

на перфоленту и затем на БЭСМ-4. В настоящее время с помощью этого современного оборудования обрабатываются ядерные эмульсии, облученные на Серпуховском ускорителе  $\mu$ -мезонами с энергией 45 и 60 Гэв и протонами с энергией 76 Гэв.

В распоряжении экспериментаторов имеется также станция космических лучей, расположенная в горах на высоте 3340 м над уровнем моря. Станция оснащена современными установками, предназначенными для проведения исследований ядерных взаимодействий частиц космического излучения с веществом. В стадии отладки находится уникальный комплекс, состоящий из четырех камер Вильсона с общим объемом 2,6 м<sup>3</sup> и ионизационного калориметра площадью 8 м<sup>2</sup>. Эта установка позволит проводить исследования ядерных взаимодействий в области энергий, на два порядка более высоких, чем получаемая с помощью существующих ускорителей.

Кроме высокогорной станции в Институте имеется промежуточная станция космических лучей, которая находится на высоте 1700 м над уровнем моря.

## IV Европейская конференция по управляемым термоядерным реакциям и физике плазмы

С 31 августа по 4 сентября 1970 г. в Риме состоялась IV Европейская конференция по управляемым термоядерным реакциям и физике плазмы\*, организованная Европейским физическим обществом (отделение физики плазмы). В конференции приняли участие около 400 ученых из 22 стран, в том числе неевропейских. Был заслушан 191 доклад (из них семь обзорных) по 16 направлениям: «Токамаки», мультиполи, стеллараторы, открытые магнитные ловушки, пинч-разряды, плотная плазма, высокочастотные методы получения и нагрева плазмы, взаимодействие пучков с плазмой, бесстолкновительные ударные волны и турбулентный нагрев, стабилизация плазмы системами обратной связи и динамическими методами, ударные трубы, диагностика плазмы, теория тороидального удержания, линейные волны и неустойчивости, нелинейные явления, общая теория. Обзорные доклады были посвящены итогам работы теоретической группы в Институте теоретической физики МАГАТЭ в Триесте, термоядерным реакторам, высокочастотным пробкам и возможности их использования в термоядерных устройствах, лазерной плазме, изучению скрюпичей, определению надтепловых флюктуаций электрического поля из измерений профилей спектральных линий.

В последнее время среди замкнутых систем, используемых для удержания высокотемпературной плазмы, наибольший интерес проявлялся к тороидальным системам типа «Токамак», впервые предложенным в СССР. Это объясняется, тем, что на установке «Токамак-3» в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова впервые была получена устойчиво удерживаемая высокотемпературная плазма. На секции «Токамак» было заслушано 7 докладов. Экспериментальным исследованиям было посвящено три доклада. Доклад советских ученых (№ 18) содержал анализ энергетического баланса и времени жизни ионов в плазме на установке «Токамак-3». Основной вывод заключается в том, что в течение стационарного периода

Обе станции, расположенные на разных высотах, позволят изучать развитие в нижних слоях земной атмосферы процессов, вызванных ядерноактивными частицами очень высоких энергий. Выполняемые на этих станциях работы ведутся совместно с физиками Москвы (ФИАН СССР), Польши, Чехословакии, Болгарии.

Кроме исследований по фундаментальным проблемам строения материи в Институте запланированы и проводятся работы прикладного характера, связанные с решением народнохозяйственных задач республики. При этом используются установки Института ядерной физики АН КазССР (ядерный реактор, циклотрон).

Организация Института физики высоких энергий АН КазССР — крупное событие в научной и культурной жизни Казахской республики, отметившей свое 50-летие.

А. А. КОСТРИЦА, А. И. КУЧИН

разряда основная часть тепла, теряемого ионами в приосевой области плазмы, обусловлена классической теплопроводностью с учетом запертых частиц. Экспериментальные значения ионной температуры оказались в хорошем согласии с формулой, которая была выведена авторами из выражения для классического коэффициента теплопроводности, предложенного Галеевым и Сагдеевым. Этот факт подтверждает предположение о кулоновском механизме процесса теплопередачи в плазменном шнуре в рассматриваемом диапазоне параметров плазмы.

Совместный доклад советских и английских ученых (№ 19) был посвящен определению энергии плазмы на установке «Токамак-3» с помощью диамагнитного метода и измерений томсоновского рассеяния. Измерения, выполненные обоими методами в широком диапазоне параметров, оказались в хорошем согласии, а величина энергосодержания плазмы возрастала пропорционально квадрату разрядного тока.

