

parties of a break of the magnetized electrospending environment in approach of zero thickness of a tangential break are simulated. The received results explain existing contradictions and ones are of interest for the researchers, who were deal with problems of the plasma dynamics.

УДК 537:533

Современные генераторы электронно-пучковой плазмы с газодинамическими окнами

А. С. Коротеев, Р. Н. Ризаханов

ФГУП "Исследовательский центр имени М. В. Келдыша", Москва, Россия

Рассмотрены генераторы стационарной электронно-пучковой плазмы, основанные на выпуске в плотную среду концентрированных пучков сквозь газодинамические окна. Впервые представлена классификация подобных устройств как по методам снижения натекающего газа из рабочего объема, где создается плазма, так и по реализуемым в них типам транспортировки пучков в управляемых магнитных полях. Дан анализ, позволяющий выбрать наиболее перспективные методы для создания малогабаритных генераторов.

Введение

Электронный пучок, выведенный в плотную газовую среду, генерирует плазменное образование, которое может быть использовано для решения научно-технических, технологических задач (генерация химически активной плазмы, накачка электроионизационных лазеров, термическая и термохимическая обработка поверхностей различных материалов и др.). Проблема вывода электронов состоит в том, что пучок формируется, как правило, в условиях вакуума (10^{-2} — 10^{-4} Па), в то время как в рабочем объеме давление может достигать десятков килопаскаль вплоть до одной атмосферы.

В работе проведен анализ современных генераторов пучковой плазмы, при этом преследовались две цели: первая — осуществить классификацию генераторов на основе используемых в них эффектов, вторая — выбрать наиболее перспективные технические решения, направленные на снижение массогабаритных параметров генераторов.

Компактизация установок улучшает их эксплуатационные характеристики, расширяет диапазон решаемых задач.

Существуют два вида окон для вывода электронных потоков в плотную среду: фольговые и газодинамические.

Фольговые окна, разделяющие области глубокого вакуума и высокого давления, требуют ускорения электронов до высоких энергий (400 кэВ и выше), накладывают ограничения на средний ток пучка (не более 1 мА/см^2), характеризуются большими размерами (~ 1 — 2 м) систем электропитания, транспортировки, требуют для работы крупногабаритные радиационно-защищенные бункеры.

В этой связи при разработке малогабаритного оборудования основное внимание должно быть сосредоточено на стационарных генераторах с газодинамическими окнами (ГО). Идея создания перепада давлений между сообщающимися полостями с помощью системы дифференциальной откачки (СДО) была высказана еще в 1920 г. [1]. В работе [2] описано первое отечественное выводное устройство (ВУ) для вывода частиц из вакуума в плотный газ.

Система дифференциальной откачки представляет собой ряд автономно откачиваемых шлюзовых камер, сообщающихся одна с другой посредством небольших отверстий. Ее работу в качестве ВУ для генератора электронно-пучковой плазмы (ГЭПП) можно представить следующим образом (рис. 1). Электронный пучок из ускорителя проходит сквозь отверстия, разделяющие шлюзовые камеры, и выходит в плотный газ; натекающий газ эвакуируется системой вакуумной откачки.

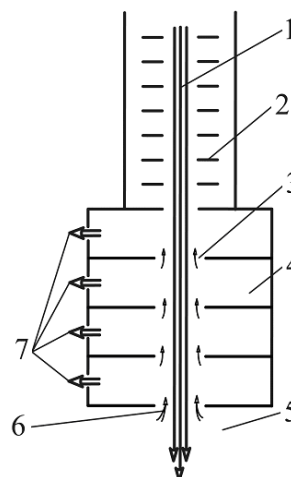


Рис. 1. Система дифференциальной откачки:
1 — электронный пучок;
2 — ускоритель;
3 — межшлюзовые отверстия; 4 — камеры СДО;
5 — плотная газовая среда;
6 — натекающий газ;
7 — система откачки

Очевидно, чем меньше размеры отверстий 3 между камерами, тем проще обеспечить необходимый перепад давлений между областью ускорения пучка 2 и рабочей средой 5. Поэтому концентрированный выпуск (в отличие от фольгового) накладывает определенные ограничения на поперечные размеры пучка. Это означает, что при создании ГЭПП помимо задач, связанных с обеспечением параметров электронного пучка, необходимо решить ряд проблем, направленных на повышение надежности работы СДО:

- снижение натекания газа из рабочей среды в полость инжектора;
- уменьшение поперечных размеров электронного пучка;
- обеспечение откачки натекающего газа.

В данной работе впервые проведена классификация ГЭПП с ГО, причем факторами систематизации служат реализованные в них методы снижения натекания газа, включая дополнительную откачку, и типы транспортировки пучка. В этом состоит ее отличие от традиционных обзорных работ [3, 4], ограничивающихся описанием отдельных установок.

Методы снижения натекания газа

Известные на сегодняшний день методы снижения натекания газа в объем ускорителя (или инжектора) могут быть классифицированы следующим образом:

- организация газодинамических сопротивлений;
- применение замещающих газов;
- локальный разогрев отдельных участков тракта;
- электрогидродинамические эффекты;
- прожиг канала транспортировки самим пучком.

Рассмотрим эти методы с точки зрения их возможного использования при создании малогабаритного ГЭПП.

При анализе основное внимание уделено физическим аспектам функционирования устройств, а геометрический фактор обсужден в заключительной части.

