

ионизировать атомы цезия при соударении их с возбужденными молекулами азота. Такой механизм ионизации практически исключает нагрев электронного газа и значительно увеличивает время распада плазмы. В работе ИАЭ им. И. В. Курчатова (В. З. Кайбышев и др.) обнаружено явление низкочастотных автоколебаний в триоде с вспомогательным разрядом вследствие наличия обратной связи между основной и вспомогательной цепями через общую плазму между электродами. Возможность регулировать частоту и форму колебаний, а также ряд других благоприятных факторов открывает перспективу применения таких триодов в высокотемпературных и радиационноустойчивых электронных схемах. Представляют интерес результаты исследования отражательной способности молибдена и вольфрама при адсорбции цезия и кислорода для электронов низкой энергии (С. Балестра и др., США). Высокое значение коэффициента отражения тепловых электронов (около 0,5) для электродов с чисто цезие-

вым покрытием может быть причиной ограничения выходных характеристик современных ТЭП.

\* \* \*

По окончании конференции 4 сентября 1975 г. состоялось очередное заседание Международной группы связи (МГС) по ТЭП, где были подведены итоги прошедшей конференции. Принято решение подготовить и опубликовать совместно с трудами конференции сводный отчет о состоянии работ и перспективах использования ТЭП в странах — участницах МГС. Заседание сочло целесообразным проводить дальнейшую работу МГС на прежнем уровне. Принято предложение советских представителей организовать следующее международное совещание специалистов по ТЭП в СССР в 1977 г. Новым председателем Международной рабочей группы связи по ТЭП избран проф. В. А. Кузнецов (ФЭИ, СССР).

КУЛИЧЕНКОВ А. И.

## VII Европейская конференция по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы

Конференция проходила 1—5 сентября 1975 г. в Лозанне (Швейцария). В работе конференции участвовали более 400 представителей европейских стран, США, Японии, Австралии, Аргентины, Индии, АРЕ. Было представлено около 200 оригинальных и 24 обзорных доклада, в которых рассматривались различные системы и направления работ по управляемому термоядерному синтезу и физике высокотемпературной плазмы, в том числе токамаки и стеллараторы, открытые магнитные ловушки, пинчи и плазменные фокусы, лазерные системы, электронные и ионные пучки, турбулентный и ВЧ-нагрев плазмы, проблемы примесей и взаимодействия плазмы со стенками камеры, взаимодействие пучков частиц с плазмой, явления аномального переноса в плазме, вопросы теории физики плазмы.

Центральное место занимали результаты исследований на токамаках, которым было посвящено более половины всех докладов. Обсуждались определение зависимости энергетического времени жизни от отдельных параметров плазмы и выяснение механизмов, ограничивающих время жизни частиц и сохранения энергии, определение допустимых значений коэффициента запаса устойчивости плазменного шнура и отношения давления плазмы к давлению магнитного поля, изучение поведения примесей, разработка дополнительных методов нагрева плазмы и методов стабилизации неустойчивости.

Большой интерес вызвали работы, выполненные на крупном французском токамаке ТФР. При дополнительном нагреве плазмы методом инжекции атомарного водорода достигнута температура ионов 1,4 кэВ при плотности  $5 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup> и времени удержания более 20 мс. Потеря энергии ионами происходит согласно неоклассическому закону, однако наблюдается аномально-быстрая потеря энергии электронами. Эти потери, по мнению авторов, могут быть связаны с внутренней турбулентностью либо с диссипативной неустойчивостью плазмы.

На советской установке «Токамак-6» проведен цикл работ по изучению неустойчивости срыва (пичковая неустойчивость), которая наблюдается при повышении

концентрации плазмы. Авторы считают, что процесс начинается с раскочки некоторой поверхностной моды магнитогидродинамической неустойчивости, которая раскачивается более высокие моды. Затем исходная мода затухает, а энергия, накопленная в других сильно развившихся модах, вызывает ряд эффектов, приводящих к неустойчивости срыва. На американском небольшом токамаке «Алкатор» с сильными магнитными полями с помощью импульсной инжекции газа удалось получить плазму с большой концентрацией порядка  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>. На американской установке АТС для дополнительного нагрева использовались инжекция атомарного водорода, ВЧ-нагрев на нижнем гибридном резонансе и сжатие плазмы магнитным полем. В результате удалось повысить ионную температуру до 1,2 кэВ при концентрации около  $10^{13}$  см<sup>-3</sup>. На советском небольшом токамаке ТМ-3 показана возможность нагрева электронного компонента плазмы ВЧ-методом на электронном циклотронном резонансе при магнитных полях до 25 кэ. Время жизни плазменного шнура росло при этом с ростом электронной температуры, а механизм нагрева был классическим.

Результаты экспериментов по адиабатическому нагреву плазмы на советской установке «Туман-2» свидетельствуют о существенном улучшении удержания энергии в период сжатия плазмы. Нагрев ионного компонента происходил по адиабатическому закону, а электроны нагревались более интенсивно.

На ряде советских и американских установок проведены эксперименты по проверке теории повышения запаса устойчивости для плазменного шнура с некруглым сечением. Развитие гидромагнитных мод неустойчивости шнура хорошо согласуется с теоретическими данными. На советской установке РТ-4 показана возможность стабилизации неустойчивости срыва в токамаках с помощью переменного продольного тока, равного по порядку величины 0,2 от основного разрядного тока.

