионизационного способа накачки объемных газовых лазеров развитие ускорителей на основе ВТР также направлено на снижение средней плотности тока, которое позволяет обеспечить продолжительное время бесперебойной непрерывной работы и требуемое распределение дозы и мощности облучения. Ускорители на основе ВТР в этом смысле конкурируют с ускорителями на основе термокатодов. При всех их недостатках они обладают возможностью повышения производительности не за счет экстенсивных мер (для термокатодных ускорителей в литературе много сообщений об одновременном использовании нескольких одинаковых ускорителей для повышения мощности и производительности), а за счет их рентабельности, заключающейся в большей энергетической эффективности, а также за счет более “дешевого вакуума” (т.е. облегченной насосной группы с возможностью работы ускорителя в области форвакуумного диапазона давлений).

Хронология развития этих ускорителей (рис. 5а) показывает, что новым современным ускорителям свойственно понижение плотности тока (и понижение энергии электронов), что коррелирует с требованием обеспечения более стабильной и продолжительной работы, а увеличение производительности, которое может быть реализовано через увеличение сечения пучка, приводит к описанному выше “эффекту большой площади” и, следовательно, опять же, к уменьшению плотности тока ПБС.

Для ускорителей на основе взрывной эмиссии, начиная от первых попыток использования взрывной электронной эмиссии для создания ускорителей электронов с большим сечением пучка, которые были предприняты в 1968 году [19], и до современных образцов установок для стерилизации [25, 31], эти ускорители по параметру плотности тока остаются практически в рамках одного диапазона (рис. 5б). Стоит отметить, что только ускорители этого типа максимально близки или в полной мере являются ускорителями, к которым применим термин “сильноточные”. Также ускорители этого типа имеют

максимальные значения как по плотности тока и полному току электронного пучка, выведенного в атмосферу, так и по сечению пучка (рис. 3). В нашем анализе максимальный ток электронного пучка, полученный ускорителями этого типа, составлял порядка 100 кА, плотность тока до 100 А/см² и сечение выведенного в атмосферу электронного пучка до 11 м² (стоит отметить, что эти максимальные параметры были достигнуты при напряжениях выше 300 кВ, поэтому часть этих результатов была исключена из представленных выше графиков, а реальный рассматриваемый диапазон токов значительно меньше и не превышает 10 кА). Ускорители на основе взрывной эмиссии прочно занимают лидирующие позиции по мгновенным максимальным параметрам, это, например, ускорители серии SINUS [25, 29–31, 34].

Казалось бы, высокое значение тока пучка, которое всегда подчеркивалось коммерческими и промышленными требованиями, должно было сделать установки этого типа наиболее коммерчески успешными. Ток пучка напрямую связан с производительностью технологической установки, он определяет в итоге ее рентабельность. Но помимо всех достоинств этого класса ускорителей, они обладают и недостатками, которые свойственны сильноточным электронным пучкам (ограничение тока собственным объемным зарядом, экранировка, неустойчивости, влияние фронта и спада импульса напряжения для малых длительностей импульса и т.д.).

Анализ показывает, что в научно-технической и патентной литературе практически отсутствуют работы, в которых бы исследовался ресурс этого типа ускорителей на больших рабочих временах. Имеется в виду, что исследования ресурса отдельных компонентов или узлов ускорителей (стойкости фольг, ресурса катода, стабильности генерации [19, 20, 30, 43, 60, 61, 119, 122]) представлены достаточно широко, но исследования ресурсоиспытаний ускорителя в целом представлены по большей части только изучением ускорителей на основе термокатодов и на основе ВТР, что также подтверждает их вовлеченность в различные технологические процессы. Эти ускорители являются лидерами по длительности непрерывной эксплуатации. Так, например, номинальный срок службы одной из установок серии BroadBeam составляет не менее 10000 часов, в течение которых ускоритель непрерывно проработал более пяти лет

с теми же катодными сборками, которые поставлялись вместе с системой [90]. В то же время примеров подобных ресурсных испытаний для ускорителей на основе взрывной эмиссии или плазменного катода найти не удалось.

Последний тип ускорителей — ускорители с плазменным катодом — это, на наш взгляд, самое противоречивое, но в то же время самое перспективное направление развития этого класса ускорителей. Во-первых, как видно на рис. 5б, это единственный тип ускорителей, для которого наблюдается существенный рост параметров плотности тока. Можно сказать, что эти ускорители впитали в себя как сильные, так и слабые стороны всех рассмотренных выше ускорителей. По плотности тока ускорители с плазменным катодом сравнимы с ускорителями на основе взрывной эмиссии, они подвержены наименьшей степени влияния “эффекта большой площади” и могут обладать еще большей эффективностью, чем ускорители на основе ВТР. Однако этим ускорителям свойственны и все минусы перечисленных выше устройств. Один из главных недостатков — нестабильность генерации. Для исследовательских задач отдельные отказы оборудования или срабатывание защиты и быстрое восстановление в рабочий режим не представляют серьезной проблемы, но для технологических задач нарушение электрической прочности, нестабильность разряда — это всегда брак в процессе облучения, что сдерживает выход ускорителей такого типа на промышленный уровень радиационных технологий. При этом проведенный анализ показывает, что разнообразие этих установок, их применение в различных практических задачах остаются стимулом к их развитию, благодаря имеющимся к настоящему моменту научному и инженерному заделам, демонстрирующим перспективность таких ускорителей электронов. Благодаря гораздо меньшему энергопотреблению и большей энергетической эффективности (как по генерации эмиссионной плазмы, так и по выводу электронного ПБС в атмосферу) эти ускорители остаются перспективными и могут быть спроектированы гораздо более компактными и пригодными для интеграции как в традиционные задачи радиационных технологий, так и в новых направлениях.

