

та. Форма представления докладов способствовала полезному обмену мнениями между автором и заинтересованными участниками конференции и поэтому следует признать ее удачной.

Конференция была содержательной. Труды ее представляют ценный источник информации о последних достижениях науки в области теплопереноса.

ОСМАЧКИН В. С.

## VII Международная конференция МАГАТЭ по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

В конференции, состоявшейся в августе 1978 г. в Инсбруке (Австрия), участвовали 520 делегатов от 34 стран и двух международных организаций. Представленные доклады по тематике распределились так: магнитное удержание плазмы — 110 докладов, системы с инерционным удержанием — 20, проекты реакторов — 11.

**Магнитное удержание плазмы.** Среди систем с магнитным удержанием главенствующее положение по-прежнему занимают токамаки. Их экспериментальному и теоретическому изучению было посвящено около половины всех докладов.

Исследования на токамаках развиваются весьма успешно. За два года, прошедшие после предыдущей конференции, были существенно улучшены параметры плазмы на действующих установках (см. таблицу), пущены три новые крупные установки: ФТ — в Италии, TFR-600 — во Франции и DOUBLET — в США. Большой интерес вызвало сообщение ученых Принстонского университета об экспериментах по нагреву плазмы в установке PLT пучками быстрых нейтральных атомов. В этих экспериментах при мощности инжекции 2,1 МВт и плотности плазмы  $\sim 2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> температура ионов была увеличена более чем в 5 раз и достигла уровня  $\sim 5,5$  кэВ, превышающего температуру «зажигания» D—T смеси (4 кэВ) при неограниченно большом времени удержания плазмы. В данном эксперименте энергетическое время жизни плазмы было небольшим ( $\tau_E \sim 25$  мс) и параметр Лоусона  $n\tau_E \sim 10^{13}$  см<sup>-3</sup>·с на два порядка меньше, чем требуется для реактора. Существенно, однако, что по частотам соударений частиц плазма оказалась в так называемой «бесстолкновительной» области, характерной для реактора, где, согласно теории, могут возникать новые типы неустойчивости, наиболее опасной из которых является не-

устойчивость на запертых ионах. В большинстве экспериментов не наблюдалось дестабилизации плазмы, и теплопроводность ионов не сильно отличалась от предсказаний неоклассической теории. В аналогичном эксперименте меньшего масштаба на T-11 был также достигнут бесстолкновительный режим по ионам и электронам и не обнаружено ухудшения удержания плазмы. Требуемое для двухкомпонентного реактора токамака значение  $n\tau_E \approx 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>·с было достигнуто на установке ALCATOR (США), но при более низкой, чем необходимо, температуре плазмы ( $\sim 0,9$  кэВ). Следующий шаг — получение  $n\tau_E \geq 3 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>·с и температуры плазмы 7—10 кэВ в одном эксперименте — должен быть сделан на сооружаемых сейчас TFTR, JET и JT-60, пуск которых планируется на 1981—1983 гг. Заметим, что указанные параметры могут быть достигнуты также на недавно пущенной установке DOUBLET III.

Возможность получения водородной плазмы с весьма низким уровнем примесей была продемонстрирована ранее на установке ALCATOR. Сейчас в большинстве экспериментов благодаря использованию некоторых простых приемов (очистка стенок водородным разрядом, напыление титана, применение диафрагм из легких материалов, программирование напуска газа и т. п.) удалось существенно снизить содержание примесей в разряде и получить плазму с  $Z_{эф} \approx 1$ .

Повышение чистоты плазмы позволило существенно расширить диапазон параметров, при которых разряд в токамаке остается устойчивым. Значение плотности плазмы, которое два года назад считалось критическим, превзойдено в 3—4 раза (ISX-A, T-11). Оказалось возможным снизить запас устойчивости  $q = aH_0/RH_T$  до 1,7—2,5 без нарушения термоядерности плазмы (DIVA, ALCATOR, T-11). Уменьшение запаса устойчивости,

Параметры плазмы в токамаках ко времени конференции в Берхтесгадене (1976 г.) и Инсбруке (1978 г.)

Показатель	1976 г.	1978 г.
Температура ионов $T_i$ (0), кэВ	1,8—1,9 (ORMAK, TFR)	5,5 (PLT)
Энергетическое время жизни $\tau_E$ , мс	40—60 (T-10, PLT)	80 (PLT)
Параметр Лоусона $n$ (0) $\tau_E$ , см <sup>-3</sup> ·с	$1,5 \cdot 10^{13}$ (ALCATOR)	$3 \cdot 10^{13}$ (ALCATOR)
Отношение давления плазмы к давлению магнитного поля на оси ппура $\beta$ (0), %	1,2 (ORMAK); 1 (DOUBLET)	4—5 (T-11); 3 (TOSCA)
Эффективный заряд ионов $Z_{эф}$	3—5 (типичное значение); $\sim 1$ (ALCATOR, T-10)	1—2 (типичное значение)
Запас устойчивости $q_{min}$ ( $a_L$ )	3,5—5 (типичное значение); 2,2 (T-11)	2—2,5 (типичное значение); 1,9 (ALCATOR), 1,7 (DIVA)
Фактор столкновительности $\nu_i^*$	0,4 (TFR)	0,04 (PLT); 0,2 (T-11)

т. е. снижение продольного магнитного поля  $H_0$  при неизменном токе в плазме, позволило увеличить параметр  $\beta = 8\mu r/H_0^2$ , от которого существенно зависят экономические показатели реактора. На Т-11 в экспериментах по нагреву плазмы пучком быстрых нейтральных атомов получено  $\beta(0)$  на оси шнура  $\sim 4-5\%$ , на ISX-A в режиме омического нагрева  $\sim 2,2\%$ . Исследования на установке TOSCA (Великобритания) показали, что в токамаке с эллиптической или треугольной формой магнитных поверхностей время удержания плазмы оказывается большим, чем в обычном токамаке. В этих экспериментах  $\beta(0) \approx 3\%$ .

