

УДК 621.039.647

Физические аспекты инжекционной системы для больших токамаков и открытых ловушек

КРЫЛОВ А. И., КУЗНЕЦОВ В. В., СЕМАШКО Н. Н.

В последние годы интенсивно изучаются возможности создания термоядерных реакторов с инжекцией, в которых поддержание термоядерной реакции обеспечивается вводом потоков атомов большой мощности (десятки и сотни МВт). Предложено несколько схем реакторов-токамаков, рас-

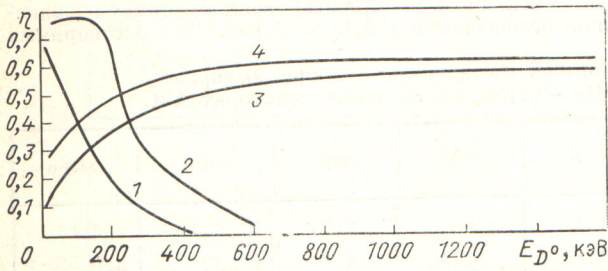


Рис. 1. Зависимость коэффициента полезного действия инжектора атомов дейтерия от энергии: 1 — инжектор с положительными ионами; 2 — инжектор с положительными ионами и рекуперацией энергии (КПД = 90%); 3, 4 — инжектор, использующий отрицательные ионы, полученные перезарядкой в цезии и натрия соответственно

считанных на инжекцию [1]. Одна из них основана на том, что инжектируемые дейтоны высокой энергии до своей термализации производят термоядерные реакции в результате столкновений с ионами тритиевой плазмы-мишени (двухкомпонентный реактор) [2]. При этом оптимум энергии частиц находится в диапазоне 200—400 кэВ. В другой схеме с помощью инжекции возможно создание в реакторе условий для зажигания термоядерной реакции [3]. При этом большие геометрические размеры токамаков приводят к необходимости использования пучков с большой длиной пробега инжектируемых частиц в плазме, то есть к инжекции атомов высоких энергий (400 кэВ и выше).

Преобразование отрицательных ионов такой энергии в нейтральные частицы происходит с эффективностью $\eta = 0,6-0,8$ в зависимости от рода мишени [4, 5], тогда как эффективность преобразования положительных ионов в атомы при этой же энергии существенно ниже. Поэтому энергетический коэффициент полезного действия инжектора, использующего отрицательные ионы, при высоких энергиях существенно выше, чем у инжектора с положительными ионами (рис. 1).

В настоящее время разработано два метода получения мощных пучков отрицательных ионов: путем извлечения отрицательных ионов непосредственно из газоразрядной плазмы, как, например, в поверхностно-плазменных источниках [6, 7], и путем двойной перезарядки положительных ионов в парах щелочных металлов [8, 9]. Несомненным

