

К ВОПРОСУ О МЕХАНИЗМЕ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ В ПРОБКОТРОНЕ

Л.П.Закатов, А.Г.Плахов

Исследована связь эффективности нагрева высокотемпературной электронной компоненты плазмы электронным пучком в пробкотроне со спектром возбуждаемых колебаний. Получены экспериментальные результаты, свидетельствующие против механизма нагрева, предложенного авторами работ [4, 5].

Известно, что при взаимодействии электронного пучка с холодной плазмой в пробкотроне, в плазме появляется группа электронов со средней энергией, значительно превышающей энергию первичного пучка. Макроскопические закономерности пучкового нагрева достаточно хорошо изучены [1, 2]. Большинство этих закономерностей могут быть поняты в рамках диффузионной модели, предложенной Рютовым [2, 3]. Это обстоятельство может рассматриваться как косвенное подтверждение исходных предположений теории.

Другая точка зрения на механизм пучкового нагрева содержится в работах [4, 5]. Авторы этих работ утверждают, что механизмом нагрева является стохастический циклотронный резонанс в неоднородном магнитном поле пробкотрона. Основным экспериментальным фактом, приводимым в пользу этого механизма, является наблюдаемая временная корреляция между вспышками рентгеновского излучения и излучения в области циклотронных частот пробкотрона. Однако одного этого факта совершенно недостаточно, чтобы решать вопрос, какие колебания ответственны за нагрев плазмы. Для этого необходимо показать, что возбуждение того или иного спектра колебаний коррелирует с увеличением энергосодержания плазмы.

В данной работе исследуется связь вспышек рентгеновского излучения на циклотронных и плазменных частотах с энергосодержанием высокотемпературной компоненты плазмы, а также выясняется роль магнитных пробки в механизме пучкового нагрева.

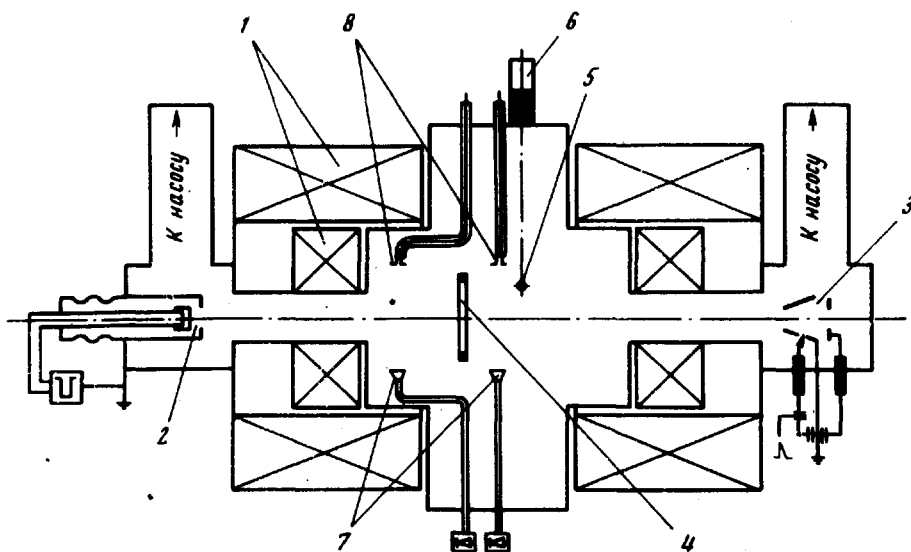


Рис. 1. Схематический чертеж установки: 1 — катушки магнитного поля, 2 — электронная пушка, 3 — плазменный инжектор, 4 — диамагнитный зонд, 5 — игла-мишень, 6 — рентгеновский датчик, 7 — рупорные антенны, 8 — дипольные антенны

Схематически установка представлена на рис. 1. Магнитное поле создавалось системой катушек (1). Напряженность магнитного поля в центре ловушки могло достигать 2 кэ , в пробках — 10 кэ . На торцах установки размещались электронная пушка (2) и плазменный инжектор (3). Измерялись диамагнетизм плазмы, рентгеновское излучение и СВЧ излучение в диапазоне циклотронных и плазменных частот. Дифференциальный диамагнитный зонд (4) имел временное разрешение не хуже 10^{-6} сек . Рентгеновское излучение с иглы-мишени (5) регистрировалось сцинтилляционным датчиком (6). Датчик экранировался свинцом, а излучение с иглы-мишени попадало на кристалл только через узкое отверстие коллиматора. Рентгеновское излучение из объема плазмы на этом уровне чувствительности не регистрировалось. Электромагнитное излучение из плазмы в области частот $2\omega_{p1}$ и ω_H принималось, соответственно, рупорными (7) и дипольными (8) антеннами. Антенны располагались в центре установки и в области первой, по ходу пучка, пробки.

