

ТЕРМОДИФфуЗИЯ И ВИХРЕВЫЕ ТОКИ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ

С.В.Егоров, А.В.Костров, А.В.Тронин

Прямыми измерениями обнаружены и исследованы вихревые токи, сопровождающие процесс термодиффузии плазмы в магнитном поле. Зарегистрировано образование областей с пониженной концентрацией на фоновой плазме при возникновении диффузионных токов.

1. Как показывает теоретический анализ ^{1, 2}, в слабоионизованной замагниченной плазме процесс диффузионного расплывания неоднородности в зависимости от ее формы может происходить с возбуждением вихревых токов. В этом случае, электроны диффундируют вдоль, ионы — поперек магнитного поля, а замкнутый ток создается фоновыми частицами. При такой диффузии, часто называемой униполярной, времена эволюции неоднородности резко уменьшаются по сравнению с амбиполярными, при которых электронный и ионный потоки равны в каждой точке. Эти времена оказываются порядка наибольшего из времен, определяемых электронным продольным или ионным поперечным униполярными коэффициентами диффузии. Замыкание потоков на фоновой плазме приводит к перераспределению фоновых частиц и к возникновению в определенных областях уменьшения концентрации плазмы ², что является отличительным свойством униполярной диффузии в безграничной плазме.

В настоящей работе экспериментально исследуется явление термодиффузии¹⁾ замагниченной плазмы при локальном нагреве электронов. В проведенных ранее экспериментах ⁴ было обнаружено, что при локальном нагреве электронов замагниченной плазмы перераспределение концентраций происходило практически с той же скоростью, что и процесс распространения тепла. Эти косвенные данные свидетельствовали о том, что быстрая термодиффузия плазмы происходит с протеканием вихревых токов. Целью данной работы и явилось прямое обнаружение и исследование этих вихревых токов.

2. Экспериментальные исследования проводились на установке, представляющей собой вакуумную камеру длиной 150 см и диаметром 80 см. Гелиевая плазма создавалась высокочастотным импульсным разрядом в однородном магнитном поле ($H = 200$ Э) при давлении 10^{-2} торр. Для локального нагрева электронов использовалась рамка с током диаметром 1,5 см, которая помещалась на оси плазменного столба диаметром ~ 40 см. Нагревный высокочастотный импульс ($\omega = 2 \cdot 10^8$ с⁻¹; $\tau_n = 2 \cdot 10^{-4}$ с) подводился к рамке на стадии распада плазмы. Характерное время изменения концентрации плазмы после выключения источника $\tau_{N_e} = 10^{-3}$ с. Нагрев электронов плазмы осуществлялся при концентрации $N_e = 2 \cdot 10^{12}$ см⁻³ и температуре электронов и ионов $T_e \approx T_i \approx 0,4$ эВ. В этих условиях параметры эксперимента соответствовали соотношениям:

$$v_{em} < v_{ei} \ll \omega_{H_e} \ll \omega_{p_e}, \quad m_e v_{ei} \ll M_i v_{im}$$

где v_{em} , v_{ei} — частоты столкновений электрона с нейтралом и ионом, а v_{im} — иона с нейтралом; ω_{H_e} — гирочастота электрона, ω_{p_e} — плазменная частота, m_e и M_i — массы электрона и иона.

Пространственное распределение температуры электронов и концентрации плазмы определялось с помощью подвижных ленгмюровских зондов. Для измерения диффузионных потоков электронов и ионов был изготовлен двойной плоский зонд ⁵, представляющий собой два металлических диска диаметром 10^{-1} см. Диска располагались параллельно, рабочи-

1) Вихревые токи в плазме могут так же оказывать существенное влияние и на термодиффузионный процесс ³.

ми поверхностями в разные стороны. Расстояние между дисками 10^{-2} см, что значительно меньше характерных масштабов изменения температуры и концентрации электронов. Оба диска имели одинаковый потенциал относительно плазмы. По разностному сигналу с дисков можно было определить амплитуду и направление электронного или ионного тока в плазме. Плоский двойной зонд перемещался как по радиусу камеры, так и вдоль ее оси.