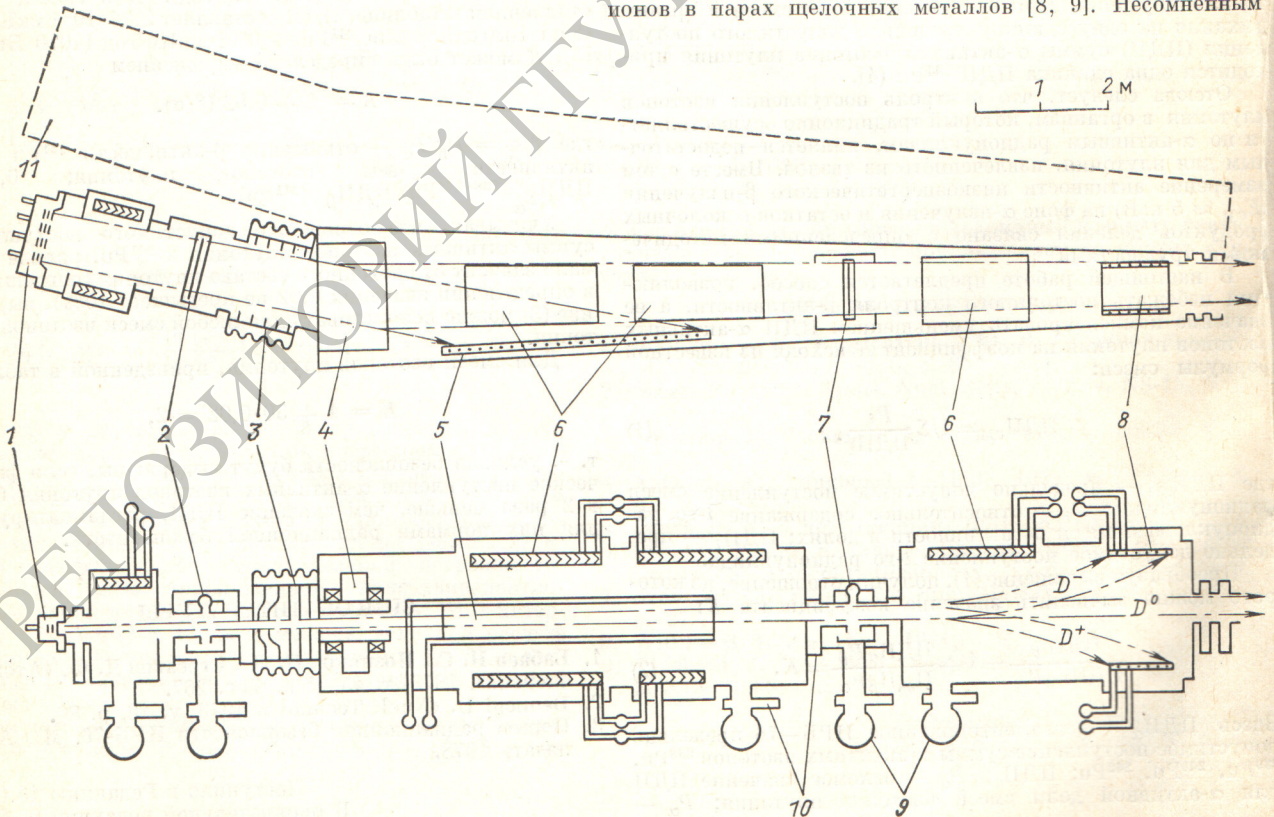


Рис. 2. Модуль инжектора атомов дейтерия с энергией 400—600 кэВ: 1 — источник положительных ионов; 2 — натриевая перезарядная мишень; 3 — система доускорения; 4 — поворотный магнит; 5 — приемник 10-кэВ атомов; 6 — панели криогенной откачки; 7 — литиевая обдирочная мишень; 8 — приемники 400—600-кэВ ионов; 9 — вакуумная система предварительной откачки; 10 — вакуумные затворы; 11 — смежный модуль инжектора

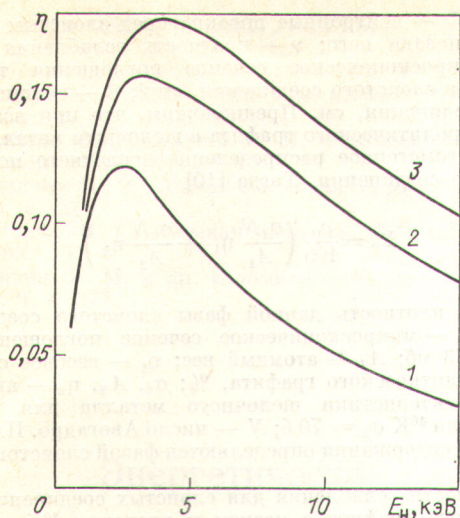


Рис. 3. Зависимость выхода отрицательных ионов от энергии при перезарядке в парах натрия ионных пучков H^+ с различным компонентным составом: 1 — $H_1^+ = 100\%$; 2 — $H_1^+ = 70\%$, $H_2^+ = 20\%$, $H_3^+ = 10\%$; 3 — $H_1^+ = 60\%$, $H_2^+ = 20\%$, $H_3^+ = 20\%$

достоинством первого способа является бóльшая простота схемы. Однако до сих пор получены пучки ионов в импульсах длительностью не более миллисекунды. При втором способе длительность импульсов доведена до секунды и нет затруднений принципиального характера, которые помешали бы созданию стационарно работающих инжекторов, в то время как перспективы первого направления менее ясны.

Общая схема инжектора быстрых атомов дейтерия энергией 400—600 кэВ включает источник положительных ионов дейтерия низкой энергии (5—10 кэВ), перезарядную мишень для получения отрицательных ионов, систему доускорения отрицательных ионов до нужной энергии, мишень для преобразования отрицательных ионов в атомы. Сравнительно низкая энергия положительных ионов обусловлена тем, что при ней выход отрицательных ионов максимален. Для мишеней из различных щелочных металлов этот выход составляет 0,12—0,25 [10, 11].