Организация газодинамических сопротивлений

В ряде ВУ реализованы технические предложения, в которых используются особенности истечения газа в сильнооразреженное пространство. На начальном участке сильнонедорасширенной струи образуются две области течения (рис. 2): центральная I и периферийная II [5].

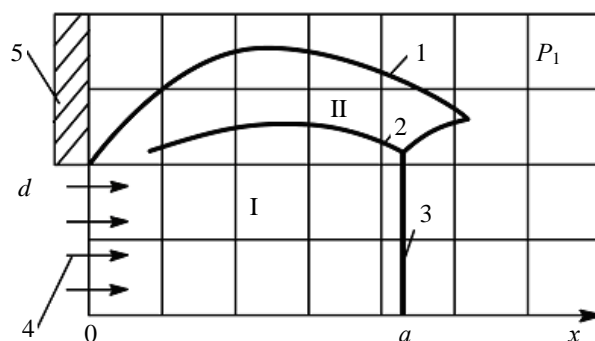


Рис. 2. Структура недорасширенной струи:
 области: I — центральная; II — периферийная;
 1 — граница струи; 2 — висячий скачок; 3 — диск Маха;
 4 — натекающий газ; 5 — диафрагма; $a = 0,65 (P_0/P_1)^{1/2} d$ [4]
 (P_0/P_1 — перепад давлений по разные стороны от диафрагмы)

В центральной области реализуется сверхзвуковое течение, сопровождающееся снижением плотности газа вдоль потока. В сечении, где располагается диск Маха 3, происходят скачкообразное уменьшение скорости потока (скорость становится дозвуковой) и рост давления. В дальнейшем скорость потока растет, оставаясь дозвуковой, давление падает.

Течение в периферийной области II является сложным, через него протекает основная часть втекающего газа. При перепаде давлений между рассматриваемыми объемами больше четырех через диск Маха 3 протекает менее 10 % всего газового потока, проходящего через критическое сечение ($x = 0$). Поэтому, если отверстие следующей диафрагмы поместить в область I и при этом удастся не нарушить структуру потока, то количество газа, натекающего в последующие шлюзы, может быть заметно снижено. Это, в частности, экспериментально подтверждено данными работы [6].

Возможны и другие методы повышения сопротивлений. Схемы газодинамических окон, работающих на эффекте возникновения разностей давления между различными областями быстрых газовых струй, показаны на рис. 3.

Схема поперечной эжекции представлена на рис. 3, а. Давление эжектирующего газа P_3 подбирается таким, чтобы после сверхзвукового сопла 2 в шлюзовой камере 3 установилось полное давление P_4 , немного превышающее давление газа P_1 . При этом статическая часть полного давления P_{4st} не должна отличаться от P_2 — давления вакуумной части, откуда транспортируется электронный пучок 1. На рис. 3, а показаны также фокусирующая магнитная линза 5 и направления газового потока 4 — стрелками.

На рис. 3, б показана схема продольной эжекции (осесимметричная конфигурация). Здесь эжектирующий газ направлен (по стрелкам) почти соосно пучку. Для давлений эжектирующего газа

P_3 в вакуумной полости P_2 , окружающей среде P_1 , полного P_4 и статического P_{4st} в области 3 должны выполняться те же условия, что и в случае на рис. 3, а, т. е. $P_3 > P_4 \approx P_1$, $P_{4st} \approx P_2$.

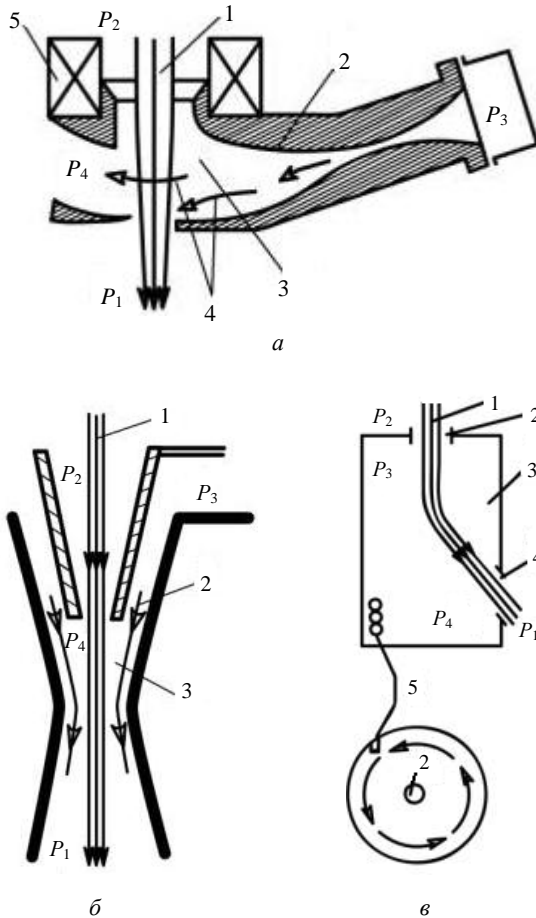


Рис. 3. Схемы различных газодинамических окон:

а — поперечная эжекция:

$P_3 > P_4 \approx P_1 > P_2$; P_i — давления в соответствующих полостях;
1 — электронный пучок; 2 — сопло; 3 — шлюзовая камера;
4 — направление газового потока; 5 — магнитная линза;

б — продольная эжекция:

1 — электронный пучок; 2 — эжектирующий газ;
3 — область перемешивания;

в — закрутка газа:

1 — пучок; 2 — входное отверстие; 3 — окно;
4 — выходное отверстие; 5 — закрутка газа с помощью тангенциальной подачи

При закручивании газа в цилиндрическом окне (см. рис. 3, в) с помощью тангенциальной подачи газа 5 давление на оси P_3 меньше давления у стенки P_4 . Если окно сообщается через отверстие 2 с вакуумной полостью, где давление P_2 , а через отверстие 4 с окружающей средой с давлением P_1 , то на нем можно организовать перепад порядка $\Delta P \approx P_4 - P_3$. Транспортировка пучка 1 возможна по криволинейной траектории.

