

03

Экспериментальное исследование отклонения вектора тяги плазменного ускорителя

© А.И. Бугрова, Г.Э. Бугров, А.М. Бишаев, А.В. Десятков,
М.В. Козинцева, А.С. Липатов, В.К. Харчевников, П.Г. Смирнов

Московский государственный технический университет радиотехники,
электроники и автоматики, Москва
E-mail: kozintseva@mirea.ru

Поступило в Редакцию 3 октября 2013 г.

Проведены экспериментальные исследования по отклонению вектора тяги плазменного ускорителя с помощью отклоняющей магнитной системы, расположенной за срезом ускорителя. Магнитное поле системы воздействовало на направленное движение ионов струи. Измерения, выполненные на лабораторной модели стационарного плазменного двигателя (СПД) α -100 с диаметром выходного канала 100 мм и габаритными размерами $L = 70$ мм и $D = 200$ мм, показали, что в исследованном диапазоне изменения параметров зависимость угла поворота выходящего из модели плазменного потока от величины тока в витках отклоняющей магнитной системы близка к линейной.

Экспериментальные исследования по отклонению струи плазменного ускорителя с помощью магнитного поля были выполнены на разработанной в МГТУ МИРЭА лабораторной модели СПД α -100 [1] с габаритными размерами $L = 70$ мм и $D = 200$ мм. Модели класса α относятся к семейству ускорителей АТОН [2], однако в них аналогичная с АТОНом конфигурация силовых линий магнитного поля достигается с помощью двух катушек намагничивания (запитываемых от автономных источников питания) при наличии шести полюсов магнитопровода [3]. При проведении измерений модель работала в следующем режиме: расход ксенона через анод составлял $\dot{m}_a = 4.5$ мг/с, разрядное напряжение было равно $U_d = 300$ В, расход ксенона через катод $\dot{m}_{cathode} = 0.4$ мг/с. Токи в намагничивающих катушках, соответствующие минимуму разрядного тока, обеспечивали работу модели в режиме с выходящей струей в форме цилиндра, когда расходимость потока минимальна.

Эксперименты проводились на вакуумном стенде МГТУ МИРЭА. Вакуумная камера стенда имеет диаметр 1 м, длину 3 м и оснащена четырьмя форвакуумными насосами марки НВЗ-20 и четырьмя диффузионными насосами НВДМ-400 с производительностью 7000 л/с каждый. Система откачки обеспечивала начальный вакуум $1 \cdot 10^{-5}$ ммНг и динамический вакуум $2.4 \cdot 10^{-4}$ ммНг (по воздуху) для расхода ксенона 4.5 мг/с. Тяга измерялась с помощью крутильных весов с лазерным указателем, относительная погрешность которых не превышала 3%.

Согласно измерениям локальных параметров плазмы в струе плазменного ускорителя, выполненным для различных моделей ускорителей [2,4], при разрядном напряжении 300 В средняя температура электронов в струе от среза модели до расстояний порядка нескольких калибров от среза находится на уровне 5 эВ (либо незначительно превышает это значение), потому для проведения оценок среднюю температуру электронов в струе можно принять равной 5 эВ. При данной температуре средняя тепловая скорость электронов равна $1.3 \cdot 10^6$ м/с, в то время как средняя скорость направленного движения ионов ксенона в струе при данном разрядном напряжении равна¹ $1.9 \cdot 10^4$ м/с, поэтому направленным движением электронов, „увлекаемых“ ионами в силу квазинейтральности, можно пренебречь и рассматривать струю как направленный поток ионов, движущийся в электронном облаке. Это позволяет использовать для поворота плазменной струи воздействие магнитного поля на направленное движение ионов. Хотя истечение струи из канала плазменного ускорителя представляет собой сложное физическое явление, рассмотрению которого посвящено много экспериментальных и теоретических работ [4], такое упрощенное представление о струе оказалось оправданным, так как позволило, как мы увидим в дальнейшем, сделать правильные оценки и добиться, в соответствии с ними, поворота вектора тяги на 5° .

Если однократно заряженный ион ксенона влетает с начальной скоростью V_0 в область однородного магнитного поля протяженностью l перпендикулярно вектору магнитной индукции \mathbf{B} , то после прохождения области вектор скорости испытывает поворот на угол α , причем

$$\sin \alpha = \frac{l}{R}.$$

¹ $\langle V \rangle = \sqrt{\frac{2e(U_d - \Delta U)}{m}}$, где U_d — разрядное напряжение, m — масса иона, e — элементарный заряд, а член ΔU учитывает потери на ионизацию.

Здесь R — радиус окружности, по которой движется ион в магнитном поле:

$$R = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2m(U_d - \Delta U)}{e}},$$

где U_d — разрядное напряжение, m — масса иона, e — элементарный заряд, а член ΔU учитывает потери на ионизацию. Для выполнения оценок в нашем случае $\Delta U = 50$ В (т.е. составляет несколько потенциалов ионизации ксенона). Задавая угол отклонения α и исходя из необходимых значений длины области, можно получить оценку для величины магнитного поля. Для $U_d = 300$ В область протяженностью 14 см обеспечивает поворот на 5° потока однократно заряженных ионов ксенона при $B = 0.016$ Т.