Таким образом, параметры, получаемые в современных токамаках, близки к значениям, которые используются в оптимистических расчетах установок следующего поколения.

Теории токамаков было посвящено около 70% работ по магнитному удержанию плазмы. Основное внимание уделялось магнитогидродинамической теории устойчивости плазмы с большим  $\beta$ . Оптимизационные расчеты показали, что в токамаке возможны МГД-устойчивые состояния с  $\beta \approx 10\%$ . Уточнение теории микроустойчивостей показало, что плазма в токамаке, по-видимому, более устойчива, чем считалось ранее. В частности, бесстолкновительная дрейфовая неустойчивость, которая казалась неустраивимой и потому была названа «универсальной», весьма эффективно стабилизируется широм (в плоской геометрии), многие микроустойчивости обнаруживают тенденцию к стабилизации при увеличении давления плазмы. Сделан значительный шаг в выяснении природы аномальной электронной теплопроводности в токамаке.

Исследованиям стеллараторов было посвящено 6 экспериментальных и 4 теоретических доклада. Закономерности поведения плазмы в стеллараторах в режиме омического нагрева в основном те же, что и в токамаках. Ионная теплопроводность близка к неоклассической, электронная теплопроводность и диффузия — аномальны. Так же как и в токамаках, энергетическое время жизни растет при увеличении плотности плазмы. Ученые Гархинга (ФРГ) и Калма (Великобритания) утверждают, что определяющим фактором здесь является отношение направленной (токовой) скорости электронов к их тепловой скорости. Такая интерпретация не противоречит результатам, полученным на токамаках, однако на токамаках с омическим нагревом она не может быть установлена однозначно из-за связи между значением тока и температурой плазмы. Нет уверенности и в том, что в стеллараторах с омическим нагревом такая интерпретация единственная, но если она окажется верной, то это будет иметь важные последствия. В случае стеллараторов переход к бестоковым методам нагрева должен привести к улучшению удержания плазмы. В сооружаемых сейчас крупных токамаках, рассчитанных на использование мощного дополнительного нагрева, а тем более в реакторах, отношение дрейфовой скорости к тепловой будет весьма мало и поэтому может оказаться, что изучаемые сегодня аномальности не будут играть никакой роли в будущих экспериментах.

После громкого успеха 2XIIВ на прошлой конференции в исследованиях открытых ловушек наблюда-

лось некоторое затишье. Поиски путей усовершенствования таких ловушек и прогресс в технике получения мощных электронных и ионных пучков привели в США к возобновлению интереса к старой идее Кристофилоса о создании ловушек с обращенным полем на основе электронных и ионных колец. В Корнеллском университете наблюдалось обращение поля на оси электронного кольца на время  $\sim 1$  мс. Попытки получить обращение поля в экспериментах на 2XIIВ в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса пока не увенчались успехом. Ведутся эксперименты по обращению поля с помощью ионных колец в Корнеллском университете и Научно-исследовательской лаборатории Военно-морского флота.

Сооружение амбиполярных ловушек, предложенных 2 года назад учеными Новосибирска и Ливермора, еще не завершено (за исключением небольшой установки «Гамма-6» в Японии), а исследователи Новосибирска уже обнаружили теоретически и подтвердили в модельном эксперименте, что асимметрия магнитного поля в таких ловушках приводит к увеличению поперечных потерь плазмы вследствие эффектов типа неоклассических.

**Инерционное удержание.** Почти все крупные научные центры, в которых ведется работы по лазерному и пучковому УТС, представили на конференцию обзорные доклады, в которых изложено сегодняшнее состояние работ и программы дальнейших исследований. На протяжении последнего года в США были пущены две крупные лазерные установки с энергией световых пучков 10 кДж: 20-пучковая установка «Шива» в Ливерморе с лазерами на неодимовом стекле и 8-пучковая установка «Гелиос» в Лос-Аламосе с лазерами на  $\text{CO}_2$ . На установке «Шива» в первых экспериментах по обжатию D—T-мишеней было получено  $\sim 7 \cdot 10^9$  нейтр./имп. — рекордное число для лазерной плазмы. Программами работ в этих лабораториях предусматривается проведение демонстрационного термоядерного эксперимента в середине 80-х годов.

**Реакторы.** Различным аспектам реактора токамака было посвящено шесть докладов, среди них доклад о проекте гибридного реактора, который разрабатывается в США фирмой «Вестингауз» совместно с некоторыми научными центрами. Проект гибридного реактора на базе амбиполярной магнитной ловушки был рассмотрен в докладе Ливерморской лаборатории. Часть докладов была посвящена альтернативным концепциям термоядерного реактора: реакторам на базе тороидального пинча с обратным полем, линейного тэта-пинча, сжатия лайнером, а также тороидальных систем с остроконечной геометрией поля и с гофрированным магнитным полем.

Конференция показала, что исследования по УТС развиваются нарастающими темпами. Уже сооружаются установки, на которых в начале 80-х годов предполагается продемонстрировать физическую осуществимость УТС. Сообщенные на конференции результаты исследований вселяют уверенность, что эта цель будет достигнута.

МУХОВАТОВ В. С.