

**О БАЛАНСЕ ЧАСТИЦ И ЭНЕРГИИ
ПРИ МАГНИТОЗВУКОВОМ НАГРЕВЕ ПЛАЗМЫ
В ТОКАМАКЕ ТО-1**

Н.В.Иванов, И.А.Кован, В.С.Свищев

Установлено двойственное воздействие магнитозвуковых колебаний на состояние плазмы в токамаке, проявляющееся в нагреве ионов за счет диссипации энергии колебаний, а также в дополнительном увеличении энергосодержания плазмы за счет снижения аномальной электронной теплопроводности.

Как сообщалось в [1, 2] при возбуждении спектра собственных магнитозвуковых колебаний плазменного шнура в Токамаке ТО-1 наблюдался эффективный нагрев плазмы, проявлявшийся в увеличении диамагнетизма плазмы, возрастании ионной температуры, смещении шнура наружу и увеличении тока регуляторов равновесия. Изучение струк-

туры возбуждаемых в плазме полей и временной формы отдельных резонансных максимумов спектра колебаний показало, что поглощение энергии колебаний в плазме существенно превышает поглощение в стенках камеры [3].

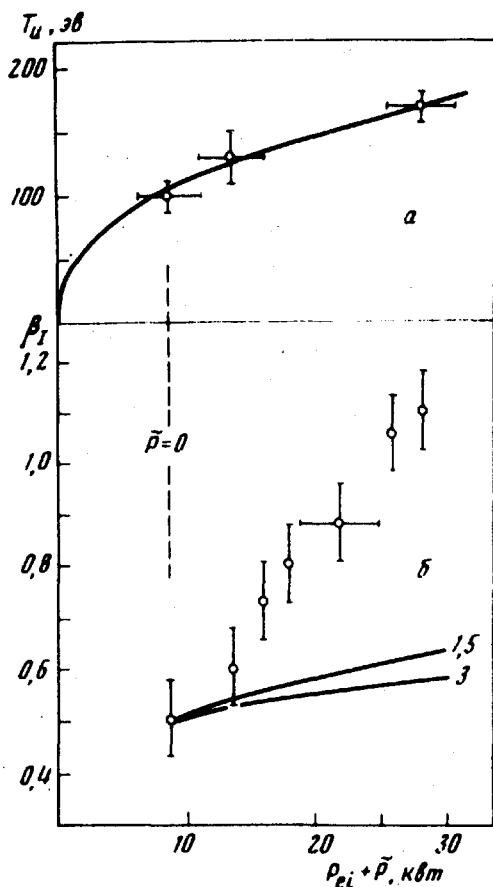


Рис. 1. Зависимость ионной температуры (а) и энергосодержания плазмы (б) от суммарной мощности, вкладываемой в ионы

Хорошо известно [4], что потери тепловой энергии из плазмы в установках токамак определяются главным образом аномальной электронной теплопроводностью и более чем на порядок превышают величину, предсказываемую неоклассической теорией [5]. В то же время экспериментальные факты свидетельствуют в пользу предположения о кулоновском характере теплообмена между электронами и ионами и неоклассическом механизме ионной теплопроводности [6]. Основываясь на этом предположении обсудим вопрос о балансе частиц и энергии в условиях магнитозвукового нагрева плазмы в ТО-1.

На рис. 1, а приведена зависимость ионной температуры от суммы мощности P_{ei} , передаваемой ионами от электронов за счёт кулоновских столкновений, и мощности \tilde{P} , вкладываемой в плазму ВЧ генератором. Мощность P_{ei} определялась по формуле:

$$P_{ei} = 0,4 \cdot 10^{-26} \int \frac{n_e^2}{\sqrt{T_i}} dV$$

(см., например, [6]), где T_i – ионная температура, n_e – концентрация плазмы, интеграл берется по всему объему плазмы. Температура ионов измерялась по доплеровскому уширению линии высокоионизованной примеси CV в максимуме ВЧ нагрева. Экспериментальные точки хорошо ложатся на кривую $T_i \sim (P_{ei} + \tilde{P})^{2/5}$. Поскольку частоты столкновений в исследуемом режиме разряда соответствовали области "плато", в которой энергетическое время жизни ионов $\tau_{E_i} \sim T_i^{-3/2}$ и температура ионов должна увеличиваться пропорционально вкладываемой мощности в степени $2/5$, на основании рис. 1,а можно сделать вывод, что вся ВЧ мощность расходовалась на нагрев ионной компоненты плазмы.