Рассмотренные схемы реализации газодинамических сопротивлений позволяют снизить натекание в два-пять раз [3—6].

Применение замещающих газов

Существенного снижения требований к вакуумным системам можно добиться путем замены рабочего газа на другой, который легче откачать или конденсировать [7]. Такой способ повышения производительности откачных средств реализован, например, в [8]. Здесь навстречу натекающему газу продувают гелий, что, с одной стороны, уменьшает рассеяние пучка (вследствие малости атомного номера He и его одноатомности), а с другой — повышает эффективность откачки, например диффузионными насосами.

В работе [9] описана конструкция СДО, содержащая испарители геттера, которые расположены вдоль канала транспортировки пучка. Во время работы установки геттеры осуществляют откачку натекающего газа. Если в такой системе воздух заменить на водород, то скорость откачки возрастет в пять раз.

Одновременно гидродинамический эффект и конденсация замещающего газа реализованы в установке, описанной в [10] и предназначенной для вывода в атмосферу пучка мощностью в несколько мегаватт и энергией до 0,5 МэВ. Схема ее выводного устройства представлена на рис. 4.

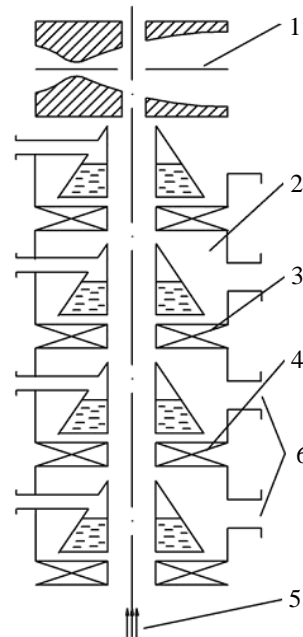


Рис. 4. Схема выводного устройства мощного ГЭП:

1 — гидродинамический затвор (сверхзвуковое паровое сопло); 2 — шлюзовая камера; 3 — криопанель; 4 — фокусирующий соленоид; 5 — пучок; 6 — вакуумная откачка

Внешний газ практически отсекается поперечным сверхзвуковым паровым соплом (гидродинамическим затвором). Натекающий в систему шлюзовых камер 2 водяной пар конденсируется на криопанелях 3, охлаждаемых жидким азотом. Для откачки неконденсирующихся компонент натекающего газа установка снабжена вакуумными

насосами 6. Ограничение поперечных размеров пучка 5 при транспортировке снизу вверх через ВУ, имеющего длину около 1,5 м, обеспечивается фокусирующими соленоидами. Величина магнитного поля выбирается такой, чтобы диаметр пучка был меньше диафрагменных отверстий.

Разогрев отдельных участков тракта

Повышенное сопротивление натекающему газу оказывают нагретые участки канала транспортировки. В [11, 12] описано окно для вывода, в котором зажигается дуговой разряд, ориентированный вдоль пучка (рис. 5).

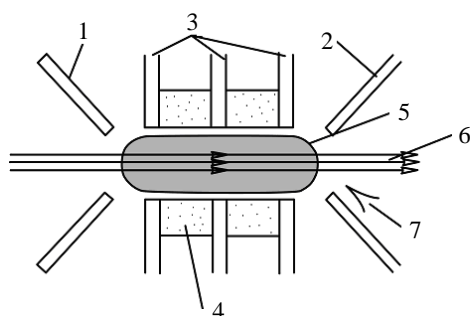


Рис. 5. Повышение гидродинамического сопротивления путем зажигания разряда:

1 — катод; 2 — анод; 3 — охлаждаемые пластины; 4 — изоляторы; 5 — разряд; 6 — пучок; 7 — натекающий газ

Дуга горит между катодом 1 и анодом 2 в аксиальном направлении, в радиальном направлении она ограничена охлаждаемыми пластинами, разделенными изоляторами. Дуговой разряд мощностью в несколько киловатт способен разогреть газ до 10^4 °С. При таких температурах молекулы воздуха разлагаются на атомы, вязкость газа возрастает примерно в пять раз. По мнению авторов, снижение натекания газа в ВУ должно дойти до 500 раз. В реальности на апертуре отверстий в 10 мм было достигнуто 200-кратное снижение при мощности 10 кВт. По всей видимости, это является следствием того, что часть газа в периферийной области дуги остается относительно холодной из-за контакта с охлаждаемыми пластинами. И поэтому запирающее воздействие на натекающий газ оказывает только центральная часть разряда. Чем больше диаметр канала, тем эффективнее данный метод запираения. В малых каналах влияние холодных стенок может сказаться на всем сечении дугового разряда и существенно снизить запирающее действие. Запирающий эффект вследствие разогрева канала самим пучком подробно исследован в работе [4].

Электрогидродинамические эффекты

В ряде ВУ реализованы дополнительные гидродинамические, электрофизические методы от-

качки. Так, в ВУ, приведенном в [13], организуется тлеющий разряд, выступающий в роли своеобразного электроразрядного насоса. Разряд организован после диска Маха (см. рис. 2), где скорость газа относительно мала. Поэтому на электроразрядную составляющую откачки накладывается также нагрев газа, что, как уже было сказано выше, сопровождается повышением сопротивления натекающему газу.

