

ионов дейтерия планируется в марте 1980 г., ускорение их до 300 кэВ ожидается через год.

В лаборатории в Фонтене-о-Роз все работы сконцентрированы на токамаке TFR-600. Этим исследованиям было посвящено и большинство докладов, представленных французскими специалистами. Основным направлением работ в настоящее время является исследование ВЧ-нагрева плазмы на ионной циклотронной частоте. Эксперименты ведутся с генератором мощностью до 500 кВт. В плазму с помощью двух полупетель вводится до 250 кВт. Этот предел определяется пробоями в подводящем фидере. В отличие от известных экспериментов на установке PLT в США здесь эксперименты проводились в широком диапазоне плотностей при различных добавках водорода к дейтериевой плазме. ВЧ-мощность эффективно поглощалась плазмой. Нагрев ионов составлял 0,7—1 эВ/кВт. Эффективность нагрева возрастала с ростом плотности, что свидетельствует и об увеличении с ростом плотности времени удержания энергии в плазме. При введении ВЧ-мощности увеличивалось свечение примесей, однако с ростом плотности плазмы этот эффект уменьшался, а по абсолютной величине был не больше, чем при введении такой же мощности при инжекции быстрых атомов. Поступление примесей зависело от концентрации водородной добавки к дейтериевой плазме и было минимальным при $n_D/n_D = 10 \div 12\%$. В этих условиях, как показали прямые эксперименты, нагрев определяется не циклотронным, а ион-ионным гибридным резонансом. (Нагрев наблюдается лишь при наличии зоны гибридного резонанса на оси шнура; зона циклотронного резонанса в этом случае может быть даже вне плазмы). При ион-ионном гибридном резонансе поглощение волн очень сильное: длина затухания волны по обходу тора порядка 25 см, и антенны работают практически независимо. Поэтому для увеличения вводимой мощности нужно увеличивать число антенн. Планируется к осени 1980 г. довести мощность генератора до 3 МВт и, используя пять антенн, провести решающие эксперименты, которые определят перспективность данного метода нагрева для крупных установок и реакторных условий.

Большой интерес представляет проведенный на TFR анализ баланса энергии в опытах с повышенной плотностью ($1,6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в центре) при $Z_{\text{эф}}=4$ и токе 400 кА. Анализ показал, что аномальная электронная теплопроводность падает с ростом плотности и в TFR сравнивается с ионной теплопроводностью, которая также несколько (примерно в три раза) выше неклассической. Эксперименты по рассеянию микроволн указывают на существование в плазме некоторого уровня турбулентности с амплитудой флюктуаций плотности 0,3—0,6% от среднего значения. Этих колебаний достаточно, чтобы объяснить

аномальную электронную теплопроводность. Возможно, что они сказываются и на ионной теплопроводности.

Интересный результат был получен на TFR при исследовании изотопного обмена между плазмой и стенкой. Показано, что если в камере нет сорбирующих элементов и стенки очищены от кислорода, при смене газа уже в первом импульсе удается иметь не более 5% добавки предшествующего изотопа водорода. Этот результат важен для будущих экспериментов с использованием трития. Неожиданный результат получен на TFR при исследовании неустойчивости внутреннего срыва с $q=1$. С помощью поверхностно-барьерных детекторов проведены хордовые измерения низкоэнергетического рентгеновского излучения из плазмы при внутренних срывах. Попытки смоделировать сигналы детекторов на ЭВМ показали, что это можно сделать, лишь приняв предположения, противоречащие ранее существовавшим теоретическим представлениям. Оказалось, что резонансная поверхность с $q=1$ в 1,5—2 раза дальше от оси, чем наблюдаемый в экспериментах радиус переворота фазы «зубцов» на интенсивности рентгеновского сигнала, который ранее принимался за радиус с $q=1$. Более того, авторы работы утверждают, что в процессе неустойчивости магнитный остров с $q=1$ не исчезает, а сохраняется примерно постоянным по своей ширине, равной 1/3 его радиуса. Данные результаты, несомненно, требуют проверки, и работа на TFR еще продолжается. В связи с этим следует заметить, что было бы очень интересно провести по разработанной методике эксперименты на T-10, где в достигнутых режимах с малым значением q (q) колебаниями охвачена большая часть плазменного шнура.

