

IV Международная конференция МАГАТЭ по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

В очередной конференции МАГАТЭ по управляемому термоядерному синтезу, состоявшейся 6—13 октября 1976 г. в Берхтесгадене (ФРГ), участвовало более 400 делегатов от 26 стран.

Представленные на заседаниях 165 оригинальных докладов охватывали практически все направления исследований в области физики высокотемпературной плазмы и отражали последние результаты работ, направленных на создание термоядерных энергетических реакторов. Были обсуждены теоретические и экспериментальные исследования на замкнутых установках типа токамак и стелларатор, в том числе влияние примесей на поведение плазмы, нагрев ее инжекцией атомарного водорода, высокочастотным и турбулентным методами; результаты работ на открытых магнитных ловушках, установках типа плазменного фокуса и различных ионных; высокочастотные методы удержания и стабилизации плазмы; иницирование управляемых термоядерных реакций с помощью лазерного излучения и релятивистских электронных пучков; взаимодействие пучков с плазмой; свойства плазмы с термоядерными параметрами и проекты будущих термоядерных реакторов.

Более трети докладов были посвящены токамакам, которые продолжают успешно развиваться и по-прежнему остаются наиболее вероятным прототипом квазистационарного термоядерного реактора. В 1975 г. построены два крупнейших токамака Т-10 (СССР) и ПЛТ (США). В Т-10 при напряженности продольного магнитного поля 35 кГс и разрядном токе 0,4 МА получена плазма плотностью $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ с температурой электронов и ионов около 1 и 0,7 кэВ соответственно и энергетическим временем удержания в лучшем режиме до 0,06 с. При заполнении камеры дейтерием наблюдался выход до $3 \cdot 10^9$ термоядерных нейтронов за разряд. Количество примесей в плазме оказалось весьма незначительным (эффективный заряд < 2). На установке ПЛТ, вступившей в строй несколько позже, при аналогичных разрядном токе и напряженности продольного магнитного поля получены сходные результаты, правда, плазма оказалась сильно загрязненной примесями (эффективный заряд около 5—6), а энергетическое время около 0,03 с.

Важные физические результаты дали эксперименты на установках Т-11 (СССР), ORMAC (США), TFR (Франция) и DITE (Англия) по изучению процессов нагрева плазмы при инжекции быстрых атомов водорода. На установке TFR при мощности инжектируемого пучка дейтерия в 450 кВт удалось повысить температуру ионов вдвое и получить рекордное значение ионной температуры 4,9 кэВ.

На американской установке «Алкатор» при напряженности продольного магнитного поля 81 кГс оказалось возможным увеличить плотность плазмы в центре до $6,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, при этом энергетическое время удержания возросло до 18 мс, а эффективный заряд уменьшился. Обнадешающие результаты дали установки Дублет IIА (США), токамак с эллиптическим сечением плазменного шнура и аналогичная система ТНТ (Япония). В результате адиабатического сжатия нарастающим магнитным полем в установке «Туман-2» (СССР) значительно повысились параметры плазмы, в частности в пять раз увеличилось энергетическое время удержания. На установке DITE начаты экспери-

менты по изучению работы дивертора — устройства для очистки плазмы от примесей.

Большое внимание на конференции уделялось проблеме неустойчивости срыва, препятствующей повышению плотности плазмы в токамаках. Экспериментальные данные, полученные на установках «Пульсатор» (ФРГ), Т-4 (СССР), TFR, и теоретический анализ позволили прояснить картину ее возникновения и сделать вывод, что критическая плотность плазмы, выше которой возникает неустойчивость, зависит от мощности нагрева. Это означает, что при соответствующем увеличении мощности нагрева можно иметь плотность, требующую для эффективной работы термоядерного реактора.

За последнее время наблюдалось существенное развитие теоретических исследований, и на конференции были представлены доклады по нелинейной теории развития винтовых магнитогидродинамических и дрейфовых неустойчивостей, по численному моделированию поведения плазмы в токамаках.

