

ГЕНЕРАЦИЯ МГД-ВОЛН ИСТОЧНИКОМ ВОЗМУЩЕНИЯ ИНДУКЦИОННОГО ТИПА В СТОЛБЕ ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЫ ДЛИНОЙ 6 М НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОМ СТЕНДЕ

GENERATION OF MHD-WAVES BY PERTURBATION RESOURCE OF INDUCTIVE TYPE IN THE COLUMN OF MAGNETIZED PLASMA OF 6 M LENGTH ON THE EXPERIMENTAL BENCH

*А. Б. Буянов, С. В. Воеводин, В. С. Корчилов, А. В. Лимонов, Р. В. Нечайкин, А. В. Перминов,
А. А. Тренькин, П. А. Цицилин, В. А. Чернышов*

*A. B. Buyanov, S. V. Voevodin, V. S. Korchikov, A. V. Limonov, R. V. Nechaikin, A. V. Perminov,
A. A. Trenkin, P. A. Tsitsilin, V. A. Chernishov*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» г. Саров Нижегородской обл.

Russian Federal Nuclear Center –All-Russia Scientific Research Institute of Experimental Physics

В камере моделирования экспериментального стенда диаметром 1 м и длиной 7,5 м, в гелиевой среде при давлении $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Тор в осесимметричном магнитном поле индукцией 0,1 Тл сформирован столб фоновой плазмы длиной 6 м и апертурой 10×10 см². Плотность ионов плазмы определялась методом двойного электрического зонда и составила величину $5 \cdot 10^{11} \dots 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³. Проведены эксперименты по отработке методов генерации и средств измерений параметров МГД-волн в замагниченной плазме. Для генерации волн разработан источник возмущения на основе RLC-контура, состоящий из магнитной антенны и импульсного источника сигнала. Регистрация колебаний магнитного поля волны проводилась системой магнитных зондов. Фазовая скорость волны составила величину $\approx 10^8$ см/с. Полученные экспериментальные данные используются для калибровки методик расчета распространения МГД-импульса.

The column of a background plasma of 6 m length and aperture of 10×10 cm² is created on the experimental bench in the modelling chamber of 1 m diameter and 7.5 m length, in the helium medium at the pressure of $10^{-4} \dots 10^{-3}$ Tor, in the axisymmetric magnetic field of 0.1 T induction. The ions density of the plasma column was defined by the method of a double electric probe and created the value of $5 \cdot 10^{11} \dots 2 \cdot 10^{12}$ cm⁻³. The experiments of the adjustment of the generation methods and instrumentation of MHD waves parameters in the magnetized plasma were carried out. The perturbation resource based on the RLC-circuit was developed; it consists of a magnetic antenna and pulsed signal resource. The oscillation of the wave magnetic field was recorded by the system of magnetic probes. The phase velocity of the wave was $\approx 10^8$ cm/s. The obtained experimental data was used for the calibration of calculation methods of MHD-pulse propagation.

Введение

В ряде задач лабораторного моделирования нестационарных физических процессов в космосе и околоземном космическом пространстве требуется формирование фоновой замагниченной плазмы плотностью $10^9 - 10^{12}$ см⁻³ в инертных газах при давлениях $10^{-4} - 10^{-5}$ Тор [1]. Для удовлетворения условиям подобия натуральных и лабораторных процессов немаловажным требованием является также обеспечение относительно больших простран-

ственных размеров фоновой плазмы [1, 2]. Проведение экспериментального моделирования необходимо, в том числе для тестирования соответствующих физико-математических моделей и повышения достоверности получаемых с их помощью расчетных данных.

