

УДК 621.039.6

Экспериментальное моделирование рекуператора для инжекторов на отрицательных ионах

ДИМИТРОВ С. К., МАХИН А. В., ТУРКУЛЕЦ С. В.

Для создания и нагрева плазмы в некоторых термоядерных установках применяются инжекторы быстрых атомов, получаемых как из положительных, так и из отрицательных ионов [1, 2]. В обоих случаях коэффициент преобразования ионов в быстрые атомы значительно меньше единицы, поэтому для повышения к. п. д. инжектора необходимо прямое преобразование (рекуперация) кинетической энергии неперезарядившихся ионов в электрическую.

Цель настоящей работы — исследование варианта системы рекуперации энергии моноэнергетических пучков отрицательных ионов. Эксперименты проводили с электронными пучками, так как источники электронов и их эксплуатация проще, мягче требования к откачке. С помощью электронных пучков можно экспериментально промоделировать влияние некоторых факторов на эффективность рекуперации энергии (например, влияние геометрии системы, объемного заряда и других параметров пучка).

Проблемы торможения пучков, при котором кинетическая энергия электронов трансформируется в энергию электрического поля и возвращается во внешнюю цепь, возникают также при создании электронно-лучевых вентиляей, высокочастотных электронных ламп и находящихся в стадии исследования электрокинетических линий электропередач.

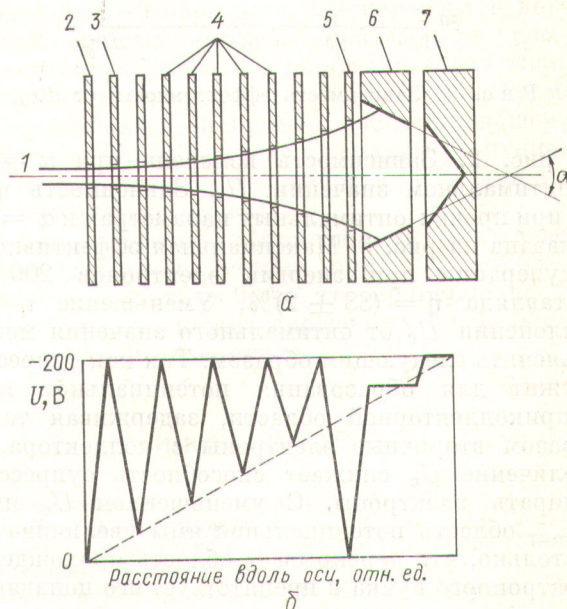
В нашей работе экспериментально исследовались задачи торможения и сбора частиц в системе рекуперации, состоящей из коллектора с супрессором и набора диафрагм, создающих тормозящее электрическое поле (рис. 1, а). Аналогичная система описана в работе [3]. Поверхность коллектора представляет собой конус с углом раствора α . Отверстие в коллекторе по оси системы необходимо для того, чтобы использовать рекуператор в тракте инжектора без применения отклоняющего магнитного поля («на пролете») и облегчить откачку газа из области коллектора. Для запираания потока ионов, проходящих в это отверстие, за коллектором расположен специальный электрод, создающий рассеивающее ионы электрическое поле.

В такой системе вторичные электроны запираются супрессором, потенциал у которого ниже, чем у коллектора [3]. Перед диафрагмами расположен коллектор вторичных электронов (КВЭ), по значению тока с которого можно приблизительно оценить число электронов, отраженных электрическим полем системы и не попавших на коллектор,

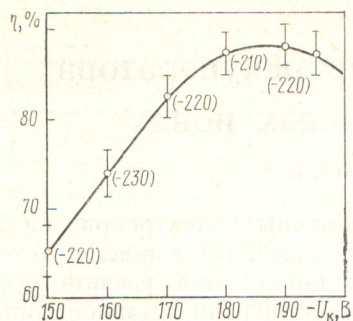
а также вторичных электронов, не запираемых супрессором. Ток КВЭ входит в потери рекуперированной мощности при расчете эффективности преобразования энергии в данной системе (эффективность рекуперации — отношение электрической мощности, снимаемой с коллектора, к мощности пучка на входе в рекуператор).

Апертуры коллектора, супрессора и диафрагм выбирали с учетом угловой расходимости пучка электронов и расходимости из-за влияния объемного заряда в потоке частиц. Чтобы провести пучок в область коллектора с минимальными потерями, использовали фокусировку его вдоль всей зоны торможения. Для этого на некоторые диафрагмы подавался отрицательный потенциал, равный примерно ускоряющему потенциалу электронной пушки (см. рис. 1, б). Благодаря этому в данной системе можно рекуперировать пучки с большой угловой расходимостью (в нашем случае $\theta = 8^\circ$). Система оптимизировалась по потенциалу коллектора U_k , супрессора U_c , дополнительного электрода U_a , углу раствора конуса α .

