

ТОКОВАЯ СТРУКТУРА ПЛАЗМЕННОГО ФОКУСА В МОМЕНТ ГЕНЕРАЦИИ БЫСТРЫХ ЧАСТИЦ

Посвящается памяти Сергея Ивановича Сыроватского

Н.В.Филиппов

Экспериментально обнаружена сложная структура локализованных областей генерации быстрых частиц МэВ диапазона энергии в плазменном фокусе при азимутальном разрушении токовой оболочки. Ускорение частиц связывается с динамической диссипацией магнитного поля при пересоединении магнитных силовых линий. Подобное явление объясняет ускорительный механизм генерации нейтронов в классических линейных пинчах.

Как отмечалось ранее [1] на плазменном фокусе (ПФ) в режиме работы с "убегающей" токовой оболочкой и углублении в центре анода, наблюдается интенсивное ускорение заряженных частиц до высоких энергий. Опыты по регистрации таких дейтронов на фотоэмульсиях с помощью нескольких комбинаций метода камер-обскур с дополнительным магнитным отклонением заряженных частиц позволили судить о локализации зон ускорения и токовой структуре ПФ в момент генерации быстрых частиц. Схема первой серии опытов показана на рис. 1. Характеристика установки и параметры разряда указаны в [1]. Дейтроны, ускоренные в ПФ (P), попадают через систему: отверстие (4) — щель (6) на фотоэмульсию (7), отклоняясь в поперечном магнитном поле H . Для предотвращения прямой засветки эмульсии световым излучением разряда, приосевая область эмульсии покрыта 2 мкм Al фильтром (8). Для уменьшения рассеяния дейтронов, вход в откачиваемую дрейфовую трубу (3) открывался лишь в момент разряда конденсаторной батареи установки, инициируемого срабатыванием электромагнитного клапана (5). Щель (6) шириной в $0,1 \div 0,2$ мм изготовлена из 10 мкм Al для регистрации мягкого рентгеновского изображения приосевой зоны разряда, если оно проходит мимо щели. На рис. 2 приведены типичные изображения энергетических дейтронов, полученных на фотоэмульсии ФТ-41. Исследуемый энергетический интервал ограничен снизу апертурой прибора и величиной магнитного поля H . Часть разрядов сопровождалась генерированием жестких дейтронных потоков со сложной структурой. Кроме малых (часто менее 1 мм) поперечных размеров источника, обращает на себя внимание монохроматичность отдельных элементов, отмеченных в [2] при исследовании Z-пинчей. Появление этих групп стабильно коррелирует с отсчетами счетчика СТС-5 (B), регистрирующего γ -активность при β -распаде Al^{28} , полученного по реакции $Al^{27}(d,p)Al^{28}$ на дюралюминиевой крышке камеры (2). Эксперименты показали отсутствие связи между мягким рентгеновским изображением осевой зоны разряда и характером спектрального распределения быстрых дейтронов.

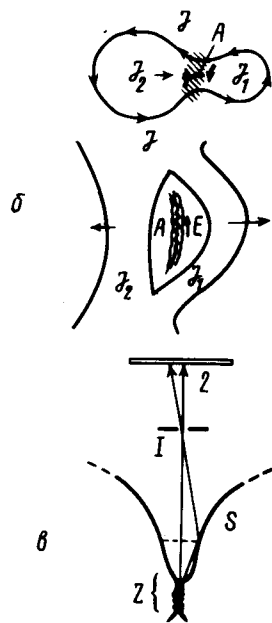
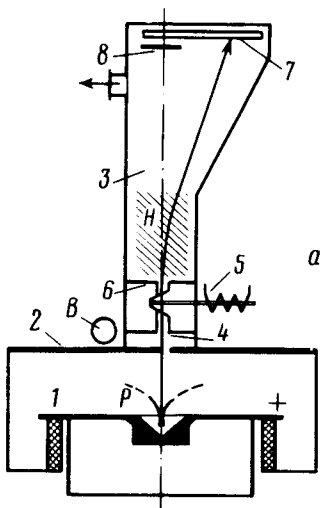


Рис. 1. *a* – Экспериментальная установка и схема отклонения пучка, *б* – схема филаментации тока, *в* – регистрация отражения дейтронов от плазменной оболочки

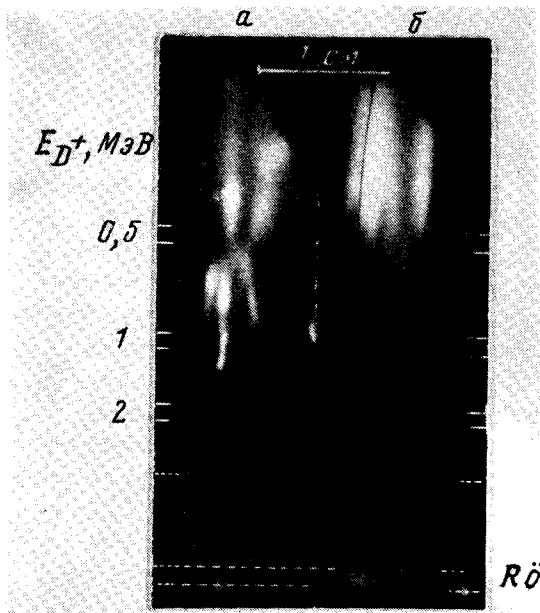


Рис. 2. Различные энергетические распределения быстрых дейтронов, полученные по схеме рис. 1, *a* при магнитных полях 1,4 кЭ (*a*, *б*)

