

Нижнегибридный нагрев (НГН) основан на наличии резонанса для быстрых магнитозвуковых волн (см. *Волны в плазме*) вблизи т. н. нижнегибридной частоты, к-рая для плазмы с одним сортом ионов равна  $(\omega_{Вг} \omega_{Вэ})^{1/2}$ , где  $\omega_{Вэ} = eB/m_e c$  — электронная циклотронная частота. В крупных токамаках нижнегибридной частоте соответствует длина волны  $\sim 10$ — $20$  см. Мощность НГН в совр. экспериментах достигает  $10$  МВт. Воздействие на плазму ВЧ-полем в диапазоне нижнегибридной частоты используется также для возбуждения и поддержания тороидального тока в замкнутых установках.

Электронно-циклотронный резонансный нагрев (ЭЦРН) основан на близости частоты эл.-магн. волны  $\omega$  к электронной циклотронной частоте  $\omega_{Вэ}$  (или её гармонике). Для реактора-токамака это соответствует эл.-магн. волнам длиной  $1$ — $2$  мм, генератором к-рых обычно бывают *гиротроны*. Гиротронный комплекс токамака Т-10 (СССР) обеспечивает ввод в плазму излучения мощностью  $4$  МВт. Применение мощного ЭЦРН в открытых ловушках позволяет создавать в них «надтепловые» электроны, что необходимо для формирования в них тепловых барьеров (см. *Открытые ловушки*). ЭЦРН и др. резонансные методы нагрева позволяют в определ. мере управлять распределением мощности нагрева по сечению плазмы.

**Пучковый нагрев.** Широко используются для Н. п. пучки атомов водорода (и его изотопов) с энергией от десятков кэВ до неск. МэВ. Применяются именно атомарные, а не ионные пучки, т. к. они легко проникают в сильное магн. поле. Попадая в плазму, быстрые атомы превращаются в ионы (вследствие ионизации и перезарядки) и, т. к. их ларморовский радиус мал по сравнению с поперечным размером плазмы, остаются в ней и постепенно передают свою энергию частицам плазмы в результате кулоновских столкновений. Энергию пучка подбирают из условия, чтобы глубина проникновения быстрых атомов в плазму, определяемая процессами ионизации и перезарядки, была сравнима с характерным размером плазмы. Для получения атомарных пучков сначала в газоразрядном ионном источнике создают медленные ионы водорода (или его изотопов), затем их ускоряют до нужной энергии и, наконец, пропускают через перезарядную мишень (обычно облако газообразного водорода), где быстрый ион нейтрализуется в реакции перезарядки.

В кон. 1980-х гг. получены пучки дейтронов с энергией  $\geq 100$  кэВ, эквивалентным током  $50$  А и длительностью импульса в неск. секунд. Используя неск. пучков, мощность инжекции на крупных токамаках довели до  $30$  МВт.

При энергиях дейтронов, значительно превышающих  $100$  кэВ, перезарядка положит. ионов становится неэффективной. Для получения атомарных пучков с большей энергией используются отрицат. ионы водорода: они также извлекаются из спец. ионного источника, ускоряются, а затем «обдираются» до нейтральных атомов в газовой мишени. Таким способом получают пучки атомов с энергией в сотни кэВ и планируют получать пучки с энергией св.  $1$  МэВ. Достоинством метода Н. п. атомарными пучками является хорошая контролируемость процесса нагрева, недостатком — высокая стоимость соответствующих систем нагрева (особенно при больших энергиях инжекции).

Среди др. методов Н. п. в токамаках используют также адиабатич. сжатие плазменного шнура (обычно оно осуществляется как по большому, так и по малому радиусу) и нагрев НЧ-колебаниями  $\omega \ll \omega_{Вг}$ .