Подводя итог, можно грубо описать получившуюся хронологию простыми словами: для ускорителей на основе термокатодов и ВТР преимуще-

ственно наблюдается эволюция промышленных ускорителей, а для ускорителей на основе взрывной эмиссии и плазменных катодов — эволюция лабораторных и исследовательских ускорителей. В качестве еще одного аргумента можно привести распределение анализируемых ускорителей электронных ПБС по используемому максимальному ускоряющему напряжению (рис. 6). Проведенный анализ показывает, что набор рассматриваемых ускорителей имеет несколько выделенных уровней максимального напряжения с шагом 50 кВ и максимумом, соответствующим напряжению 200 кВ. На этом факте следует заострить внимание, поскольку он коррелирует между ускорителями, имеющими разную эмиссионную природу, при том, что общее количество используемых ускорителей и режимов их работы для разных типов ускорителей сопоставимо. Для ускорителей на основе термокатодов и ВТР обращают на себя внимание большое количество сообщений с промежуточными значениями максимального напряжения между пиками, что свидетельствует о широком и разнообразном практическом применении именно этих типов ускорителей и (как причине использования) качественной оптимизации режимов работы под конкретные задачи. На производстве, где ключевыми факторами работы ускорителя являются стабильность параметров, производительность и длительность непрерывной работы, максимальные рабочие напряжения не обязаны быть кратными каким-то определенным величинам. С другой стороны, описание параметров лабораторного и исследовательского оборудования тяготеет к публикации максимально достижимых значений, амплитуда которых округляется до кратных величин при том, что эти ускорители чаще всего эксплуатируются не в предельных режимах.

Если подробно рассматривать преимущества, на которых акцентируют внимание разработчики ускорителей на основе взрывной эмиссии и плазменных катодов (простота конструкции, удобство обслуживания, широкий диапазон перестройки параметров, отсутствие инерционности запуска, невосприимчивость к прорыву атмосферы — в сравнении с ускорителями на основе термокатодов, — энергетическая эффективность и прочие), то необходимо провести четкое разделение между этим преимуществами как для лабораторного оборудования, так и для промышленного. Большинство из вышеперечисленных достоинств являются такими

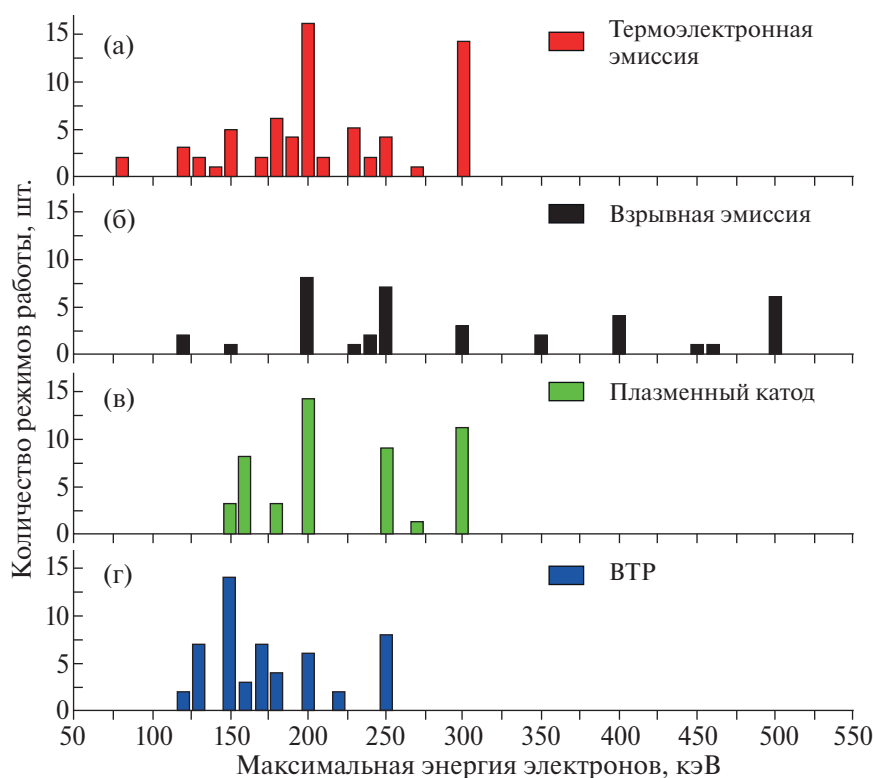


Рис. 6. Распределение максимальных энергий электронов для анализируемых ускорителей и их режимов работы: (а) — ускорители на основе термокатодов, (б) — ускорители на основе взрывной эмиссии, (в) — ускорители с плазменным катодом и анодом, (г) — ускорители на основе ВТР.

только для узкого спектра лабораторных и исследовательских задач. Коммерческие ускорители, как правило, эксплуатируются в монорежимах, которые не предусматривают частого изменения условий генерации. Кроме того, обычно ускорители эксплуатируются в условиях, далеких от предельных, о чем свидетельствуют данные по продолжительности работы промышленных ускорителей на основе термокатодов (в этих случаях речь идет о тысячах часов непрерывной работы). Многие производители предоставляют пожизненную гарантию на ремонт и обслуживание своих ускорителей.

