

ИЗМЕРЕНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛАЗМЕ

А.М. Жукешов

НИИЭТФ, Казахский национальный университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Проведено исследование плазмы в импульсных пушках, рассмотрены различные аспекты формирования и ускорения плазмы. Исследованы зависимости тока и напряжения в коаксиальном ускорителе КПУ-30 от давления и проведен анализ данных.

Импульсные плазменные ускорители используются для получения высокотемпературных плазменных потоков большой мощности. Такие потоки находят широкое применение в науке и технологии. Особый интерес представляет использование горячих плазменных потоков для обработки материалов. С экспериментальной стороны работа этих ускорителей достаточно подробно исследована [1-3], однако, до сих пор не существует единой теоретической модели, описывающей все многообразие процессов в них. В связи с этим, необходимо сравнение полученных в последнее время экспериментальных данных на соответствие существующим теоретическим моделям, описывающим динамику формирования плазменных сгустков и процесса ускорения.

В любой плазменной установке динамику процессов определяет конфигурация электромагнитных полей. При этом, происходящие в системе физические процессы должны выполняться на основе законов сохранения энергии. В коаксиальном импульсном плазменном ускорителе, схема которого показана на рис. 1а, существуют азимутальное магнитное и радиальное электрическое поля, которые осуществляют необходимый подвод энергии к ускоряемой плазме.

Для измерения высоких напряжений изготовлен комбинированный омический и емкостной делитель напряжения с коэффициентом деления 1:10000. Выбор данного типа делителя обоснован тем, что с его помощью можно измерять широкий по частоте интервал напряжений. Импульсы напряжения от делителя передавались с помощью экранированных коаксиальных кабелей с согласованными волновыми сопротивлениями к запоминающим осциллографам.

Для измерения токов применялся метод осциллографической регистрации с использованием пояса Роговского. Были разработаны несколько поясов: внешний для измерения разрядного тока и внутренний для непосредственного определения тока в плазменном потоке. Внешний пояс Роговского изготавливался как соленоид диаметром 4 мм и длиной 60 см, свернутый в виде тороида, количество витков 2450. Для исследования токов внутри ускорителя применяли пояс Роговского с количеством витков 528 и длиной 30 см.

Схема эксперимента показана на рисунке 1. Этот пояс также применяли для измерения плотности тока в плазме посредством изменения сечения тора. Пояс устанавливался на различном расстоянии от конца внешнего электрода внутри лайнера ускорителя. Для исследования структуры потока пояс устанавливался на различном расстоянии от торца внешнего электрода: 2-80 см через 2 и 5 см.

Таким образом, измеряется ток, проходящий через сечение кольца. В случае внешнего пояса этот ток соответствует разрядному току конденсаторов, а в случае внутреннего - току в плазме. Сигнал подавали без усиления на вход осциллографа по коаксиальному кабелю 50 Ом.

Основная часть работы была выполнена на установке КПУ-30 с холодными протяженными медными электродами.

Перед каждым разрядом камера откачивалась до давления 0,133 Па (10^{-3} Торр). После этого, в зависимости от задачи, давление в камере поднималось до значений в диапазоне 0,05-5 Торр. Такой метод позволяет устанавливать одинаковое начальное давление перед

каждым выстрелом. Для регистрации тока использовался осциллограф UT3200. Типичные осциллограммы тока при давлениях 0,1 и 0,05 Торр приведены на рисунке 2.