На рис. 2,а представлена осциллограмма диамагнитного сигнала, характеризующегося скоростью изменения энергосодержания плазмы. На этой осциллограмме видно, что в некоторые моменты времени происходит резкое уменьшение энергосодержания плазмы. В эти же моменты наблюдаются интенсивные вспышки излучения на циклотронных частотах (осциллограмма 2,б) и рентгеновского излучения с иглы-ми-

шени (осциллограмма 2,в). Поскольку эти вспышки (число их зависит от концентрации холодной плазмы) всегда сопровождаются не увеличением, а уменьшением энергосодержания плазмы, то естественно, они никакого отношения к нагреву плазмы иметь не могут. Отсюда становится очевидным, что стохастический циклотронный механизм пучкового нагрева плазмы, базирующийся исключительно на наблюдении корреляций между рентгеновским излучением и возбуждением спектра колебаний в области циклотронных частот экспериментально необоснован. На самом деле результаты авторов стохастического циклотронного механизма имеют отношение не к нагреву, а к наблюдению неустойчивости плазмы, нагретой в полях колебаний совсем другого типа. Подобные неустойчивости наблюдались ранее в плазме с горячими электронами [6].

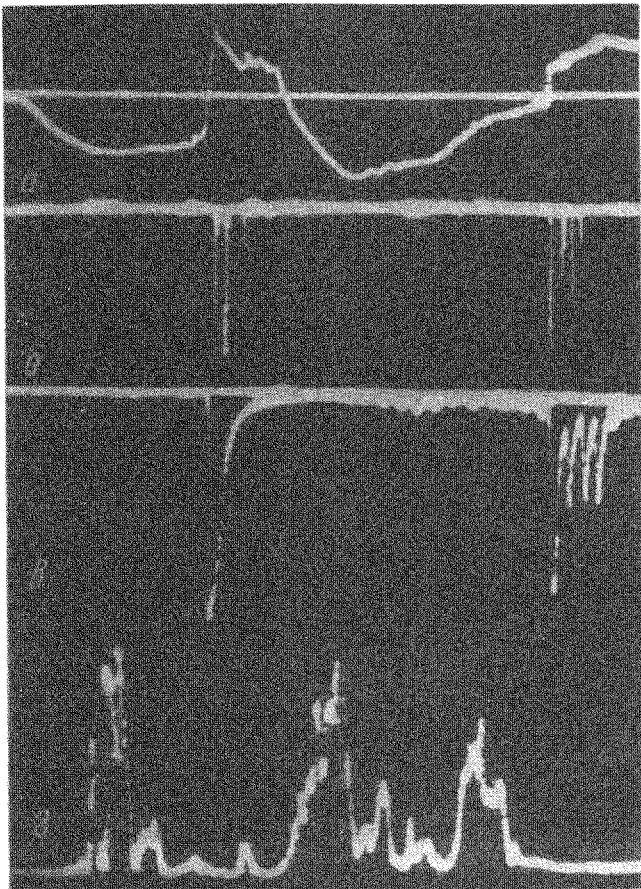


Рис. 2. Осциллограммы, снятые в одном опыте: *а* – дифференциальный диамагнитный сигнал, *б* – излучение на длине волны $\lambda = 10$ см, *в* – жесткое рентгеновское излучение, *г* – излучение на длине волны $\lambda = 1,5$ см. $H_{min} = 1$ кэ, $H_{max} = 5$ кэ, ток пучка $I = 10$ а, энергия пучка $U = 20$ кэв, концентрация плазмы $n = (1 + 2) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, длительность развертки $\tau = 50$ мксек

На стадиях нагрева (нижние участки осциллограммы 2,а) наблюдается излучение на двойной плазменной частоте $2\omega_{pl}$ (осциллограмма

2,1), что свидетельствует о развитии в плазме интенсивных ленгмюровских колебаний. Вероятнее всего, что нагрев электронов до высоких температур происходит в полях именно этих колебаний.