С точки зрения энергетической эффективности необходимо принимать во внимание, что производительность современных ускорителей и прибавленная стоимость к конечному продукту легко компенсируют большие затраты мощности на нагрев катодов, чем, например, для ускорителей на основе разрядов низкого давления. Учет затрат мощности на нагрев накаливаемого катода и последующую необходимость охлаждения узлов ускорителя является критичным, если речь идет о компактных ускорителях, для которых эффективность является одним из ключе-

вых параметров. Именно поэтому на основе ВТР существуют (условно компактные) мобильные ускорители для облучения [113–117]. По средней мощности они не уступают, а иногда и превосходят ускорители на основе термокатодов, также они обладают уникальными преимуществами за счет более широкого диапазона возможной перестройки параметров и более гибких возможностей управления дозой облучения. Именно эти ускорители на рис. 4в конкурируют с ускорителями на основе термокатодов вблизи области максимума средней плотности мощности. Ускорители на основе ВТР обладают большей эффективностью с точки зрения затрат мощности на создание и поддержание вспомогательного разряда и эмиссионной плазмы с исключением необходимости заводить высокую мощность (десятки кВт) на высоковольтную сторону для обеспечения эмиссии электронов с термокатода.

4. ВЫВОДЫ

Как следует из анализа и приведенных в работе графиков, наличие разных производителей электронных ускорителей с ПБС, а также

объем разработанных и введенных в эксплуатацию ускорителей привели к тому, что к настоящему моменту охвачен широкий диапазон возможных параметров обработки и облучения. На любом из представленных выше графиков можно выбрать произвольные параметры облучения, для большинства из которых легко найти несколько типов ускорителей, удовлетворяющих такому требованию. Если не рассматривать процессы уникального ввода энергии в вещество (например, одиночные импульсы тока пучка гигаваттной мощности), то несмотря на то, что ускорители различаются по типу используемого катода, их целесообразно сравнивать через стремление устойчиво обеспечивать генерацию пучка со средней мощностью, удовлетворяющей требованиям промышленности. В этом случае ускорители должны обеспечивать устойчивые параметры пучка не только по средней мощности, но и с точки зрения минимальной неоднородности плотности электронного тока на мишени, при этом необходим высокий ресурс эмиссионного электрода и всей электродной системы в целом. Приведение режимов генерации различных типов ускорителей именно к средней мощности пучка обусловлено, на наш взгляд, прежде всего тем, что к настоящему моменту нет однозначного понимания о требуемой скорости ввода дозы (скорости ввода энергии) в вещество для достижения нужного эффекта. Вероятнее всего, понимание этого процесса будет следующим витком эволюции для этого класса оборудования.

Проведенный анализ и построенные «карты» по разным параметрам показывают, что стремление обеспечения максимальных удельных параметров пучка (например, таких как плотность тока пучка или повышение энергии электронов) не является приоритетной задачей. Эта проблема уже вышла из научного дискуссионного поля в плоскость технологии и практического применения, и основной упор делается на обеспечение стабильности и производительности. Последнее приводит к необходимости увеличения сечения пучка или изменения его пространственной конфигурации даже при условии снижения плотности тока пучка или его энергии, но при росте средней мощности пучка для обеспечения скорости технологического процесса. В результате мы находимся в ситуации, когда огромный комплекс проведенных ранее исследований в области разработки оборудования для

радиационных технологий отдельными частями перешел в стадию исключительно дистрибуции оборудования и монополии отдельных производителей. При поставках по всему миру сотен электронных ускорителей в год [10, 11] в публичном научном поле практически отсутствуют данные о многих технических составляющих этих ускорителей. Имеется информация только об их практическом применении в смежных областях, не связанных с электротехникой и инженерными науками. Хронология и характер развития ускорителей на основе термокатодов и ВТР, которые привели к понижению плотности тока и амплитуды ускоряющего напряжения, однозначно указывает на наличие направлений, которые монополизированы несколькими производителями.

Проведенная в обзоре работа может позволить провести оценку параметров ускорителей, производители которых приводят лишь часть параметров своего оборудования. Проблема выбора между универсальным многопрофильным оборудованием и приборами, которые эффективны только в каком-то ограниченном диапазоне параметров, может решаться различными способами и при помощи ускорителей, основанных на разных принципах эмиссии. Особенно это актуально относительно ускорителей и производителей, для которых по текущей научно-технической литературе не всегда можно определить, приступил ли конкретный коллектив к промышленному освоению описываемой модели ускорителя. Используя полученные карты, можно провести оценку этих ускорителей и сделать выводы об эффективности и уровне конкуренции конкретного оборудования для соответствующих типов ускорителей или выявить параметры, которые выделяют оборудование как уникальное.