Интересная идея по электродинамической откачке изложена в [14]. Камера ВУ имеет сужающуюся геометрию в сторону эмиттера электронов 9 (рис. 6). При работе насоса газ ускоряется в сужающемся канале, образованном электродами 4. Согласно закону Бернулли наименьшее давление имеет место в отверстии 2. Здесь электроды располагаются ближе всего, подбором их геометрии можно получить электрические поля большой напряженности, и поэтому вероятность зажигания разряда именно здесь велика.

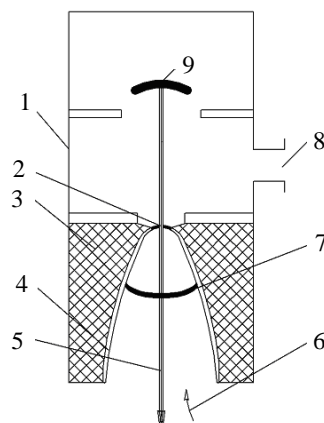


Рис. 6. Устройство вывода с динамическим затвором:

1 — корпус ВУ; 2 — отверстие между камерами; 3 — изоляторы; 4 — электроды; 5 — электронный пучок; 6 — натекающий газ; 7 — фронт разряда; 8 — вакуумная откачка; 9 — эмиттер электронов

Загоревшийся разряд, стремясь занять более устойчивое положение, определяемое по кривой Пашена, движется в сторону больших межэлектродных расстояний, т. е. навстречу газовому потоку. Формируется мощная магнитогидродинамическая волна, интенсивность которой превосходит аэродинамическую силу движения потока. Таким образом, осуществляется "отстрел" потока газа к выходу. Как только фронт разряда достигает выхода и прерывается, сразу же у отверстия 2 формируется новый разряд. Описанный механизм реализуем, если рабочие процессы протекают на левой ветви кривой Пашена. Это ограничивает применимость данного эффекта областями с низким давлением (0,1—1 Па). Параметры разряда определяются давлением газа и геометрическими размерами устройства.

Прожиг канала транспортировки самим электронным пучком

Весьма важным является проблема юстировки и центровки ВУ — совмещение электронно-оптической оси системы формирования пучка и геометрической оси тракта транспортировки. Их несовпадение приводит к потерям пучка и дополнительным тепловым нагрузкам. Если же увеличить апертуру диафрагм, то возрастание газонатекания в тракт приводит к необходимости увеличения производительности вакуумной откачки.

Значительное улучшение работы СДО наступает при транспортировке пучка сквозь набор прожигаемых диафрагм. Этот метод обладает рядом достоинств: пучок прожигает минимально необходимые для транспортировки отверстия; отпадает сложный и трудоемкий процесс юстировки и центровки; снижаются требования к откачке; становится лишней система управления пучком.

Идея проводки пучка через прожигаемый канал была рассмотрена в работе [7], далее она была усовершенствована в [15] и реализована в малогабаритном ВУ [16] в составе ГЭПП, предназначенном для работы в газе с давлением до 1—10 кПа.

Указанный метод снижения натекания применяется и в крупногабаритных ГЭПП, например в устройстве вывода ускорителя ЭлВ-4 (рис. 7). Электронный пучок фокусируется в магнитных полях соленоидов и прожигает четыре диафрагмы 3, расположенные в фокусах. Шлюзовые камеры 4 откачиваются вакуумными насосами со средней производительностью 0,1 м³/с, что обеспечивает при диаметрах прожигаемых отверстий 3—5 мм давление в полости ускорителя на уровне 20—40 мПа [17].

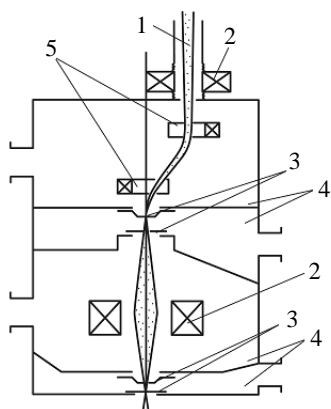


Рис. 7. Выводное устройство ЭлВ-4:

- 1 — электронный пучок; 2 — фокусирующий соленоид;
3 — прожигаемые перегородки; 4 — шлюзовые камеры;
5 — отклоняющая система

Прожигаемые пучком диафрагмы использовались и в ГЭПП с энергией электронов 200 кэВ и мощностью пучка 80 кВт, предназначенном для

очистки отходящих газов от токсичных примесей [18].

Путем увеличения индукции фокусирующих магнитных полей и соответствующего уменьшения диаметров прожигаемых отверстий удается существенно уменьшить габаритные размеры ВУ и снизить требуемую производительность откачных средств [19]. Выводное устройство на рис. 8 представляет собой СДО, в которой шлюзовые камеры 1 образованы охлаждающими соленоидами. Компактное расположение соленоидов позволяет достичь сильных магнитных полей и сфокусировать электронный пучок 3 в жгут диаметром 2—3 мм. В этих условиях даже относительно маломощный пучок (2—5 кВт) способен прожечь систему диафрагм. Наличие магнитного поля на выходе устройства способствует увеличению длины пробега электронного пучка в газовой среде, что важно для проведения ряда технологических операций.

