

ЗАТУХАНИЕ МАГНИТНО-ЗВУКОВОЙ ВОЛНЫ  
В ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

23

*Г.Л.Максимов, В.Л.Смирнов, Е.Г.Утюгов*

Как указывалось в ряде теоретических работ, турбулентность плазмы может существенно изменять ее дисперсионные и диссипативные свойства [1, 2]. Измерение величины аномального скин-слоя в турбулентной плазме подтверждает существование таких изменений [3]. В излагаемой ниже работе продемонстрировано влияние турбулентности, возбуждаемой в плазме током прямого разряда, на затухание магнитно-звуковой волны. Описываемые эксперименты [4] проводились в тех же условиях, что и работы по турбулентному нагреву плазмы сильным током вдоль силовых линий магнитного поля [5 – 7]. Возбуждение неустойчивости тока приводит к резкому увеличению эффективной частоты столкновений электронов и ионов и к появлению аномального сопротивления. Вследствие этого магнитно-звуковая волна, распространяющаяся в той области, где имеет место аномальное сопротивление плазмы, должна поглощаться сильнее. Таким образом, появляется возможность сравнить частоты столкновений, рассчитанные по величинам аномального сопротивления и коэффициента затухания волны.

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. В ловушке с пробочным отношением 2 в области однородного поля размещался ударный контур. Длина витка, окружавшего камеру, равнялась 100 см. Частота контура была близка к 7 МГц, напряженность переменного магнитного поля  $\tilde{H}_B$  на границе плазменного шнура достигала 90 э. Направление переменного магнитного поля контура совпадало в первом полупериоде с направлением постоянного поля  $H_0$ . Величина постоянного поля  $H_0$  менялась от 600 до 1000 э. В качестве рабочего газа использовался водород, начальное давление которого в камере не превышало  $10^{-3}$  мм рт.ст. Плазма создавалась двумя индукционными источниками типа  $\theta$ -пинчей, расположенными по краям установки. Величина концентрации плазмы менялась от  $10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ . Эффективный диаметр плазменного шнура равнялся 10 см, внутренний диаметр стеклянной камеры – 16,5 см.

К электродам, размещенным в области магнитных пробок в 200 см друг от друга, прикладывалось напряжение прямого разряда  $V_T$ . Включение прямого разряда производилось через 100 – 150 мксек после запуска индукционных инжекторов. За этот промежуток времени плазма успевала равномерно заполнить ловушку. Частота тока прямого разряда в колебательном режиме равнялась 330 кГц. Напряжение  $V_T$  на емкости  $C = 0,2$  мкф не превышало 30 кВ, а ток разряда  $I = 5$  кА. С помощью СВЧ интерферометра показано, что концентрация плазмы увеличивалась за первую четверть периода прямого тока на 30 – 60% в зависимости от начальных условий. Измерениями магнитных полей прямого разряда установлено отсутствие гидромагнитной неустойчивости плазмы.

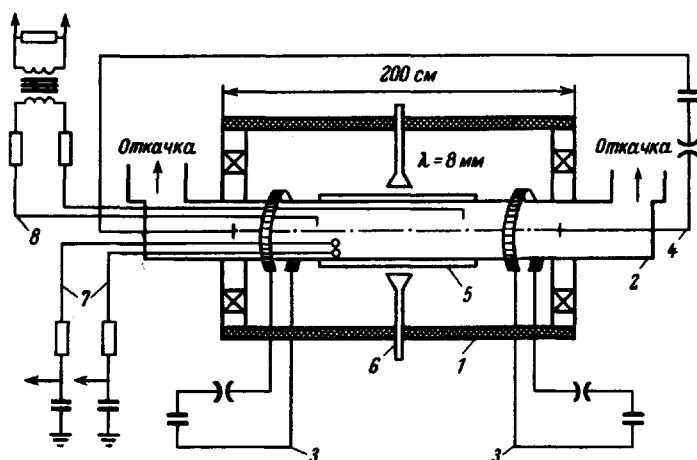


Рис. 1. Схема установки НВ-1: 1 – соленоид, 2 – вакуумная камера, 3 – индукционные плазменные источники, 4 – схема прямого разряда, 5 – виток ударного контура, 6 – СВЧ интерферометр, 7 – магнитные зонды, 8 – двойной электрический зонд

После включения прямого разряда с регулируемым временем задержки  $\tau$  запускался ударный контур. Типичная осциллограмма магнитного поля волны и поля возбуждения для двух значений приведена на рис.2. Наибольшее затухание волны соответствовало максимальной величине сопротивления плазмы. Сопротивление измерялось на участке столба плазмы, расположенном под витком ударного контура, т.е. в области возбуждения волны. Для этой цели использовались одиночные и двойные электрические зонды, регистрировавшие активное падение напряжения в плазме.