Наиб. известный метод Н. п. в импульсных системах с магн. удержанием — тета-пинч, т. е. быстрое сжатие плазмы по радиусу нарастающим продольным магн. полем (см. *Пинч-эффект*). Таким способом на одной из эксперим. установок в Лос-Аламосской лаборатории (США) была получена плазма плотностью  $10^{16}$  см $^{-3}$  и темп-рой  $10^7$  К. Др. метод — столкновение плазменных

сгустков, «выстреливаемых» навстречу друг другу с двух концов установки. Большая группа методов Н. п. связана с инжекцией пучков электронов или ионов с конца установки вдоль магн. поля. Т. к. длина свободного пробега частиц пучка по отношению к кулоновским столкновениям с электронами и ионами плазмы обычно заметно превышает длину установки, нагрев осуществляется в результате возбуждения пучком надтепловых микрофлукуэаций плазмы, к-рые затем передают свою энергию в тепло (группу методов нагрева, связанных с возбуждением плазменной микротурбулентности, иногда объединяют термином «турбулентный нагрев»).

В термоядерных системах с инерциальным удержанием плазмы Н. п. осуществляется в результате её быстрого сжатия схлопывающейся тяжёлой оболочкой. Для разгона оболочки применяется либо реактивная сила, возникающая при абляции (испарении) её внеш. слоёв под действием мощного потока светового излучения (в физич. геометрии), либо сила давления магн. поля, создаваемого протекающим по оболочке импульсным током (схема миниатюрного Z-пинча).

Лит.: Бабыкин М. В., *Электронный термоядерный синтез*, в кн.: *Итоги науки и техники*, сер. Физика плазмы, т. 1, ч. 2, М., 1981; Васов Н. Г. и др., *Нагрев и сжатие термоядерных мишеней, облучаемых лазером*, в кн.: *Итоги науки и техники*, сер. Радиотехника, т. 28, ч. 4, М., 1982; Габович М. Д., Плешивцев Н. В., Семашко Н. Н., Пучки ионов и атомов для управляемого термоядерного синтеза и технологических целей, М., 1988; Голант В. Е., Фёдоров В. И., *Высоочастотные методы нагрева плазмы в тороидальных термоядерных установках*, М., 1986. Д. Д. Рютов.

**НАДБАРЬЕРНОЕ ОТРАЖЕНИЕ** — квантовомеханич. эффект отражения частицы от *потенциального барьера* в случае, когда её энергия больше высоты барьера. См. *Квазиклассическое приближение*.

**НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ ПРИНЦИП** — один из вариационных принципов механики, согласно к-рому для данного класса сравниваемых друг с другом движений механич. системы действительным является то, для к-рого физ. величина, наз. *действием*, имеет минимум (точнее, экстремум). Обычно Н. д. п. применяется в одной из двух форм.

а) Н. д. п. в форме Гамильтона — Остроградского. В этом случае под действием за промежуток времени  $t_1 - t_0$  понимают величину

$$S = \int_{t_0}^{t_1} L dt,$$

где  $L$  — ф-ция Лагранжа, зависящая от обобщённых координат системы  $q_i$ , обобщённых скоростей  $\dot{q}_i$  и времени  $t$  (см. *Лагранжа функция*). Н. д. п. в этой форме устанавливает, что среди всех кинематически возможных перемещений системы из одной конфигурации в другую (близкую к первой), совершаемых за один и тот же промежуток времени  $t_1 - t_0$ , действительным является то, для к-рого действие  $S$  будет наименьшим. Матем. выражение Н. д. п. имеет в этом случае вид

$$\delta S = 0, \quad (1)$$

где  $\delta$  — символ неполной (изохронной) вариации.

б) Н. д. п. в форме Мопертюи — Лагранжа. В этом случае под действием за промежуток времени  $t_1 - t_0$ , в течение к-рого система перемещается из конфигурации  $A$  в конфигурацию  $B$ , понимают величину

$$S_0 = \int_{t_0}^{t_1} 2T dt \quad \text{или} \quad S_0 = \int_A^B \sum_i p_i dq_i,$$

где  $T$  — кинетич. энергия системы,  $p_i$  — обобщённые импульсы. Н. д. п. в этой форме устанавливает, что среди всех кинематически возможных перемещений системы из конфигурации  $A$  в близкую к ней конфигурацию  $B$ , совершаемых при сохранении одной и той же величины полной энергии системы, действительным является то, для к-рого действие  $S_0$  будет наименьшим.