На рис. 2 изображена схема модуля инжектора с использованием отрицательных ионов дейтерия. Несколько отдельных модулей собираются в инжектор с общей мощностью в атомарных пучках 30—40 МВт. Источник создает и формирует пучок положительных ионов с током порядка 100 А и плотностью тока до 0,25 А/см². В качестве первой перезарядной мишени использовали сверхзвуковую струю паров натрия [8], в которой выход отрицательных ионов составляет 0,12 для пучка D_1^+ при энергии ионов ~ 7 кэВ. С учетом присутствующих в пучке ионов D_2^+ и D_3^+ , которые при прохождении мишени диссоциируют на ионы меньшей энергии и перезаряжаются, суммарный выход отрицательных ионов достигает 0,18 (рис. 3). Сверхзвуковая струя служит также вакуумным затвором, создавая перепад давления между областями движения положительных

и отрицательных ионов, и осуществляет частичную откачку газа, вытекающего из источника.

Система доускорения, расположенная внутри высоковольтного изолятора, представляет собой ряд прогреваемых электродов. Распределение потенциала по электродам, с одной стороны, обеспечивает высоковольтную прочность, а с другой — создает по возможности длиннофокусную систему.

Магнит, расположенный вслед за системой доускорения, поворачивает на небольшой угол пучок отрицательных ионов и направляет его на входную апертуру термоядерной установки. Образовавшиеся в мишени нейтральные частицы принимаются на специальном токоприемнике. Давление остаточного газа в этой области не должно превышать $1,33 \cdot 10^{-3}$ Па, чтобы не вызывать больших потерь пучка ионов D^- . Это пространство также должно быть заэкранировано от рассеянных магнитных полей установки.

Если мишенью для обдирки отрицательных ионов служат наиболее разработанные мишени на парах щелочных металлов, то в качестве рабочего вещества целесообразно выбрать литий, обеспечивающий наибольший выход атомов ($\sim 0,65$) [11] и очень малый вынос паров, при котором в термоядерной установке будет минимальное количество примесей с малым зарядом. Оставшиеся заряженные компоненты пучка состоят примерно из равного количества положительных и отрицательно заряженных частиц. Очистка пучка атомов от заряженных компонентов может быть сделана как с помощью магнитного поля рассеяния от тока плазменного шнура токамака, так и с помощью специального магнитного поля. Эффективность инжектора может сильно возрасти при использовании плазменной мишени [5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jassby D. «Nucl. Fusion», 1977, v. 17, p. 309.
2. Furth H. e.a. «Phys. Rev. Lett.», 1974, v. 32, p. 1176.
3. Artsimovich L. A. «Nucl. Fusion», 1972, v. 12, p. 215.
4. Дьячков Б. А. ЖТФ, 1968, т. 38, с. 1250.
5. Димов Г. И. и др. «Ядерный синтез», 1975, т. 15, с. 551.
6. Dimov G. In: Proc. Symp. Production and Neutral Negative Hydrogen Ions and Beams. Brookhaven, 1977, BNL-50727, p. 170.
7. Prelec K. e.a. Ibid., p. 111.
8. Semashko N. e.a. Ibid., p. 170.
9. Hooper E. Ibid., p. 161.
10. Дьячков Б. А., Зименко В. Н. «Атомная энергия», 1968, т. 24, вып. 1, с. 18.
11. Hooper E. UCRL-81830, 1978.
12. Семашко Н. Н. и др. В кн.: Труды II конф. по инженерным вопросам УТС. Т. II. Л., 1977.

Поступило в редакцию 18.05.79

УДК 621.039.515

О возможности регулирования нейтронного потока молекулярными слоистыми соединениями

ГВЕРДЦЕЛИ И. Г., КАЛАНДАРИШВИЛИ А. Г., КРИВОСОВ С. Д., КУЧУХИДЗЕ В. А., МСХАЛАЯ Б. А.

При эксплуатации реакторов необходимо обеспечить требуемые спектр нейтронов, значение и профиль энергораспределения. Для регулирования нейтронного потока в реакторе предложено много технических решений, в том

числе управление реактором при помощи каналов, заполненных поглотителями нейтронов из веществ в различных агрегатных состояниях [1—5].