

ВЛИЯНИЕ ТОРОИДАЛЬНОГО ДРЕЙФА НА ИНЖЕКЦИЮ ПЛАЗМЫ ПОПЕРЕК МАГНИТНОГО ПОЛЯ

О.И.Федянин, Д.В.Хольнов

Одним из методов инжекции в магнитные ловушки, играющим в последнее время большую роль, является инжекция плазмы поперек магнитного поля с использованием эффекта поляризационного взаимодействия сталкивающихся потоков [1-3]. Экспериментальная проверка по изучению возможности заполнения плазмой замкнутой тороидальной ловушки с двухзаходным стеллараторным полем показала наличие эффективного захвата плазмы [4].

При исследовании движения плазменных струй в поперечном магнитном поле было обнаружено, что плазма, несмотря на то, что магнитное давление гораздо больше кинетического ($H^2/8\pi \gg p$), довольно хорошо проникает сквозь магнитный барьер. Этот эффект обусловлен возникновением электрической поляризации плазмы, двига-

щейся в поперечном магнитном поле, которая, в свою очередь, приводит к дрейфу в самосогласованных скрещенных полях со скоростью, совпадающей по направлению с первоначальной. Кроме сохранения поперечного движения, наблюдается интенсивное растекание плазмы вдоль силовых линий поля, причем скорость продольного растекания может быть порядка поперечной. При поперечной инжекции плазмы в тороидальное магнитное поле на эти движения должен накладываться тороидальный дрейф, обусловленный поляризационными полями, возникающими вследствие центробежного дрейфа и дрейфа в неоднородном поле равноименных компонент плазмы. Действительно, тороидальный дрейф приводит к вполне определенным электрическим поляризованным полям, которые могут совпадать или быть противоположными электрическим полям, возникающим при движении плазмы поперек магнитного поля. Таким образом, следует ожидать, что распределение плазмы по объему ловушки будет зависеть от начальных условий, а именно, от направления вектора скорости плазменного потока относительно градиента магнитного поля.

Для проверки этих предположений были проведены исследования движения плазмы в тороидальном магнитном поле. Эксперименты проводились на установке, представляющей собой тороидальную вакуумную камеру из нержавеющей стали (большой диаметр тора 120 см, малый - 10 см). Камера помещена в магнитную систему секционированного соленоида, создающую квазистационарное поле (максимальная величина поля ~ 3 кэ, длительность полупериода $\sim 2 \cdot 10^{-3}$ сек). Инжекция плазмы осуществляется двумя искровыми источниками, помещенными в плоскости тора на одном азимуте ($\varphi = 0$). Различие в расположении инжекторов заключается в том, что они дают разное направление начальной скорости плазменного потока: для внутреннего $\bar{v}_{\text{пл}}$ параллельна ∇H^2 , для внешнего $\bar{v}_{\text{пл}}$ антипараллельна ∇H^2 . Измерение потока плазмы, захваченной в ловушку, производилось локальными экранированными электрическими зондами на различных азимутах тора ($\varphi = 45$ и 135°).

На рис. 1, 2 приведены распределения ионов по радиусу $N(r) = \int_0^r n v dt$, где n - плотность ($n_{\text{max}} \approx 5 \cdot 10^{11}$ см $^{-3}$), v - скорость.

Из кривой рис. 1 видно, что плазма, инжектируемая внешним источником, на азимуте 45° имеет колоколообразное распределение с максимумом, смещенным наружу. Конфигурация плазмы при внутренней инжекции резко отличается: во-первых, число частиц, прошедших ази-

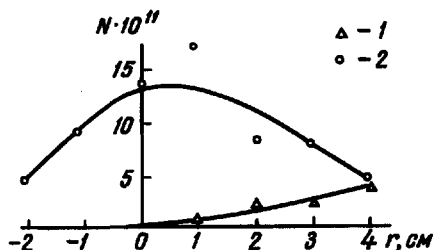


Рис. 1. Распределение интегрального во времени потока частиц по радиусу для внутренней (1) и внешней (2) инжекции плазмы. Измерения для азимута 45°

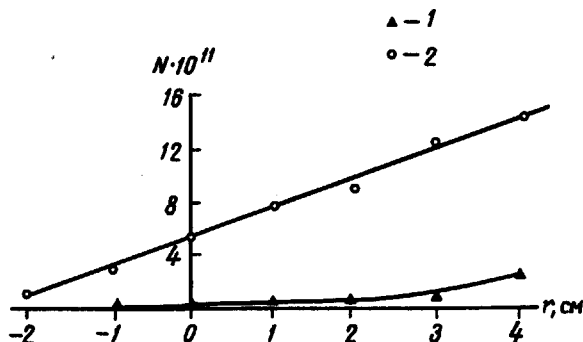


Рис. 2. Распределение интегрального потока частиц N по радиусу для внутренней (1) и внешней (2) инжекции плазмы. Измерения для азимута $\varphi = 135^\circ$

мут 45° , значительно меньше, и, во-вторых, распределение отвечает обычному распределению плазмы в тороидальном магнитном поле, обусловленному тороидальным дрейфом.