С учетом того, что к настоящему моменту имеются перспективные ускорители с плазменными или взрывоэмиссионными катодами, с точки зрения перехода от лабораторного оборудования к промышленному, можно сделать вывод, что технологическим барьером для ряда установок является чаще всего не техническая задача, которая может быть решена известными способами (снятием высокой тепловой нагрузки через контуры охлаждения, увеличением электрической прочности зазоров и кабелей, тренировкой, обработкой поверхностей, заменой элементной базы на более дорогостоящую и т.д.), а фундаментальные проблемы плазменной эмиссионной электроники и физики газо-

вого разряда, которые на настоящий момент все еще не решены и продолжают оставаться стимулом для развития этого класса оборудования, в то время как ускорители на основе термокатодов продолжают по-прежнему более активно использоваться в промышленности, даже несмотря на имеющиеся у них недостатки.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность С.Л. Косоговору за полезные комментарии, дискуссии и замечания, высказанные в процессе подготовки обзора.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FWRM-2021-007).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. Электронные пучки большого сечения. Москва: Энергоатомиздат, 1984.
2. Черняев А.П. Радиационные технологии. Наука. Народное хозяйство. Медицина. Москва: Изд. МГУ, 2019.
3. Новиков А.А. Источники электронов высоковольтного тлеющего разряда с анодной плазмой. Москва: Энергоатомиздат, 1983.
4. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1976.
5. Крейнделъ Ю.Е. Источники электронов с плазменным эмиттером. Новосибирск: Наука, 1983.
6. Источники заряженных частиц с плазменным эмиттером / Под ред. П.М. Щанина. Екатеринбург: Наука, 1993.
7. Окс Е.М. Источники электронов с плазменным катодом: физика, техника, применения. Томск: Изд-во НТЛ, 2005.
8. Суминов С.И., Бандерова Л.В. Радиационно-химические процессы и установки за рубежом. Серия: Радиационная химия и технология, радиационная стойкость. Москва: НИИТЭХИМ, 1986.
9. Абрамян Е.А. Промышленные ускорители электронов. Москва: Энергоатомиздат, 1986.
10. Auslender V.L. Industrial radiation processing with electron beams and X-rays. International Atomic Energy Agency, International Irradiation Association, 2011.
11. Карнов Д.А., Косоговор С.Л. Ускорители электронов с выводом пучка в атмосферу для радиационных технологий. Санкт-Петербург: АО "НИИ-ЭФА", 2021.
12. Бугаев С.П., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. // ПТЭ. 1980. № 1. С. 7.
13. Sterilization by ionizing radiation / Ed. by E.R.L. Gaughran, A.J. Goudie. Montréal: Johnson & Johnson Limited, 1974.
14. Харламов В.А., Тхорик О.В., Помясова М.Г. // Радиация и риск. 2021. Т. 30. № 3. С. 80. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-3-80-92>
15. Scharf W., Wieszczycka W. // Maintenance and Reliability. 2001. № 2–3. С. 10.
16. Applications of ionizing radiation in materials processing (Vol. 1) / Ed. by Y. Sun, A.G. Chmielewski. Warszawa: Institute of Nuclear Chemistry and Technology, 2017.
17. Hamm R.W. Industrial accelerators. CERN CDS: IPAC 2013, 2013.
18. Cleland M.R. Industrial applications of electron accelerators. CERN CDS, 2009.
19. Бугаев С.П., Загулов Ф.Я., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. // Изв. ВУЗов СССР. Физика. 1968. № 1. С. 145.
20. Бугаев С.П., Кочкарев А.П., Манылов В.И., Пайгин В.М. // ПТЭ. 1974. № 2. С. 160.
21. Абдуллин Э.Н., Бугаев С.П. Разработка и применение источников интенсивных электронных пучков / Под ред. Г.А. Месяца. Новосибирск: Наука, 1976. С. 81.
22. Абдуллин Э.Н., Басов Г.Ф. // Изв. ВУЗов. Физика. 2019. Т. 62. № 11. С. 156. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/11/156>
23. Абдуллин Э.Н., Морозов А.В. // Proc. VI Intern. Conf. on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows. Tomsk. 2002. С. 71.
24. Абдуллин Э.Н., Беломытцев С.Я., Бугаев С.П., Горбачев С.И., Заславский В.М., Зорин В.П., Ковальчук Б.М., Логинов С.В., Матюков Ю.Н., Распутин Р.М., Толкачев В.С., Щанин П.М. // Физика плазмы. 1991. Т. 17. № 6. С. 741.
25. Ростов В.В., Бармин В.В., Ландль В.Ф., Выходцев П.В., Артемов К.П., Степченко А.С. // Изв. ВУЗов. Физика. 2019. Т. 62. № 7. С. 147. <https://doi.org/10.17223/00213411/62/7/147>
26. Бугаев С.Н., Кассиров Г.М., Ковальчук Б.М., Месяц Г.А. // Письма в ЖЭТФ. 1973. Т. 18. С. 82
27. Бугаев С.П., Кочкарев А.В., Манылов В.И., Пайгин В.М. // ПТЭ. 1974. № 2. С. 160.
28. Бычков Ю.И., Карлова Е.К., Карлов Н.В., Ковальчук Б.М., Кузьмин Г.П., Курбатов Ю.А., Манылов В.И., Месяц Г.А., Орловский В.М., Прохоров А.М., Рыбалов А.М. // Письма в ЖТФ. 1976. Т. 2. С. 212.
29. Ростов В.В., Алексеенко П.И., Выходцев П.В., Штейнле А.В., Мазин В.И., Красноженов Е.П.,