В Принстонской лаборатории физики плазмы (США) установка «Стелларатор-С» была переделана в установку «Токамак СТ» с малым радиусом плазменного шнура 14 см, большим — 110 см и продольным магнитным полем напряженностью до 35 кэ. Результатам, полученным на этой установке за несколько месяцев работы, и посвящен доклад № 216. За исключением некоторых деталей, касающихся распределения электронной температуры в сечении плазменного шнура на конечной стадии разряда и характера развития отдельных мод магнитогидродинамической неустойчивости шнура, данные полученные на установках «Токамак СТ» и «Токамак-3», практически совпадают.

В разных странах сейчас сооружается более десяти установок типа «Токамак». Конструкция одной из систем («Алкатор»), рассчитанная на получение магнитных полей до 120 кэ, описана в докладе американских ученых (№ 20). На основе численных расчетов, с учетом эффекта аномального сопротивления, авторы предполагают получить на этой установке плазму с плотностью до  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> и температурой в несколько килоэлектронвольт.

\* Труды конференции изданы Национальным комитетом по атомной энергии Италии. Рим, 1970.

При изучении процессов, протекающих в той или иной системе, весьма полезную информацию можно получить путем численных расчетов, основанных на различных моделях плазмы. Сравнению расчетов с экспериментальными данными были посвящены доклады № 16 (Франция) и № 17 (СССР). Авторы последнего доклада получили хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных для установки «Токамак-3» на основе классической теории процессов переноса с учетом запертых частиц и введения феноменологических коэффициентов для величин сопротивления и электронной теплопроводности плазмы.

Ограниченность омического метода нагрева плазмы заставляет искать новые методы для получения температур плазмы выше нескольких килоэлектронвольт. Недавно академиком Л. А. Арцимовичем была предложена идея, развитая впоследствии американскими физиками Фюртом и Йошикавой, о нагреве плазмы методом адиабатического сжатия внешними вертикальными магнитными полями, используемыми в «Токамаках» для управления положением плазменного шнура в камере. В докладе № 15 (США) речалась задача по определению конфигурации магнитного поля, позволяющей одновременно сохранять равновесие шнура и получать дополнительный нагрев плазмы. В оптимальном случае оказывается возможным повысить температуру ионов в три раза.

Результаты работ на установках «Токамак» позволяют рассчитывать на дальнейшее повышение плотности, температуры и времени жизни плазмы при дальнейшем увеличении размеров установок, напряженности продольного магнитного поля и силы разрядного тока.

Стеллараторной программе исследований было посвящено 12 докладов, из них удержанию плазмы в стеллараторах и явлениям, происходящим при этом, посвящены доклады №№ 25—27, 29 и 31—34. В остальных докладах рассматривались проблема нагрева плазмы (№ 28), диффузия плазмы и дрейфовые волны в прямой линии участка стеллараторного поля (№ 36), движение плазмы в криволинейном участке и влияние на это движение дивертора (№ 30), термоядерный реактор на основе торсатронного варианта стелларатора (№ 35).

Основной и наиболее важный результат, полученный на стеллараторе «Протоклео» (доклад № 25, Великобритания), сводится к тому, что время жизни плазмы растет пропорционально произведению угла поворота силовых линий на квадрат среднего радиуса граничной поверхности. При этом время жизни не зависело от величины шира. Исследуя удержание плазмы в стеллараторе «Ливень-1» (доклад № 31), советские ученые обнаружили новое явление. Измерения показали, что в плазменном шнуре имеется направленный ионный поток, распределенный по сечению шнура, и его интеграл по площади сечения отличен от нуля. Авторы предполагают, что это явление связано с наличием радиального электрического поля, изменяющего величину угла преобразования. В этом случае при определенных условиях имеется группа «резонансных» ионов, уходящих на стенки. Возникающая асимметрия в функции распределения скоростей и регистрируется в виде направленного потока.

На двухзаходном стеллараторе W-II A (ФРГ) были выполнены работы, представленные тремя докладами. Интересным представляется результат проверки влияния накаленной сферы (диаметр 3 мм), используемой для термической ионизации рабочего газа (барий), на удержание плазмы. В отсутствие сферы плазма

создавалась с помощью фотоионизации. Время жизни плазмы в обоих случаях оказалось практически одинаковым и с точностью до коэффициента 2 соответствующим значению, вычисленному на основе теории Пфирша и Шлютера.

Исследования на стеллараторах показывают, что время жизни плазмы при имеющих место небольших величинах электронной температуры и плотности (бесстолкновительная и промежуточная области) хорошо согласуется с классической теорией с учетом запертых частиц.