3. При подаче высокочастотного напряжения на рамку происходил омический нагрев электронов квазистатическим полем антенны ($\omega \sim \nu_{ei}$). От источника нагрева вдоль магнитного поля распространялась тепловая волна, имеющая из-за неоднородного поперечного нагрева вид конуса, обращенного основанием к источнику ⁴. Квазистационарное распределение электронной температуры и возмущения концентрации плазмы к концу импульса нагрева представлены на рис. 1. Характерное время термодиффузионного перераспределения концентрации составляло величину 10^{-4} с. Такое быстрое время, по сравнению с чисто амбилярным поперек или вдоль магнитного поля, соответствует продольному выносу плазмы с электронным коэффициентом термодиффузии.

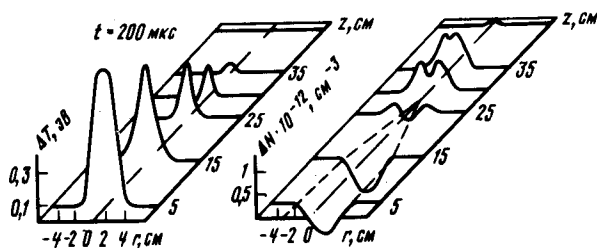


Рис. 1. Квазистационарные пространственные распределения электронной температуры и концентрации плазмы через 200 мкс после включения источника нагрева. Источник находился в $z = 0$

Измерения с помощью двойного плоского зонда позволили обнаружить, что изменение концентрации плазмы в магнитном поле под действием градиента электронной температуры происходило с образованием вихревых токов. Результаты этих измерений в виде пространственных распределений плотности тока электронов вдоль, а ионов поперек магнитного поля показаны на рис. 2. Вдоль оси электронный ток направлен от источника нагрева, а по фоновой плазме наблюдался противоток электронов. Оценки показывают, что величины прямого и обратного токов электронов с учетом аксиально-симметричного распределения практически равны.

Ионный ток вблизи источника направлен поперек магнитного поля из области нагрева, а обратный ток фоновых ионов наблюдался в тех сечениях по оси z , где происходило уменьшение прямого электронного тока. Максимальная величина продольного электронного тока вдоль оси системы соответствует наибольшему значению диффузионной скорости ($v_{e \text{ дифф}} \sim v_{Te}^2 / \nu_{ei} \cdot \nabla T_e / T_e$, где v_{Te} — тепловая скорость электронов) (рис. 2).

Как отмечалось выше, одной из характерных особенностей униполярной диффузии является образование областей обеднения фоновой плазмы. Для обнаружения этих областей был применен миниатюрный СВЧ зонд ⁶, который позволял проводить локальные измерения относительно малых возмущений концентрации (чувствительность $\delta N / N \geq 5 \cdot 10^{-3}$). Результаты этих измерений представлены в виде заштрихованных участков на рисунках 2 (а, б). Эти участки соответствуют областям обеднения плазмы с $\delta N / N \sim 10^{-2}$.

После выключения источника нагрева температура электронов уменьшалась за время порядка $3 \cdot 10^{-5}$ с. При этом происходило диффузионное затекание концентрации плазмы к первоначальному состоянию. Как показали измерения, направление токов электронов и ионов изменилось на противоположное по сравнению с процессом термодиффузии.