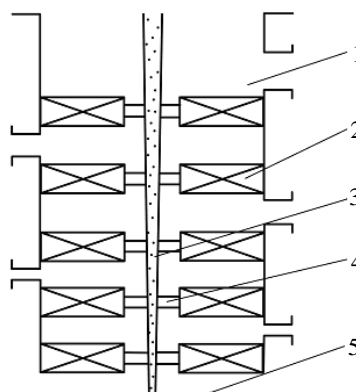


Рис. 8. СДО с прожигаемыми перегородками:

- 1 — шлюзовая камера; 2 — соленоид; 3 — электронный пучок; 4 — прожигаемая перегородка; 5 — плотная газовая среда

Прожиг канала оказался весьма перспективным шагом, что подтверждается рядом работ [20—23], посвященных широкому спектру вневакуумных электронно-лучевых технологий.

Виды транспортировки концентрированных электронных потоков в выводных устройствах

Исследованиям методов транспортировки пучков в ВУ посвящено гораздо меньше работ, чем методам снижения натекания газа. Это объясняется тем, что каналы проводки пучка имеют поперечные размеры, заметно превышающие диаметр пучка во избежание осаждения последнего на стенках канала. Поэтому допускается некоторая девиация геометрии пучка, что практически не влияет на работу ВУ.

Ситуация изменяется коренным образом, если используется прожигание тракта непосредственно пучком. В этом случае апертура канала, натекание газа и, как следствие, требования к системе откачки зависят от параметров пучка. Поэтому метод прожигания канала, будучи наиболее перспективным для создания малогабаритных ГЭПП, предъявляет высокие требования к качеству пучка и методу его транспортировки.

Рассмотрим возможные методы транспортировки пучка в ВУ на основе анализа уравнения огибающей в эквипотенциальном пространстве [24], которое в системе СИ имеет вид

$$r'' + k^2 r - \varepsilon^2 / r^3 = 0, \quad (1)$$

где r — радиус огибающей пучка;

ε — его эмиттанс;

$k = \sqrt{\eta/8U} B$, $\eta = e/m$ — удельный заряд электрона;

U — ускоряющее напряжение;

B — магнитная индукция на оси системы, производные берутся по осевой координате z ,

$$r'' \equiv d^2 r / dz^2.$$

Анализ ограничен пучками технологического назначения с характерным током 1 А. Возможны следующие виды транспортировок:

- при отсутствии магнитного поля;
- в полях одиночных линз;
- адиабатическое сопровождение;
- согласованная транспортировка;
- рассогласованная транспортировка.

Для простоты положим, что в исходном сечении $z = 0$ выполняются условия $r'_0 = 0$, $r = r_0$, если не оговорены иные условия (т. е. начальный радиус пучка r_0 , начальный наклон огибающей равен нулю).

Рассмотрим подробнее каждый вид транспортировки.

Транспортировка без магнитного поля, $B = 0$

В отсутствие магнитного поля решение уравнения огибающей (1) имеет вид

$$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{\varepsilon^2}{r_0^2} z^2}.$$

Пучок имеет форму гиперболоида вращения с радиусом в минимальном сечении r_0 и расходимостью $\alpha = \varepsilon/r_0$ при больших z .

Такой вид транспортировки может применяться в ВУ при выпуске высокоэнергетического пучка в газовую среду с относительно низким давлением (например, пучок с энергией электронов в 500 кэВ в газ с давлением 1 Торр), когда эффекты рассея-

ния на молекулах газа не играют особой роли. При этом желательно иметь аксиальные размеры ВУ небольшими, в противном случае диаметр пучка, определяемый при больших z формулой $d \approx 2\varepsilon z/r_0$, может оказаться настолько большим, что откачная система не сможет справиться с натеканием.

Кроме того, при прожигании лучевода пучком образующееся отверстие может оказаться заметно больше размера пучка. Это связано с рассеянием последнего на парах испаряемого материала прожигаемой перегородки, а также с динамикой прожига каналов концентрированными потоками энергии [25]. Поэтому несмотря на конструкционную простоту и отсутствие дополнительных фокусирующих элементов и источников их питания, транспортировка пучка в ВУ без магнитного поля не может рассматриваться в качестве перспективного метода при создании малогабаритных ГЭПП.

Транспортировка в полях одиночных линз

Одиночная магнитная линза имеет фокусное расстояние [26]

$$f = \left(\frac{\eta}{8U} \int B^2(z) dz \right)^{-1},$$

где $B(z)$ — распределение магнитного поля на оси линзы.

Набор таких линз может ограничивать поперечные размеры пучка на достаточном протяжении, например на длине всего ВУ (рис. 9). Примером реализации такого метода транспортировки может служить ВУ ускорителя ЭлВ-4 (см. рис. 7, [17]), в котором прожигаемые перегородки располагаются в фокусах линз. Но в ЭлВ-4 энергия электронов имеет порядок от сотен килоэлектронвольт до нескольких мегаэлектронвольт, так что влияние рассеяния в камерах ВУ вследствие взаимодействия с испаряющимся веществом не столь велико, как в малогабаритных ГЭПП, ориентированных на применение пучков с меньшими энергиями. В этой связи представляется целесообразным создание магнитного поля именно в месте прожигания перегородки, что снизит влияние рассеяния электронов на парах испаряющегося материала.