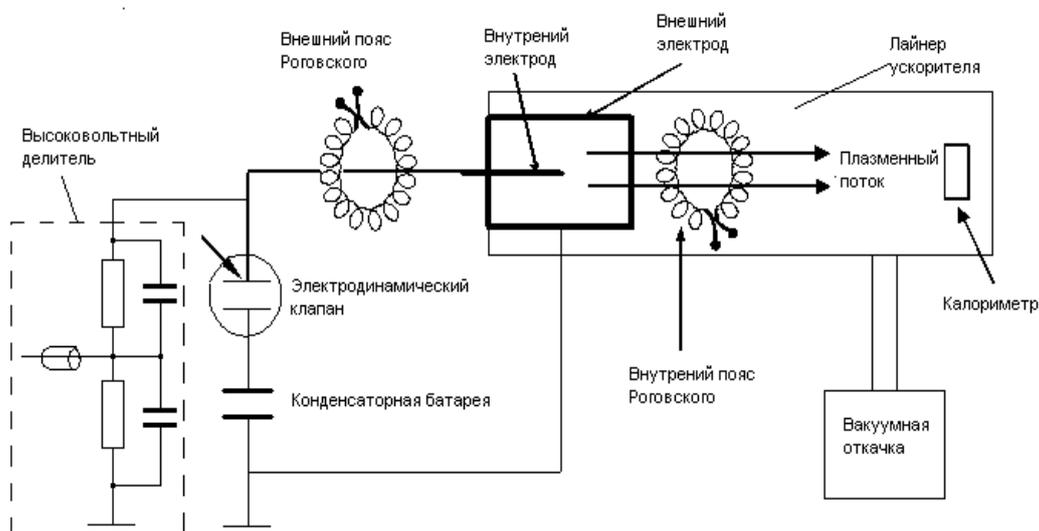
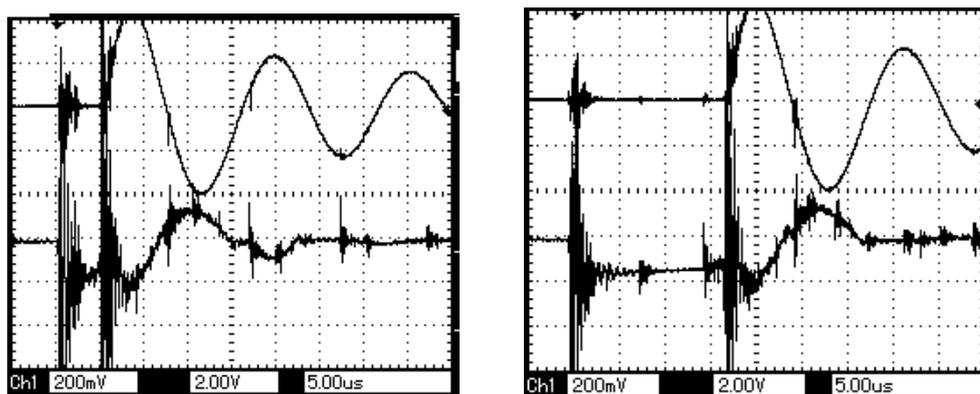


Рис. 1. Схема эксперимента по исследованию структуры плазменного потока

Как видно из рисунков, разряд тока в ускорителе представляет собой аperiодический затухающий сигнал. Количество полупериодов практически не зависит от начального давления в камере. Это свидетельствует о том, что период разряда определяется индуктивностью коаксиальных электродов. Период тока слабо возрастает на 1-2 мкс, амплитуда тока падает по экспоненте с декрементом $\sim 10^5$. Амплитуда тока варьируется в пределах 300-450 кА. Наличие быстро затухающих осцилляций в начале развертки можно объяснить отражением сигнала от концов кабеля, что характерно для таких измерений.

На рисунке 2 показаны также осциллограммы напряжения при различных давлениях. Обращает на себя внимание следующие особенности этих кривых. Во-первых, линия напряжения сильно изрезана, что обусловлено импульсными помехами. На кривых тока в начальный момент времени также можно заметить наличие быстрых осцилляций, но так как пояс Роговского обладает большой собственной индуктивностью, изрезанность проявляется не так заметно. Кроме этого, видно, что ток в начале разряда растет очень быстро, достигая значения 500 кА (рисунок 3, нижний график) за время 3 мкс. В этом случае скорость нарастания тока составит $1,7 \cdot 10^{11}$ А/с. Во-вторых, напряжение в первой четверти разряда становится больше прилагаемого, а затем падает. Такое поведение связано, по-видимому, с эффектом, описываемым в литературе как аномальное сопротивление плазмы в начальный момент разряда [4]. В этом случае, общее сопротивление плазмы преобладает над его омическим сопротивлением. В результате, напряжение на разрядном промежутке увеличивается.