При дальнейшем движении в тороидальном поле плазма "сдвигается" на внешнюю стенку камеры (см. рис. 2). Приводимые распределения получены на азимуте 135° .

Интересным фактом является сохранение потока плазмы вблизи внешней границы камеры, как видно из сравнения величин потока на

радиусах 3–4 см (рис. 1 и 2). Это явление может быть объяснено, по-видимому, эффектом проводящих границ.

Для дополнительной проверки утверждения о влиянии начальной скорости плазмы на распространение ее в тороидальном магнитном поле возможно изменение начальных условий инжекции проводить не ва-

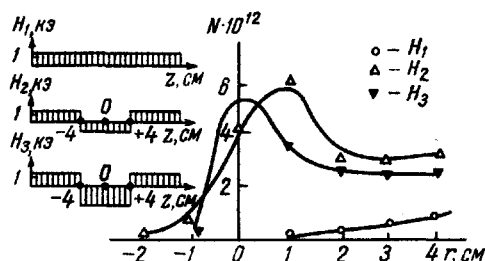


Рис. 3. Распределение интегрального потока частиц N по радиусу для внутренней инжекции плазмы в поле с пространственной модуляцией. Приводится схематическое распределение величины магнитного поля в области инжекции при соответствующих значениях H_z . Измерения приведены для азимута $\varphi = 45^\circ$

риацией \bar{v}_0 , а каким-либо другим образом. В качестве одного из способов может служить применение пространственной модуляции магнитного поля. В области инжекции, с помощью короткого соленоида, помещенного внутрь камеры, создавалось программированное во времени изменение магнитного поля. Магнитное поле может уменьшаться до нуля и менять свое направление в течение $\tau \sim 40\text{--}50$ мксек ($\tau \gg$ времени инжекции).

Картина движения плазмы, инжектированной в модулированное поле, резко меняется. На рис. 3 приведены распределения потоков частиц в зависимости от величины магнитного поля в области инжекции для случая внутренней инжекции плазмы. Здесь приводятся также схематические конфигурации продольной компоненты H_z .

Особенностью распределения на азимуте 45° является четкая локализация плазмы, определяемая конфигурацией магнитного поля в области инжекции, причем это явление наступает при наличии знакопеременного поля. При данном методе инжекции плазма, захваченная в

тороидальную систему, при своем движении проходит области несохранения адиабатической инвариантности (область нулевого поля), и конфигурация плазменной струи в значительно меньшей степени определяется направлением инъекции (внешней или внутренней) по отношению к направлению градиента магнитного поля.

Таким образом, полученная совокупность экспериментальных результатов, а именно - различие в пространственном распределении плазмы, инжектируемой по направлению градиента тороидального магнитного поля и против, значительное влияние пространственной модуляции магнитного поля в области инъекции на конфигурацию плазменного потока - позволяет утверждать о справедливости модели суммарного дрейфа.

В заключение авторы считают приятным долгом выразить благодарность М.С.Рабиновичу, И.С.Шпигелю за полезные обсуждения, Н.В.Перову, В.М.Зикову за помощь в подготовке и проведении экспериментов.

Физический институт
им.П.Н.Лебедева
Академии наук СССР

Поступило в редакцию
27 мая 1965 г.

Литература

- [1] E.G. Harris, R.V. Thun, W.H. Bostick. Phys. Rev., 105, 47, 1957.
- [2] Б.Г.Сафронов, В.Н.Гончаренко, Д.К.Гончаренко. Сб. "Физика плазмы и проблема управляемого термоядерного синтеза", стр. III. Изд. АН УССР, Киев, 1962.
- [3] И.И.Демиденко и др. ИТФ, 34, 1183, 1964.
- [4] Г.М.Батанов, С.Е.Гребенщиков и др. Докл. АН СССР, 160, 1296, 1965.