

частиц в плазму. Для высокочастотного нагрева плазмы удобно использовать резонансы, к-рые отвечают внутр. колебат. процессам в плазме. Напр., нагрев ионной компоненты удобно осуществлять в диапазоне гармоник циклотронных частот либо осн. ионов плазмы, либо специально подобранных ионов-присадок. Нагрев электронов осуществляется при электронно-циклотронном резонансе.

При нагреве ионов с помощью быстрых частиц обычно используются мощные пучки нейтральных атомов. Такие пучки не взаимодействуют с магн. полем и проникают глубоко внутрь плазмы, там они ионизируются и захватываются магн. полем  $T$ .

С помощью дополнит. методов нагрева темп-ры плазмы  $T$  удаётся поднять  $> 3 \cdot 10^8$  К, что вполне достаточно для протекания мощной термоядерной реакции. В будущих разрабатываемых  $T$ -реакторах нагрев плазмы будет осуществляться высокоэнергетичными альфа-частицами, возникающими при реакции слияния ядер дейтерия и трития.

**Стационарный токамак.** Обычно ток в плазме протекает только при наличии вихревого электрич. поля, создаваемого за счёт увеличения магн. потока в индукторе. Индукционный механизм поддержания тока ограничен во времени, так что соответствующий режим удержания плазмы является импульсным. Однако импульсный режим не является единственным возможным, нагрев плазмы может использоваться и для поддержания тока, если наряду с энергией в плазму передаётся и импульс, разный для разных компонент плазмы. Неиндукционный поддержание тока облегчается за счёт генерации тока самой плазмой при её диффузионном расширении к стенкам (бутстрэп-эффект). Бутстрэп-эффект был предсказан неоклассич. теорией и подтверждён затем экспериментально. Эксперименты показывают, что плазма  $T$  может удерживаться стационарно, и гл. усилия по практич. освоению стационарного режима направлены на повышение эффективности поддержания тока.

**Дивертор, управление примесями.** Для целей управляемого термоядерного синтеза требуется очень чистая плазма на основе изотопов водорода. Чтобы ограничить примесь др. ионов в плазме, в ранних  $T$  плазма ограничивалась т. н. лимитером (рис. 2, а), т. е. диафрагмой, не допускающей соприкосновения плазмы с большой поверхностью камеры. В совр.  $T$  используется гораздо более сложная диверторная конфигурация (рис. 2, б), создаваемая ка-

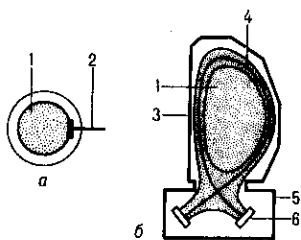


Рис. 2. Поперечный разрез плазмы круглого сечения (а) и вертикально вытянутого с образованием диверторной конфигурации (б): 1—плазма; 2—лимитер; 3—стенка камеры; 4—сепаратриса; 5—диверторная камера; 6—диверторные пластины.

тушками полоидального магн. поля. Эти катушки необходимы даже для плазмы круглого сечения: с их помощью создаётся вертикальная компонента магн. поля, к-рая при взаимодействии с осн. током плазмы не позволяет плазменному вихрю выбраться на стенку по направлению большого радиуса. В диверторной конфигурации витки полоидального магн. поля расположены так, чтобы сечение плазмы было вытянуто в вертикальном направлении. При этом замкнутые магн. поверхности сохраняются только внутри сепаратрисы, снаружи её силовые линии уходят внутрь диверторных камер, где происходит нейтрализация потоков плазмы, вытекающих из осн. объёма. В диверторных камерах удаётся смягчить нагрузку от плазмы на диверторные пластины за счёт дополнит. охлаждения плазмы при атомарных взаимодействиях.

**Токамак-реактор.** Гл. целью исследований на установках  $T$  является освоение концепции магн. удержания плазмы для создания термоядерного реактора. На  $T$  удаётся создать устойчивую высокотемпературную плазму с темп-рой

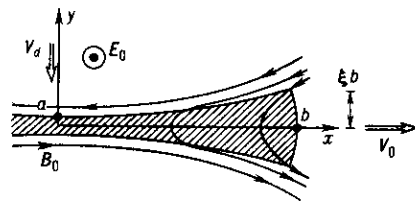
и плотностью, достаточными для термоядерного реактора; установлены закономерности для термоизоляции плазмы; осваиваются методы поддержания тока и управления уровнем примесей. Работы на  $T$  переходят из фазы чисто физ. исследований в фазу создания эксперим. термоядерного реактора.