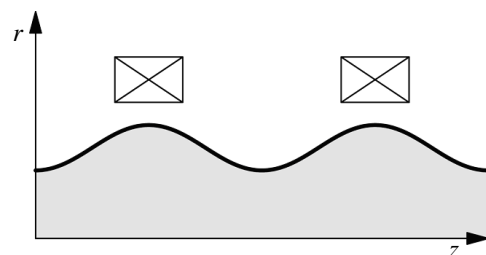


Рис. 9. Огибающая пучка в полях одиночных линз

Метод фокусировки системой одиночных линз обладает рядом недостатков. Так, геометрические и хроматические аберрации, накапливающиеся от линзы к линзе, приводят к увеличению диаметра пучка. Кроме того, необходимо соблюдение точной центровки и юстировки системы одиночных линз для обеспечения устойчивой транспортировки пучка.

Таким образом, данный метод транспортировки может применяться только в высоковакуумных шлюзовых камерах ВУ ($p < 1$ Па), где рассеяние не столь велико, при наличии возможности центровки и юстировки магнитных линз и проводки пучка сквозь заранее просверленные диафрагмы.

Адиабатическое сопровождение

Если пучок с момента рождения на катоде движется в медленно изменяющемся магнитном поле до самого выхода из ВУ, то такой вид транспортировки называют адиабатическим. Условие медленности изменения поля означает, что на длине ларморовского периода ρ_L поле можно полагать почти постоянным [27], т. е.

$$\frac{\partial B}{\partial z} \ll \frac{B}{\rho_L}. \quad (2)$$

Тогда центр ларморовской окружности скользит по силовой линии поля. Если R — расстояние от центра ларморовской окружности до оси аксиально-симметричного магнитного поля, а ρ — радиус ларморовской окружности, то при выполнении условия адиабатичности (2) соблюдаются два инварианта движения [27]

$$\begin{aligned} B(z)R^2(z) &= B_0R_0^2; \\ B(z)\rho^2(z) &= B_0\rho_0^2, \end{aligned}$$

где B_0 , R_0 , ρ_0 берутся, например, на катоде.

При исследовании огибающей пучка в сильных полях рассматривают первое соотношение (как обычно, $\rho_0 \ll R$). Это соотношение получается также из (1), если полагать $r'' = 0$, тогда, в частности, следует, чем меньше эмиттанс ε , тем меньше сечение пучка при тех же магнитных полях. Данный вид транспортировки применялся, например, в установках, описанных в работах [10, 18, 28].

Адиабатическое сопровождение представляется перспективным для реализации в малогабаритных ВУ, так как характеризуется устойчивостью транспортировки, малыми поперечными размерами пучка, надежностью прожигания тонкого канала (прожиг происходит в магнитном поле). Однако оно обладает существенным недостатком: большой эффективный эмиттанс пучка и большая по-

требная мощность фокусирующей и/или откачной системы.

Адиабатическая проводка на всем тракте транспортировки не является оптимальной, так как в малогабаритных ВУ отпадает необходимость в ускорителях большой длины. Однако проводка, близкая к адиабатической, может быть реализована в последних шлюзовых камерах ВУ перед выпуском пучка в рабочую среду. В таком подходе имеется несколько преимуществ:

прожигаются наименьшие отверстия именно на выходе ВУ, что минимизирует количество натекающего газа в систему;

реализуется наибольшая температура натекающего газа, что порождает дополнительное газодинамическое сопротивление, а также снижает рассеяние пучка на частицах газа [4];

магнитное поле сопровождает пучок и в газовой среде, что способствует сохранению его направленности;

вследствие создания сильных магнитных полей не на всем тракте транспортировки снижается потребная мощность на систему фокусировки.

Согласованная транспортировка в однородных магнитных полях

Если на входе в длинный соленоид, создающий однородное магнитное поле, огибающая пучка будет удовлетворять сразу двум условиям

$$r_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{k}} \quad \text{и} \quad r'_0 = 0, \quad (3)$$

где r_0 , r'_0 — соответственно, радиус и угол наклона огибающей пучка на входе в однородное поле, то решение уравнения (1) имеет вид

$$r = r_0 = \sqrt{\frac{\varepsilon}{k}}. \quad (4)$$

Такая проводка называется согласованной и применяется в ряде приборов (пролетный клистрон, гиromонотрон и др.). В выводных устройствах согласованная проводка практически не встречается, что сопряжено со сложностью создания протяженных однородных полей при одновременном соблюдении обоих условий (3) на входе в поле.

Рассогласованная транспортировка

Несоблюдение хотя бы одного из условий (3) приводит к тому, что огибающая пучка испытывает колебания вокруг равновесного положения, определяемого выражением (4). Действительно, если $B = \text{const}$, $r = R_0$, $r' = R'_0$ при $z = 0$, то общее решение уравнения (1) имеет вид

$$r = \sqrt{\frac{c_1 + \sqrt{c_1^2 - 4k^2\varepsilon^2} \sin 2k(z + c_2)}{2k^2}}, \quad (5)$$

где $c_1 = R_0'^2 + k^2 R_0^2 + \varepsilon^2/R_0^2$;

$$c_2 = \frac{1}{2k} \frac{k^2 R_0^2 - R_0'^2 - \varepsilon^2/R_0^2}{2kR_0R_0'}$$

Если $R_0' = 0$, то (5) упрощается

$$r = \sqrt{R_0^2 \cos^2 kz + \frac{\varepsilon^2}{k^2 R_0^2} \sin^2 kz}, \quad (6)$$

откуда следует, что $r_{\max} = R_0$; $r_{\min} = \frac{\varepsilon}{kR_0}$ (рис. 10)

или наоборот. При этом r_{\min} , r_0 и r_{\max} в указанном порядке составляют геометрическую прогрессию. Здесь r_0 — радиус пучка при согласованной транспортировке (4) в том же магнитном поле.