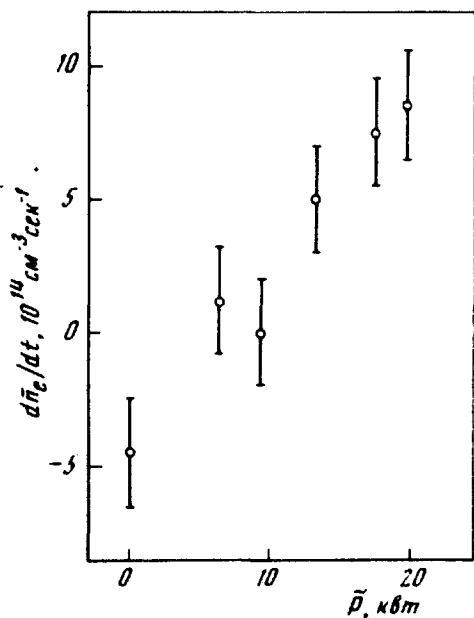


Рис. 2. Зависимость скорости изменения усредненной на диаметр диафрагмы концентрации плазмы от мощности, развиваемой ВЧ генератором

Такой вывод находится в кажущемся противоречии с результатами измерений. Действительно, если вся ВЧ мощность шла на нагрев ионов, то ожидаемое относительное увеличение энергосодержания плазмы должно быть невелико, так как в исходном состоянии $T_e > T_i$. На рис. 1,б сплошными кривыми показано изменение величины β_I (отношение давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля), связанное с увеличением только температуры ионов для двух начальных значений T_e/T_i . Из рисунка видно, что приведенные кривые лежат значительно ниже экспериментальных точек. Этот факт свидетельствует о возрастании энергосодержания электронной компоненты плазмы и может объясняться лишь увеличением энергетического времени жизни электронов, поскольку мощность омического нагрева плазмы изменялась в процессе ВЧ нагрева не более чем на $15 + 20\%$.

Возбуждение в плазме магнитозвуковых колебаний приводило также к скачкообразному увеличению производной концентрации плазмы по времени. Зависимость $d\bar{n}_e/dt$ от мощности, развиваемой ВЧ генератором, представлена на рис. 2. Как показали оптические измерения, проделанные Н.Н.Швиндтом, этот эффект не является следствием возрастания потока нейтральных частиц в плазму, так как он не сопро-

вождался ростом интенсивностей спектральных линий водорода и примесей, способным объяснить наблюдаемое изменение концентрации заряженных частиц. Измерения спектральных линий были проведены как в области возбуждителя, так и в диаметрально противоположном сечении камеры токамака. Таким образом, наблюдаемое поведение концентрации свидетельствует об увеличении диффузионного времени жизни плазмы τ_D .

