

Стационарный инжектор пучка протонов током 1 А и энергией 100 кэВ с источником ионов типа «ионный насос»

КОВАЛЬСКИЙ Г. А., КАРЕТНИКОВ Д. В., МЕНЬШИКОВ М. И., ПЛГШИВЦЕВ Н. В., ШЕМБЕЛЬ Б. К.

В настоящей работе описан инжектор постоянного протонного пучка* для инжекции в сильно-точный ускоритель непрерывного действия [1] с входным акцептансом 10 см·мрад. К началу работы был известен только один инжектор [2] с близкой, но недостаточной для поставленной задачи интенсивностью 0,75 А при энергии пучка 100 кэВ.

Работа стационарного инжектора с высокой интенсивностью пучка характеризуется значительными тепловыми нагрузками в области его формирования и большой напряженностью электрического поля. Электрическая прочность ускоряющих межэлектродных промежутков в этой области может поддерживаться только при хороших вакуумных условиях, которые, в свою очередь, обеспечиваются при малых потоках нейтрального газа из источника ионов. В инжекторе, описанном в работе [2], а также в инжекторах [3, 4], способных создавать пучки интенсивностью до 0,6 А, давление газа в разрядной камере источника составляет 1—10 Па.

В разработанном нами источнике разрядная камера соединена с областью формирования отверстием большой площади. Давление газа в разрядной камере снижено приблизительно до 10^{-1} Па. Перепад давления между разрядной камерой и прикатодной областью разряда (в которой оно составляет 1 Па) создается за счет использования эффекта ионной откачки. Такой механизм перемещения газа был впервые применен в вакуумном ионном насосе [5]. В этой работе получено отношение значений давления между прикатодной областью и разрядной камерой ~ 500 .

Схема источника «Ионный насос» показана на рис. 1. Область низкого вакуума 1, где расположен накаленный катод 2 с развитой поверхностью эмиссии, соединена узким каналом 3 с основной разрядной камерой 4, в которой создается более высокий вакуум. Плазма газового разряда 5, коллимированная продольным магнитным полем, распространяется до антикатада 6. Корпус камеры 7 служит анодом. Истечение плазмы из источника в вакуум происходит через отверстие в антикатоде 8.

Устойчивый разряд устанавливается при продольном магнитном поле 0,02—0,04 Тл. Этим значениям магнитной индукции соответствует также наибольший выход плазмы. При увеличении поля свыше 0,06 Тл сильно возрастают интенсивность

колебаний в плазме и, соответственно, радиальный поток ионов, обусловленный боровской диффузией. Росту тока дуги во всех случаях соответствует увеличение протонных компонентов, которые в длинных камерах при напряжении на разряде $U = 200$ В могут достигать 80—90%.

Конструктивное оформление источника ионов в значительной мере продиктовано условиями формирования пучка. Один из важнейших элементов формирующей системы — плазменная граница эмиссии ионов. Положение границы (при отсутствии магнитного поля, перпендикулярного направлению отбора ионов) определяется условием равенства давления электронного газа плазмы и давления внешнего электростатического поля

$$\epsilon_0 E/2 = n_e k T_e, \quad (1)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума; E — напряженность внешнего электростатического поля; n_e — концентрация электронного газа на границе плазмы; T_e — температура электронного газа.

Плотность ионного тока насыщения на зонд из плазмы находили по соотношению [6]

$$j = 0,4en_0 \sqrt{2kT_e/m_i}, \quad (2)$$

где $n_0 = 1,65n_e$; e — заряд электрона; m_i — масса иона. Используя это соотношение, выражение (1) приводили к виду

$$E = 4,96 \cdot 10^3 j^{1/2} (M\theta)^{1/4}, \text{ В/м.} \quad (3)$$

Здесь j — плотность ионного тока; M — масса иона, а. е. м.; θ — электронная температура, эВ.