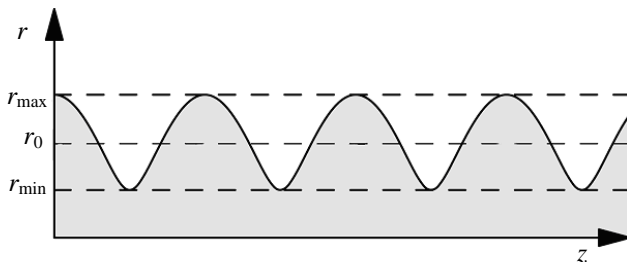


Рис. 10. Рассогласованная проводка

Из рис. 10 видно, что такой вид транспортировки дает возможность в отдельных сечениях пучка иметь меньший диаметр, чем при согласованной или адиабатической проводке при тех же значениях магнитного поля. Это позволяет при помещении прожигаемых перегородок в сечения с $r = r_{\min}$ снизить мощность либо фокусирующей, либо откачной системы.

Данный вид транспортировки применяется в установке, описываемой в работе [19]. К его достоинствам относится возможность применения относительно маломощных фокусирующих систем и откачных средств. Однако при этом возрастают требования к качеству стабилизации источников питания: к источнику высоковольтного питания электронной пушки — по напряжению; к источникам питания фокусирующих соленоидов — по току. Кроме того, необходима точная установка прожигаемых перегородок в места наименьшего сечения пучка. Переход на другое ускоряющее напряжение должен сопровождаться адекватным изменением магнитного поля.

Заключение

Представленный анализ позволяет оценить потенциальные возможности рассмотренных мето-

дов снижения натекания газа и типов транспортировки электронных потоков с позиций создания малогабаритного ГЭПП.

Организация газодинамических сопротивлений дает возможность снизить натекание газа в два-пять раз, что может несколько ослабить требования к производительности откачных средств, но не способна в корне изменить облик ВУ ГЭПП. Локальный разогрев до 10^4 °С, как отмечалось выше, может уменьшить натекание до 200 раз. Однако его реализация в малогабаритных устройствах представляется проблематичной из-за высоких температурных градиентов, устойчивости дугового разряда, размещения и охлаждения электродов, их ресурса. Кроме того, с уменьшением диаметра канала снижается и запирающее действие разогрева.

Перспективными представляются методы откачки на основе электро-, гидродинамических эффектов. Однако авторам неизвестны устройства, работающие на основе этих принципов.

Метод замещающего газа отличается простотой реализации и большим ожидаемым эффектом. В [29] показано, что применение воды для генерации замещающего газа и организация его эффективной откачки, например методом конденсации на криопанелях, охлаждаемых жидким азотом, могут обеспечить откачку на уровне 10^2 м³/с в течение длительного времени (нескольких часов).

Несомненными достоинствами обладает и метод прожига канала транспортировки самим пучком. Для этого мощность последнего должна быть достаточной для прожига нескольких пластин, разграничивающих шлюзовые камеры системы дифференциальной откачки.

Анализ типов транспортировки показывает, что при выпуске пучка в газовую среду с низкой концентрацией (до 100 Па), когда эффекты рассеяния не играют доминирующую роль, предпочтительной является проводка без магнитного поля или в полях одиночных линз. Эти схемы транспортировки являются наиболее простыми и экономичными. Если давление в рабочем объеме велико ($\sim 10^5$ Па), то для сохранения малых поперечных размеров пучка необходимо в шлюзовых камерах, близких к рабочему объему, организовывать адиабатическое сопровождение. В глубоковакуумных камерах транспортировка может быть рассогласованной или в полях одиночных линз.

Таким образом можно подвести итоги.

1. Проведена классификация ГЭПП с газодинамическими окнами по методам снижения натекания газа и типам транспортировки электронных пучков в выводных устройствах.

2. На основе анализа классификации определены методы, способствующие созданию малогабаритного ГЭПП:

транспортировка пучка сквозь прожигаемый канал;

использование откачки методом замещающего газа;

организация в выводном устройстве комплексной транспортировки: рассогласованной в глубоковакуумных и адиабатической — в низковакуумных шлюзовых камерах.