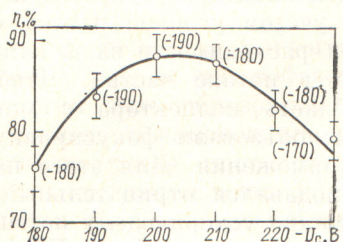
Зависимость эффективности η от U_k при оптимальном значении U_c для каждого U_k показана



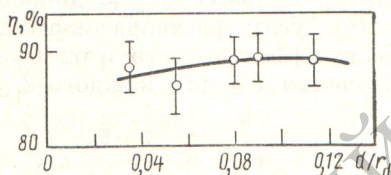
Р и с. 1. Схема рекуператора (а) и качественное распределение потенциала на электродах (б): 1 — пучок, $W_0 = 200$ эВ; 2 — коллимирующая диафрагма; 3 — коллектор вторичных электронов; 4 — электроды тормозящего поля; 5 — супрессор; 6 — коллектор; 7 — дополнительный электрод рассеивающего поля



Р и с. 2. Зависимость эффективности η от U_k (цифры в скобках — оптимальные значения U_c)



Р и с. 3. Зависимость эффективности η от U_c (цифры в скобках — оптимальные значения U_k)



Р и с. 4. Зависимость эффективности от d/r_d

на рис. 2. Зависимость измерена при $\alpha = 30^\circ$ и оптимальном значении U_a . Зависимость η от U_c при прочих оптимальных параметрах и $\alpha = 30^\circ$ показана на рис. 3. Максимальная эффективность рекуперации при энергии электронов 200 эВ составляла $\eta = (88 \pm 2)\%$. Уменьшение η при отклонении U_c от оптимального значения можно объяснить следующим образом. Так как супрессор служит для образования потенциальной ямы в приколлекторной области, задерживая таким образом вторичные электроны с коллектора, то увеличение U_c снижает способность супрессора запира́ть электроны. С уменьшением U_c ниже $U_{c, \text{опт}}$ область потенциальной ямы увеличивается настолько, что перекрывает область прохождения электронного пучка и препятствует его попаданию на коллектор, отражая электроны обратно.

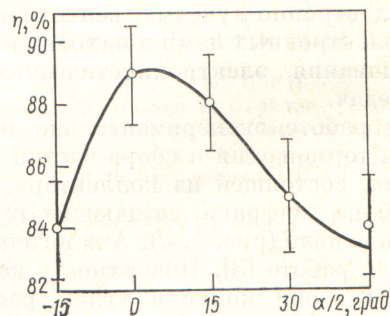
Эффективность системы со сплошным коллектором (без отверстия и дополнительного электрода, т. е. без рассеяния пучка в конце торможения) оказалась ниже, так как потенциальная яма, создаваемая супрессором, не перекрывает цен-

тральных областей коллектора и не задерживает вторичные электроны, о чем свидетельствует увеличение тока с КВЭ.

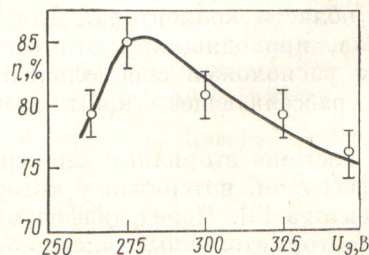
Эксперименты позволили установить, что для максимальной эффективности преобразования пучок должен тормозиться на 90—95%. Влияние объемного заряда в пучке, согласно работе [4], характеризуется безразмерным параметром d/r_d , где d — диаметр пучка, r_d — параметр, имеющий размерность длины и вычисляемый по плотности тока и энергии пучка. Экспериментально показано, что в пределах изменения d/r_d от 0,06 до 0,11 эффективность остается постоянной. Это объясняется тем, что небольшая расходимость пучка из-за объемного заряда, которая оказывает влияние на эффективность преобразования, компенсируется отрицательным потенциалом фокусирующих диафрагм (рис. 4).

Эффективность преобразования зависит также от угла наклона поверхности коллектора к оси системы. Для максимального торможения частиц эта поверхность должна быть ортогональной траекториям электронов. Из полученных зависимостей (рис. 5) видно, что к. п. д. такой системы достигает своего максимального значения $89 \pm 2\%$ при угле наклона, равном 5° (при прочих оптимальных параметрах).

Как выяснилось, существенное влияние на траектории электронов (а значит, и на эффективность) оказывает потенциал электрода, формирующего рассеивающее поле. Оптимальный потенциал U_a ,



Р и с. 5. Зависимость эффективности от $\alpha/2$



Р и с. 6. Зависимость эффективности от потенциала электрода рассеивающего поля U_a при $\alpha/2 = 30^\circ$