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создан лабораторный стенд, позволяющий проводить моделирование физических процессов в околоземном космическом пространстве. На стенде магнитоактивная плазма создается в вакуумной камере моделирова-

ния объемом $\approx 6 \text{ м}^3$ вдоль внешнего магнитного поля B_0 . Для создания плазмы используется термоэмиссионный дуговой разряд низкого давления, формируемый между термокатодом и сетчатым анодом. В таких условиях для среды гелия возможна реализация следующих параметров плазмы: концентрация электронов от 10^9 до $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, электронная температура от 0,05 до 10 эВ, ионная температура около 1 эВ [3]. Данные параметры обеспечивают условия для моделирования процессов генерации и распространения МГД-волн, возбуждаемых источниками разного типа: электрическая и магнитная антенна, лазерная плазма, электронный и ионный пучок и т. п. [4].

В настоящей работе представлены постановка и результаты лабораторного исследования генерации и распространения МГД-волн источником возмущения индукционного типа в столбе замагниченной плазмы длиной 6 м.

Описание экспериментального стенда

Стенд включает в себя [5]: камеру моделирования, систему вакуумирования и газонапуска, систему формирования фоновой плазмы, систему формирования фонового магнитного поля, автоматизированную систему управления и средства диагностики (рис. 1).

Камера моделирования представляет собой секционированную цилиндрическую трубу из нержавеющей стали. На торцах камеры находятся вакуумно-плотные двери, обеспечивающие доступ к внутренним элементам камеры. Камера имеет окна для подключения элементов системы газонапуска, средств диагностики и визуального наблюдения. Общая длина камеры моделирования составляет 7,5 м, внутренний диаметр – 1 м.

Вакуумная система стенда разработана на основе передовых технологий вакуумирования с применением безмасляных насосов и современной вакуумной арматуры, и обеспечивает остаточное давление в камере моделирования при постоянной откачке до $4 \cdot 10^{-7}$ Тор. Система газонапуска обеспечивает напуск и поддержание заданного давления газа.

Квазистационарное магнитное поле формируется сегментированным соленоидом. Камера моделирования находится внутри соленоида соосно с ним. Ток в соленоидах обеспечивается модульным источником питания, собранным на основе стартерных аккумуляторов. Источник питания генерирует напряжение 0...800 В и ток до 500 А в импульсах секундного диапазона длительности. Максимальная величина индукции магнитного

поля на оси вакуумной камеры стенда составляет 0,3 Тл.

Автоматизированная система управления позволяет дистанционно осуществлять: контроль и запуск оборудования, управление системой формирования магнитного поля, управление системами откачки и газонапуска, управление и сбор данных с измерительных приборов.

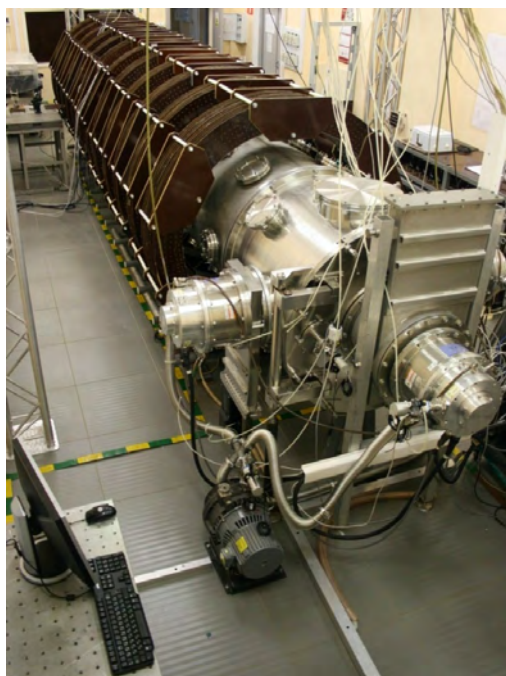


Рис. 1. Фотография стенда

В качестве источника первичных электронов при формировании плазменного столба в камере моделирования используются специально разработанные металлооксидные термокатоды.