- Мушатоватова Л.С., Солодкова Т.В., Постников П.С., Кутонина К.В., Штейнле Л.А., Шатохин А.А. // Изв. Томского политехнического университета. 2012. Т. 321. № 2. С. 48.
30. Mesyats G.A., Korovin S.D., Gunin A.V., Gubanov V.P., Stepchenko A.S., Grishin D.M., Landl V.F., Alekseenko P.I. // *Laser and Particle Beams*. 2003. V. 21. № 2. P. 197.
<https://doi.org/10.1017/S0263034603212076>
 31. Коваль Н.Н. Радиационные технологии в сельском хозяйстве и пищевой промышленности: состояние и перспективы 26—28 сентября 2018. Обнинск. https://rt2018.rirae.ru/images/Documents/26Sept/12.30-14.30_tech/2-Koval%20NN.pdf
 32. Загулов Ф.Я., Кладухин В.В., Кузнецов Д.Л., Любушин С.К., Новоселов Ю.Н., Рукин С.Н., Словицкий Б.Г., Харлов Е.А. // ПТЭ. 2000. № 5. С. 71.
 33. Загулов Ф.Я., Борисов В.Я., Власов Г.Я., Макушев А.А., Лопатин В.В., Ельчанинов А.С., Ковальчук Б.М. // ПТЭ. 1976. № 5. С. 18.
 34. Афанасьев К., Гаузитейн В., Баранова М., Ростов В. // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. № 1(139). С. 1.
<https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.139.21>
 35. Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакишин С.А. // ПТЭ. 2015. № 5. С.112.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040138>
 36. Воробьев М.С., Коваль Н.Н., Сулакишин С.А., Шугуров В.В. // Изв. ВУЗов. Физика. 2014. Т. 57. № 11/3. С. 194.
 37. Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Воробьев М.С. // Изв. ВУЗов. Физика. 2020. Т. 63. № 10. С. 7.
<https://doi.org/10.17223/00213411/63/10/7>
 38. Коваль Н.Н., Девятков В.Н., Воробьев М.С. // Труды VII международного Крейнделевского семинара “Плазменная эмиссионная электроника” / Под ред. М.С. Воробьева. Улан-Удэ: Изд. Бурятского научного центра СО РАН. 2023. С. 34.
<https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-34-41>
 39. Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Крейнделъ Ю.Е., Толкачев В.С., Щанин П.М. // ПТЭ. 1987. № 1. С. 167.
 40. Бугаев А.С., Коваль Н.Н., Рыжов В.В., Тарасенко В.Ф., Турчановский И.Ю., Феденев А.В., Щанин П.М. // КЭ. 1990. Т. 17. № 1. С.17.
 41. Бугаев А.С., Коваль Н.Н., Тарасенко В.Ф., Феденев А.В. // КЭ. 1992. Т. 19. № 11. С. 1064.
 42. Bugaev A.S., Koval N.N., Lomaev M.I., Mel'chenko S.V., Ryzhov V.V., Tarasenko V.F., Turchanovsky I.Yu., Fedenev A.V., Shanin P.M. // *Laser and Particle Beams*. 1994. V. 12. № 4. P. 633.
<https://doi.org/10.1017/S026303460000851X>
 43. Koval N.N., Oks E.M., Schanin P.M., Gavrilov N.V., Kreindel Yu.E. // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. 1992. V. 321. № 3. С. 417.
[https://doi.org/10.1016/0168-9002\(92\)90049-A](https://doi.org/10.1016/0168-9002(92)90049-A)
 44. Гушенец В.И. Коваль Н.Н., Кузнецов Д.Л., Месяц Г.А., Новоселов Ю.Н., Уварин В.В., Щанин П.М. // Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. С. 26.
 45. Казьмин Г.С., Коваль Н.Н., Крейнделъ Ю.Е., Толкачев В.С., Щанин П.М. // ПТЭ. 1977. № 4. С. 19.
 46. Ефремов А.М., Ковальчук Б.М., Крейнделъ Ю.Е., Толкачев В.С., Щанин П.М. // ПТЭ. 1987. № 1. С. 167.
 47. Окс Е.М., Щанин П.М. // ПТЭ. 1988. № 3. С. 166.
 48. Oks E.M., Schanin P.M. // *Phys. Plasmas*. 1999. V. 6. P. 1649.
<https://doi.org/10.1063/1.873420>
 49. Bugaev S.P., Gushenets V.I., Schanin P.M. // *Proc. IX Intern. Conf. on High Particle Beams, BEAMS-92*. Washington. 1992. V. 2. P. 1099.
 50. Осипов В.В., Лисенков В.В., Гаврилов Н.В., Буреев О.А., Шитов В.А., Малышкин А.А. // Оптика атмосферы и океана. 1995. Т. 8. № 11. С. 1616.
 51. Дорошкевич С.Ю., Воробьев М.С., Торба М.С., Гришков А.А., Коваль Н.Н., Сулакишин С.А., Шугуров В.В., Леванисов В.А. // ПТЭ. 2023. № 3. С. 53.
<https://doi.org/10.31857/S0032816223020052>
 52. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. // ЖТФ. 1985. Т. 55. № 9. С. 1845.
 53. Гаврилов Н.В., Щанин П.М. // Источники электронов с плазменным эмиттером / Под ред. Ю.Е. Кренделя. Новосибирск: Наука, 1983. С. 74.
 54. Гаврилов Н.В., Крейнделъ Ю.Е., Щанин П.М. // ПТЭ. 1984. № 2. С. 143.
 55. Ворогушин М.Ф., Глухих В.А., Манукян Г.Ш., Карпов Д.А., Свинын М.П., Энгелько В.И., Яценко Б.П. // Вопросы атомной науки и техники. 2002. № 3. С.101.
<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/80093>
 56. Аброян М.А., Баранов В.Е., Богомазов П.М., Косоголов С.Л., Плахотнюк В.П., Сиротинкин В.В., Сытых Д.С., Чумичев В.А., Шапиро В.Б., Шведюк В.Я. // Тезисы докладов седьмого совещания по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. М.: ЦНИИАтоминформ, 1992. С. 18.
 57. Аброян М.А., Богомазов П.М., Зверев С.Ф., Косоголов С.Л., Лагутин В.А., Родичкин В.А., А.Д. Сусаров, Токарев Г.М., Шарков К.А. // ПТЭ. 1982. № 5. С. 28.
 58. Аброян М.А., Акулов В.В., Богомазов П.М., Косоголов С.Л., Манукян Г.Ш., Мотовилов С.А., Шведюк В.Я., Шапиро В.Б. // КЭ. 1996. Т. 23. № 8. С. 751.
 59. Косоголов С.Л. // ЖТФ. 2011. Т. 81. № 7. С. 115.
 60. Баранов Г.А., Бодакин Л.В., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д., Комаров О.В., Косоголов 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>