Отклоняющая магнитная система крепилась на корпусе ускорителя. Ось ускорителя была горизонтальна, а поворот вектора тяги в горизонтальной плоскости вправо и влево от первоначального направления обеспечивался вертикальной компонентой магнитного поля отклоняющей системы. Определенное экспериментально направление вертикальной компоненты и направление поворота вектора тяги позволили доказать, что поворот испытывают именно ионы плазменной струи ускорителя под действием силы Лоренца.

Параметры отклоняющей системы (ее протяженность, форма и размеры магнитных катушек, число ампер-витков в них, расположение по отношению к модели) подбирались и рассчитывались в соответствии с размерами плазменного источника и параметрами выходящего из него потока плазмы. Многочисленные эксперименты и наблюдения показывают, что выходящий из ускорителя плазменный поток является наиболее сформированным на расстоянии 1–2 калибров от источника, поэтому протяженность области „однородного“ магнитного поля l должна быть порядка калибра ускорителя (что составляет 100 мм для модели α -100).

Распределение относительной величины вертикальной компоненты магнитного поля вдоль оси ускорителя для использованной в эксперименте отклоняющей системы показано на рис. 1. Из приведенного распределения видно, что создаваемое отклоняющей системой магнитное поле имеет в центральной части необходимую для поворота вектора тяги область длиной 100 мм, на протяжении которой поле спадает на 20%. В то же время в областях, удаленных от центрального сечения отклоняющей системы на 100 мм и более (калибр α -100), поле

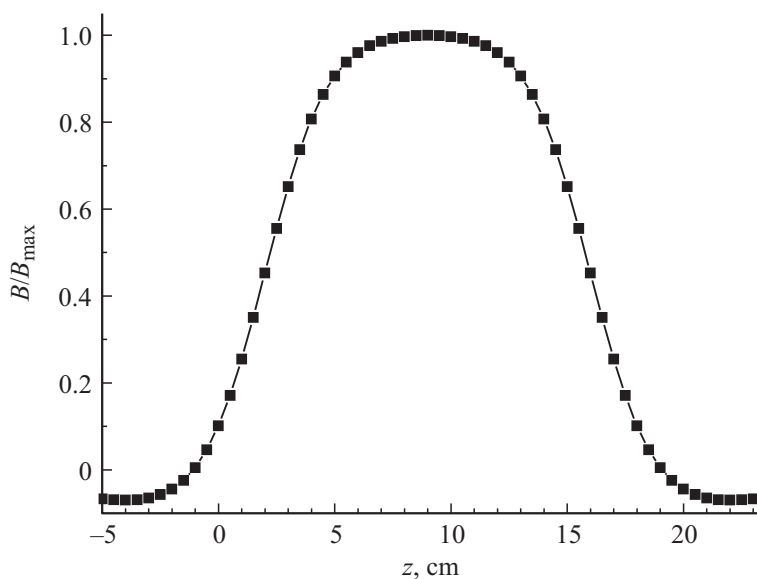


Рис. 1. Распределение относительной величины вертикальной компоненты магнитного поля вдоль оси ускорителя в зависимости от расстояния до его среза для использованной в эксперименте отклоняющей системы.

спадает на порядок, обеспечивая минимум воздействия на выходную зону ускорителя и соответственно на режим его работы. При токе 10 А в витках отклоняющей магнитной системы максимальное значение вертикальной компоненты равно 0.02 Т.

Для определения направления вектора тяги использовались зондовые измерения. Принимающая поверхность электрического зонда площадью 5 mm^2 была ориентирована перпендикулярно плазменному потоку, вытекающему из ускорителя. Зонд работал в режиме насыщения по ионному току. Зонд располагался на координатном устройстве и перемещался в горизонтальной плоскости перпендикулярно оси ускорителя.

Рис. 2 поясняет сущность проведения измерений угла отклонения плазменного потока по радиальному распределению ионного тока на зонд. Из рисунка видно, что для измерения угла отклонения α плаз-

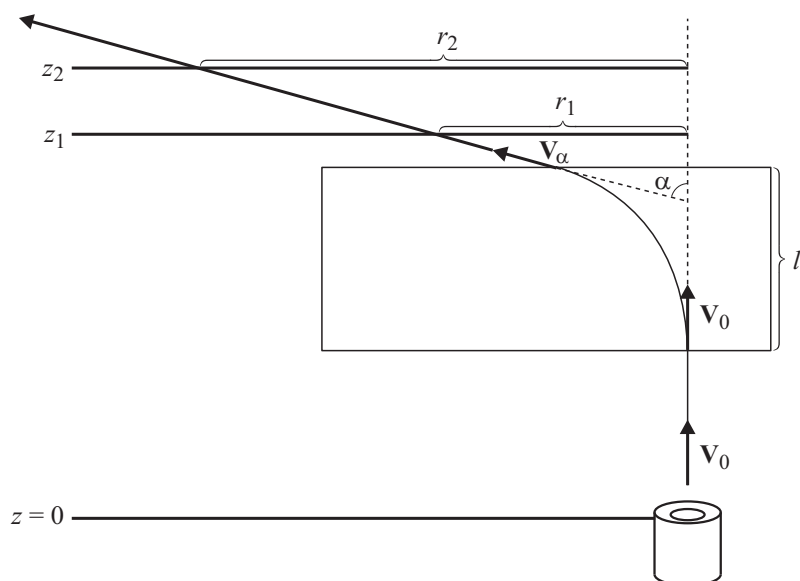


Рис. 2. Измерение угла отклонения плазменного потока после прохождения отклоняющей области протяженностью l .