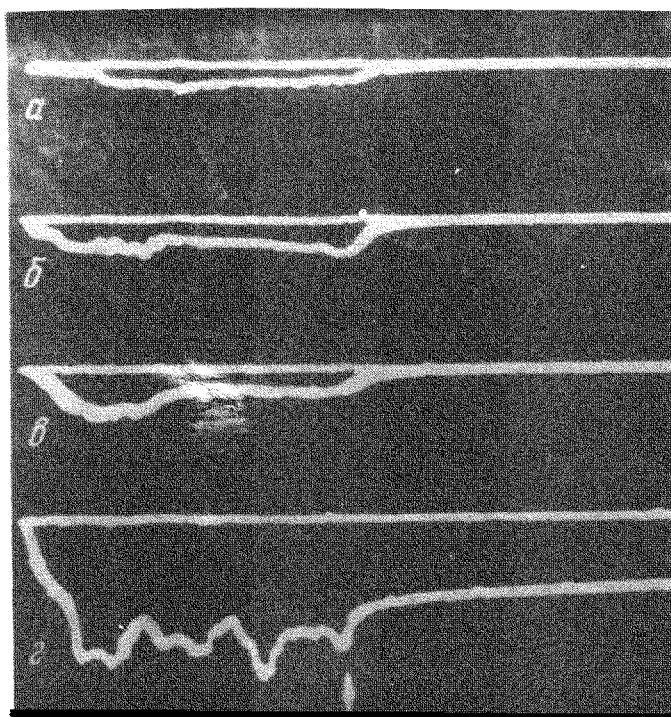


Рис. 3. Осциллограммы интегрального диамагнитного сигнала: а - $R_3 = 2, R_{II} = 2$; б - $R_3 = 2, R_{II} = 5$; в - $R_3 = 5, R_{II} = 2$; г - $R_3 = 5, R_{II} = 5$. $H_{min} = 1$ кэ, $l = 10$ а, $U = 20$ кэв, $n = (1 + 2) \cdot 10^{12}$ см $^{-3}$, $\tau = 500$ мксек. Момент выключения пучка указан стрелкой

На рис. 3 показана серия осциллограмм интегрального диамагнитного сигнала (энергосодержания плазмы) при различных комбинациях пробочных отношений. Было реализовано четыре комбинации: а) $R_3 = 2, R_{II} = 2$; б) $R_3 = 2, R_{II} = 5$; в) $R_3 = 5, R_{II} = 2$; г) $R_3 = 5, R_{II} = 5$, где R_3 - пробочное отношение на стороне электронной пушки, R_{II} - пробочное отношение на противоположном конце пробкотрона. На рис. 3, а, б, в диамагнитные сигналы практически не отличаются друг от друга. В случае рис. 3, г картина существенно меняется - значительно увеличивается энергосодержание плазмы и возрастает ее температура, о чем можно судить по длительному удержанию плазмы после выключения пучка. Из этих экспериментов следует, что величина пробочного отношения на обоих концах пробкотрона играет существенную роль в механизме пучкового нагрева. В модели стохастического циклотронного нагрева считается, что электроны плазмы набирают энергию в области спадающего магнитного поля первой, по ходу электронного пучка, пробки, а вторая пробка служит лишь для захвата их в ловушку. Однако и в этом пункте модель нагрева, развитая в работах [4, 5], экспериментально не подтверждается.

В заключение авторы выражают благодарность Д.Д.Рютову за полезные обсуждения.

Институт атомной энергии
им. И.В.Курчатова

Поступила в редакцию
20 мая 1974 г.

Литература

- [1] Л.П.Закатов, А.Г.Плахов, Д.Д.Рютов, В.В.Шапкин. ЖЭТФ, 54, 1088, 1968.
 - [2] А.Г.Плахов, Д.Д.Рютов, В.В.Шапкин. III Междунар. конф. по физике плазмы и исследованиям по управляемому термоядерному синтезу, Новосибирск, 1968, доклад CN 24/2-3.
 - [3] Д.Д.Рютов. Ядерный синтез, 9, вып. 2, 1969.
 - [4] Р.А.Демирханов, А.К.Геворков, А.Ф.Попов, О.А.Колмаков. Письма в ЖЭТФ, 15, 389, 1972.
 - [5] Р.А.Демирханов, А.К.Геворков, А.Ф.Попов, О.А.Колмаков. ЖЭТФ, 63, 1653, 1972.
 - [6] В.В.Аликаев, В.М.Глаголев, С.А.Морозов. Plasma Physics, 10, 753, 1968.
-