

МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ

Авторы: В. Д. Шафранов, А. В. Тимофеев

МАГНИТНЫЕ ЛОВУШКИ, конфигурации магнитного поля, способные удерживать заряженные частицы или плазму. Естественной М. л. является, напр., магнитное поле Земли. Плазма солнечного ветра, захваченная земным магнитным полем, образует [радиационные пояса Земли](#). М. л. используются как для науч. исследований, так и в практич. целях, наиболее важная из которых – создание термоядерного реактора для осуществления [управляемого термоядерного синтеза](#).

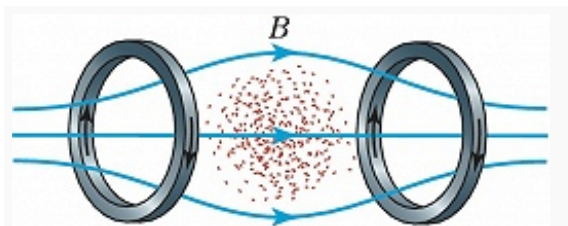


Рис. 1. Открытая магнитная ловушка: короткие стрелки показывают направление электрических токов в катушках.

Магнитное поле может удерживать заряженные частицы, движущиеся как в поперечном направлении к вектору магнитного поля, так и в продольном. Эти свойства магнитного поля позволяют создавать М. л. В магнитном поле траектория заряженной частицы имеет вид спирали, вытянутой вдоль силовых линий поля. Проекция траектории на плоскость, перпендикулярную магнитному

полю, представляет собой окружность (ларморовская окружность). Её радиус (ларморовский радиус) равен

$$r_B = v_{\perp} / \omega_B, \text{ где}$$

$\omega_B = eB/mc$ – частота вращения по ларморовской окружности,

v_{\perp} – перпендикулярная магнитному полю составляющая скорости,

e – электр. заряд частицы,

m – её масса, c – скорость света,

B – индукция магнитного поля. Частица будет удерживаться в М. л., если её

ларморовский радиус мал по сравнению с размером ловушки поперёк магнитного поля.

Для этого магнитное поле должно быть достаточно велико (

$r_B \propto B^{-1}$). При малой величине ларморовского радиуса плазму можно рассматривать как газ заряженных т. н. ларморовских кружков, движущихся вдоль магнитного поля со скоростью

$v_{\parallel} = \mathbf{v}\mathbf{B}/B$. Если магнитное поле неоднородно (его величина или направление меняется в пространстве), то ларморовские кружки движутся (дрейфуют) поперёк поля со скоростью

$v_{др1} = mc v_{\perp}^2 \mathbf{B} \times \nabla B / 2eB^3$ (градиентный дрейф) и

$v_{др2} = mc v_{\parallel}^2 \mathbf{B} \times (\mathbf{B}\nabla)\mathbf{B} / eB^4$ (центробежный дрейф). Обычно в М. л. пространственный масштаб магнитного поля

L_B намного превышает ларморовский радиус, поэтому скорость дрейфа меньше скорости частицы в

$L_B/r_B \gg 1$ раз.

Ларморовский кружок представляет собой круговой ток с магнитным моментом

$\mathbf{M} = -mv_{\perp}^2 \mathbf{B} / 2B^2$. В магнитном поле, величина которого меняется в продольном направлении, на ларморовский кружок действует сила

$\mathbf{F} = \mathbf{M}\nabla B$, стремящаяся оттолкнуть его от области более сильного поля, называемой магнитной пробкой, или магнитным зеркалом. Это произойдёт, если угол между направлением скорости частицы и магнитным полем

$\theta = \arctg(v_{\perp}/v_{\parallel})$ (питч-угол) не слишком мал и, соответственно, энергия продольного движения

$E_{\parallel} = mv_{\parallel}^2/2$ не слишком велика по сравнению с энергией поперечного движения

$E_{\perp} = mv_{\perp}^2/2$.

Удержание заряженных частиц с помощью магнитных пробок используется в

[открытых ловушках](#). Этот термин указывает на то, что, в отличие от замкнутых

ловушек (см. ниже), в открытых М. л. силовые линии магнитного поля выходят из области, занятой плазмой. Открытые ловушки также называют пробкотронами, а в

англоязычной лит-ре – зеркальными ловушками. Принципиальная схема открытой

магнитной ловушки показана на рис. 1. Магнитные пробки не являются абсолютными,

они пропускают те заряженные частицы, питч-угол которых достаточно мал. Частицы

плазмы, удерживаемые в ловушке, сталкиваются друг с другом, что приводит к

изменению питч-угла. В результате частицы, запертые в открытой ловушке, могут

перейти в разряд неудерживаемых. Поскольку из открытых ловушек выходят частицы с малым значением питч-угла, распределение частиц в пространстве скоростей оказывается анизотропным, а следовательно, термодинамически неравновесным. Это способствует самопроизвольному возникновению флуктуирующих электрич. полей – развитию неустойчивостей, под влиянием которых выход частиц из открытых ловушек усиливается. Для улучшения удержания плазмы предложено неск. модификаций открытых М. л. – амбиполярные М. л., ловушки с гофрированным магнитным полем, газодинамич. ловушки и др.

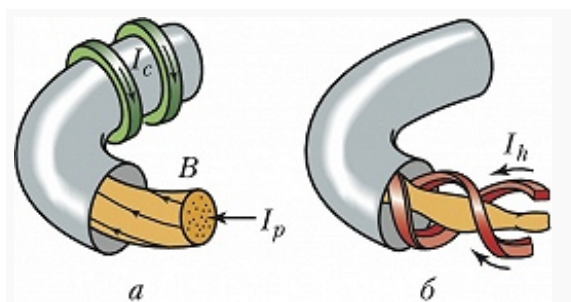


Рис. 2. Тороидальные магнитные ловушки: а – токамак, б – стелларатор-торсатрон. Короткие стрелки показывают направление электрических токов: I_c – в витках тороидального магнитного по...