В работах по мультипольным системам (4 доклада) наиболее интересные результаты были получены на сфераторе с левитирующим сверхпроводящим кольцом (доклад № 246, США). Время удержания дейтериевой плазмы, создаваемой электронно-циклотронным резонансом, составляло в режиме левитации 100—200 мсек, т. е. всего в 2,5 раза меньше расчетного классического времени. Если же ток несущее кольцо поддерживалось с помощью поддержек, то время удержания плазмы падало до 10 мсек. Результаты получены для случая холодной плазмы, и авторы предполагают на новой установке получить плазму с температурой ионов 100 эв. С точки зрения изучения физических явлений подобные установки несомненно представляют большой интерес. Однако необходимость осуществления левитации проводников практически лишает подобные системы перспективы создания на их основе термоядерных реакторов.

Работы, обсуждавшиеся на секции «Ловушки с магнитными пробками», можно условно разделить по таким направлениям, как удержание плазмы с горячими ионами или электронами, удержание в ловушках с комбинированными пробками, в том числе высокочастотными, инжекция плазмы в ловушку, изучение неустойчивостей. В установках ПР-6 (доклад № 86, СССР) и MTSE II (доклад № 90, Великобритания) с конфигурацией магнитного поля типа «минимум В», где создавались достаточно хорошие вакуумные условия, наблюдается аномально быстрый распад плазмы с плотностью более  $10^{12}$  см<sup>-3</sup>. При этом имеет место высокочастотное излучение на ионной циклотронной частоте. Однако идентифицировать неустойчивость, вызывающую эти явления, авторам пока не удалось. Интересные работы, представленные французскими (доклады № 78 и 86) и советскими (доклад № 85) учеными, по улучшению удержания плазмы с помощью высокочастотного поля, приложенного вблизи магнитной пробки. Показано, что если частота высокочастотного поля близка к электронной циклотронной, то можно существенно уменьшить утечку ионов из ловушки.

Большинство работ по пинч-разрядам (доклады № 37—53) связано с изучением устойчивости и методов стабилизации разрядов с помощью винтовых магнитных полей. Экспериментальные работы, представленные на конференцию, характеризуются разнообразием типов пинчей и параметров установок. Существенно новых результатов по удержанию плазмы в линейных системах в этих докладах не было. Сейчас большинство экспериментаторов переходят к изучению тороидальных пинч-разрядов, в которых благодаря отсутствию потерь на концах время жизни плазмы может быть значительно увеличено, если будет решена проблема равновесия.

На секции «Плотная плазма» обсуждались работы по изучению плазмы, образующейся в фокусе лазера, а также систем типа «плазменный фокус». В обзорном докладе А. Карузо были приведены результаты исследова-

дования свойств лазерной плазмы, полученные в различных лабораториях за последние 1—2 года. В настоящее время разработана общая картина процесса образования плазмы мощным лазерным излучением. Однако остаются пока неясными такие вопросы, как точный учет фокусировки излучения, поведение коэффициента поглощения и отражения при плотности, близкой к критической, роль неравновесности состояния. Все это приводит к расхождению в оценках требуемых мощностей излучения для создания плазмы с термоядерными параметрами от  $10^{13}$  до  $10^{15}$  *вт*. Из экспериментальных работ наибольший интерес вызвали доклады № 112 (Франция) и № 113 (ФРГ). В первой работе удалось получить до  $10^5$  нейтронов за импульс при энергии лазера около 60 Дж, излучаемой за время 3,5 *нсек*. Во второй работе изучался важный вопрос поглощения энергии луча при плазменной частоте, большей лазерной, т. е. плотностях плазмы выше критической. При облучении полиэтиленовой пленки получена плазма с плотностью  $8 \cdot 10^{21}$  *см<sup>-3</sup>*.

Главными вопросами в изучении систем типа плазменного фокуса являлись выяснение механизма возникновения нейтронного излучения и определение зависимости нейтронного выхода от параметров конденсаторной батареи. В работе итальянских ученых (доклад № 117) максимальный выход нейтронов достигал  $2 \cdot 10^{11}$  за импульс и оказался пропорциональным энергии батареи в степени 2,3 независимо от того, менялись ли емкость или напряжение батареи. Это позволяет в будущем для повышения выхода нейтронов использовать батареи на большие энергии, но при технически удобных величинах напряжения.