Обсуждение экспериментальных и теоретических исследований на официальных и многочисленных неофициальных заседаниях — дискуссиях позволяет высказать утверждение о получении в ближайшем будущем на токамаках плазмы с термоядерными параметрами и об осуществлении физической реакции синтеза.

Интересные и важные результаты получены на новых крупных стеллараторных установках «Ливень-2» (СССР), «Клео» (Англия), «Вандельштейн-VIIA» (ФРГ) и ИПП-ТП (Япония).

В «Ливне-2» омическим нагревом при разрядном токе 20 кА и напряженности магнитного поля 14 кГс плазма имела плотность около 10^{13} см^{-3} , электронную температуру 0,4 кэВ и энергетическое время удержания 8 мс. Эксперименты на установке «Клео», которая работала как в режиме стелларатора, так и токамака, показали, что стеллараторное пологоидальное магнитное поле приводит к улучшению удержания плазмы. Предыдущие результаты по удержанию плазмы, выполненные на стеллараторе-С (США), оказались ошибочными из-за плохой конструкции установки. Стеллараторное направление, хотя и сложное с технической точки зрения, заслуживает дальнейшего развития.

На стеллараторах «Ураган-2» (СССР) и «Гелиотрон-Д» (Япония) продолжают исследования по ионноциклотронному нагреву, на тороидальной установке Элмо Бампи Торус (США) получена устойчивая плазма плотностью 10^{12} см^{-3} при нагреве методом электронного циклотронного резонанса. В последнее время развиваются работы по новому методу накопления плазмы — инжекции твердых крупинок дейтерия. Можно ожидать, что при радиусе 200—400 мкм и скорости 10^5 — 10^6 см/с инжекция крупинок позволит существенно улучшить параметры плазмы в замкнутых системах.

Среди немногочисленных докладов об открытых магнитных ловушках обращает на себя внимание работа на установке 2ХП В (США). Благодаря новому способу подачи холодных ионов через магнитную пробку извне для стабилизации горячей плазмы в ловушке удалось получить устойчивую плазму плотностью $1,5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ с температурой ионов около 10 кэВ и временем жизни 0,3 мс. Большой интерес вызвала предложенная советскими учеными ИЯФ АН СССР новая система — маг-

нитная ловушка с двойными пробками, которая дает возможность существенно повысить отношение выхода термоядерной энергии к вложенной.

На конференции были представлены доклады практически из всех лабораторий США, СССР, Японии, Франции и Англии, где ведутся исследования нагрева плазмы лазерным излучением, в частности изучение поглощения и отражения света, генерации быстрых электронов и ионов, аномального переноса энергии в плазме, а также сжатия стеклянных микросфер, наполненных дейтерием и тритием. Хотя экспериментальных данных имеется довольно много, все еще нет полной и ясной картины механизмов поглощения излучения и рождения быстрых частиц. Из последних результатов обращает на себя внимание то, что при потоке излучения более 10^{12} Вт/см² весь энергетический вклад (более 50% от падающей энергии) обусловлен резонансным поглощением, причем характер взаимодействия практически не меняется с изменением длины волны, равной 1 или 10 мкм (США, Япония, СССР).

В экспериментах американских ученых (лаборатория фирмы «КМС-Фьюжн») получено объемное сжатие микросфер до 2000 раз, температура после сжатия в центре мишени составляла 1,5 кэВ.

Численные расчеты многослойных полых мишеней достаточно больших размеров, выполненные в ряде лабораторий (СССР, США), показали возможность достижения отношения выхода термоядерной энергии к вложенной, равного 1000, при энергии лазерного излучения 0,1—1 МДж, если удастся подавить неустойчивости, разрушающие тонкие оболочки.

В ближайшие годы, как сообщалось в ряде докладов, войдут в строй установки с энергией лазеров на неодимовом стекле 10 кДж (США, СССР) и CO₂-лазеров до 100 кДж (США, Япония), на которых предполагается осуществить иницирование физической реакции синтеза.

