

## К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ УСКОРЕНИЯ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В ДИНАМИЧЕСКОМ ЗЕТ-ПИНЧЕ

И. Ф. Кварцхава, Ю. В. Матвеев, Н. Г. Решетняк

В динамическом зет-пинче часто наблюдается ускорение заряженных частиц, ответственных за генерацию рентгеновского и нейтронного излучений. Для объяснения этого эффекта предлагались различные механизмы, однако ни один из них не согласуется с экспериментальными данными в достаточной мере [1].

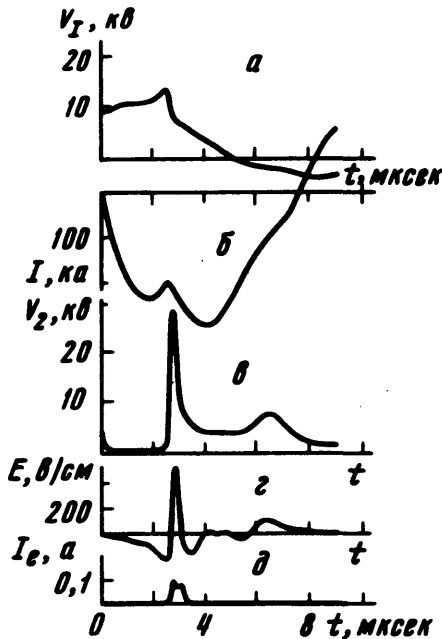


Рис. 1. Осциллограммы, полученные при разряде в дейтерии ( $V_0 = 20$  кВ) для  $P_0 = 10^{-1}$  мж рт. ст.: а – сигнал с делителя напряжения  $D_1$ , б – ток в цепи разряда, в – сигнал с делителя  $D_2$ , г – ЭДС, измеряемая петлей П, д – ток электронов на цилиндр Фарадея

Обсуждение предлагаемого нами механизма ускорения начнем с перечисления основных экспериментальных фактов<sup>1)</sup> [1–3]: 1) ускорение ионов и электронов происходит одновременно и приблизительно до одинаковых энергий; 2) область ускорения локализована вдоль оси разряда. Ее поперечный размер составляет несколько миллиметров; 3) электроны ускоряются к аноду, ионы к катоду; 4) наиболее благоприятным для ускорения частиц является режим разряда с выраженными "особенностями" на кривых тока и напряжения; 5) частицы ускоряются в стадии нарастания разрядного тока после "особенности", т. е. после максимального сжатия пинча; 6) наложение продольного магнитного поля не исключает эффекта ускорения.

В нашей работе [4] обращалось внимание на важность учета процесса повторного зажигания разряда для понимания механизма ускоре-

<sup>1)</sup> Подробнее вопрос будет рассмотрен в статье.

ния. Последующие эксперименты подтвердили эту точку зрения. Основные результаты получены на установке с параметрами  $C = 48 \text{ мкф}$ ,  $V_0 = 20 \div 25 \text{ кВ}$ . Внутренний диаметр камеры – 20 см, длина – 50 см. Исследовались разряды в водороде, дейтерии, гелии, воздухе и аргоне в диапазоне давлений  $5 \div 2 \cdot 10^{-2} \text{ мм рт. ст.}$  На рис. 1 приведены некоторые характеристики интересующих нас процессов для разряда в дейтерии.

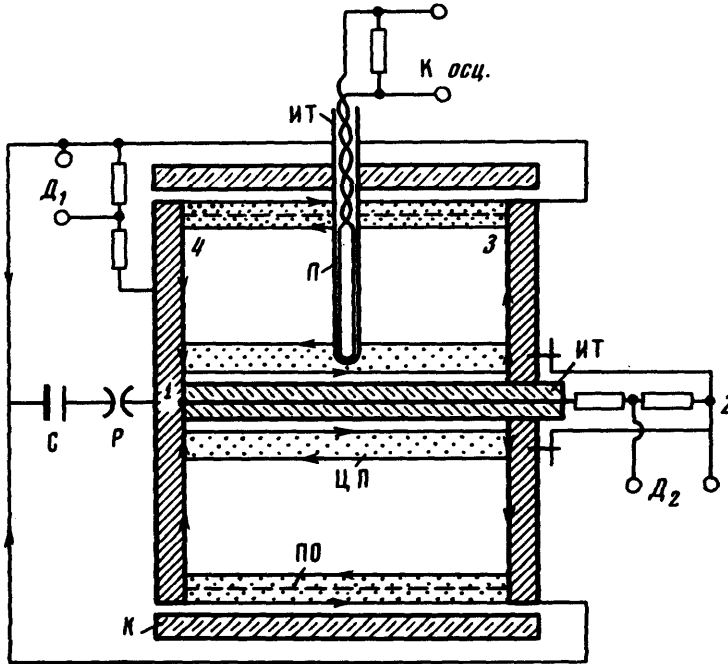


Рис. 2. Схема установки и расположение делителей  $D_1$ ,  $D_2$  и петли  $P$ :  $P$  – разрядник,  $ЦП$  – центральный пинч,  $ПО$  – пристеночная оболочка плазмы,  $ИТ$  – изолирующая трубка,  $К$  – стенка камеры. Стрелками обозначены направления токов. Пунктирная линия – линия нулевой плотности тока