Средства диагностики применяются для измерения основных электрических характеристик разряда и пространственно-временного распределения электронной плотности в фоновой плазме. Для определения концентрации электронов используется метод двойного электрического зонда. При этом в течение всей длительности разряда на электроды зонда подается импульс пилообразного напряжения, что позволяет определять концентрацию в любой момент времени.

Постановка эксперимента

Для проведения экспериментов по генерации и распространению МГД-волн в фоновой плазме стенда разработан генератор сигналов напряжения с возможностью формирования, как однократного однополярного импульса тока, так и синусоидаль-

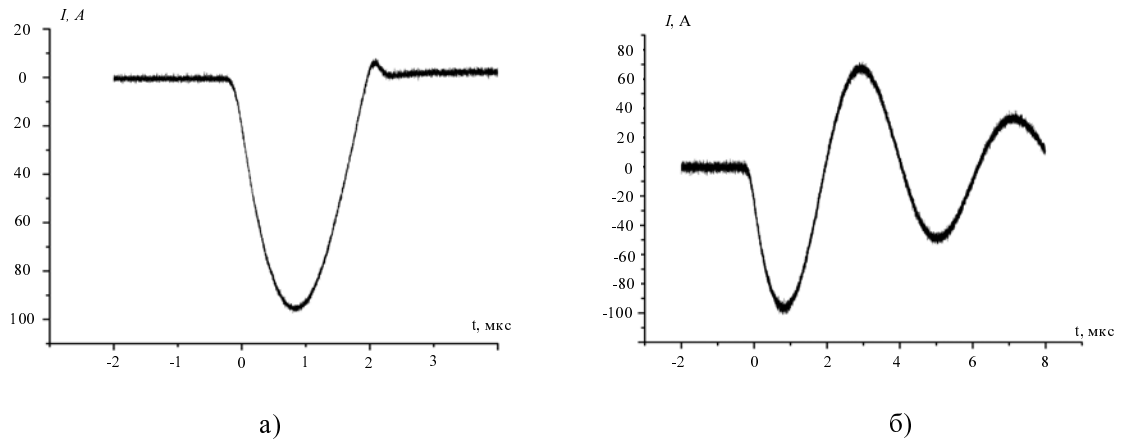


Рис. 2. Осциллограмма тока в магнитной антенне в режиме однократного а) и затухающего б) колебаний

ного затухающего колебания. Генератор отвязан от внешних электрических цепей, что обеспечивает снижение влияния помех на результаты измерений. Генератор реализован на основе схемы RLC-контура, состоящей из силовой части, подводящей линии и магнитной антенны индукционного типа. Силовая часть состоит из мощного полупроводникового ключа на IGBT модуле и накопительной емкости. Режим и частота формируемого сигнала (рис. 2) определяется электрической конфигурацией сменной платы. На осциллограммах представлен результат работы генератора при выходном напряжении 760 В на эквивалентную нагрузку со следующими параметрами: $L_3 = 4,1$ мкГн, $R_3 = 0,23$ Ом.

Подводящая линия состояла из витой пары ≈ 1 м внутри вакуумной камеры и коаксиального кабеля ≈ 1 м от корпуса камеры до генератора.

Магнитная антенна представляет собой кольцо из поликапролактама с внутренним диаметром 3,1 см, на котором в три ряда намотано девять витков медного провода диаметром 0,8 мм.

Регистрация колебаний магнитного поля в плазменном столбе осуществлялась пятью магнитными зондами (МЗ). Отдельный зонд состоит из индукционного датчика (ИД), стеклянного капилляра-держателя и усилителя. Индукционный датчик состоит из двух обмоток. Провода обмоток свиты в витую пару и намотаны на кубический фторопластовый каркас со стороной 2,5 мм. В одной обмотке находятся четыре витка медного провода диаметром 100 мкм. Каркас с обмотками залит тонким слоем эпоксидной смолы. Датчики калиброваны в магнитном поле, образованном катушкой Гельмгольца диаметром 5 см.