В работах по нагреву пучками электронов и ионов исследовались нагрев мишеней и плазмы в магнитном поле, а также получение электронных и ионных колец для удержания плазмы в открытых магнитных ловушках и системах типа «Астрон». Новый подход к нагреву мишеней релятивистскими электронными пучками был предложен и продемонстрирован советскими учеными (ИАЭ им. И. В. Курчатова). На установке «Тритон» с энергией пучка 1,5 кДж осуществлен нагрев плотной дейтериевой мишени и зарегистрирован выход до $3 \cdot 10^6$ термоядерных нейтронов. Пучок нагревал внешнюю оболочку конусообразной модели мишени с $Z \gg 1$. В результате лучшей теплопроводности значительная часть энергии передавалась внутренней оболочке с эффективным зарядом 1. При этом благодаря меньшей массе внутренней оболочки удалось достичь скорости, достаточной для поджига дейтериевого топлива при существенно меньшем энергетическом вкладе в первую оболочку по сравнению с обычным методом нагрева. В докладах, представленных американскими учеными (лаборатория фирмы «Сандиа»), сообщалось о получении плотности тока электронных пучков 1 МА/см² и скорости оболочки

однослойной мишени до $3,5 \cdot 10^6$ см/с, а также о наблюдении аномального энергетического вклада в тонкую оболочку.

При нагреве плазмы электронными пучками в открытых магнитных ловушках (США, Англия) температура превысила 1 кэВ, плотность составила 10^{16} см⁻³ (при начальном давлении 0,1 тор). Плотность тока в пучке равнялась 20 кА/см², длительность импульса 150 нс. Природа явлений, приводящих к нагреву, пока неясна.

Серьезное внимание на конференции уделялось работам, касавшимся получения сильноточных пучков ионов с помощью рефлексных триодов и коаксиальных диодов с магнитной изоляцией и плоских диодов с магнитной самоизоляцией (США). Рассказывалось об ионных пучках максимальным током 200 кА при энергии 0,6—1,2 МэВ и мощности более $2 \cdot 10^{11}$ Вт. Число протонов, ускоряемых за импульс, составляло $3 \cdot 10^{16}$, угловая расходимость пучка 3—6°. В дальнейшем предполагается использовать ионные пучки для создания ионных колец и нагрева оболочки мишени. В последнем случае требуемая энергия для поджига дейтериевого топлива оказывается в несколько раз меньше, чем в случае электронных пучков.

Исследования на системах с большим отношением давления плазмы к удерживающему магнитному полю хотя и занимают важное место в программе термоядерных исследований, пока не привели к существенным результатам. Можно надеяться, что высокий уровень теоретических и экспериментальных работ, ведущихся в этом направлении в СССР, ФРГ, США, Англии и Японии, позволит получить высокотемпературную плазму и осуществить ее удержание с более эффективным использованием магнитных полей.

Одно из заседаний, как и на предыдущей конференции, было посвящено обсуждению проектов энергетических термоядерных реакторов. Американские ученые (Висконсинский университет) представили проект термоядерного реактора токамака Увмак III с учетом последних экспериментальных данных. В этом варианте тепловая нагрузка на стенку от термоядерных нейтронов выбрана более высокой, 2 МВт/м².

Были представлены проекты энергетических термоядерных реакторов тепловой мощностью 400—500 МВт Аргоннской и Ок-Риджской национальными лабораториями, фирмой «Дженерал атомик» (США), а также меньшей, около 100 МВт (Япония). В докладе английских ученых (Калэмская лаборатория) подробно проанализирована стоимость сооружения и эксплуатации термоядерного реактора токамака.

Результаты конференции свидетельствуют о быстром продвижении исследований физики высокотемпературной плазмы, качественном понимании процессов, протекающих в различных экспериментальных установках, и существенном расширении инженерных и технологических разработок, необходимых для создания следующего поколения крупных термоядерных установок и в будущем термоядерной энергетики.

КУЗНЕЦОВ Э. И.