

РЕЗОНАНСНЫЙ НАГРЕВ ПЛАЗМЫ СИЛЬНЫМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ПОЛЕМ

В.В.Чечкин, М.П.Васильев, Л.И.Григорьева,

А.В.Лонгинов, Б.И.Смердов

В настоящей работе изложены предварительные результаты экспериментов по нагреву плотной плазмы мощными короткими высокочастотными импульсами в условиях, когда в плазме резонансным образом возбуждается быстрая магнитозвуковая волна ($\Omega_e \gg \omega_e$, $\omega_i < \omega \ll \ll \omega_e$, где Ω_e - электронная плазменная частота, ω_i , ω_e - соот-

ответственно ионная и электронная циклотронные частоты, ω - рабочая частота). Эффективность нагрева при помощи магнитозвуковой волны исследована теоретически и проверена экспериментально в работах [1-5].

Схема и подробное описание установки приведены в [6]. Исследования проводились на распадающейся плазме, находящейся в квазипостоянном продольном магнитном поле, напряженность которого могла достигать 6000 э. Плазма создавалась импульсным разрядом с колеблющимися электронами в водороде и гелии при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст. Внутренний диаметр стеклянной разрядной трубы равен 6 см, расстояние между электродами - 88 см.

На распадающуюся холодную (температура ~ 1 эв) плазму накладывалось поле ВЧ, возбуждаемое при разряде конденсаторов емкостью $5,25 \cdot 10^{-9}$ ф, заряжаемых до потенциала 36 кв, через катушки индуктивности, намотанные на разрядную трубу таким образом, что поле вдоль оси было периодическим с аксиальным периодом $\lambda = 20$ см.

Длина системы катушек ~ 80 см (4 периода). Частота колебаний контура 7 Мгц, амплитуда аксиального магнитного поля ВЧ $\tilde{H}_z = 140$ э.

Проведены измерения коэффициента передачи энергии поля ВЧ от контура плазме, равного отношению энергии, поглощенной плазмой, к общей энергии, запасенной в контуре, с помощью внешнего зонда по затуханию колебаний в контуре. Измерены также средняя по сечению разрядной трубы электронная плотность (радиоинтерферометром на длине волны 2 и 8 мм) и температура электронов (оптическими методами и многосеточным зондом). Получены зависимости этих параметров от напряженности квазипостоянного магнитного поля.

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента передачи от напряженности квазипостоянного магнитного поля для различных значений начальной электронной плотности, т.е. плотности в момент включения контура ВЧ ($\circ - 4,5 \cdot 10^{13}$, $\times - 6,5 \cdot 10^{13}$, $\Delta - 8 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$). Кривые получены для водородной плазмы при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст.

Из рис. 1 следует, что поглощение энергии поля ВЧ плазмой имеет резонансный характер, его максимум соответствует частоте ω ,

лежащей в области $\omega_i < \omega < \sqrt{\omega_i \omega_e} \ll \omega_e$. Смещение максимума в сторону меньших магнитных полей с уменьшением начальной плотности плазмы хорошо описывается дисперсионным соотношением для

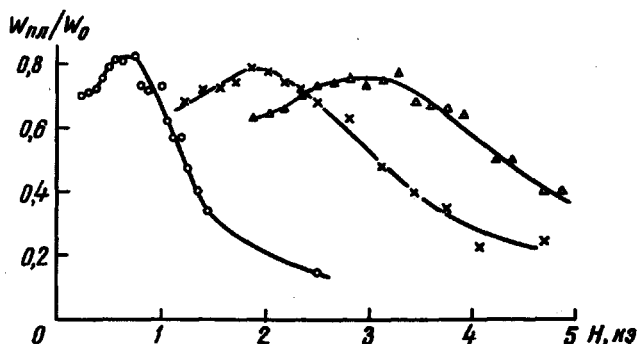


Рис. I

магнитнозвуковых волн [7], распространяющихся вдоль плазменного цилиндра. Аналогичные зависимости коэффициента передачи от напряженности магнитного поля были получены для гелиевой плазмы.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента передачи (а), электронной температуры (б) и приращения электронной плотности (в) от напряженности магнитного поля. Кривые получены для гелиевой плазмы при давлении $\sim 10^{-3}$ мм рт.ст. и начальной плотности электронов $5 \cdot 10^{13}$ см $^{-3}$. Температура электронов определялась по отношению интенсивностей свечения линий гелия HeI 4921 и HeI 4713, по скорости "выгорания" линий водорода H β 4861 и гелия HeI 5875, по приращению электронной плотности [8] и при помощи многосеточного зонда [9]. Значения температуры, полученные этими методами, хорошо совпадают.