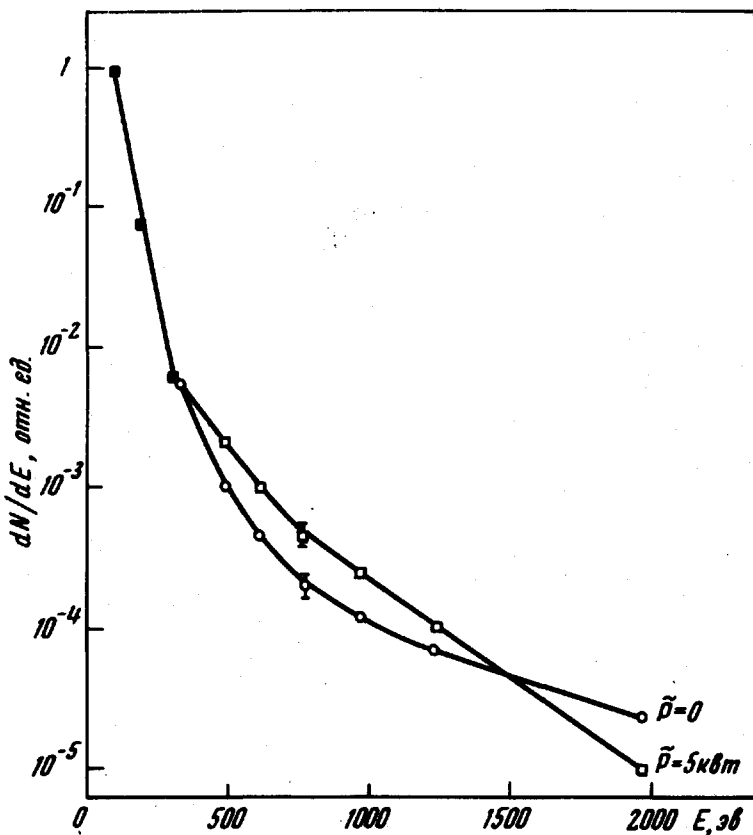


Рис. 3. Энергетическое распределение атомов перезарядки при ВЧ нагреве и в его отсутствие

Относительное изменение $\Delta r_D / r_D$ можно оценить из уравнения материального баланса плазмы $d\bar{n}_e / dt = l - \bar{n}_e / r_D$, где \bar{n}_e — усредненная на диаметр диафрагмы концентрация плазмы, l — плотность потока нейтрального газа, полагая, что $r_D \gg r_E$. В рассматриваемом случае $l = \text{const}$, $\bar{n}_e = 10^{18} \text{ см}^{-3}$, $r_E = 2,5 \text{ мсек}$ и $\Delta r_D / r_D \approx 0,5$. Отметим, что полное увеличение концентрации плазмы в процессе ВЧ нагрева составляло $10 + 15\%$.

Воздействие ВЧ колебаний на плазму проявилось также в исправлении высокоэнергетического хвоста функции распределения ионов, который в отсутствие колебаний заметно отличался от максвелловского. Этот эффект иллюстрируется рис. 3, где представлены энергетические спектры атомов перезарядки.

На основании приведенных результатов можно сделать вывод о том, что магнитозвуковые колебания оказывают двойное воздействие на состояние плазмы в токамаке. Во-первых, вся диссипируемая энергия колебаний идет на нагрев ионной компоненты плазмы. Во-вторых, наличие колебаний приводит к дополнительному увеличению энергосодержания за счет уменьшения аномальной электронной теплопроводности, а также к увеличению диффузионного времени жизни плазмы.

Следует отметить, что стабилизирующее воздействие магнитозвуковых колебаний на некоторые виды неустойчивостей плазмы, а именно дрейфовые неустойчивости, предсказано теоретически [7] и подтверждено экспериментально в Q-машине [8].

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
20 мая 1974 г.

Литература

- [1] Н.В.Иванов, И.А.Кован, П.И.Козлов, Е.В.Лось, В.С.Свищев, Н.Н.Швиндт. Письма в ЖЭТФ, 16, 88, 1972.
- [2] Н.В.Иванов, И.А.Кован, В.В.Силуянов, Н.Н.Швиндт. АЭ, 36, 374, 1974.
- [3] Н.В.Иванов, И.А.Кован. АЭ, в печати.
- [4] Л.А.Арцимович. Письма в ЖЭТФ, 13, 101, 1971.
- [5] А.А.Галеев, Р.З.Сагдеев. ЖЭТФ, 53, 348, 1967.
- [6] Л.А.Арцимович, А.В.Глухов, М.П.Петров. Письма в ЖЭТФ, 12, 449, 1970.
- [7] А.А.Иванов, Т.К.Соболева, ЖЭТФ, 62, 2170, 1972.
- [8] Л.А.Арцимович, В.Д.Русанов, Т.К.Соболева, С.С.Соболев, Н.М.Умрихин. Доклад на Междунар. конф. по явлениям в ионизованных газах, Прага, 1973 г.