В характерных условиях работы источника ионов ($j = 0,1$ А/см², $\theta = 5$ эВ) напряженность поля на границе плазмы составляет несколько киловольт на сантиметр. С помощью задания распределения плотности плазмы по сечению области отбора ионов, подбора геометрии системы отбора

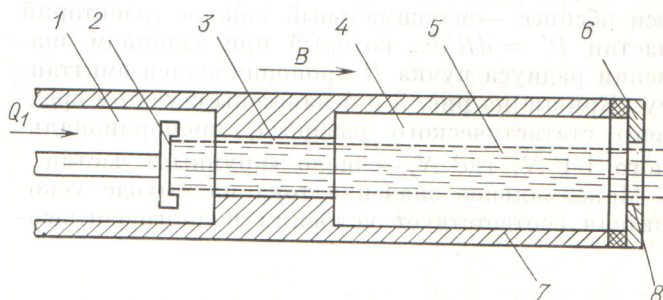
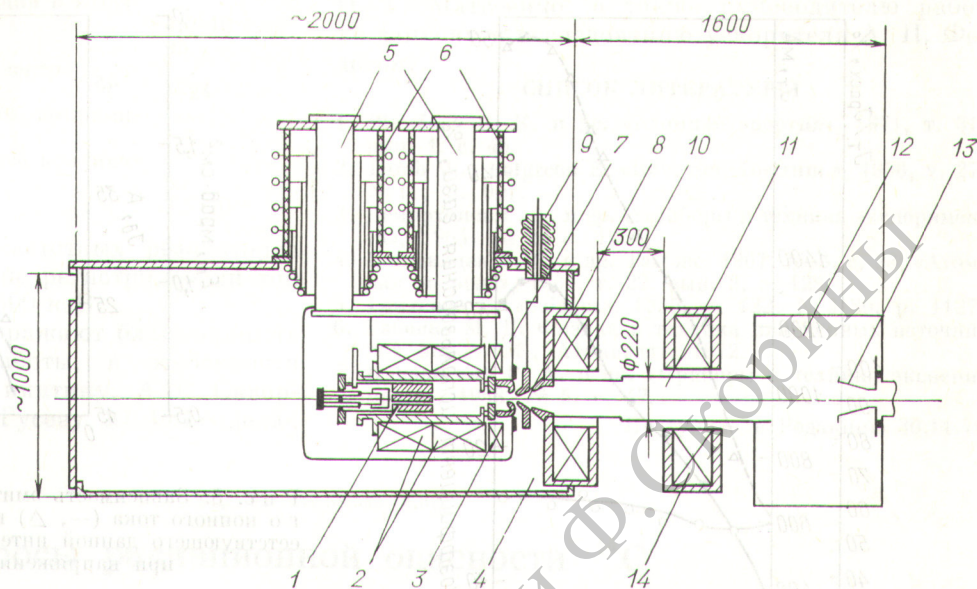


Рис. 1. Принципиальная схема источника ионов (стрелкой указано направление подачи газа в ионный источник)

* Работа выполнена в 1967 г.

и с учетом приведенных выше соотношений можно создавать благоприятную для формирования пучка конфигурацию границы плазмы. Поток первичных электронов заметно увеличивает давление со стороны плазмы. В результате граница плазмы деформируется в соответствии с распределением плотности тока разряда. В данном источнике для исключения влияния первичных электронов на границу плазмы введен цилиндрический электрод, расположенный за антикатодом и имеющий одинаковый с ним потенциал. Первичные электроны электрически отражаются в разрядный столб