Вопросы высокочастотных методов создания и нагрева плазмы рассматривались в 11 докладах на соответствующей секции и в большей или меньшей степени еще в 16 докладах. Большое внимание было уделено высокочастотным методам нагрева ионов, особенно в тороидальных системах. Несколько докладов посвящено изучению уже ставшего традиционным ионно-циклотронного метода нагрева, но в различных модификациях (№ 103, США и № 105, Франция). В докладе № 101 (Франция) дан теоретический анализ нагрева ионов в тороидальных системах методом магнитной накачки бегущей волной. В докладе советских ученых (№ 104) по нагреву плазмы при частотах, близких к нижней гибридной, показана связь между поглощением в этой области частот и линейной трансформацией, а также возможность эффективного нагрева ионов в соответствии с теоретическими оценками. Этому же методу были посвящены работы французских и бельгийских ученых (доклады № 131 и 100). Несколько работ связано с дальнейшим развитием исследований по формированию плазмы и нагреву электронов под действием сверхвысокочастотных волн, применением СВЧ-методов ионизации и ускорения плазмы для создания плазменных источников. Следует отметить, что методы создания плазмы и нагрева электронов с помощью СВЧ-волн в диапазоне частот между электронной, циклотронной и верхней гибридной получили в настоящее время широкое распространение на многих установках.

В работах по взаимодействию электронных и ионных пучков с плазмой основными вопросами были нагрев ионов в системе плазма — пучок и возбуждение пучком колебаний. Из теоретических работ несомненный интерес представляет доклад № 74 (СССР), где предложена новая теория взаимодействия пучка с плазмой с учетом эффекта группировки пучка. В этом случае результирующая функция распределения имеет вид двух-

максвелловской, что находится в хорошем согласии с численными расчетами и экспериментом.

В программу конференции было включено 8 работ по собственно диагностике. В этих и других работах описываются новые или сильно модифицированные диагностические методы. Доклад № 146 (США) посвящен принципиальному уточнению обработки результатов, полученных с помощью зондов при плавающем потенциале (доклад № 40, США) — применению кинематографии для восстановления профиля плазмы в тэта-пинче, доклад № 626 (СССР) — измерению степени анизотропии электрических полей по линейному шарк-эффекту, доклад № 125 (ФРГ) — измерению магнитного поля плазмы по лазерному рассеянию. Наиболее интересным из обсуждавшихся направлений является измерение амплитуд, дисперсии и анизотропии электрических полей в плазме по линейному и квадратичному шарковскому уширению. Этому вопросу был посвящен и обзорный доклад Г. Грима (США).

Как известно, в последние годы была развита новая теория процессов переноса в тороидальных системах (так называемая классическая теория с учетом запертых частиц) первоначально Галеевым и Сагдеевым (СССР), а затем Коврижных (СССР), Фюртом и Розенблютом (США) и другими. Из докладов секции «Тороидальное удержание» наибольший интерес вызвала совместная работа американских и советского ученых (доклад № 12) об эффекте дополнительного пинчевания из-за наличия продольного электрического и азимутального магнитного полей в бесстолкновительной плазме в тороидальных системах. Этот эффект приводит при определенных условиях к появлению дополнительного потока плазмы по направлению к оси системы и к уменьшению скорости диффузии. Заметим, что аналогичный результат независимо был получен также Галеевым.

В настоящее время теория волн и неустойчивостей в линейном приближении хорошо разработана и в известной мере является завершенным разделом физики плазмы. Основное внимание в докладах на эту тему было уделено дальнейшему развитию и углублению ранее высказанных идей и сравнению теории с экспериментом. Изучение условий возбуждения и распространения волн, как правило, рассматривалось для довольно простых конфигураций магнитных полей.

Нелинейным явлениям в плазме — одному из основных направлений развития теории — было посвящено 27 докладов. Они касались как теоретического, так и экспериментального изучения эха в плазме, взаимодействия волн в плазме (распадная и параметрическая неустойчивости), взаимодействия волн и частиц (эффект захвата частиц и нелинейное затухание Ландау). Ряд выводов и результатов представляют несомненный интерес для дальнейшего развития теории, а также для практических целей диагностики плазмы, электроники и радиофизики. Весьма характерной тенденцией в теоретических исследованиях являются рост числа и улучшение качества работ с применением ЭЦМ.

Из-за краткости данного обзора не все направления и работы, представленные на конференцию и несомненно представляющие интерес, были рассмотрены выше. Предпочтение отдано работам, более тесно связанным с проблемой управляемых термоядерных реакций. Кроме того, некоторые темы были опущены, поскольку они обсуждались на специальных конференциях. Например, в июне 1970 г. в Принстоне (США) состоялась конференция по стабилизации плазмы системами обрат-