Лит.: Арцимович Л. А., Управляемые термоядерные реакции, 2 изд., М., 1963; Лукьянов С. Ю., Горячая плазма и управляемый ядерный синтез, М., 1975; Kadomtsev B. V., Tokamak plasma a complex physical system, L., 1992. В. Б. Кадоццев.

**ТОКОВЫЕ СЛОЙ** — слой в хорошо проводящей плазме, разделяющие магн. поля разл. направленности. Скачок магн. поля ведёт к возникновению тонкого слоя электрич. тока. В результате происходящего в слое пересоединения магн. силовых линий меняется топология магн. поля, что сопровождается переходом его энергии в тепло, излучение, энергию магнитогидродинамич. течений и ускоренных частиц.

Частным случаем Т.с. является *нейтральный токовый слой*, разделяющий противоположно направленные магн. поля. Однако для образования нейтрального Т.с. необходима слишком высокая симметрия источников поля, поэтому в реальных условиях космич. и лаб. плазмы формируются т. н. не-нейтральные — содержащие ненулевые поперечную  $B_{\perp}$  и продольную  $B_{\parallel}$  компоненты магн. поля Т.с. (рис.;  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$  — соответственно  $y$ - и  $z$ -компоненты поля). Др. словами, для образования Т.с. достаточно лишь одной пары пересоединяющихся компонент поля,  $B_{\theta}$ . Строго говоря, любой Т.с. конечной ширины не-нейтрален, однако физика процесса пересоединения меняется лишь для достаточно больших значений  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$ .

Не-нейтральный токовый слой (симметричная поворота не показана).  $V_d$  — скорость втеkania плазмы в токовый слой.



Плазма вытекает из слоя с альвеновской скоростью  $V_0$  через эфф. сечение, пропорциональное  $\xi b$ , где  $\xi = B_{\perp} / B_0$ ,  $b$  — полуширина Т.с. Поэтому наличие поперечной компоненты  $B_{\perp} > (a/b) B_0$  существенно увеличивает охлаждение слоя тепловыми потоками и потоками плазмы вдоль силовых линий ( $a$  — полутолщина Т.с.). Скорость выделения энергии в таком слое гораздо больше, чем в нейтральном. Поперечная компонента стабилизирует *тириг-неустойчивость* Т.с., а значит, увеличивает величину магн. энергии, к-рая может быть накоплена в слое.

Пересоединение практически всегда происходит в присутствии продольного поля  $B_{\parallel}$ , совпадающего по направлению с электрич. полем  $E_0$ . Сжатие плазмы внутри слоя сопровождается усилением  $B_{\parallel}$ . Это, с одной стороны, препятствует увеличению плотности плазмы, а с другой — приводит к появлению электрич. тока, циркулирующего в поперечном сечении слоя. В условиях конечной проводимости этот ток диссипирует, приводя к дополнит. джоулеву нагреву плазмы. Кроме того, продольная компонента удерживает в Т.с. быстрые заряж. частицы, способствуя их ускорению электрич. полем.

Свойства Т.с. с ненулевыми  $B_{\perp}$  и  $B_{\parallel}$  позволяют истолковывать магнитосферные *суббури*, *вспышки на Солнце* и др. звёздах как процесс быстрого магн. пересоединения. Пересоединение в не-нейтральных Т.с. экспериментально проявляется, в частности, в ловушках типа *токамак*.

Лит.: Кадоццев В. Б., Перезамыкание магнитных силовых линий, «УФН», 1987, т. 151, с. 3; Проблемы физики солнечных вспышек, М., 1988; Somov B. V. (ed.), Fundamentals of cosmic electrodynamics, Dordrecht — [a. o.], 1994; см. также лит. при ст. *Нейтральный токовый слой, Пересоединение*. Ю. Э. Литвиненко.