Сигнал с датчика передается на вход усилителя посредством коаксиального кабеля. Усилитель

выполнен по дифференциальной схеме на трех широкополосных ВЧ операционных усилителях [6]. Коэффициент усиления $k = 100$. Использование дифференциальной схемы позволяет избавиться от плазменных электростатических шумов [7]. С усилителей сигналы передаются на входы осциллографа с полосой пропускания 500 МГц.

Для создания магнитоактивной плазмы применялся плоский оксидный термокатод (ТК) с площадью эмиссионной поверхности 10×10 см². Разряд зажигался в гелии при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Тор. Длительность разрядного импульса 40 мс. Фоновое магнитное поле $\approx 0,1$ мТл. Размеры плазменной области: длина ≈ 600 см, диаметр ≈ 10 см. Для измерения концентрации электронов в области формирования МГД-волны в плазме устанавливались два двойных электрических зонда, размещенных на оси камеры на расстоянии 250 см и 500 см от ТК (рис. 3). Концентрация электронов составила величину $2 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и $5 \cdot 10^{11}$ см⁻³ соответственно.

Магнитная антенна, крепилась к стеклянной трубке-держателю и устанавливалась вертикально на оси вакуумной камеры на расстоянии 430 см от ТК (рис. 3). Нормаль к плоскости антенны направлена перпендикулярно фоновому магнитному полю. Индукционные датчики располагались на оси камеры на расстояниях 50, 77, 104, 155, 207 см от магнитной антенны в положительном направлении оси z' и были ориентированы на регистрацию поперечных колебаний магнитного поля по оси x' .

Результаты и их обсуждение

Эксперименты по регистрации параметров МГД-волны в замагниченной плазме проводились в двух постановках. В первом случае за 100 мкс до

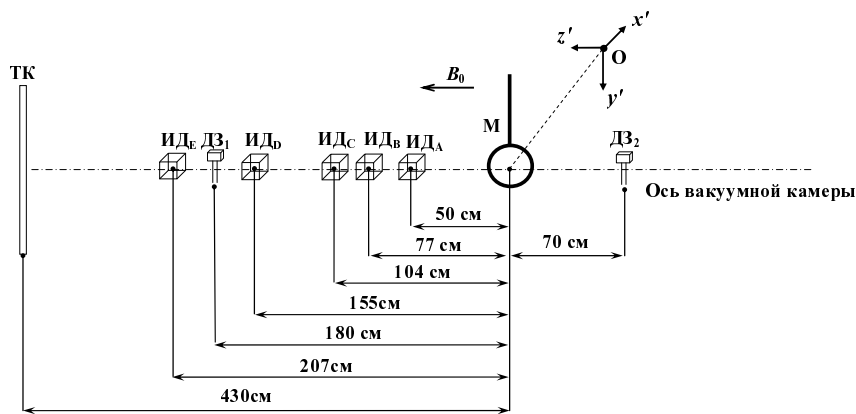


Рис. 3. Взаимное расположение индукционных датчиков (ИД), двойных электрических зондов (ДЗ), магнитной антенны (М) и термокатада (ТК)