Движение заряженных частиц вдоль магнитного поля не приводит к потерям плазмы, если силовые линии магнитного поля не выходят за пределы ограниченной области пространства. В этом случае вся область, в которой располагаются силовые линии магнитного поля, представляет собой М. л. Такие ловушки называются замкнутыми. Наибольшее развитие среди них получили токамаки и стеллараторы. В токамаках осн. магнитное поле, создаваемое набором катушек с током, эквивалентно полю тороидального

соленоида (рис. 2, а). Его силовые линии представляют собой окружности с центром на оси соленоида, а величина поля уменьшается от оси по закону, близкому к

$$B \propto 1/R, \text{ где}$$

R – расстояние от оси. Из-за неоднородности такого магнитного поля заряженные частицы дрейфуют по бинормали к силовым линиям. Так, если силовые линии лежат в горизонтальной плоскости, то скорость дрейфа вертикальна, причём скорости ионов и электронов направлены в противоположные стороны. В результате происходит разделение зарядов – электрически нейтральная плазма поляризуется. Возникающее при этом электрич. поле ортогонально магнитному (скрещенные поля). В таких полях плазма как целое дрейфует со скоростью

$$\mathbf{v} = c\mathbf{E} \times \mathbf{B}/B^2, \text{ направленной от оси тороида, и, в конце концов, должна попасть на}$$

стенку камеры, отделяющей плазму от внешнего мира.

Чтобы воспрепятствовать уходу плазмы, магнитное поле усложняют. В тороидальном плазменном шнуре возбуждают продольный электрич. ток, создающий полоидальное магнитное поле. Силовые линии суммарного магнитного поля (поля тороидального соленоида и полоидального поля тока в плазме) имеют вид спиралей, проворачивающихся вокруг оси плазменного шнура. Такое магнитное поле называют полем с вращательным преобразованием. В нём заряженные частицы движутся по довольно сложным траекториям, не выходя, однако, за пределы ограниченной области, поэтому электрич. поляризации плазмы не происходит.

Электрич. ток может возбуждаться как индукционным способом – наращиванием тока в дополнит. обмотках (индукторе), так и безындукционным – с помощью микроволн и инъекции высокоэнергичных нейтральных атомов. Поскольку электрич. ток в индукторе не может возрасти неограниченно, в первом случае токамак вынужден работать в импульсном режиме, т. к. плазма уходит на стенки камеры, когда рост тока в индукторе прекращается.

Вращательное преобразование магнитных силовых линий можно осуществить и без возбуждения тока в плазме. Возможны два таких способа: использование соленоида, ось которого не является плоской кривой (стелларатор с пространственной осью), и наложение на тороидальный соленоид винтовых проводников с током (обычный стелларатор и его модификации – торсатрон, гелиотрон и др.; рис. 2, б). Глав. преимущество стеллараторов перед токамаками – возможность стационарной работы без затраты энергии на генерацию тока в плазме, их недостаток – громоздкость конструкции.

Одним из параметров, характеризующих качество М. л., является параметр

$$\beta = 8\pi p / B^2, \text{ где}$$

p – давление плазмы, удерживаемой в ловушке,

$B^2/8\pi$ – давление магнитного поля. В токамаках и стеллараторах эта величина мала по сравнению с единицей, что позволяет эффективно контролировать величину и конфигурацию магнитного поля этих ловушек.

При достаточно мощных разрядах плазма может так изменять конфигурацию магнитного поля, что возникают замкнутые ловушки, причём параметр β оказывается сравнимым с единицей. Так, при разряде в тороидальном магнитном поле оно может менять знак в некоторой части плазменного шнура (пинч с обращённым магнитным полем). Разряд в прямом магнитном поле, происходящий одновременно с его обращением, может приводить к замыканию силовых линий магнитного поля и образованию конфигураций, называемых компактными торами, или конфигурациями с обращённым магнитным полем. Однако время жизни таких объектов оказывается небольшим, и параметры плазмы (плотность, темп-ра) уступают достигнутым на токамаках и стеллараторах.

Осн. потери плазмы из замкнутых М. л. происходят за счёт её диффузии поперёк магнитного поля. Диффузия вызывается столкновениями заряженных частиц и хаотич. электрич. полями, возникающими вследствие развития плазменных неустойчивостей. В однородном магнитном поле заряженные частицы при столкновениях смещаются поперёк магнитного поля на расстояния порядка ларморовского радиуса (классич. диффузия). В замкнутых М. л. смещения увеличиваются из-за сложной траектории заряженных частиц (неоклассич. диффузия). Однако обычно наиболее интенсивна т. н. аномальная диффузия, возникающая вследствие хаотич. смещений плазмы, дрейфующей в скрещенных полях (магнитном поле ловушки и электрич. поле неустойчивых плазменных колебаний). Время диффузионного ухода возрастает с увеличением размеров плазмы. Поэтому эволюция М. л. шла по пути увеличения их размеров. Наилучшие результаты были получены на т. н. больших токамаках: JET (Joint European Torus, Европа), TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, США), JT-60 (Япония). Планируется сооружение междунар. токамака ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), что является одной из ступеней на пути создания пром. [термоядерного реактора](#).

Литература

Лит.: Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. 2-е изд. М., 1963; Трубников Б. А. Теория плазмы. М., 1996; Ковальский Н. Г., Лукьянов С. Ю. Горячая плазма и управляемый синтез. М., 1999; Миямото К. Основы физики плазмы и

управляемого синтеза. М., 2007; Морозов А. И. Введение в плазмодинамику. 2-е изд.
М., 2008.

Processing math: 100%