Основной характеристикой ускорителя является его вольтамперная характеристика. Для построения ВАХ получена зависимость разрядного тока от напряжения. Экспериментальные данные по ускорителю КПУ-30 при использовании сплошного режима его работы приведены на рисунке 3. Как видно, вольтамперные характеристики разряда в диапазоне токов 150-500 кА остаются практически линейными при любых давлениях, что свидетельствует об отсутствии эффекта скольжения тока в данном ускорителе.



Давление в камере слева $-0,1$ Торр, справа- $0,05$ Торр.

Рис. 2. Осциллограммы тока (вверху) и напряжения (внизу) при 15 кВ.

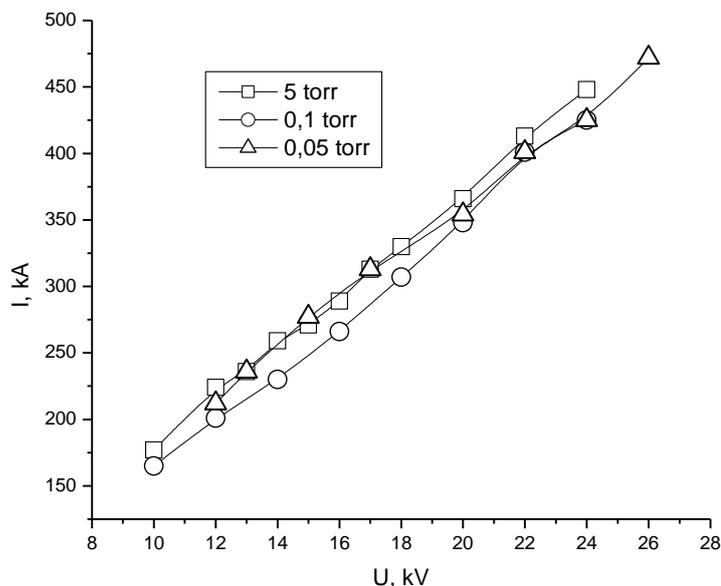


Рис. 3. ВАХ ускорителя КПУ-30 при трех разных давлениях

Далее были получены зависимости разрядного тока от давления. Результат представлен на рисунке 4. Данные по току получены при постоянном напряжении 20 кВ. Кривая имеет пологий максимум в районе $0,2$ Торр. Следует отметить, что были проведены исследования в очень широком диапазоне давлений – от 100 до $4 \cdot 10^{-2}$ Торр. Если со стороны меньших давлений существует определенный порог, соответствующий $(4 \cdot 10^{-2})$ Торр, то со стороны высоких давлений такого порога не наблюдается.

Небольшое изменение наблюдается только при изменении давления на три порядка. Наличие пологого максимума в широкой области давлений $10^{-2} - 10$ Торр объясняется известным законом Пашена, в соответствии с которым, для любого газа, сосредоточенного между двумя электродами, существует минимальное напряжение пробоя, определяемое кинетическими процессами в газе. В нашем случае, минимальное напряжение пробоя наблюдается при $0,2$ Торр. Это и есть оптимальное давление при использовании ускорителя

в сплошном режиме, когда реализуется максимальный разрядный ток, а значит и выталкивающая сила Ампера. Независимость тока от давления соответствует расчетам по формуле Спитцера, так как в плазме ток определяется не плотностью частиц, а степенью ионизации газа [5].