Из приведенных графиков следует, что электронная температура T_e возрастает при увеличении энергии, поглощаемой плазмой, достигая величины ~ 60 эв. При этом увеличивается также плотность электронов и степень ионизации приближается к 100%. Температура ионов T_i , измеренная многосеточным зондом в условиях сильного

поглощения, составляет ~ 30 эв. Нагрев плазмы происходит за короткое время: в условиях максимального поглощения амплитуды колебаний ВЧ в контуре уменьшаются в $\epsilon = 2,7$ раза за время $\sim 0,5$ мксек, т.е. за 2-3 периода колебаний; без плазмы это уменьшение происходит примерно за 11 периодов.

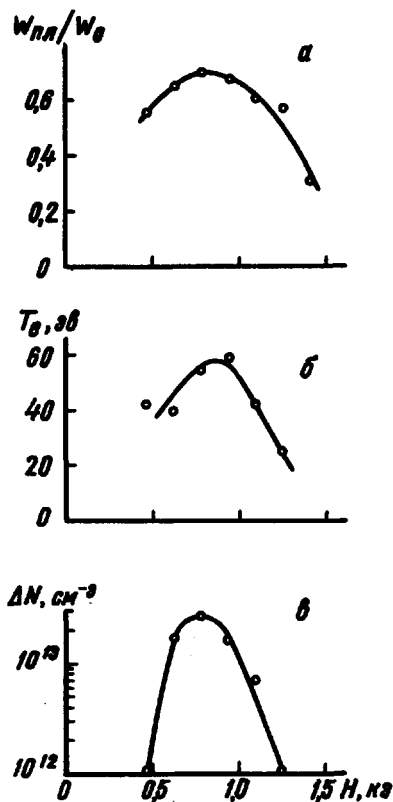


Рис. 2

Вычисленный по скорости уменьшения амплитуды колебаний в контуре в резонансных условиях декремент затухания $\gamma'_{эксп} \approx 6,5 \cdot 10^{-2} \omega$ более чем на два порядка превосходит декремент затухания магнитозвуковых волн, обусловленный кулоновскими потерями [10]. Возможно, что наблюдавшееся затухание обусловлено черенковским поглощением энергии магнитозвуковых волн электронами плазмы, так как черенковский декремент затухания для однородной плаз-

мы [1,2] $\gamma_{\text{пер}} \sim 2 \cdot 10^{-2} \omega$ незначительно отличается от $\gamma_{\text{эсп}}$.
Наличие неоднородностей плазмы увеличивает $\gamma_{\text{пер}}$ [3].

Температура, вычисленная из баланса энергии в предположении, что вся энергия, поглощаемая плазмой, идет на ее нагрев, равна $T_i + T_e \approx 90$ эв, что хорошо согласуется с экспериментальными данными.

В заключение авторы приносят глубокую благодарность К.Н. Степанову, Н.И. Назарову и В.Т. Толочку за ценные обсуждения и полезные советы.

Поступило в редакцию

7 сентября 1965 г.

Литература

- [1] К.Н. Степанов. ЖЭТФ, 38, 265, 1960.
- [2] К.Н. Степанов. Изв. вузов. Радиофизика, 6, 403, 1963.
- [3] В.В. Долгополов, А.И. Ермаков, Н.И. Назаров, К.Н. Степанов, В.Т. Толочк. Об. Ядерный синтез, 3, 251, 1963.
- [4] Н.И. Назаров, А.И. Ермаков, В.В. Долгополов, К.Н. Степанов, В.Т. Толочк. Об. Ядерный синтез, 3, 255, 1963.
- [5] А.В. Бартов, Е.К. Завойский и др. Ядерный синтез. Дополнение, ч. 3, 1067, 1962.
- [6] М.П. Васильев, Л.И. Григорьева, В.В. Долгополов, Б.И. Смердов, К.Н. Степанов, В.В. Чечкин. ЖТФ, 34, 984, 1964.
- [7] T.H. Stix. Phys. Rev., 106, 1146, 1957.
- [8] М.В. Бабькин, П.П. Гаврин, Е.К. Завойский и др. ЖЭТФ, 43, 411, 1962.
- [9] Д.Г. Булыгинский, Б.В. Галактионов, К.А. Долматова, В.А. Овсянников. ЖТФ, 33, 183, 1963.
- [10] В.Л. Гинзбург. Распространение электромагнитных волн в плазме. Физматгиз, М., 1960.