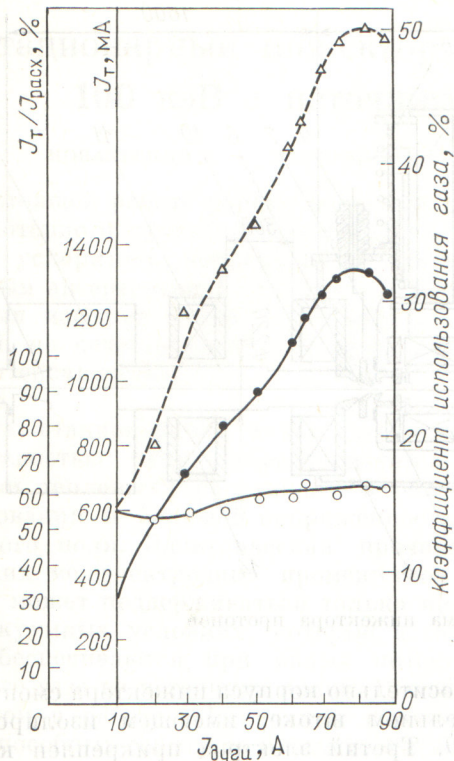
Р и с. 2. Схема инжектора протонов

вблизи антикатодного отверстия, не проникая в полость цилиндрического электрода, а плазма свободно вытекает из источника. В большинстве ионных источников плазма поступает в область формирования пучка через центральное отверстие выходного электрода газоразрядной камеры. Поэтому максимум плотности плазмы оказывается на оси. Повышенная плотность плазмы в центральной области и ослабленное (из-за наличия отверстия в ускоряющем электроде) внешнее поле приводят к появлению выпуклости на граничной поверхности отбора, что существенно ухудшает условия формирования пучка. В рассматриваемом источнике использован разрядный столб трубчатой конфигурации. При движении плазмы в полости цилиндрического электрода приосевая область в результате радиальной диффузии также заполняется плазмой, но плотность ее ниже. Поэтому при отборе ионов образуется вогнутая поверхность плазмы и формируется пучок, близкий к ламинарному.

Конструкция и характеристики инжектора протонов. Схематически инжектор изображен на рис. 2. Газоразрядный блок 1 с магнитными катушками 2, 3 изолирован от корпуса инжектора на полное значение ускоряющего напряжения. Он помещен в вакуумный контейнер 4. Источник подвешен на трубчатых штоках 5 к верхним фланцам двух проходных высоковольтных изоляторов 6. Для повышения электрической прочности источника он помещен в кожух 7 из полированных медных листов. В контейнере, внутренние стенки которого плакированы полированными медными листами, помещены электроды формирующей системы 8. Второй электрод с отрицательным потенциа-

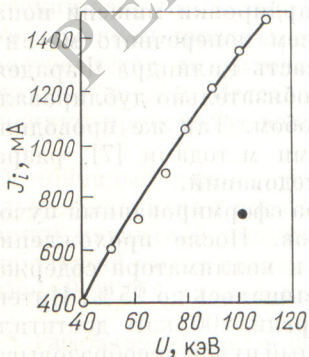
лом относительно корпуса инжектора смонтирован на отдельном штоке, имеющем изолированный вывод 9. Третий электрод прикреплен к стенке контейнера. Снаружи передней стенки контейнера помещена мощная фокусирующая катушка 10, создающая поле до 0,7 Тл. Ионопровод 11 соединяет объем контейнера с объемом коллиматора 12, в котором на расстоянии 1600 мм от источника ионов (перед входом в предускоритель [1]) находится коллимирующий медный конус 13, размер проходного отверстия в котором зависит от условий опыта. Вторая фокусирующая катушка 14 отстоит от первой на 300 мм. Все узлы инжектора, облучаемые ионами, интенсивно охлаждаются водой, а высоковольтная часть инжектора — дистиллятом. Вакуум $4 \cdot 10^{-3}$ Па обеспечивается пятью паромасляными насосами, снабженными азотными ловушками. Суммарная скорость откачки составляет 15 тыс. л в секунду. Большинство текущих измерений тока ионного пучка выполнено электрическим методом. Погрешность измерений, обусловленную вторичными электронами, возникающими в результате бомбардировки мишени ионами, устраняли наложением поперечного магнитного поля на входную часть цилиндра Фарадея. Все основные измерения обязательно дублировали калориметрическим способом. Так же проводили измерения бесконтактными методами [7], разработанными в ходе исследований.

По выходе из инжектора сформированный пучок содержит $\sim 70\%$ протонов. После прохождения фокусирующих катушек и коллиматора содержание протонов в пучке повышалось до 95%. Интенсивность пучка при энергии 100 кэВ достигала 1,3 А. При этом в протонный пучок преобразовыва-

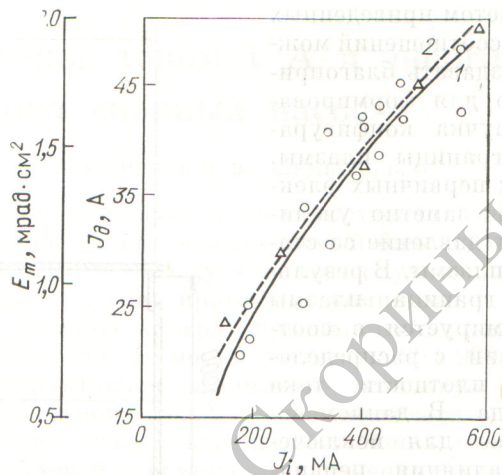


Р и с. 3. Зависимость тока протонного пучка от тока дугового разряда при энергии ускорения 100 кэВ: коллимирующее отверстие диаметром 70 мм расположено на расстоянии 1,6 м от источника; △ — коэффициент использования газового потока для создания протонного пучка; ● — ток протонного пучка; ○ — коэффициент использования тока высоковольтного выпрямителя для создания протонного пучка