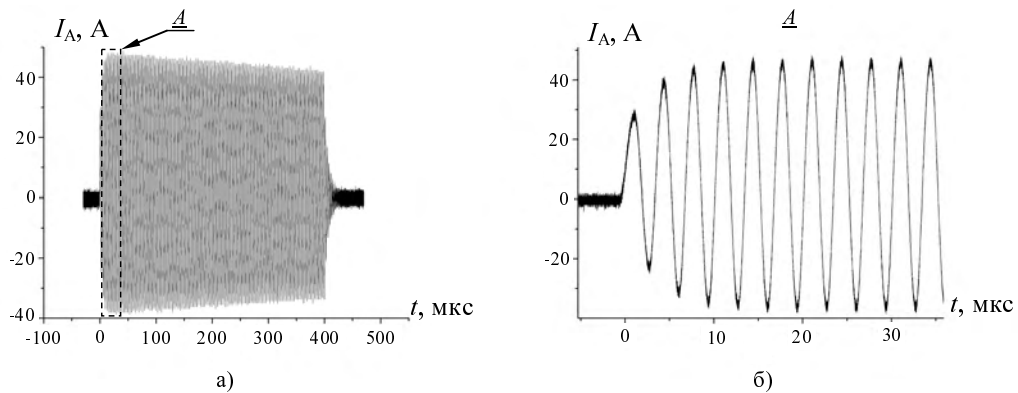


Рис. 4. Осциллограмма тока в магнитной антенне при подаче пакета импульсов а) и участок в увеличенном масштабе б)

конца разрядного импульса, формирующего фоновую плазму, на магнитную антенну подавался пакет (120 шт., длительность ≈ 400 мкс) гармонических импульсов с частотой 300 кГц (рис. 3) и амплитудой 40 А.

Импульсы подавались таким образом, что часть из них (≈ 30 шт.) оказывалась в разрядной фазе, остальные – после его прекращения (в фазе послесвечения). Ток разряда при этом равнялся ≈ 190 А. На рис. 5 приведены результаты измерений магнитного поля МГД-волны через 65 мкс после начала возмущения и через 125 мкс после выключения тока разряда.

Следующие эксперименты по генерации МГД-волны, проводились при однократном однополярном квазигармоническом импульсе тока в магнитной антенне (рис. 2,а), амплитудой ≈ 60 А.

Опыты проводились при двух величинах разрядного тока 150 А и 250 А. Зарегистрированные магнитными зондами сигналы приведены на рис. 6.

Из соответствующих осциллограмм, по временной задержке сигнала, регистрируемого индукционными датчиками при периодическом и однократном возмущении, определена продольная фазовая скорость волны. Среднее значение которой составило $\approx 1 \cdot 10^8$ см/с. По величине фазовой скорости измеренной между точками расположения ИД_В и ИД_Е оценена плотность электронов фоновой плазмы в промежутке, соответствующем месту расположения зонда ДЗ₁ (рис. 3). Значение электронной концентрации составило величину $\approx 10^{12}$ см⁻³, что хорошо согласуется с результатами зондовых измерений.

На рис. 7 для сравнения представлены амплитудные значения магнитного поля МГД-волны для периодического и однократного режимов работы генератора при разных разрядных токах.