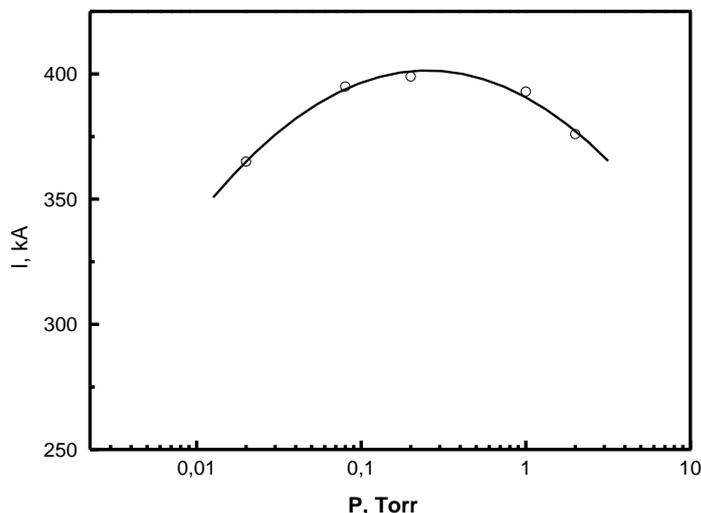


Рис. 4. Зависимость разрядного тока от начального давления

Гармонический характер зависимости тока от времени определяется превращением электрической энергии конденсаторной батареи в энергию магнитного поля, ускоряющего плазменную перемычку, а затухание - диссипацией энергии на омический нагрев плазмы и потери в разрядном контуре. Ход напряжения почти в противофазе с током, что говорит о преимущественно индуктивном характере разрядного контура. Величина периода практически не изменяется, и процесс формирования сгустков каждый раз повторяется, но при меньшей энергии конденсаторной батареи.

Таким образом, ускоритель КПУ работает в режиме действия выталкивающей магнитной силы Ампера. Однако достаточно слабое затухание тока свидетельствует, что процесс перекачки электромагнитной энергии в кинетику сгустка не достаточно эффективен и формируется несколько сгустков. Каждый сгусток, похоже, забирает лишь небольшую часть энергии поля, в основном она сохраняется в контуре и участвует в формировании следующего сгустка. Всего таких сгустков образуется пять-шесть.

Кроме этого, ряд эффектов, таких как наличие перенапряжения в начальной стадии процесса, независимость тока от давления и др. требуют более тщательных измерений и выяснения причин такого поведения.

Литература

1. Marshall J., Henius I. //Nuclear Fusion. Suppl. 1960. - P.449.
2. Плазменные ускорители. Под ред. Л.А.Арцимовича. - М.: Машиностроение. 1973, 312 с.
3. Физика и применение плазменных ускорителей. – Минск: Наука и техника, 1974.
4. Баимбетов Ф.Б., Жукешов А.М., Амренова А.У. Измерение импульсных токов и напряжений и оценка эффективности ускорения плазмы в коаксиальном ускорителе КазНУ //Известия НАН РК. Серия физико-математическая. -2005. -№4. - С.180-183.
5. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. – М.: Физматлит, 2006. - Гл.1. - С.79-80.

ПЛАЗМАДАҒЫ ИМПУЛЬСТІК ТОҚТАР МЕН КЕРНЕУЛЕРДІ ӨЛШЕУ

Ә.М. Жүкешов

Импульстік үдеткіштердегі плазманың үдеу және қалыптасуының әртүрлі аспектілерін сипаттайтын эксперименттік нәтижелер алынған. КПУ-30 коаксиалды үдеткішке тоқ және кернеудің қысымға тәуелдігі зерттеліп, сараптама жасалынған.

MEASUREMENT OF PULSED CURRENT AND VOLTAGE IN PLASMA

A.M. Zhukeshov

The discuss of various aspects of formation and acceleration of plasma streams in pulse guns is carried out on the basis of experimental dates. The depend of current and voltage from pressure in coaxial accelerator KPU-30 is researched.