Будущие исследования на токамаках во Франции связаны с установкой «Торус II», проект которой был представлен в одном из докладов. Это будет сверхпроводящий токамак с малым радиусом 70 см, большим радиусом 215 см, магнитным полем 4,5 Тл, продольным током 1,7 МА. Его отличительная особенность — использование для охлаждения обмотки сверхтекучего гелия. Благодаря этому на ниобий-титановой обмотке можно получить максимальное поле до 9,0 Тл и допускаются возникающие при срывах тока в плазме большие скорости изменения полей (скачки поля — 0,8 Тл для продольного и 0,3 Тл для поперечного компонентов при постоянной времени камеры 2 мс). Решение о строительстве установки должно быть принято в начале 1980 г. Предполагаемое место сооружения — Кадараш, срок пуска — 1984 г., стоимость ~60 млн. долл.

Совещание в Фонтене-о-Роз прошло в дружеской обстановке и было, несомненно, полезно для всех его участников.

ЧУЯНОВ В. А.

Советско-итальянский семинар «Опыт эксплуатации и результаты работ на крупных токамаках»

Семинар проходил с 19 по 21 ноября 1979 г. в ИАЭ им. И. В. Курчатова. Итальянские специалисты сообщили об опыте эксплуатации токамака FT (Фраскати), о полученных результатах, теоретических расчетах и о подготовке эксперимента по дополнительному нагреву, а также о замысле и результатах эскизной проработки реконструкции этой установки.

В настоящее время установка FT (большой и малый радиусы равны соответственно 83 и 23 см, предельное проектное поле и ток составляют 10,0 Тл и 1 МА) выведена в режим регулярных физических экспериментов при параметрах, довольно близких к предельным проектным: поле 8,0 Тл, ток 600 кА. В этих условиях измерены основные параметры плазмы: концентрация n_e (средняя по сечению) до $4,5 \cdot 10^{14} \cdot \text{см}^{-3}$, эффективный заряд примесей

$Z_{\text{эф}} \approx 1$, T_e до 2 кэВ, T_i до 1 кэВ. Время удержания энергии растет с увеличением концентрации и при максимальных n_e составляет ~30 мс. При этом $nT \approx 1,5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$, т. е. близко к рекордному. Показано, что высокие значения n_e и nT получаются лишь после очень тщательной вакуумной подготовки и подбора программ напуска газа и включения поперечного магнитного поля. Отклонение от оптимальных программ ведет к уменьшению n_e и nT в полтора-два раза.

Сейчас готовятся эксперименты по дополнительному ВЧ-нагреву плазмы на нижнегибридной частоте. Теоретические расчеты показали, что с помощью антенного устройства типа «грилл» (два сфазированных волновода) можно ввести в плазму до 1 МВт ВЧ-мощности, эффективность поглощения которой может достигать 100%. В качестве

источников ВЧ-мощности используются два клистрона VKS-8269-Varian мощностью 500 кВт каждый при длительности импульса до 1 с. Эксперименты предполагается начать весной 1980 г.

В дальнейшем намечается реконструкция установки, чтобы, используя достигнутые в экспериментах с сильными магнитными полями высокие значения nT при малом объеме плазмы, получить параметры плазмы, близкие к параметрам зажигания за счет дополнительного ВЧ-нагрева относительно небольшой мощности (4—8 МВт). При этом предполагается максимально использовать имеющееся оборудование, помещение, системы обеспечения и т. п., сохранить высокое значение продольного поля, увеличить размеры камеры и ток плазмы за счет устранения медного кожуха и перехода на автоматическое регулирование положения плазменного шнура и обеспечить возможность ввода ВЧ-мощности дополнительного нагрева. Параметры нового токамака, получившего название FTU: большой радиус тора 100 см; малый радиус камеры 30 см; продольное поле 8,0 Тл; ток плазмы 1 МА; число люков для дополнительного нагрева 8; размер люков 5×20 см; плотность потока энергии дополнительного нагрева в люке 5—

10 кВт/см²; длительность импульса дополнительного нагрева 1 с. В основу конструкции новой установки положен таковой же принцип, как и на существующей: криореистивные обмотки тороидального поля биттеровского типа из бронзы, охлаждаемые жидким азотом, в корпусах из нержавеющей стали с наружным арочным распором. Питание обмотки тороидального поля — от существующего высокооборотного ударного генератора на 120 МВт с сильным самовозбуждением. Воздушный индуктор и управляющие обмотки тоже криореистивные. Сборку и испытание катушек новой установки предполагается провести по соседству с существующей, чтобы обеспечить минимальный перерыв в экспериментах при замене одной установки на другую. Стоимость реконструкции самой установки составит около 7 млн. долл., оборудования системы дополнительного нагрева — 14 млн. долл. Если финансирование будет утверждено в 1980 г., эксперименты на новой установке предполагается начать в 1983 г.