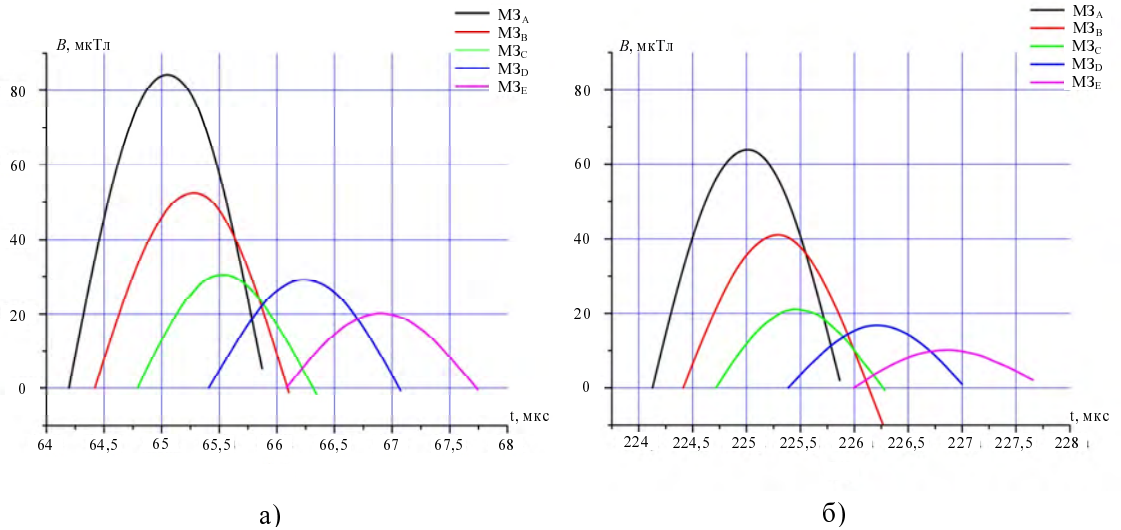


Рис. 5. Магнитное поле МГД-волны через 65 мкс после начала возмущения а) и через 125 мкс после выключения тока разряда б)

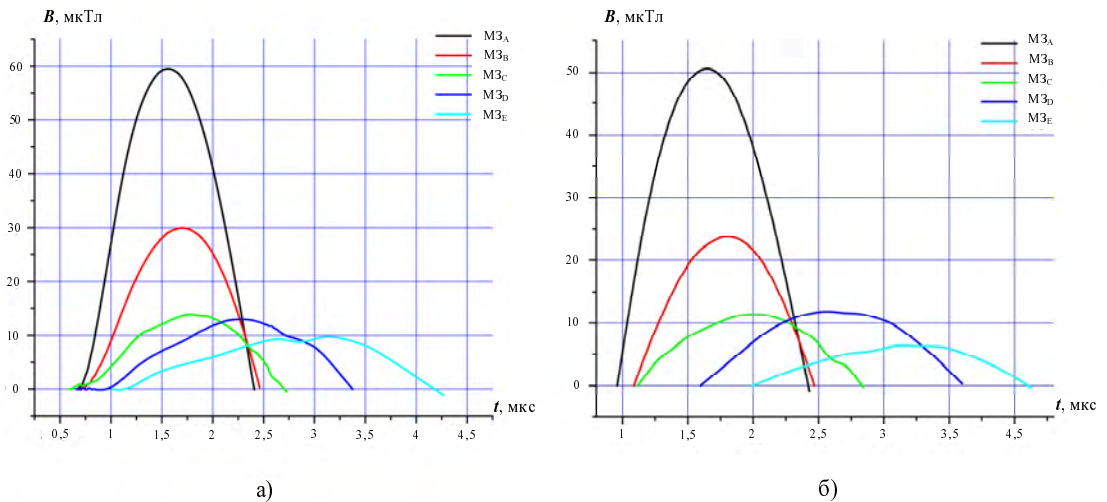


Рис. 6. Магнитное поле МГД-волны при однократном импульсе возмущения и разрядном токе 150А а) и 250А б)

Видно, что при разных режимах работы магнитной антенны и разных параметрах плазмы прослеживается подобие в характере затухания МГД-волны.

Из обработанных сигналов с магнитных зондов вычислена экспериментальная длина затухания волны δ_3 . Согласно [8], δ_3 можно определить из графика зависимости плотности магнитной энергии W от расстояния z , аппроксимировав экспериментальные значения выражением:

$$W(z) = W_0 e^{-\frac{z}{\delta_3}} \quad (1)$$

где W_0 – начальная плотность магнитной энергии. Значения плотности магнитной энергии в точках расположения магнитных зондов, вычислялась из выражения [9]:

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (2)$$

На рис. 8 показана плотность магнитной энергии в местах расположения магнитных зондов, и их аппроксимация для экспериментов при однократном импульсе возмущения, разрядном токе 250 А и фоновом магнитном поле 0,1 Тл.

Обработка полученных результатов дает значение $\delta_3 \approx 31$ см. Учитывая, что первый индукционный датчик располагался на расстоянии 50 см от магнитной антенны, в последующих экспериментах представляется целесообразным более подробно исследовать промежуток до 1 м от магнитной антенны.