61. Бодакин Л.В., Гусаков А.И., Комаров О.В., Косого-
ров С.Л., Мотовилов С.А., Успенский Н.А. // ЖТФ.
2016. Т. 86. № 9. С. 122.
<https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/43566>
62. Энгелько В.И., Ткаченко К.И., Мюллер Г. // РФ
Патент 2395866, 2010.
63. Schultheiss C., Engelko V., Krafft G., Schumacher G.,
Müller G. DE Patents 19541510C2, 1999.
64. Источники серии “Геца”. АО НИИЭФА им. Д.В.
Ефремова
[http://www.niiefa.spb.su/site/left/accelerat/direct/
geza/?lang=ru](http://www.niiefa.spb.su/site/left/accelerat/direct/geza/?lang=ru)
65. Аброян М.А., Успенский Н.А., Федяков В.П. // ПТЭ.
1984. № 4. С. 24.
66. Аброян М.А., Евстратов И.Ю., Косого-
ров С.Л., Мотовилов С.А., Сиротинкин В.В., Шапиро В.Б. // ПТЭ. 1998. № 2. С. 83.
67. Аброян М.А., Косого-
ров С.Л., Шведюк В.Я. // Атом-
ная энергия. 2003. Т. 94. № 4. С. 304.
68. Иванов А.Г., Карпов Д.А., Косого-
ров С.Л., Успен-
ский Н.А. // Труды VII международного крейн-
делевского семинара “Плазменная эмиссионная
электроника” / Под ред. М.С. Воробьёва. Улан-
Удэ: Изд. Бурятского научного центра. 2023.
С. 101.
[https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-
101-106](https://doi.org/10.31554/978-5-7925-0655-8-2023-101-106)
69. Аброян М.А., Косого-
ров С.Л., Набокова И.В.,
Успенский Н.А., Чумичев В.А., Шапиро В.Б.,
Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2007. № 4. С. 109
70. Баранов Г.А., Гурашвили В.А., Джигайло И.Д.,
Комаров О.В., Косого-
ров С.Л., Кузьмин В.Н., Немчи-
нов В.С., Сень В.И., Успенский Н.А., Шведюк В.Я. // ПТЭ. 2020. № 2. С. 102.
<https://doi.org/10.31857/S0032816220030027>
71. Аброян М.А., Косого-
ров С.Л., Мотовилов С.А.,
Туманов И.А., Шведюк В.Я. // Развитие и совер-
шенствование способов и средств очистки и обе-
ззараживания питьевых и сточных вод. Вологда:
Полиграфист, 2003. С. 65.
72. Коровкин В.В. // Тезисы докладов Восьмого
совещания по применению ускорителей заря-
женных частиц в промышленности и медицине,
Санкт-Петербург. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995.
С. 104.
73. Соковнин С.Ю., Балезин М.Е. // ПТЭ. 2005. № 3.
С. 127.
74. Соковнин С.Ю. Наносекундные ускорители элек-
тронов для радиационных технологий. Екатеринбу-
рг: Уральский ГАУ, 2017.
75. Гаврилов Н.В., Осипов В.В., Буреев О.А., Емлин Д.Р.,
Каменецких А.С., Шитов В.А. // Письма в ЖТФ.
2005. Т. 31. С. 72.
76. Гаврилов Н.В., Ковальчук Б.М., Крейндель Ю.Е.,
Толкачев В.С., Щанин П.М. // ПТЭ. 1981. № 3.
С. 152.
77. Denholm A.S., Quintal B.S., Frutiger W.A. Pulsed and
Continuous Beam Electrocurtain Systems TR-31.
Energy Sciences Incorporated, 1973.
78. Aaronson J.N., Nablo S.V. // Nucl Instrum Methods
Phys Res B. 1985. V. 10–11. № 2. P. 998.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(85\)90157-0](https://doi.org/10.1016/0168-583X(85)90157-0)
79. Hiley J., Frutiger W.A., Nablo S.V. // IAEA-TEC-
DOC-428. Electron beam processing of combustion
flue gases. Vienna: International atomic energy agency,
1987. P. 153
80. Frutiger W.A., Uglum J.R., Quintal B.S., Nablo S.V. // Journal of Vacuum Science & Technology. 1973. V. 10. № 6. P. 965.
<https://doi.org/10.1116/1.1318527>
81. Scharf W., Wieszczycka W. // AIP Conference Pro-
ceedings. 1999. V. 475. № 1. P. 949.
<https://doi.org/10.1063/1.59300>
82. Lämpü U.V., Seidel J.R., Hugelin B. // Radiat. Phys.
Chem. 1983. V. 22. № (3–5). P. 823.
[https://doi.org/10.1016/0146-5724\(83\)90101-2](https://doi.org/10.1016/0146-5724(83)90101-2)
83. Frutiger W.A., Nablo S.V. // Final report of a consul-
tant meeting on electron beam processing of combus-
tion flue gases. Karlsruhe: IAEA-TECDOC-428, 1986.
P. 153.
84. Nablo S.V. // Proceedings of a Seminar on Indus-
trial Applications of Electron Beams. 1987. Dublin:
Nuclear Energy Board, 1987. P. 8.
85. Nablo S.V. // Proceedings of a Seminar on Indus-
trial Applications of Electron Beams, 1987. Dublin:
Nuclear Energy Board, 1987. P. 30.
86. Nablo S.V., Fussa A.D. U S Patent. 1981. 4,246,297.
87. Denholm A.S., Frutiger W.A., Nablo S.V. // Proceedings
of VIII Symp. on Discharges and Electrical Insulation
in Vacuum, 1978. Albuquerque: Sandia Labor, 1978.
P. F5.
88. Denholm A.S. // U S Patent. 3,769,600. 1973.
89. Chen P., Zhang M., Li X., Wang Y. // Chinese Phys.
C. 1998. V. 22. № 6. P. 564.
90. Klein A.F. // IAEA-TECDOC-428. Electron beam
processing of combustion flue gases. 1987. Vienna:
International atomic energy agency, 1987. P. 167.
91. Федоров В.И. // Дисс. ... канд. тех. наук. Москва:
ВЭИ им. В.И. Ленина, 1981.
92. Федоров В.И., Шантурин Л.П. // ПТЭ. 1976. № 1.
С. 153.
93. Шантурин Л.П., Федоров В.И. // Радиотехника
и электроника. 1980. Т. 25. № 2. С. 372.
94. Григорьев Ю.В., Шантурин Л.П. // ПТЭ. 1978. № 2.
С. 187.
95. Григорьев Ю.В., Шантурин Л.П. // ПТЭ. 1979. № 4.
С. 194.
96. Дутов А.И., Минаев С.В., Николаев В.Б. // КЭ.
1979. Т. 6. № 8. С. 1690.
97. Berejka A.J., Avnery T., Carlson C. // Radiation Phys-
ics and Chemistry. 2004. V. 71. № (1–2). P. 301.
<https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2004.04.020>