Советские специалисты сообщили о результатах экспериментов и опыте эксплуатации установок T-10, T-7 и T-11.

ИВАНОВ Д. П.

Советско-японский семинар «Нелинейные явления в плазме»

Семинар состоялся в ноябре 1979 г. в ОИЯИ (Дубна, СССР). В соответствии с согласованной программой было заслушано 29 докладов — 18 советских и 11 японских. Представлены результаты теоретических исследований и численных модельных экспериментов. Доклады и дискуссии показали, что обе стороны уделяют большое внимание изучению нелинейных волновых процессов, плазменных неустойчивостей и турбулентности плазмы. Это нашло свое отражение и в научной программе семинара, которая содержала четыре основные темы: пересоединение магнитных силовых линий в плазме магнитных ловушек и магнитосферы; солитоны и коллапс в плазме; баллонные и дрейфовые неустойчивости в токамаках и стеллараторах; параметрические явления и турбулентность плазмы.

По первой теме советскими специалистами рассматривались эволюция и распад токовых слоев как механизм вспышек излучения и ускорения частиц в лабораторной и космической плазме. Проанализирована роль нелинейной тиринг-неустойчивости в развитии геомагнитных суббурь. В одном из докладов излагался новый метод нагрева плазмы в замкнутых ловушках. В этом методе используется энергия, выделяющаяся при пересоединении силовых линий магнитного поля при слиянии нескольких тороидальных плазменных шнуров. Специалисты Японии привели результаты численного моделирования явления перезамыкания силовых линий в плоской геометрии при учете образования ударных волн. Проведено систематическое исследование тиринг-неустойчивостей в стеллараторах с током в предположении винтовой симметрии возмущений. В одном из докладов результаты численного моделирования нелинейной стадии развития винтовой неустойчивости и процессов пересоединения силовых линий были продемонстрированы в цветном фильме.

В советских докладах о солитонах и коллапсе в плазме рассматривались неоднородные солитоны на различных ветвях колебаний плазмы на стадии насыщения, когда подпитка, вызванная неустойчивостью, и поглощение на больших волновых числах в солитоне уравновешивают друг друга (так называемые диссипативные солитоны). Изучалась плазменная турбулентность как случайный набор таких солитонов. Исследовались взаимодействие ионно-звуковых солитонов с резонансными частицами, эволюция возмущений одномерной ленгмювской волны на численной модели. Были найдены новые решения урав-

нения синус-Гордона. Показано, что в квазиклассическом приближении ленгмювский коллапс имеет точные автомодельные решения и что автомодельный сверхзвуковой коллапс невозможен.

С японской стороны было представлено обширное одномерное численное исследование плазмы в условиях сильного тока. Показано, что при этом образуются ионно-звуковые солитоны, а также мощные двойные слои малой ширины, находящиеся в покое относительно ионов и распространяющиеся периодически вдоль направления тока. Рассматривалось образование солитонов при распространении альфвеновских волн вдоль магнитного поля. Уравнения альфвеновских волн и ряд других подобных уравнений решаются точно методом обратной задачи рассеяния.

По неустойчивостям с советской стороны был представлен доклад, посвященный исследованию баллонных мод в токамаках с произвольной формой сечения шнура. Получен аналитический критерий устойчивости, позволяющий находить предельное давление. В одной из работ исследовалась неустойчивость нижнегибридных волн и показано, что она приводит к аномальной диффузии магнитного поля. Японские специалисты исследовали баллонные моды в стеллараторах с током. Найдена величина предельного давления как функция шира, тороидальности и тока в стеллараторе. Изучалась универсальная дрейфовая неустойчивость в тороидальном плазменном шнуре. При токе, превышающем критическое значение, эта неустойчивость начинает развиваться даже при большом шире. Рассматривалась эволюция двумерных дрейфовых волн на нелинейной стадии развития.

По четвертой теме советскими специалистами рассматривались параметрический нагрев плазмы в магнитных ловушках за счет поглощения косых ленгмювских волн, возбуждаемых электромагнитной волной, спонтанная генерация магнитных полей при нагреве плазмы мощным лазерным излучением. Ряд докладов посвящен исследованию лазерного нагрева неоднородной плазмы с учетом влияния пондеромоторного понижения плотности в области нагрева. Советскими и японскими специалистами проведены аналитические и численные исследования. В одном из советских докладов представлено исследование пучковой неустойчивости в ультрарелятивистской плазме с учетом квазилинейного обратного действия раскачиваемых волн на функцию распределения пучка. Это исследование имеет астрофизическое приложение и объясняет излучение пульсаров. Кроме того, рассматривались влияние