менного потока ускорителя после прохождения отклоняющей поток области протяженностью l нужно измерить координаты r_1 и r_2 максимальных значений ионного тока на зонд на расстояниях z_1 и z_2 от среза источника соответственно.

В данных экспериментах измерения проводились на расстояниях $z_1 = 32$ см и $z_2 = 40$ см от среза модели в соответствии с протяженностью отклоняющей поток области.

На рис. 3 приводится зависимость угла поворота, выходящего из модели плазменного потока (иными словами, вектора тяги), от величины тока в витках отклоняющей магнитной системы. Из рисунка видно, что в данном диапазоне изменения параметров эта зависимость близка к линейной. Интегральные параметры ускорителя, измеренные для различных значений тока в витках отклоняющей системы, сведены в таблицу. В таблице приняты следующие обозначения: I_d — разрядный ток; I_1 и I_2 — токи в 1-й и 2-й намагничивающих катушках соответ-

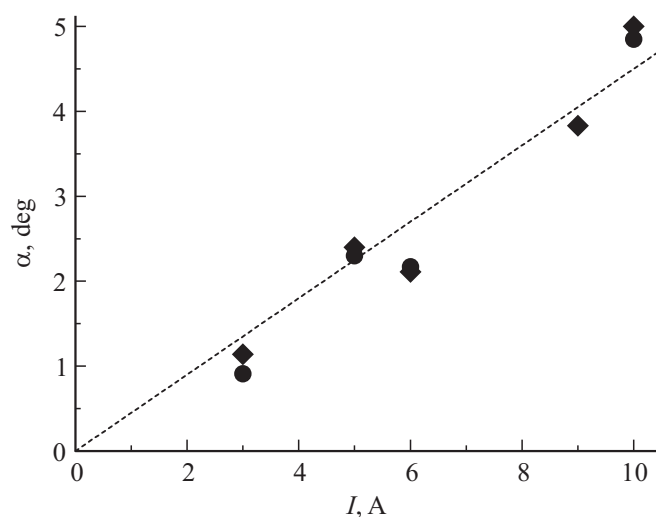


Рис. 3. Зависимость угла отклонения вектора тяги от тока в витках отклоняющей системы. Ромбы и кружки соответствуют разным направлениям тока в витках отклоняющей системы и соответственно противоположным углам отклонения вектора тяги.

Интегральные параметры модели α -100 при различных токах в витках отклоняющей магнитной системы

Ток в витках отклоняющей системы, А	\dot{m}_a , mg/s	U_d , V	I_d , А	I_1 , А	I_2 , А	F , mN
0	4.5	300	4.45	2.7	4.45	80.9
3	4.5	300	4.45	2.7	4.45	80.4
6	4.5	300	4.47	2.7	4.45	80.0
10	4.5	300	4.49	2.7	4.45	78.5

ственно; F — тяга, развиваемая ускорителем. Как следует из таблицы, при токе 10А в витках отклоняющей системы, когда обеспечивается поворот вектора тяги в 5° : 1) конфигурация магнитного поля в канале модели остается неизменной вследствие неизменности токов I_1 и I_2 в намагничивающих катушках; 2) увеличение разрядного тока

составляет менее процента от его величины в номинальном режиме; 3) уменьшение тяги составляет 3% от ее значения в номинальном режиме. Поворот вектора тяги на 5° без изменения его величины по модулю изменил бы значение проекции, измеряемое весами, до 80,6 mN. Наблюдаемое уменьшение тяги до 78,5 mN может быть вызвано уходом модели из оптимального режима, однако лежит в пределах погрешности измерения тяги.

Таким образом, экспериментально показана возможность управления вектором тяги плазменного ускорителя с помощью дополнительного магнитного поля.

Исследование выполнено при частичной поддержке ОКБ ФАКЕЛ и Министерства образования и науки РФ, соглашения № 14.В37.21.1840, соглашения № 14.В37.21.1291.

Список литературы

- [1] Бугрова А.И., Десятков А.В., Козинцева М.В., Липатов А.С., Сигов А.С., Смирнов П.Г. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. В. 23. С. 85–90.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Десятков А.В. и др. // Физика плазмы. 1997. Т. 23. В. 7. С. 635–645.
- [3] Бугрова А.И., Морозов А.И., Козинцева М.В. и др. Плазменный ускоритель с замкнутым дрейфом электронов: Патент РФ № 2139647. 1998.
- [4] Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Изд-во МАИ, 2012. С. 100–128.