Аксиальное положение зоны ускорения определялось с помощью обработки обскурোগрам, снятых через три отверстия $\phi 0,1$ мм (без фильтров), два из которых смещены от оси камеры на 16 и 32 мм. Обработка большого числа, подобных приведенным на рис. 3, снимков, показала, что зона ускорения находится в анодной полости, на 2 – 3 см ниже плоскости анода, а поперечные размеры ее не превышают 1 мм. Испол-

зуя рис. 3,а, можно восстановить геометрию токово-плазменной оболочки (ТПО) в момент генерации быстрых дейтронов по схеме, показанной на рис. 1,в. Через отверстия обскуры (1), кроме осевой (прямой) группы ускоренных в зоне дейтронов, могут пройти лишь те, которые отразились от узкой кольцевой зоны (S) ТПО. Тогда из геометрии эксперимента $\phi S = 7,5$ мм; $S - Z = 10$ мм. Подобные кольцевые изображения получаются для разрядов, не сопровождающихся активацией Al. Для тех же разрядов, где генерируется большое число жестких дейтронов, обскурограммы имеют нерегулярную структуру, подобную показанной на рис. 3,б, свидетельствующую о том, что вблизи зоны ускорения не сохраняется сплошная плазменная оболочка.

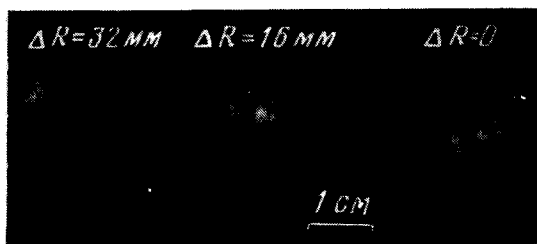


Рис. 3. Изображения зоны генерации дейтронов, полученные одновременно через осевое и два смещенных по радиусу на 16 и на 32 мм отверстия.

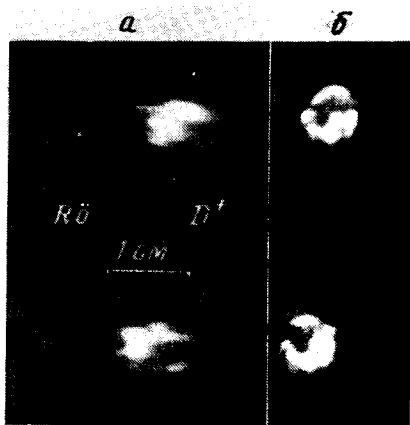


Рис. 4. Изображения зоны генерации дейтронов, полученные одновременно через два отверстия, смещенных от оси на 6 мм в противоположные стороны, с отклоняющим магнитным полем (а) и без поля (б)

Магнитное отклонение прошедших через парные отверстия обскуры дейтронов (рис. 4,а, $H = 810$ Э) также показывает, что засветка эмульсии фотонным излучением разряда значительно меньше, чем корпускулярным, что связано с наличием большой полости, предотвращающей контакт ПФ с поверхностью металла. Рис. 4,б ($H = 0$) дает представление о сложной структуре и размерах области ускорения. Наложение магнитного поля вблизи одного лишь отверстия стереообскуры дает возможность судить о пространственно-энергетической структуре источника дейтронов. На рис. 5 приведены обскурограммы двух разрядов: (а) с большим количеством жестких дейтронов и (б) без них. Здесь можно различить: зону ускорения (Z), первую отражающую зону ТПО (S_1) и вторую зону (S_2), по-видимому, связанную с двойной струк-

турой оболочки. Магнитное отклонение показывает, что энергия отраженных от первой оболочки дейтронов близка к их энергии в прямом пучке, в то время как после прохождения первой и отражения от второй, уменьшается с $E = 1,3$ МэВ до 0,8 МэВ (для рис. 5,а).