98. *Felis K., Avnery T., Berejka A.J.* // Rad. Phys. Chem. 2002. V. 63. № (3–6). P. 605.
[https://doi.org/10.1016/S0969-806X\(01\)00556-4](https://doi.org/10.1016/S0969-806X(01)00556-4)
99. *Avnery T.* // U S Patent. 6,545,398, 2003.
100. *Avnery T.* // U S Patent. 5,962,995, 1999.
101. *Avnery T., Felis K.* // U S Patent. 6,407,492, 2002.
102. *Avnery T.* // U S Patent. 6,630,774 B2, 2003.
103. *Avnery T.* // U S Patent. 7,180,231 B2, 2007.
104. *Mehnert R., Klenert P., Hartmann E.* // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B. 1992. V. 68. № 1–4. P. 73.
[https://doi.org/10.1016/0168-583X\(92\)96052-Z](https://doi.org/10.1016/0168-583X(92)96052-Z)
105. *Mehnert R., Klenert P., Prager L.* // Radiat. Phys. Chem. 1993. V. 42. № (1–3). P. 525.
[https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90302-B](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90302-B)
106. *Qitao H.* // Radiat. Phys. Chem. 1993. V. 42. № 1–3. P. 23.
[https://doi.org/10.1016/0969-806X\(93\)90197-3](https://doi.org/10.1016/0969-806X(93)90197-3)
107. Электронные отпаянные пушки. НПП «Исток»
<https://istokmw.ru/products/instruments-for-accelerator-installationsok/>
108. *Loda G.K., Meskan D.A.* // Proc. 2nd Intern. Conf. on high power electron and ion beam research and technology. Cornell. 1977. V. 1. P. 252.
109. *Loda G.K.* // 2-nd Intern. Topical Conference on Electron Beam Research & Technology, Ithaca, NY, 1977, № 13224903. P. 879.
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6396252>
110. *Krokhmal A., Gleizer J.Z., Krasik Y.E., Felsteiner J., Gushenets V.I.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 1. P. 44.
<https://doi.org/10.1063/1.1577228>
111. *Krokhmal A., Gleizer J.Z., Krasik Y.E., Felsteiner J., Gushenets V.I.* // J. Appl. Phys. 2003. V. 94. № 1. P. 55.
<https://doi.org/10.1063/1.1577229>
112. *Метель А.С., Мельник Ю.А.* // ПТЭ. 2013. № 3. С. 76.
<https://doi.org/10.7868/S0032816213020225>
113. EVONTA-Service GmbH.
<https://www.evonta.de/>
114. *Teichmann T., Dincklage L., Schaap L.L., Schreuder D., Blüthner R., Winckler F., Schopf S., König U., Zimmermann B., Mattausch G.* // J. Phys. Conf. Ser. 2023. V. 2443. № 012017.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2443/1/012017>
115. *Vicente Gabás I.G., Mattausch G., Schmidt S., Rögner F.-H.* // Proc. ICPIG 2015. Iasi. 2015. P. 2.49.
116. *Röder O., Jahn M., Schröder T., Stahl M., Kotte M., Beuermann S.* // J. Verbrauch Lebensm. 2009. V. 4. № 2. P. 107.
<https://doi.org/10.1007/s00003-009-0476-3>
117. *Blüthner R., Herzog M., Süß C., Mattausch G., Rögner F.H.* // ARIES-PoC Meeting. 2019. Budapest: CERN CDS, 2019.
118. *Quintal B.S.* // U S Patent. 1972. 3,702,412.
119. *Анисимова Т.Е., Малинин А.Н.* // ПТЭ. 2008. № 6. С. 99.
120. *Farrell S.R., Demeter L.J., Woods P.G.* // U S Patent. 1975. 3,863,163.
121. *Goede W.G., Runtzel R.K.* // U S Patent. 1973. 3,746,909.
122. *Curry R.D.* Design and operation of a 45 μ s repetitively pulsed 12 MW electron beam for a CO₂ Laser. PhD Doctor of Philosophy. St. Andrews: University of St. Andrews, 1992.
123. *Hant W.* // IEEE Trans Electron Devices. 1975. V. 22. № 11. P. 1010.
<https://doi.org/10.1109/T-ED.1975.18261>
124. *Волколупов Ю.Я., Бурмака Т.К., Емельянов С.В., Рыльцев П.И.* // Радиотехника. 1987. № 80. С.132.
125. *Hegeler F., Myers M.C., Friedman M., Giuliani J.L., Sethian J.D., Swanekamp S.B., Wolford M.F.* // IEEE 25 International power modulator symposium and high voltage workshop. Hollywood. 2002. P.121.
126. *Ramizer J.J., Cook D.L.* // J. Appl. Phys. 1980. V. 51. P. 4602.
<https://doi.org/10.1063/1.328354>
127. *Иден Д., Энн Д.* // Приборы для научн. исслед. 1980. № 6. С. 94.
128. *Desenberg G., Wright W., Sneider S.* // Proc. of IEEE Conf. Record of 1976 Twelfth Modulator Symposium. New York, 1976. P. 163.
129. *Scorlett W.R., Andrews K.R., Jausen H.* // Proc. IEEE Intern. Pulse Power Conf. Lubbock, Texas, 1976. P. 261.
130. *Bayless J.R.* // Rev. Sci. Instrum. 1975. V. 46. № 9. P. 1158.
<https://doi.org/10.1063/1.1134434>
131. *Gielkens S.W.A., Peters P.J.M., Witteman W.J., Borovikov P.V., Stepanov A.V., Tskhai V.N., Zavjalov M.A., Gushenets V.I., Koval N.N.* // Rev. Sci. Instrum. 1996. V. 67. № 7. P. 2449.
<https://doi.org/10.1063/1.1147195>
132. *Goebel D.M., Watkins R.M.* // Rev. Sci. Instrum. 2000. V. 71. № 2. P. 388.
<https://doi.org/10.1063/1.1150212>
133. *O'Brien B.B.* // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 22. № 10. P. 503 (1973)
<https://doi.org/10.1063/1.1654485>
134. *Балтаков Ф.Н., Босамыкин В.С., Корнилов В.Г., Кудрявкин Е.В., Павловский А.И., Селявский В.Т., Суханов Л.В., Челпанов В.И.* // ЖТФ. 1976. Т. 46. № 10. С. 2195.
135. *Garnsworthy R.K., Mathias L.E.S., Carmichael C.H.H.* // Appl. Phys. Lett. 1971. V. 19. № 12. P. 506.
<https://doi.org/10.1063/1.1653791>
136. *Нечаев А.А., Персианцев И.Г., Полушкин В.М., Тимофеев М.А., Тугарев В.А.* // ПТЭ. 1983. № 2. С. 156.
137. *Pigache D., Bonnet J., Fournier G.* // Proc. of 15 Inter. Conf. Phenomena in ionized gases. Minsk, 1981. P. 865.
138. *Pigache D., Fournier G.* // J. Vac. Sci. Technol. 1975. V. 12. № 6. P. 1197.
<https://doi.org/10.1116/1.568492>

