

МОЩНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ Z-ПИНЧА

*В. А. Грибков, О. Н. Крохин, Г. В. Склизов,
Н. В. Филиппов, Т. И. Филиппова*

В работе проведено сравнение существующих в настоящее время модификаций Z-пинча. На основе предлагаемой модели образования тепловой части нейтронного выхода (нагрев пучком электронов) объяснено увеличение нейтронного выхода и тепловой доли в нем с уменьшением длины коллективного торможения пучка в Z-пинче. Для увеличения нейтронного выхода предложена схема эксперимента с дейтерированной мишенью на аноде камеры, предварительно подогреваемой мощным лазером перед развитием в Z-пинче релятивистского электронного пучка.

Несмотря на то, что Z-пинч является одним из первых объектов исследований в области УТС, до сих пор остаются невыясненными многие вопросы. В частности, природа возникновения нейтронного и жесткого рентгеновского (ЖР) излучения является предметом как экспериментального [1], так и теоретического [2] исследований. Эксперименты с различными модификациями Z-пинча [3 — 6], проведенные с аппаратурой, обладающей высоким разрешением, прояснили ряд характерных черт пинч-эффекта. В настоящее время существует четыре типа установок с использованием Z-пинча. Параметры этих установок, существенные для дальнейшего, приведены в таблице. Как видно, нейтронный выход и доля тепловых нейтронов в нем возрастает с уменьшением диаметра пинча a в момент его разрыва и с увеличением плотности плазмы. Но уменьшение диаметра пинча перед обрывом тока приводит к большим значениям величины аксиального электрического поля [7]:

$$E_{z_{max}} \sim H_{\phi} \sim \frac{2T_0}{ca} \quad (1)$$

В этом поле дейтроны должны приобретать энергию меньше или одного порядка с энергией электронов. Это подтверждается рентгеновскими

[8] и нейтронными [9] спектральными измерениями в плазменном фокусе. Помещение же в катод микропинча [5] мишени из твердого CD_2 привело к увеличению нейтронного выхода на порядок, а в некоторых режимах в плазменном фокусе с трубкой на катоде вдоль оси z [9] нейтроны образовывались на расстояниях вплоть до $\sim 1,5$ м от катода камеры, что подтверждает наличие в пинчах пучков дейтонов со скоростями $\geq 10^8$ см/сек. Эксперименты с продольным магнитным полем в плазменном фокусе [10] показали резкий спад нейтронного выхода, что, очевидно, объясняется отсутствием обрыва тока в пинче в данном случае.

Тип установки Параметры	Классический Z-пинч [1]	Плазменный фокус [3]	Индукцируемый лазером Z-пинч [4]	"Микропинч" (взрывающаяся проволочка) [5]
Напряжение на конденсаторной батарее U_0	~ 30 кВ	~ 25 кВ	~ 15 кВ	~ 600 кВ
Ток I_0	~ 400 кА	~ 1 Ма	~ 250 кА	$\sim 1,2$ Ма
Диаметр пинча перед обрывом тока $2a$	~ 2 см	$\sim 0,5$ см		$\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$ см
Плотность в максимуме нейтронного импульса N_{epl}	$\sim 10^{17}$ см $^{-3}$	$\sim 10^{18} \div 10^{19}$ см $^{-3}$	$\sim 10^{21}$ см $^{-3}$	$\geq 10^{21}$ см $^{-3}$
Температура по мягкому рентгеновскому излучению и нейтронным спектрам $T_{e,i max}$	$< 10^2$ эВ	$\sim 10^4$ эВ	$8 \cdot 10^3$ эВ	$\sim 10^4$ эВ
Энергия жесткой компоненты рентгеновского излучения $W_{об}$	до 350 кэВ	$\sim 200 \div 500$ кэВ	~ 500 кэВ	≥ 600 кэВ
Абсолютный нейтронный выход N_n	$\sim 10^7 + 10^8$	$\sim 10^{10} + 10^{11}$	—	$\sim 10^{11}$
Отношение количеств нейтронов термоядерного и ускорительного происхождения N_n^T / N_n^Y	$\ll 10^{-1}$	$\sim 10^{-1} + 10$	—	> 10

С другой стороны образовавшийся в поле (1) электронный пучок может нагревать плазму пинча [11 – 13]. Такие фокусирующиеся и подвергающиеся шланговой неустойчивости пучки были обнаружены и изучены в работе [6] методами скоростной интерферометрии и фотографирования в мягком рентгеновском излучении (МР). Одновременно в работе [4] были получены фотографии пинча в МР диапазоне, на

которых также была зафиксирована коническая структура (фокусирующийся электронный пучок).

Длина торможения пучка ℓ для параметров плазмы плотного пинча в $10^2 - 10^3$ раз должна [11 - 13] превышать длину торможения за счет двухпучковой неустойчивости:

$$\ell \approx 10^2 + 10^3 \frac{v}{0,7(N_{e_b}/N_{e_{p\ell}})^{1/3} \omega_{pe} \ell} \ln \left(\frac{W_{ob}}{W_{th p \ell}} \right), \quad (2)$$

где $v \sim c$ — скорость электронов пучка.