Широкий круг экспериментов по изучению поведения примесей в плазме на различных установках типа токамак показал, что основным источником примесей



является стенка разрядной камеры и их поток пропорционален концентрации электронов. Примеси могут поступать в плазму за счет излучения, попадающего на стенку из плазмы, бомбардировки стенки нейтральными частицами, возникающими в плазме в процессе перезарядки, или заряженными частицами. В типичных режимах работы установок основными примесями являются углерод и кислород; в режимах с невысокой концентрацией электронов в плазме содержатся тяжелые примесные ионы материалов диафрагмы и стенки камеры.

Исследованиям на стеллараторах посвящено небольшое число докладов, но ряд результатов представляет несомненный интерес. На советском стеллараторе «Ураган-2» показано, что с помощью ионно-циклотронного метода удается нагреть ионы до нескольких сотен электронвольт. В ФРГ исследуется удержание плазмы с большой величиной отношения давления плазмы к давлению магнитного поля на установках «Пульсатор» и «Изар-Т1-В». На обеих установках достигнута большая гидродинамическая устойчивость плазмы. На установке W-ПВ в режиме токового разряда показано, что наблюдаемая в стеллараторах аномальная электронная теплопроводность не может быть объяснена влиянием примесей. На советском стеллараторе «Сириус» также наблюдалась аномальная теплопроводность электронов, которую авторы связывают с дрейфовыми колебаниями.

Исследования по применению системы обратных связей на американской установке «Сциллак» типа тороидального тэта-пинча показали, что, хотя принципиальное использование такой системы для стабилизации неустойчивостей и поддержания равновесия плазменного шнура возможно, реализация ее в случае плазмы с термоядерными параметрами наталкивается на серьезные трудности. В связи с этим намечено проверить возможность стабилизации плазмы с помощью проводящей стенки в сочетании с методом ударного нагрева при малой степени сжатия плазмы. В последнее время появились системы типа плазменного фокуса с дополнительным нагревом плазмы лазерным излучением (СССР, Польша). Нейтронный выход при хорошей синхронизации процессов возрастает в такой системе в несколько раз.

В докладах по открытым магнитным ловушкам основное внимание было уделено проблеме устранения потерь частиц и энергии через открытые концы ловушек. На американской установке 2X-ПВ с помощью инъекции холодной плазмы вдоль оси системы осуществлено подавление дрейфовой конусной неустойчивости. При инъекции 370 экв. А атомарного дейтерия получена плазма с плотностью около  $4 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>, энергией ионов 13 кэВ и временем удержания несколько миллисекунд. Интересные исследования выполнены на электромагнитных ловушках «Юпитер» (СССР), где

получена плазма плотностью  $5 \cdot 10^{12}$  см<sup>-3</sup>, ионной температурой 1 кэВ и временем жизни 5 мс.

Наибольшее внимание в докладах, посвященных изучению плазмы, создаваемой лазерным излучением, уделено взаимодействию излучения с твердой мишенью и плазмой, в частности исследованию нелинейных процессов поглощения излучения, установлению порога возникновения нелинейностей, генерированию гармоник в лазерной плазме, измерениям угловых распределений интенсивности отраженного света и гармоник. Большинство экспериментальных работ выполнено с применением импульсных СО<sub>2</sub>-лазеров с импульсами наносекундной длительности. Показано, что отражение света происходит в основном вперед, а общий коэффициент отражения плазмы не превышает, как правило, 15% до потоков  $5 \cdot 10^{12}$  Вт/см<sup>2</sup>. Нелинейности возникают при потоках более  $4 \cdot 10^{10}$  Вт/см<sup>2</sup>. Предварительные эксперименты показали существование в лазерной плазме собственных магнитных полей напряженностью до нескольких мегагауссов.

В ряде докладов приведены результаты расчетов и экспериментов по облучению мишеней мощными электронными пучками. Сфокусированные релятивистские электронные пучки, создаваемые в специальных диодных устройствах, позволяют проводить сжатие мишени при мощностях до  $10^{12}$  Вт. Около половины запасенной в пучке энергии диссипируется в облучаемой оболочке из тяжелых элементов, окружающей мишень из D—Т-смеси.

Разрабатываются и сооружаются различные системы для создания длинных импульсов и слоев протонов для захвата и удержания горячей плазмы. Получены импульсные протонные пучки с током несколько килоампер и общим числом протонов в импульсе  $10^{14}$ . Эти пучки предполагается сжимать в магнитном поле для повышения параметров захватываемой плазмы до термоядерных значений.

Результаты работ, выполненных за два года после предыдущей конференции, свидетельствуют о существенном расширении исследований по управляемому термоядерному синтезу с использованием современных методов диагностики и применением ЭВМ для обработки результатов экспериментов и численных расчетов. Новые данные, полученные на экспериментальных термоядерных установках, позволили приступить в европейских странах, США и Японии к разработке следующего поколения крупных установок, в первую очередь токамаков, предназначенных для получения плазмы с термоядерными параметрами. Ввод в строй этих установок планируется на конец 70-х годов. Успешная демонстрация на этих установках термоядерной реакции с энерговыделением, равным энергии, введенной в плазму, позволит приступить к созданию опытных энергетических термоядерных реакторов.

КУЗНЕЦОВ З. И.