

Письма в ЖЭТФ, том 17, вып. 1, стр. 4 - 7

5 января 1973 г.

МАГНИТНО-ЗВУКОВОЙ НАГРЕВ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ

*В. Л. Вдовин, О. А. Зиновьев, А. А. Иванов,
Л. Л. Козоровицкий, М. Ф. Кротов, В. В. Параил,
Я. Р. Рахимбабаев, В. Д. Русанов, Н. В. Шапожковский*

В работе [1] было впервые экспериментально получено возбуждение магнитно-звукового (м.-з.) резонанса в плазме установки Токамак. В настоящей работе сообщаются результаты экспериментов, по магнитно-звуковому нагреву плазмы в той же установке ("ТМ-1-ВЧ").

Нагрев плазмы, также как и в предыдущих опытах [1] осуществлялся с помощью ВЧ генератора ($f = 21 \text{ МГц}$), связанного с плазмой узким витком. Этот виток вводился внутрь лайнера либо с кварцевой изоляцией, либо без нее. Разряд производился в водороде или дейтерии при давлении $8 \cdot 10^{-5} - 8 \cdot 10^{-4} \text{ тор}$.

Эффект нагрева фиксировался измерением давления плазмы $n(T_e + T_i)$. Диамагнитный сигнал определялся по реакции тока в цепи соленоида магнитного поля [2]. Одновременно измерялась средняя концентрация заряженных частиц с помощью СВЧ интерферометров на длине волны $\lambda = 3,8$ мм, $\lambda = 7,9$ мм. Оценка диаметра плазменного столба производилась с помощью хордового СВЧ зондирования.

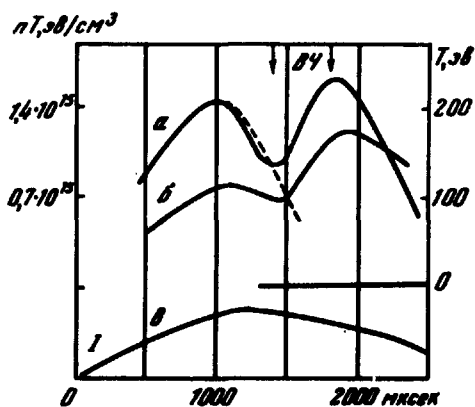


Рис. 1. *a* – Ход во времени $n(T_e + T_i)$ при ВЧ нагреве – сплошная и без ВЧ нагрева – пунктир; *b* – ход во времени $(T_e + T_i)$; *c* – осциллограмма тока в плазме

Диамагнетизм, возникающий при наложении ВЧ импульса, иллюстрируется рис. 1, на котором видно увеличение $n(T_e + T_i)$, а также рост $T = T_e + T_i$ под действием м.э. волны, поглощаемой плазмой. Длительность ВЧ импульса составляла 400 мксек, и выбиралась из оценки энергетического времени жизни $\tau_E \sim 300$ мксек для режима токового нагрева. Средняя плотность заряженных частиц в момент включения ВЧ импульса составляла 10^{13} см⁻³, при величине среднего диаметра плазменного шнура 12 см.

Энергосодержание плазмы в режиме джоулевого нагрева для данного опыта 6 дж, диссипация м.э. волны сообщает плазме энергию, превышающую 5 дж, при этом суммарная температура удваивается, приближаясь к 200 эв. Этот эффект соответствует поглощению мощности генератора ~ 16 дж. ($P_{\text{акт}} = 40$ квт). Таким образом КПД нагрева $\sim 40\%$.

Одним из важнейших вопросов, связанных с нагревом плазмы, является вопрос, какой сорт частиц, т. е. электроны или ионы, поглощают энергию м.э. колебаний. В нашем случае для определения температуры ионов измерялась полуширина примесной линии СIII ($\lambda = 4647$ Å). Максимальное значение ионной температуры в указанном опыте достигалось в конце ВЧ импульса и составляло ≈ 110 эв. Согласно [5], эта оценка может дать заниженное значение T_i , так как линии СIII интенсивны в периферических частях шнура.

Типичная картина роста ионной температуры при наложении длинного ВЧ импульса показана на рис. 2. Номинальная активная мощность генератора здесь не превышала 20 квт. Верхняя кривая рис. 2 соответствует току сетки ВЧ генератора. Хорошо видно, что в окрестности м.э. резонанса отбор мощности возрастает, коррелируя с нагревом. Ионная температура здесь представлена для сравнения в двух случаях, верхняя кривая соответствует включению ВЧ мощности, нижняя – только токовому нагреву. Рис. 3 показывает ход во времени ионной темпе-

ратуры при нагреве более коротким импульсом ВЧ мощности ($\tau_{ВЧ} \sim 750$ мксек). Видно, что спад T_i происходит с характерным временем $\tau_i \sim 500$ мксек.

Соответствие в измерениях прироста nT и T_i позволяет говорить о том, что при наложении импульса ВЧ мощности нагревается в основном ионная компонента. Это подтверждается также тем, что не отмечалось заметного изменения тока или вихревого электрического поля.