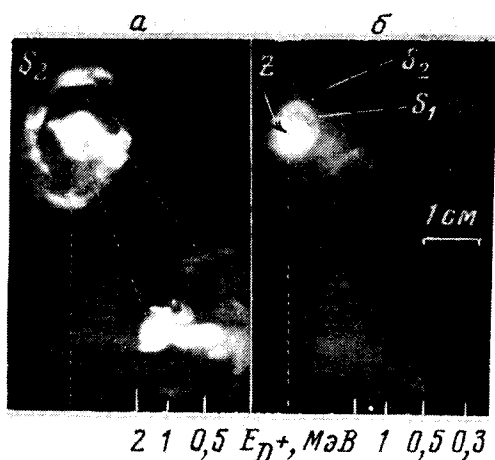


Рис. 5. Изображения зоны генерации дейтронов, полученные одновременно через два отверстия, вблизи одного из которых приложено отклоняющее магнитное поле. В случае (а) наблюдается генерация быстрых частиц

Совокупность экспериментальных данных подтверждает концепцию, высказанную Сыроватским [5] о генерации быстрых частиц при динамической диссипации магнитного поля. Первоначальное сжатие области токовой перетяжки ($m = 0$) или области фокуса, определяется соотношением между магнитным давлением и силами инерции ТПО с одной стороны и противодействием захваченного объема горячей плазмы. Дальнейшая эволюция ПФ связана как с продольным вытеканием вещества вдоль оси разряда, так и возможностью радиального расширения или даже прорывов в токовой оболочке, экспериментально зарегистрированных Грибковым [3] на установке ЛВ-2. В коротком ПФ (плоский анод) основная потеря вещества идет в осевом направлении; в длинном же фокусе (анод с центральной полостью), где осевое вытекание затруднено, происходит разрыв ТПО в наименее "прочных" местах. В результате пересоединения магнитных силовых линий тока J при разбиении его на отдельные филаменты (два на рис. 1,б), образуется нейтральный токовый слой A , распад которого приводит к ускорению ионов в направлении электрического поля в области с $H = 0$.

Если филаментация слабая и не распространяется далеко вдоль оси ПФ, то сохранивший симметрию участок ТПО дает практически кольцевые отражения (рис. 3,а, 5,б) и в этом случае нет ускорения частиц до энергий МэВ диапазона. При сильных прорывах ТПО, филаментация распространяется далеко по линиям тока вдоль оси ПФ и на пленке фиксируется сложная комбинация отраженных и прямых пучков жестких дейтронов (рис. 2,а, б, 3,б, 5,а). Необходимо заметить, что в последнем случае наблюдается и рентгеновское излучение в МэВ диапазоне жесткости, отвечающее ускорению электронов в анодную сторону. Нейтронный выход из ПФ в случае генерации быстрых дейтронов обычно меньше за счет более раннего разрушения фокуса при радиальных прорывах оболочки.

Описанный выше механизм ускорения в еще большей мере применим к линейным Z-пинчам, где он может быть основным источником быстрых частиц и нейтронного излучения. Осевое вытекание здесь сильно затруднено за счет большой длины зоны пинчевания, а радиальные проорывы инициируются начальной "неравнопрочностью" оболочки за счет сильно развитой азимутальной структуры при малых ($20 \div 50$ мтор) начальных давлениях газа. В 1956 г. автором были поставлены опыты, позволившие уменьшить начальное давление дейтерия ниже $5 \div 8$ мтор.

Пробой газового промежутка обеспечивался закорачиванием медным стержнем ϕ 14 мм межэлектродного промежутка цилиндрической камеры, показанной на стр. 238 [4]. Тогда в каждом разряде регулярно наблюдался ряд последовательных нейтронных импульсов при каждом цикле сжатия - расширения пинча, хотя осевая часть камеры была занята стержнем и не могла быть зоной генерации быстрых частиц.

В результате проведенных экспериментов показана прямая связь филаментации тока с генерацией быстрых частиц мегаэлектронвольтового диапазона энергий в плазменном фокусе. Генерируемые таким образом быстрые частицы не определяют собой нейтронного выхода из плазменного фокуса, являясь в то же время основной причиной генерации жестких излучений из линейного Z-пинча.

Разобранный выше механизм определяет и генерацию мощных электронных пучков при контакте ПФ с анодом. Меньшая жесткость ($70 \div 300$ кэВ) возникающего при этом рентгеновского излучения связана с более медленным развитием разрывов и процесса пересоединения в тяжелой металлической плазме.

Автор благодарит Т.И. Филиппову за участие в экспериментах и анализе результатов. Было очень полезным обсуждение экспериментов и модели с В.С. Имшенником, Б.А. Трубниковым, А.Г. Франк и В.Д. Шафрановым. Без помощи В.В. Комиссарова в изготовлении аппаратуры выполнение этой работы было бы существенно затруднено.

Институт атомной энергии
им. И.В. Курчатова

Поступила в редакцию
7 декабря 1979 г.

Литература

- [1] Н.В. Филиппов, Т.И. Филиппова. Письма в ЖЭТФ, 25, 135, 1977.
- [2] Б.Г. Брежнев. Изв. АН СССР, ОТН. Энергетика и автоматика, 2, 64, 1960.
- [3] В.А. Грибков. Канд. диссертация, М., 1975.
- [4] Н.В. Филиппов. Сб. ФП и ПУТР под ред. М.А. Леонтовича, стр. 238, 1958 г.
- [5] С.И. Сыроватский. Астроном. ж., 43, 340, 1966.