139. *Clark W.M., Dunning G.J.* // IEEE J Quantum Electron. 1978. V. 14. № 2. P. 126.
<https://doi.org/10.1109/JQE.1978.1069743>
140. *Crocker A., Foster H., Lamberton H.M., Holliday J.H.* // Electron. Lett. 1972. V. 8. № 18. P. 460.
<https://doi.org/10.1049/el:19720332>
141. *Carmichael C.H.H., Garnsworthy R.K., Mathias L.E.S.* // Rev. Sci. Instrum. 1973. V. 44. № 6. P. 701.
<https://doi.org/10.1063/1.1686225>
142. *Isaacs G.G., Dooley P.J., Jordan D.L.* // J. Phys. E. Sci. Instrum. 1979. V. 12. № 2. P. 115.
<https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/2/012>
143. *Салимов Р.А.* // УФН. 2000. Т. 170. № 2. С. 197.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.0170.200002h.0197>
144. *Брызгин А.А., Куксанов Н.К., Салимов Р.А.* // УФН. 2018. Т. 188. № 6. С. 672.
<https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.03.038344>
145. *Аброян М.А., Трубников Г.И.* // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 2. С. 129.
146. *Аброян М.А., Зуев Ю.В., Косоголов С.Л., Шведюк В.Я.* // ЖТФ. 2003. Т. 73. № 8. С. 98.
147. *Сливков И.Н.* Электроизоляция и разряд в вакууме. Москва: Атомиздат, 1972.
148. *Сливков И.Н.* Процессы при высоком напряжении в вакууме. Москва: Энергоатомиздат, 1986.