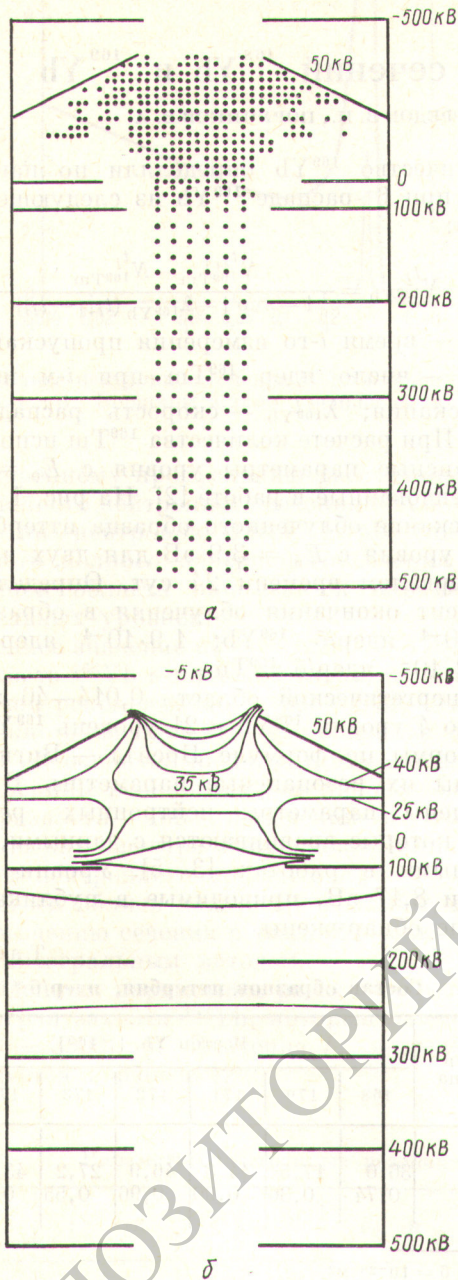


Рис. 7. Положение частиц в области торможения (а) и картина эквипотенциалей при тех же параметрах (б) при $t = 0,6$ мкс, $j = 55$ А/м², $W_0 = 500$ кэВ

при котором наблюдается максимальная эффективность, зависит также от геометрии этого электрода. На рис. 6 показана зависимость эффективности η от U_0 для электрода в форме сплошного конуса (см. рис. 1, а). При работе по пролетной схеме электрод должен быть выполнен в виде кольца. В этом случае необходимо подавать на него примерно вдвое больший потенциал, чем в сплошной исследованной конструкции.

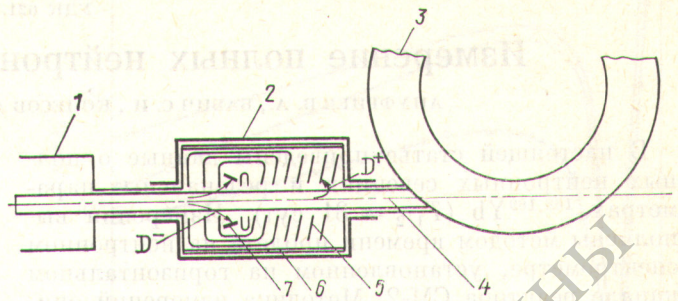


Рис. 8. Вариант расположения рекуператоров в инжекторной системе токамака: 1 — камера перезарядки; 2 — магнитный экран; 3 — реактор-токамак; 4 — атомы; 5 — рекуператор энергии ионов D^+ (система скошенных диафрагм); 6 — криопанели; 7 — рекуператор энергии ионов D^-

На ЭВМ методом «крупных частиц» моделировали процесс торможения в данной системе пучка ионов энергией 500 кэВ при $d/r_d = 0,08$. На рис. 7 изображены положение пучка в области торможения и картина эквипотенциалей. Наглядно показана роль рассеивающего электрода (он выполнен в виде кольца). В данном случае нет необходимости в периодическом фокусирующем поле, так как пучок, выходящий из ионного источника, практически не имеет углового разброса. Длина всей системы меньше расстояния, на котором образуется виртуальный катод (порядка r_d).

Вариант расположения рекуператора в инжекторной системе токамака показан на рис. 8. В качестве рекуператора ионов D^+ , образующихся в результате процессов $D^0 \rightarrow D^+$, $D^- \rightarrow D^+$, можно использовать, например, систему скошенных диафрагм [4], которая при параметрах пучка D^+ $d/r_d = 0,08$ имеет эффективность 90% (для моноэнергетического пучка).

Таким образом, эффективность рекуперации в исследованной системе при $d/r_d = 0,08-0,1$ может составлять $\sim 90\%$, что примерно на 10% больше, чем в системе скошенных диафрагм для тех же параметров пучка D^- [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пистунович В. Н. Препринт ИАЭ-2209. М., 1972.
2. Грибов Ю. В., Чуянов В. А., Шаталов Г. Е. В кн.: Труды 2-го Советско-американского семинара «Синтез—деление». М., Атомиздат, 1978, с. 192.
3. Абрамян Е. А., Шарана А. Н. «Приборы и техника эксперимента», 1971, № 2, с. 30.
4. Виноградова О. А. и др. «Атомная энергия», 1973, т. 35, вып. 1, с. 15.
5. Димитров С. К., Махин А. В. Там же, 1979, т. 46, вып. 4, с. 245.

Поступила в Редакцию 28.09.79