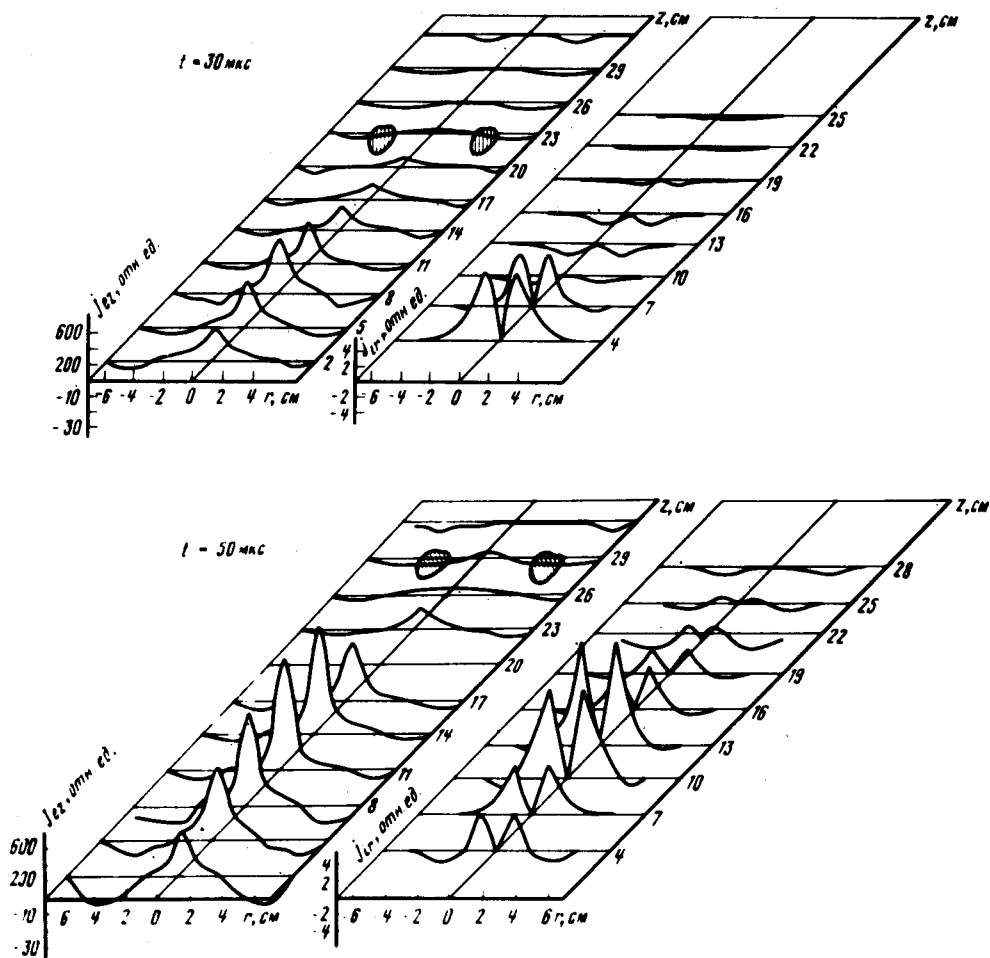


Рис. 2. Пространственные распределения плотности электронного и ионного токов в плазме в процессе термодиффузии через: а – 30 мкс; б – 50 мкс: после включения источника нагрева. Заштрихованные участки соответствуют обнаруженным областям обеднения

Таким образом, в результате экспериментальных исследований прямыми измерениями показано, что процесс термодиффузии плазмы в магнитном поле, при локальном нагреве электронов, происходит с возбуждением вихревых токов, протекающих по возмущенной и фоновой плазме. При этом характерные времена изменения концентрации плазмы определяются униполярными коэффициентами переноса. Полученные данные могут способствовать интерпретации результатов по нелинейному взаимодействию мощного радиоизлучения с ионосферной плазмой.

Литература

1. Гуревич А.В., Цедилина Е.Е. УФН, 1967, 91, 609.
2. Жилинский А.П., Цендин Л.Д. УФН, 1980, 131, 343.
3. Васьков В.В. Взаимодействие радиоволн КВ и УКВ диапазонов с ионосферой. М.: Измиран, 1980.
4. Васьков В.В., Голубятников Г.Ю., Егоров С.В., Костров А.В., Миронов В.А., Чугунов Ю.В. Международный симпозиум. Модификация ионосферы мощным радиоизлучением, М.: Измиран 1986, с. 157.
5. Радченко Р.В. и др. ЖТФ, 1975, 10, 2225.
6. Стензел Р.А. Приборы для научных исследований, 1976, 72, 5.