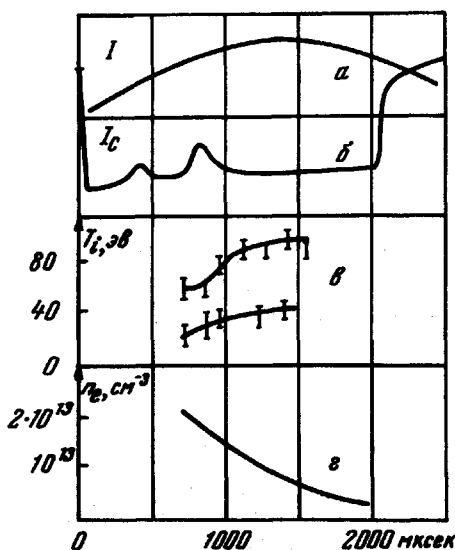


Рис. 2. *а* – Осциллограмма тока сетки ВЧ генератора; *б* – осциллограмма тока в плазме; *в* – ионная температура; верхняя кривая с ВЧ нагревом, нижняя – без ВЧ нагрева; *г* – поведение во времени концентрации электронов

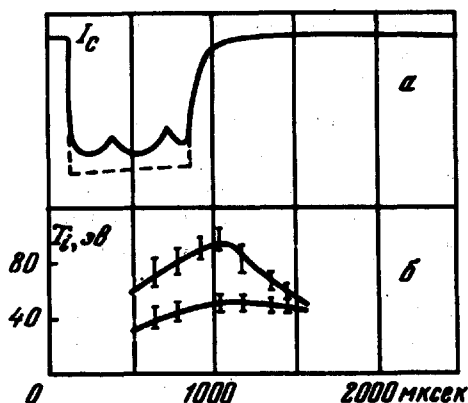


Рис. 3. *а* – Осциллограмма тока сетки ВЧ генератора; *б* – ионная температура; верхняя кривая с ВЧ нагревом, нижняя – без ВЧ нагрева

Таким образом, возбуждение м. з. волн в тороидальной плазме с током приводит к нагреву плазмы. Максимальное поглощение в дейтериевой плазме, что иллюстрируется рис. 1 и рис. 3, отвечает возбуждению собственного радиального мода колебаний. При концентрациях меньших резонансной, отмечалось поглощение ВЧ энергии на несимметричном радиальном моде $m = 1$. Добротность плазмы, определенная по ширине резонансных максимумов, колеблется в пределах 6 – 15 и достигает минимума при максимальных величинах nT , обеспечиваемых джоулевым нагревом (вблизи максимума тока). Эти эффекты хорошо согласуются с представлениями о распадах магнитно-звуковых волн [3].

Так эксперименты с дейтериевой плазмой ($\omega > \omega_{H_i}$) могут быть объяснены распадом исходной м. э. волны на "электрозвуковую" $\omega \sim kv_{T_i}$ и дрейфовую $\omega_* \approx (kcT_i / eH)(\nabla n / n)$, что обеспечивает низкий порог распада, добротность плазмы $Q \sim 10$ и преимущественный нагрев ионов. Рождающиеся дрейфовые волны с $kr_{Di} \sim 1$ не должны приводить к заметной диффузии плазмы из-за малой длины волны. Длинноволновые дрейфовые колебания, которые могли бы привести к дополнительной диффузии и теплопроводности, стабилизируются магнитным звуком [4], что должно приводить к увеличению времени жизни. Действительно, время жизни частиц τ_n увеличивалось при наложении ВЧ.

М. э. нагрев осуществлялся в условиях $\omega \gtrsim \omega_i$ (водород) и $\omega \gtrsim 2\omega_i$ (дейтерий), когда ионно-циклотронные волны не возбуждаются. При $\omega < \omega_i$ нами наблюдалось эффективное возбуждение ионно-циклотронных волн. Поглощение ВЧ мощности при этом было несколько меньше.

Следовательно, в опытах показано:

1. Существует нагрев плазмы м. э. волнами, причем абсолютный прирост nT достигал 1,5, $T_i + T_e$ повышалось в 1,5 – 1,8 раза по сравнению с токовым нагревом.
2. Преимущественно нагревались ионы, T_i могло возрасти в несколько раз по сравнению с T_i джоулевого нагрева и достигать величины $T_i > T_e$.
3. Время жизни T_i превышало τ_E примерно в 2 раза.
4. Поглощение энергии не падало при нагреве плазмы, оптимум соответствовал $(nT)_{max}$ при джоулевом нагреве.
5. Смещение шнура при ВЧ нагреве имело место и подтверждало качественно оценку nT по диамагнитному сигналу.

Авторы выражают благодарность Е.К.Завойскому за интерес к работе, Л.А.Арцимовичу за обсуждения и поддержку в постановке эксперимента. Авторы искренне благодарны за участие в работе и помощь М.А.Долматову, Г.Ф.Жалудю, Т.А.Косиновой, М.К.Романовскому, К.И.Тараканову, Л.Г.Страковскому, Н.Т.Собко и Р.И.Азизову.

Поступила в редакцию
10 августа 1972 г.
После переработки
13 октября 1972 г.

Литература

- [1] В.Л.Вдовин, О.А.Зиновьев, А.А.Иванов, Л.Л.Козоровицкий, В.В.Параил, Я.Р.Рахимбабаев, В.Д.Русанов. Письма в ЖЭТФ, 14, 228, 1971.
- [2] Л.А.Арцимович, Г.А.Бобровский, С.В.Мирнов, К.А.Разумова, В.С.Стрелков. АЭ., 22, 259, 1967.
- [3] А.А.Иванов, В.В.Параил. ЖЭТФ, 62, 932, 1972.
- [4] А.А.Иванов, Т.К.Соболева. ЖЭТФ, 62, 1807, 1972.
- [5] Ю.И.Галушкин, В.И.Гервизо, В.И.Коган. Сб. докл. конференции в Медисоне 17 – 23 июня 1971 г; IAEA-CN-28/F-6, Vol. II, 407.