Экспериментальные результаты работ [3, 4, 14] свидетельствуют о следующем: 1) электронные пучки начинают эффективно тормозиться в пинче спустя 20 - 100 нсек (в зависимости от плотности $N_{e_{p\ell}}$) после образования, т. е. только тогда, когда температура плазмы (нагреваемой, по-видимому, в основном, обратным током) повышается до величин порядка $10^3 - 10^4$ эв. В этот момент исчезает ЖР и начинается основной нейтронный импульс. Это находится также в согласии с теоретическими представлениями [11] и с экспериментальным результатом работы [5], в которой помещение холодной мишени из твердого CD, в анод камеры не привело к увеличению нейтронного выхода.

2) Длина торможения электронного пучка приблизительно обратно пропорциональна $N_{e_{p\ell}}$ (в классическом Z-пинче практически нет торможения [1], в плазменном фокусе $\ell \approx 10^{-1} - 1$ см и торможение часто возникает при нескольких фокусировках пучка в плазме [3], в микропинче [5] и в пинче, индуцируемом лазером [4] — $\ell \approx 10^{-3} - 10^{-1}$ см, что находится в согласии с теоретическими работами [11, 12] и формулой (2). Этот факт подтверждается и экспериментами по хорошей проводке внешнего электронного пучка через классический Z-пинч [15] и, с другой стороны, по эффективному торможению внешнего пучка электронов в плазменном фокусе [16], сопровождающемуся увеличением нейтронного выхода.

Таким образом, на основе вышесказанного можно сделать вывод, что основными механизмами нейтронов в Z-пинчах, по-видимому, являются соударение ускоренных в электрических полях типа (1) ионов дейтерия с "холодным" (≤ 1 кэв) дейтерием пинча и, с другой стороны, нагрев плазмы до температур $\geq 10^4$ эв за счет двухпучковой неустойчивости мощными релятивистскими пучками электронов, причем роль второго механизма повышается с увеличением поля $E_z(a)$, плотности и температуры плазмы Z-пинча, так как при этом длина торможения электронного пучка резко уменьшается и увеличивается удельный энерговыход, тогда как сечение $d - d$ реакции для ускорительных дейтронов с энергией порядка сотен кэв является весьма слабой функцией энергии.

Из вышесказанного следует, что в начальный момент времени (20 - 100 нсек) энергия электронного пучка практически полностью весьма неэффективно рассеивается на холодном аноде, так как сравнительно низкая температура образующейся над поверхностью анода плазмы препятствует развитию двухпучковой неустойчивости [11]. Поэтому для увеличения нейтронного выхода представляется естественным

подогреть твердую дейтерированную мишень, помещаемую на анод Z-пинча, например, мощным лазерным излучением до температур порядка нескольких $\kappa\epsilon\epsilon$ с тем, чтобы в момент появления электронных пучков возник эффективный нагрев плазмы за счет развития двухпучковой неустойчивости. Мощным источником нейтронов может стать, очевидно, и микропинч [5] в случае, если с помощью мощного лазера осуществить предварительное сжатие проволоочки до высоких плотностей и нагрев до температур порядка 10^3 эв [17] в области вблизи анода камеры.

Авторы благодарны академику Н.Ф.Басову за внимание к работе.

Физический институт
им. П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
8 августа 1973 г.
После переработки
1 октября 1973 г.

Литература

- [1] В.В.Александров, Н.Г.Ковальский, С.Ю.Лукьянов, В.А.Ранцев-Картинов, М.М.Степаненко. ЖЭТФ, 64, 1222, 1973.
- [2] В.С.Имшенник, С.М.Осовец, И.В.Отрошенко. ЖЭТФ, 64, вып 5, 1973.
- [3] В.А.Грибков, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков, Н.В.Филиппов, Т.И.Филиппова. Письма в ЖЭТФ, 18, 11, 1973.
- [4] T.N.Lee. NRL Memorandum Report 2502, NRL, W., DC, 1972.
- [5] D.Mosher, L.S.Levine, S.J.Stephanakis, I.M.Vitkovitsky, F.Young. 6 European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Moscow, 1973.
- [6] В.А.Грибков, В.М.Коржавин, О.Н.Крохин, Г.В.Склизков, Н.В.Филиппов, Т.И.Филиппова. Письма в ЖЭТФ, 15, 329, 1972.
- [7] Б.А.Трубников. Сб. ФП и ПУТР под ред. М.А.Леонтовича, стр. 87, Изд. АН СССР, М., 1958.
- [8] H.L. van Raasen, R.H.Vandre. Phys. Fluids, 13, 2606, 1970.
- [9] H.Conrads, P.Cloth. 5th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, 1, №67, Grenoble, France, 1972.
- [10] Д.П.Петров, Н.В.Филиппов, Т.И.Филиппова, В.А.Храбров. Сб. ФП и ПУТР, т. IV, изд. АН СССР, 1958.
- [11] Л.И.Рудаков. ЖЭТФ, 59, 2091, 1970.
- [12] Б.Н.Брейзман, Д.Д.Рютов, П.З.Чеботаев. 62, 1409, 1972.
- [13] R.L.Morse, C.W.Nelson. Phys. Rev. Lett., 26, 3, 1971.
- [14] C.Patou, A.Simonnet. Note C.E.A. №1189, 1969.
- [15] J.Benford, B.Ecker. Phys. Rev. Lett., 26, 19, 1160, 1971.
- [16] D.A.Friewald et al. Phys. Lett., 36A, 297, 1971.
- [17] K.A.Brueckner. KMSF-NP5, Ann Arbor, Michigan, 1972.