

монтаже, оперативной переборке подвергаются лишь модули малых размеров через окна криостата. Сопrotивление на обходе реакторной зоны обусловлено 12 сильфонами, которые соединяют между собой секторы. Дивертор с одним нулем, расположенным на дне, выбран из соображений смены блоков диверторных пластин манипуляторами. Диверторные блоки меняются один раз в год, перемещаются они через диверторные каналы в направлении большого радиуса наружу. Механическая структура электромагнитной системы создается центральным опорным цилиндром, верхней и нижней кольцевой структурой между катушками тороидального поля. Эта структура воспринимает нагрузку в плоскости катушек и перпендикулярно к ней в связи с воздействием торо- и полоидальных магнитных полей.

V. Магнитные и электрические системы. Система тороидального поля рассмотрена для трех хладагентов: жидкий (4,2 К), закритический (4,5 К) и сверхтекучий гелий (1,8 К). К сверхпроводнику (Nb_3Sn) закритический гелий подается циркулирующей в каналах охлаждения токоносущего элемента, жидкий гелий — сливом в ванну, где помещена сверхпроводящая обмотка. Катушки полоидального поля включают в себя сверхпроводящий ($NbTi$) и криореzистивный (Cu) соленоиды, сверхпроводящие ($NbTi$) кольцевые катушки. Система криогенного охлаждения рассматривается в циркуляционном исполнении и рассчитана на производство холода 4,5 К мощностью 53 кВт и 1800 л/ч жидкости.

VI. Системы нагрева и подачи топлива. Система нагрева нейтральными пучками рассчитана на мощность 75 МВт четырьмя инжекторами. Предусмотрен один резервный инжектор. Угол инжекции 16° — 22° . В каждом инжекторе расположено шесть индивидуальных источников ионов. Система подачи топлива состоит из газонапуска, применяемого на старте, и инжекции таблеток для регулирования плотности плазмы в фазе горения. Рассматривается два варианта инжекторов таблеток: газодинамический и центрифужный.

VII. Система управления и контроля. Работа по этой проблеме будет продолжена с учетом требований алгоритмов, которые сформируют разработчики ИНТОРа.

VIII. Критерии выбора площадки и общая компоновка. Критерии выбора следующие: достаточная территория для строительства, обслуживания и создания охранных зон; низкая сейсмичность; наличие энергосистем, допускающих большие импульсные нагрузки; обеспеченность источниками водоснабжения для охлаждения и другими системами охлаждения; возможность надежного захоронения радиоактивных отходов; удовлетворение требованиям безопасности, связанным с утечкой трития; обеспеченность людскими ресурсами для строительства и эксплуатации реактора; возможность транспортировки негабаритных и тяжеловесных конструкций; наличие хорошо развитой базы строительной индустрии. Общая компоновка характеризуется размещением вокруг ИНТОРа инжекторов нейтральных пучков (четыре основных, один резервный), инжекторов топлива (два), вакуумных насосов (двенад-

цать), испытательных модулей (три), блоков оборудования системы управления (два).

На заседании инженерной группы определены технические решения, которые могут рассматриваться при продолжении работы. Не решены в настоящее время способ охлаждения сверхпроводящих магнитов (циркуляционный или погружной) и тип хладагента.

На заседании ядерной группы подтверждены основные решения, принятые на предыдущей сессии. Первая стенка камеры работает в напряженных радиационных условиях и подвергается значительным термомеханическим нагрузкам. Выбрана конструкция толщиной 12 мм из нержавеющей стали, способная выдержать воздействие излучения плазмы в течение всего времени работы ИНТОРа. Проработаны альтернативные варианты конструкции из алюминиевых сплавов и стали с разрезами на поверхности.

Бланкет закрывает 60% поверхности камеры и располагается с верхней и боковой стороны тора. Такое расположение позволяет легко его разобрать в случае аварии. Проектом не предусмотрено производство электричества бланкетом, поэтому он может быть выполнен низкотемпературным и соответственно достаточно надежным.

Широко обсуждалась программа исследовательских работ на ИНТОРе и ее связь с проектированием будущего демонстрационного термоядерного реактора.