Литература

1. *Pauly W. E.* Uber line neue Entladungsrohe die den Austritt alter in der Rohe entstehenden Strahlen in die atmospherische Luft gastater// Zeit. Phys. 1920, Bd. 21. № 1. P. 11—14.
2. *Синицын С. Т.* Выпуск корпускулярных лучей из трубки через открытое отверстие// ЖТФ. 1933. Т. 3. № 4. С. 277—282.
3. *Орликов Л. Н.* Вопросы теории и практики вывода в газ низкоэнергетических электронных пучков. — Томск: Томский гос. ун-т, 2002. — 150 с.
4. *Коротеев А. А.* Малогабаритные энергонапряженные системы транспортировки электронных пучков в плотные среды. — М.: Машиностроение/ Машиностроение-Полет, 2003. — 224 с.
5. *Дулов В. Г., Лукьянов Г. А.* Газодинамика процессов истечения. — Новосибирск: Наука. 1984 — 235 с.
6. *Орликов Л. Н., Чикин Е. В.* О повышении эффективности газодинамического окна для вывода электронных пучков// Прикладная механика и техническая физика. 1985. № 2. С. 3—6.
7. *Трохан А. М.* О выводе электронных пучков из вакуума в газ через газодинамическое окно// Там же. 1965. № 5. С. 108—111.
8. *Schumacher B. W., Lowry J. F., Smith R. C.* High Power Electron Beam in Atmosphere. — In.: Proc. Of the 4th Intern. Electron Beam Processing Symp, 1976.
9. А. с. 1055310. Устройство вывода пучка ускоренных частиц/ Б. Д. Ершов, Г. Л. Саксаганский. 1989; Бюл. 6.
10. *Иевлев В. М., Коротеев А. С.* Вывод в атмосферу и исследование мощных стационарных электронных пучков// Изв. АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1981. № 3. С. 3—13.
11. *Hershcovitch Ad.* High pressure arcs as vacuum-atmosphere interface and plasma lens for nonvacuum electron beam welding machines, electron beam melting, and nonvacuum ion material modification// J. of Appl. Phys. 1995. V. 78.
12. *Hershcovitch Ad., Johnson E. D., Lansa R. C.* The plasma window: a windowless high pressure-vacuum interface for various accelerator applications: Proc. of the 1999 Particle Accelerator Conference. — New York, 1999. P. 584—587.
13. А. с. 1281141. Устройство для вывода пучка заряженных частиц/ Л. Н. Орликов, Д. А. Носков. 1998; Бюл. 11.
14. А. с. 1521261. Устройство для вывода частиц/ Л. Н. Орликов. 1998; Бюл. 11.

15. А. с. 105174. Окно для вывода сфокусированного электронного пучка в газовую среду/ П. В. Белков, М. Н. Васильев, Е. Е. Голубков, А. С. Коротеев.

16. *Васильев М. Н., Коротеев А. С.* Устройство для вывода концентрированного электронного пучка в плотную газобразную среду// ПТЭ. 1984. № 1. С. 154—157.

17. *Горбунов В. А., Куксанов Н. К., Салимов Р. А., Черток И. Л.* Выпуск в атмосферу концентрированного пучка электронов мощностью до 60 кВт ускорителя ЭлВ-4: Докл. III Всес. совещ. по применению ускорителей заряженных частиц в народном хозяйстве. — Л., 1979. № 4.1. С. 122—125.

18. *Белозривцев В. М., Давыдов А. В., Ризаханов Р. Н.* Ускоритель с концентрированным выводом электронного пучка для опытной установки электронно-лучевой очистки дымовых газов на Черепетской ГРЭС// Сб. Применение электронных пучков и импульсных разрядов для очистки дымовых газов. — М.: ИВТАН. 1991. С. 17—21.

19. *Коротеев А. С., Белозривцев В. М., Ризаханов Р. Н., Ярцев А. М.* Вывод концентрированного электронного пучка в плотную газовую среду: Тез. докл. VII Всес. симпози. по силовой электронике. — Томск, 1988. Ч. 2. С. 263—265.

20. *Коротеев А. С.* Мощные электронные пучки — путь к реализации новых технологий// Вестник АН СССР. 1988. № 10. С. 13—19.

21. *Gorshkov O. A., Koroteev A. S., Rizakhanov R. N.* Electron Accelerators with Concentrated Beam Ejection to Atmosphere and Their Applications in Beam Extra-Vacuum Technologies: EPAC-98/ Institute of Physics Publishing. — Bristol, UK, 1998. P. 2425.

22. *Горшков О. А., Ризаханов Р. Н.* Ускорители электронов с концентрированным выпуском пучка в атмосферу и их применение в лучевых вневакуумных технологиях// Конверсия в машиностроении. 1995. № 1. С. 33—36.

23. *Горшков О. А., Ризаханов Р. Н.* Очистка дымовых газов от окислов азота и серы с помощью концентрированных электронных пучков: Тез. докл. конф. "Решение экологических проблем г. Москвы". — М.: ВИМИ, 1994. С. 210—213.

24. *Лоусон Дж.* Физика пучков заряженных частиц. — М.: Мир, 1980. — 439 с.

25. *Рыкалин Н. Н., Зуев И. В., Углов А. А., Кокора А. Н.* Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: Справочник. — М.: Машиностроение, 1985. — 496 с.

26. *Кельман В. М., Явор С. Я.* Электронная оптика. — Л.: Наука, 1968. — 488 с.

27. *Мешков И. Н.* Транспортировка пучков заряженных частиц. — Новосибирск: Наука, 1991. — 222 с.

28. *Иевлев В. М., Коротеев А. С., Коба В. В., Кулаков И. Г.* Экспериментальная установка для получения концентрированного пучка релятивистских электронов в атмосфере// Изв. АН СССР. Сер. Технические науки. 1977. № 13. Вып. 3. С. 52—56.

29. *Джанибекова С. Х., Ризаханов Р. Н.* Расчет газодинамического затвора: Тр. XXXVI Уральского семинара "Механика и процессы управления": Т. 1. — Екатеринбург, 2006. С. 147—157.

Статья поступила в редакцию 14 августа 2007 г.

Modern electron-beam plasma generators with gas-dynamic valves

A. S. Koroteev, R. N. Rizakhanov

Federal State Unitary Enterprise "Keldysh Research Center", Moscow, Russia

In this article stationary electron-beam plasma generators based on concentrated beam output into dense medium through gas-dynamic valves are reviewed. For the first time detailed classification of such devices both on methods of gas leakage from working plasma region reduction and implemented beam transportation types in managed magnetic fields is proposed. Analysis that offers an opportunity to choose the most promising technologies for compact generators developing is also presented.

* * *