Обращает на себя внимание различие сигналов от делителей напряжения  $D_1$  и  $D_2$  (рис. 2). В интервале времени от  $t = 0$  до  $t = t_{\text{особ}}$ , т. е. до кумуляции плазмы, эта разница связана с тем, что делитель  $D_2$  регистрирует лишь омическую составляющую полного напряжения, фиксируемого  $D_1$ . При  $t > t_{\text{особ}}$  делитель  $D_2$  регистрирует резкий сигнал, значительно превышающий сигнал с  $D_1$ . Его следует связать с повторным зажиганием разряда и образованием нового пристеночного слоя плазмы, экранирующего центральный пинч от приложенного напряжения. В процессе повторного зажигания под этим слоем формируется замкнутая токовая оболочка с заключенным в ней магнитным потоком пинча [4]. Поток полностью охватывается и контуром 1-2-3-4-1, что позволяет объяснить ход сигнала с  $D_2$  при  $t > t_{\text{особ}}$  изменениям и потока во времени. Контрольные измерения  $d\phi/dt$  с помощью петли  $P$  подтверждают это.

Быстрое уменьшение отключаемого от внешней цепи потока свидетельствует о большой мощности омических потерь, происходящих, в основном, в пристеночном слое холодной плазмы. Возникающая вследствие уменьшения  $\phi$  ЭДС индукции действует на участке источника магнитного поля, т. е. вдоль пинча. Величине ЭДС  $\sim 30$  кВ соответствует  $R \approx 2 \cdot 10^{-1}$  Ом. При этом за  $\Delta t = 0,3 + 0,5$  мксек диссипирует приблизительно четвертая часть ( $\sim 1$  кДж) магнитной энергии поля, заключенного в R-L-контуре.

Ускоренные вдоль оси пинча электроны (рис. 1, д) наблюдались во всех использованных нами газах. Их энергия соответствовала измененной величине ЭДС индукции. Наибольшая ЭДС зарегистрирована в дейтерии при  $P_0 = 10^{-1}$  мж рт. ст. Ее зависимость от рода газа качественно близка к найденной авторами работы [5], исследовавших энергии ускоренных электронов.

Наиболее эффективное ускорение частиц в осевой области пинча возможно лишь при одновременном наличии в ней достаточной степени разрежения плазмы и значительного электрического поля. Возникновение зоны разрежения обеспечивается отражением от оси сходящейся ударной волны [1, 6]. Оценки, основанные на предположении, что в канале разрежения ускоряются все частицы, приводят к разумным значениям плотности частиц в нем. Для выполнения второго условия необходимо, чтобы к моменту повторного зажигания разряда, соответствующего кумуляции плазмы, ток был локализован к оси пинча. Как известно [7], осевая локализация автоматически осуществляется при уменьшении тока в пинче (эффект "обратного скина"). Именно этот случай и реализуется в стадии "особенности". Последующая диссипация энергии магнитного поля поддерживает локализацию тока и после "особенности" <sup>1)</sup>.

Заметим, что кратковременное смещение тока к границе канала разрежения не устраняет ЭДС индукции в канале. В этом отношении имеется аналогия с линейным бетатроном. Различие заключается лишь в способе изменения потока. В рассмотренном случае изменение потока вызвано не внешним источником, а обусловлено диссипацией магнитной энергии в токовой оболочке, отключенной от внешней цепи.

Естественно полагать, что продольное магнитное поле окажет влияние на ускорение в той мере, в какой повлияет на сжатие плазмы и на наличие "особенностей".

Таким образом, предлагаемый механизм ускорения частиц объясняет основные черты наблюдаемого явления. Этот механизм может проявляться и в других импульсных разрядах, таких, например, как нецилиндрический пинч, плазменный фокус и т. д.

Благодарим Э.Ю. Хаутиева за обсуждение результатов работы.

Поступила в редакцию  
17 апреля 1972 г.

<sup>1)</sup> Эффект "обратного скина" вызывает появление на поверхности пинча тока обратного направления.

## Литература

- [ 1 ] Л.А.Арцимович. Управляемые термоядерные реакции М., Физматгиз, 1963.
  - [ 2 ] Н.А.Бодин, L.A.Reynolds. Engineering, 184, 538, 1957.
  - [ 3 ] L.C.Burkhardt, R.H.Lovberg. Nature, 181, 228, 1958.
  - [ 4 ] I.F.Kvartskhava, Yu. V.Matveev. Nuclear Fusion, 11, 385, 1971.
  - [ 5 ] B.G.Brezhnev, I.S.Maksimov. Proc. V Int. Conf. on Ioniz. Phenom. in Gases, 1962, 11, Amsterdam.
  - [ 6 ] Л.И.Седов. Методы подобия и размерности в механике, М.-Л., ГИТТЛ, 1951.
  - [ 7 ] I.F. Kvartskhava Yu. V.Matveev, E.Yu. Khautiev. Nuclear Fusion, 11, 349, 1971.
-