На заседании группы безопасности сделаны оценки энергии, которая может выделяться в аварийных ситуациях. Наибольшая энергия заключена в тороидальном магнитном поле реактора (40 ГДж). При проектировании также учитывается тепловая и магнитная энергия плазмы, которая будет выделяться на первой стенке реактора при срыве тока ($\sim 0,3$ ГДж). Рассмотрены аварийные ситуации с выходом дейтерия и трития внутрь защитной оболочки, связанные с разрушением контура охлаждения и испарением криогенных жидкостей. Суммарное содержание трития в реакторе оценено 3,4—3,9 кг, из них 0,6 находится в тритиевой системе; 0,5—1 — в литиевом бланкете и относящихся к нему системах; 2,3 — в системе хранения трития. Выход трития при нормальной работе составит до $7,4 \cdot 10^{11}$ Бк/сут. При аварийных ситуациях возможны выбросы до 100 г ($3,7 \cdot 10^{16}$ Бк) внутрь защитной оболочки и до $3,7 \cdot 10^{15}$ Бк в атмосферу.

Изменена система вакуумных барьеров. По новой схеме между криостатом и вакуумной камерой будет находиться зона под давлением немного ниже атмосферного.

Группа по плану-графику и трудовозатратам составила ориентировочный план-график сооружения реактора и схему обеспечения научно-исследовательскими работами при различных комбинациях стран-участниц.

Таким образом, фаза концептуального проектирования, длившаяся полтора года, успешно завершена.

Совещание подгруппы Международного совета по термоядерному синтезу, проходившее в Вене 29 июня 1981 г., подтвердило решение о продолжении работы МРГ по ИНТОРу в фазе 2А до конца 1982 г.

КАДОМЦЕВ Б. Б., ПИСТУНОВИЧ В. И.

Сессия Научного совета по комплексной проблеме

«Физика плазмы» АН СССР

На очередной расширенной сессии, проходившей в Звенигороде в апреле 1981 г., обсуждались наиболее важные работы по удержанию и нагреву плазмы в магнитных ловушках, исследования систем с большим отношением давления плазмы к давлению магнитного поля (плазменный фокус, пинч, лайнер), работы по инициированию управляемых термоядерных реакций с помощью лазерного излучения, электронных и ионных пучков.

Основными темами сообщений, посвященных изучению поведения плазмы в замкнутых магнитных ловушках,

были результаты первых экспериментов на новых установках, исследование неомических методов нагрева, изучение энергобаланса ионов и электронов, диффузии рабочего газа и примесей, устойчивости и равновесия, способов безиндукционного поддержания тока в плазме. На первом в мире токамаке со сверхпроводящей магнитной системой Т-7 (ИАЭ им. И. В. Курчатова) показана работоспособность обмотки тороидального магнитного поля в переменных магнитных полях и начаты физические исследования. Система удобна для проведения опытов,

требующих набора большого числа данных. В отличие от других установок на Т-7 нет необходимости в охлаждении магнитных катушек между рабочими импульсами, что позволяет работать в режиме один разряд каждые три минуты. Получены устойчивые разряды при токе до 200 кА и напряженности магнитного поля 2 Тл. Средняя плотность плазмы составляла $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, температура электронов и ионов достигала 1,3 и 0,5 кэВ соответственно.

Начаты эксперименты по сжатию плазмы нарастающим магнитным полем на установке Туман-3 (ЛФТИ). При двукратном увеличении магнитного поля за 3,7 мс наблюдался нагрев плазмы по адиабатическому закону, причем достигнутые при сжатии плотность и температура сохранились до конца разряда. Однако при начальной плотности более $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ повышение магнитного поля приводило к возникновению интенсивных магнитогидродинамических колебаний, препятствующих сжатию плазмы. В ИАЭ им. И. В. Курчатова введен в строй токамак ТМ-Г с графитовым лайнером, являющийся модернизированным вариантом ТМ-3. Основной целью экспериментов является исследование возможности получения плазмы с малыми радиационными потерями энергии за счет существенного уменьшения ее загрязнения примесями тяжелых ионов. Большой интерес представляют эксперименты по электронно-циклотронному нагреву на Т-10 (ИАЭ им. И. В. Курчатова) при вводимой в плазму мощности около 500 кВт. Эффективность нагрева при плотности до $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ достигла 60%, температура электронов увеличивалась в 1,5 раза по сравнению с чисто омическим нагревом.