Увеличение затухания волны в турбулентной фазе тока может быть связано или с диссипацией ее энергии на шумах, или с возбуждением неустойчивостей собственных токов волны, которое, по-видимому, облегчается из-за присутствия начального уровня шумов в плазме. Однако, второе предположение представляется маловероятным в нашем случае, поскольку на основании измерений величины диамагнитного сигнала ( $nT \sim 2 \cdot 10^{15}$  эв/см<sup>3</sup>) для всех известных типов неустойчивостей

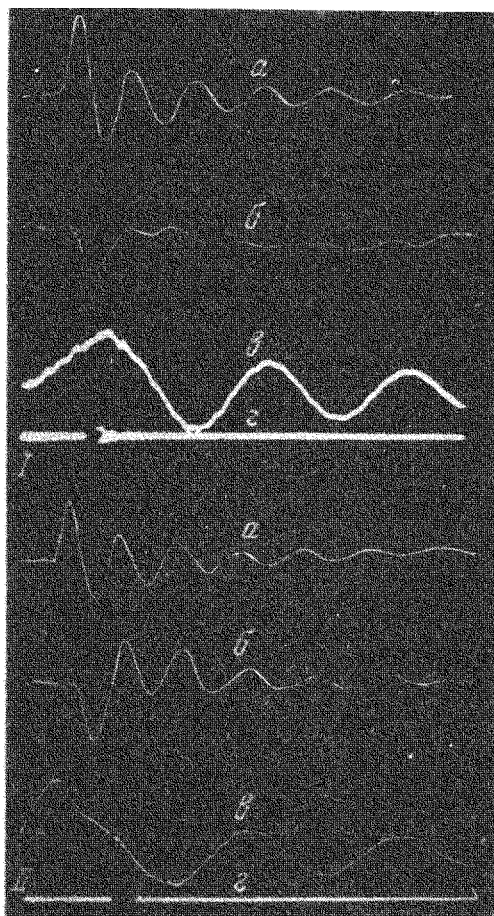


Рис. 2. Магнитное поле волны в плазме.  $I_{max} = 3700$  а,  $H_0 = 600$  э,  $n = 6,5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>,  $H_B = 90$  э. Кривые I и II соответствуют различным задержкам запуска ударного контура относительно прямого тока: а —  $H_z$  в зазоре плазма — виток, б —  $H_z$  в плазме ( $r = 2$  см), в — ток прямого разряда  $I$ , z — метка запуска ударного контура

токов волны имеет место соотношение:  $\gamma r_f \lesssim 1$ . Здесь  $r_f$  — характерное время нарастания поля на фронте волны, а  $\gamma$  — инкремент неустойчивости. Таким образом, единственной причиной затухания является рассеяние электронов на турбулентных пульсациях электрических полей прямого тока. В пользу этого свидетельствует также сопоставление эффективных частот столкновений  $\nu_{эфф}$ , вычисленных из величин коэффициента затухания волны и усредненного по длине контура аномального сопротивления плазмы.

Коэффициент затухания волны определялся из отношения амплитуды волны, измеренной в турбулентной плазме, к амплитуде волны, измеренной в плазме без тока. Сравнение амплитуд производилось по осциллограммам сигнала магнитного зонда, размещенного в 2 см от оси камеры, при этом величины  $N_0$ ,  $\tilde{N}_B$  и  $n$  поддерживались постоянными. Из выражения для коэффициента затухания магнитно-звуковой волны [7]

$$\chi/k = \omega_{\text{эфф}}/2\omega_1\omega_0$$

для условий рис. 2 можно найти величину  $\nu_{\text{эфф}}$ :  $\nu_{\text{эфф}} \approx 6 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ . Для тех же условий из показаний электрических зондов следует, что напряженность электрического поля достигает  $\sim 30 \text{ в/см}$ , а  $\nu_{\text{эфф}} \approx 8 \cdot 10^8 \text{ сек}^{-1}$ . Эти результаты удовлетворительно согласуются с данными, приведенными в работах [4,6,7], выполненных в аналогичных условиях.

Авторы искренне благодарны Е.К.Завойскому за постоянное внимание к работе, С.Л.Недосееву, Л.И.Рудакову, Д.Д.Рютову за ценные обсуждения, Л.Е.Аранчуку, В.В.Ржанникову за помощь в проведении экспериментов.

Институт атомной энергии  
им. И.В.Курчатова

Поступило в редакцию  
9 января 1969 г.

### Литература

- [1] А.А.Веденов, А.В.Гордеев, Л.И.Рудаков. 2-ая Междунар. конф. по физике плазмы, Калэм, Англия, 1965, доклад-21/155.
- [2] В.Н.Цытович. Нелинейные эффекты в плазме. М., Атомиздат, 1967.
- [3] В.А.Скорюпин. ЖЭТФ, 53, 1213, 1967.
- [4] Г.П.Максимов, В.П.Смирнов. Препринт ИАЭ-1645.
- [5] М.В.Бабыкин, П.П.Гаврин, Е.К.Завойский, С.Л.Недосеев, Л.И.Рудаков, В.А.Скорюпин. ЖЭТФ, 52, 643, 1967.
- [6] С.Д.Фанченко, Б.А.Демидов, Н.И.Елагин, Д.Д.Рютов. ЖЭТФ, 46, 497, 1964.
- [7] Д.А.Франк-Каменецкий. Лекции по физике плазмы. М., Атомиздат, 1964.