лось 50% газового потока, поступавшего в источник. Ток пучка составлял ~ 60% токовой нагрузки высоковольтного выпрямителя. Зависимость тока пучка от тока дугового разряда в источнике показана на рис. 3. На рис. 4 приведена зависимость тока пучка от энергии в диапазоне от 40 до 110 кэВ. При удлинении тракта до 3,3 м ток пучка 1,0 А при энергии 85 кэВ зарегистрирован после прохождения коллимирующего отверстия диаметром 85 мм (при этом второй соленоид отстоял от первого на 1,5 м). Эмиттанс пучка из-за



Р и с. 4. Значения тока протонного пучка при различной энергии ускорения: коллимирующее отверстие диаметром 70 мм расположено на расстоянии 1,6 м от источника; ● — данные работы [2]; ○ — эксперимент



Р и с. 5. Зависимость эмиттанса пучка от интенсивности I_0 ионного тока (—, △) и значения тока разряда, соответствующего данной интенсивности пучка (— —, ○) при напряжении на разряде 70 В

недостаточной тепловой стойкости измерительного устройства определяли при энергии 70 кэВ (рис. 5). Измерения проводили на расстоянии 1,6 м от источника при диаметре отверстия в коллиматоре 70 мм. Интенсивность пучка регулировали изменением тока разряда при постоянном разрядном напряжении. На рис. 5 видна отчетливая корреляция между изменениями эмиттанса и тока разряда. Следует отметить, что постоянный ток, поступающий в токоприемник, был всегда модулирован высокочастотными колебаниями с амплитудой на уровне 20% средней интенсивности. Уровень модуляций в пучке выше уровня модуляций высокочастотными колебаниями разрядного тока. Наибольшая интенсивность колебаний соответствует диапазону от нескольких десятков до нескольких сотен килогерц.

По окончании разработки источника ионов перед подключением к ускорителю инжектор в течение трех недель по 8—10 ч в сутки испытывался в определенном режиме (ток пучка 1,0 А, энергия пучка 100 кэВ) и показал устойчивую работу при высокой стабильности параметров.

Совместная работа инжектора с ускорителем. Схема ускорителя приведена в работе [1]. Полная длина тракта пучка до токоприемника ускорителя составляла 6,7 м. Благодаря сепарирующему действию пяти последовательно установленных фокусирующих катушек содержание протонов в пучке у входа в токоприемник ускорителя составляло свыше 99%. Ниже приведены параметры инжектора при поступлении в токоприемник ускорителя пучка протонов интенсивностью 0,6 А (без включения высокочастотного ускорения).

Мощность нагрева катода, кВт . . .	5,5
Ток разряда в источнике, А	55
Напряжение разряда, В	75
Магнитное поле в канале источника ионов, Тл	0,02

Газовый поток, поступающий в источник, м ³ ·Па/с	4,0·10 ⁻²
Энергия пучка, кэВ	95
Напряжение на первом электроде относительно земли, кВ	-24
Нагрузка высоковольтного выпрямителя инжектора, А	1,3
Диаметр отверстия в конусе коллиматора, мм	50
Вакуум в инжекторе, Па	2,7·10 ⁻³

При включении высокочастотных резонаторов ускорителя в токоприемнике регистрировали ток протонов 0,25 А энергией 500 кэВ.

В заключение авторы выражают благодарность всем участникам этой работы, в особенности М. А. Никитину, К. Н. Никитину, А. С. Скворцову, Е. Н. Князеву, О. А. Гусеву, Ю. Г. Генделю,

О. Г. Матвеевко, а также руководителю работ по запуску и исследованию ускорителя А. П. Федотову.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шембель Б. К. и др. «Атомная энергия», 1971, т. 31, вып. 1, с. 45.
2. Lamb W., Lofgreen E. «Rev. Sci. Instrum.», 1956, v. 27, N 11, p. 907.
3. Демирханов Р. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1964, № 2, с. 19.
4. Плешивцев Н. В. и др. Там же, 1967, № 6, с. 23; «Атомная энергия», 1967, т. 22, вып. 2, с. 128.
5. Lawrence E. «Science», 1955, v. 122, N 3180, p. 1127.
6. Габович М. Д. Физика и техника плазменных источников ионов. М., Атомиздат, 1972.
7. Ковальский Г. А. и др. «Приборы и техника эксперимента», 1968, № 5, с. 47.