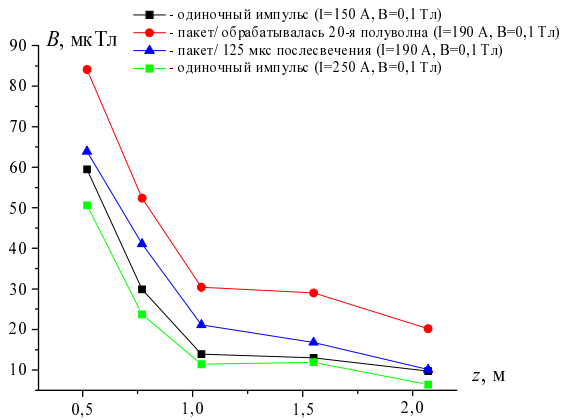


Рис. 7. Амплитуда магнитного поля МГД-волн при разных значениях разрядного тока

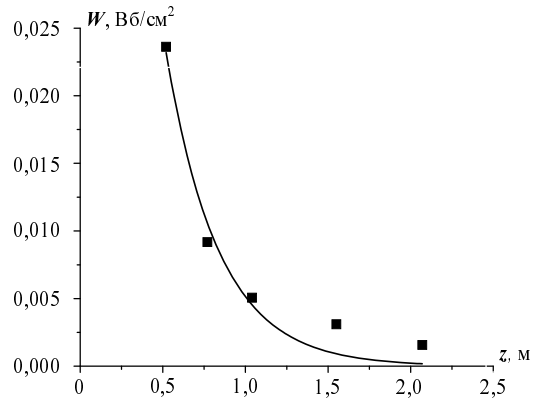


Рис. 8. Зависимость плотности магнитной энергии от расстояния

Выводы

В вакуумной камере в среде гелия при давлении $5 \cdot 10^{-4}$ Тор в осесимметричном магнитном поле 0,1 Тл сформирован столб фоновой плазмы длиной ≈ 600 см, диаметром ≈ 10 см с применением термоэмиссионного дугового разряда низкого давления между оксидным термокатодом и сетчатым анодом. На оси плазменного столба на расстояниях 250 см и 500 см от термокатада измерена плотность электронов плазмы, которая составила величину $2 \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$ и $5 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$ соответственно.

В фоновой плазме при различных значениях разрядных токов во внешнем магнитном поле 0,1 Тл, проведены эксперименты по генерации МГД-волны с помощью магнитной антенны. Зарегистрированы колебания магнитного поля волны и определена продольная фазовая скорость волны, которая составила примерно 10^8 см/с.

Полученные экспериментальные данные используются для калибровки расчетных методик.

Список литературы

1. Альвен Г., Фельтхаммар К. Г. Космическая электродинамика. М.:Мир, 1967.

2. Gekelman W. Design, construction, and properties of the large plasma research device-the LAPD at UCLA / W. Gekelman, H. Pfister, Z. Lucky, J. Bamber, D. Leneman, J. E. Maggs// Rev. Sci. Instrum. 1991. 62(12).

3. Leneman, D. The plasma source of the Large Plasma Device at University of California, Los Angeles/ D. Leneman, W. Gekelman, J. Maggs// Review of Scientific Instrument. 2006. 77, 015108.

4. Gekelman, W. The many faces of shear Alfvén waves / W. Gekelman, S. Vincena, B. Van Compernelle, G. J. Morales, J. E. Maggs, P. Pribyl, T. A. Carter // Physics of Plasmas. 2011. 8, (055501).

5. Ильяев Р. И., Незнамов В. П. и др. // Основные достижения РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2009. С. 26

6. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

7. Волович Г. И. Схемотехника аналоговых и аналого-цифровых электронных устройств. М.: Издательский дом “Додэка-XXI”, 2005.

8. Доугерти К. Введение в эконометрику. М.: ИНФРА-М., 1999.

9. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 2. Электричество. М.:Наука, 1970.