Поступила в Редакцию 30.11.79

УДК 621.039.58:539.16.01

Вопросы радиационной опасности ¹⁴C

ВАСИЛЕНКО И. Я., БУГРЫШЕВ П. Ф., ИСТОМИНА А. Г., НОВОСЕЛЬЦЕВА В. И.

Ядерные взрывы, общая мощность которых достигла 530 Мт, сопровождались образованием значительного количества радиоуглерода — ¹⁴C, характеризующегося большим периодом полураспада (5760 лет) и низкой энергией β-излучения (0,156 МэВ). Максимальная концентрация этого нуклида в атмосфере зарегистрирована в 1965 г., когда его уровень превысил естественный фон примерно на 100%. Общее количество накопленного радиоуглерода в 1972 г. составило 5,8 МКи [1,2]. В результате ограничения воздушных ядерных взрывов концентрация «бомбового» ¹⁴C в атмосфере постепенно снижается. Однако она все еще превышает естественный уровень примерно на 30%. К 2000 г. ожидается снижение до 3% (рис. 1).

В настоящее время основным источником всевозрастающего поступления ¹⁴C в окружающую среду являются предприятия ядерной энергетики. По обобщенным данным, выброс газообразного ¹⁴C из энергетических реакторов составляет сотни доли Ки/[МВт (эл.)·год] [3]. При этом ~ 95% ¹⁴C находится в виде ¹⁴CO₂, 2,5% — в виде ¹⁴CO и 2,5% — в виде гидрокарбонатов [4]. К 2000 г. такое положение может привести к повышению концентрации радиоуглерода в атмосфере примерно на 200% (рис. 2). Следует отметить, что увеличение [5, 6] содержания стабильного углерода в атмосфере вследствие сжигания минерального топлива приводит к некоторому снижению концентрации ¹⁴C в результате его разбавления.

Процессы обмена ¹⁴C между атмосферой, биосферой и гидросферой протекают достаточно интенсивно, характеризуясь временными константами порядка нескольких лет. Период полуочищения атмосферы предполагают равным 1,5—5 годам [1, 2]. В конечном счете основное количество радио-

углерода поступает в Мировой океан, который выполняет роль своеобразного «буфера» и где, вступая в реакции с металлами, ¹⁴C образует карбонаты и бикарбонаты. Временная константа обмена поверхностных слоев океана составляет ~ 5—25 лет, а глубоких — 100—1000 лет. Считают, что полный обмен ¹⁴C в атмосфере, как и стабильного углерода, происходит за 300—500 лет.

В процессе фотосинтеза ¹⁴C накапливается в растениях, а затем в организме животных и людей. При этом наземные растения фиксируют лишь 1/10 часть радиоуглерода, остальные 9/10 поглощаются морскими растениями, главным образом фитопланктоном. Коэффициент перехода в цепи атмосфера — наземные растения равен 1 [7]. Равновесие устанавливается очень быстро, через 2—3 мес. В растениях радиоуглерод может поступать в небольшом количестве также из почвы

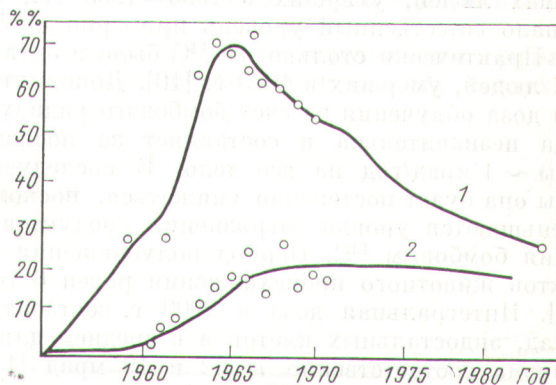


Рис. 1. Содержание «бомбового» ¹⁴C в атмосфере (1) и поверхностном слое океана (2) [1, 2]. По оси ординат на рисунках 1, 2 отложено избыточное количество ¹⁴C по сравнению с естественным содержанием