На стеллараторах Ливень-2 (ФИАН) и Ураган-2 (ХФТИ), а также на Т-10 исследовался ионно-циклотронный нагрев плазмы (водородной с малой добавкой дейтерия и наоборот). Физическая картина нагрева на ион-ионном гибридном резонансе качественно согласуется с теорией. Использование двух генераторов на Урагане-2, одного для создания плазмы (мощность 0,3 МВт) и другого для нагрева (мощность около 1 МВт), позволило получить плазму температурой около 0,3 кэВ при средней плотности 10^{13} см^{-3} .

В последние годы все большее внимание уделяется возможности возбуждения в токамаках стационарного тока ВЧ-волнами, инжекцией атомарных пучков и за счет α -частиц, поскольку стационарный режим работы термоядерного реактора-токамака с технической и экономической точек зрения является наиболее выгодным. Этой проблеме были посвящены теоретические работы, а также сообщение об экспериментах на установке Р-0 (Сухумский ФТИ), где был получен квазистационарный ток увлечения плотностью около 40 А/см^2 , возбуждаемый при поглощении плазмой бегущих альфвеновских волн. Полученные в опытах зависимости значений тока увлечения и их влияние на процессы переноса в плазме согласуются с теорией.

Часть докладов была посвящена исследованию начальной стадии разряда в токамаках и параметров пристеночной плазмы в связи с разработкой проектов термоядерных реакторов, изучению различных неустойчивостей, в частности типа срыва и тиринг-моды. Большое число сообщений посвящено анализу энергобаланса ионов и интерпретации экспериментальных результатов, которые получены из измерений параметров быстрых атомов, вылетающих из плазмы в токамаках, а также изучению материального баланса и поведению примесей в замкнутых магнитных системах. Среди диагностических методов отметим в связи с этим использование активного метода корпускулярной диагностики на Т-10, изучение пространственного распределения электронной температуры в сечении плазменного шнура в двух перпендикулярных направлениях (Т-10), инжекцию в плазму макрочастиц углерода и металлов для определения скорости и направления полоидального вращения в зависимости от малого радиуса (Т-10 и ФТ-1), локальное измерение диффузии плазмы по колебанию плотности при периодической моду-

ляции потока водорода, инжектируемого в плазменный шнур с использованием механического клапана (Т-10), зондирование плазмы пучками ионов большой массы для измерения пространственного распределения потенциала плазмы (ТМ-4).

В одной из работ (ИАЭ им. И. В. Курчатова) предложена оригинальная идея тороидальной системы с прямолинейными участками, совмещающей такие достоинства, как удовлетворительное удержание плазмы в тороидальной конфигурации и возможность получения в линейной конфигурации большого значения отношения давления плазмы к давлению магнитного поля. Для выяснения перспективности таких установок необходимо в дальнейшем провести всесторонний анализ.

В первых экспериментах на тороидальной магнитоэлектростатической ловушке АТОЛД (ИАЭ им. И. В. Курчатова) получена плазма плотностью до 10^{12} см^{-3} при температуре ионов и электронов десятки эВ. Время жизни частиц составляло около 0,2 мс, т. е. уход электронов поперек силовых линий магнитного поля на два порядка превышал классическую диффузию. Механизм этого переноса исследуется, и пока неясно, связано ли такое поведение плазмы с непринципиальными обстоятельствами, например отклонениями от симметрии магнитного поля, или аномальный перенос обусловлен развитием неустойчивости в переходном слое плазмы, как это предсказывает теория. В сообщениях, посвященных поведению плазмы в открытых магнитных ловушках, включая и амбиполярные, изложены важные результаты теоретических исследований, касающихся потерь плазмы поперек магнитного поля в амбиполярных ловушках за счет бесстолкновительного захвата определенной группы пролетных ионов в концевых пробкотронах между магнитной пробкой и областью максимального электростатического потенциала; возможности улучшения удержания в амбиполярной ловушке за счет естественного повышения температуры электронов в концевых пробкотронах даже без искусственно создаваемого теплового барьера; способов стабилизации дрейфово-конусной и анизотропной альфвеновской неустойчивостей путем добавки соответственно небольшого количества горячих электронов (СВЧ-нагрев) и малой добавки равновесных более тяжелых ионов.

Интересные результаты получены в экспериментах по микроинчам, т. е. при исследовании быстрых разрядов в рабочих камерах малых размеров (ФИАН, МИФИ, Институт спектроскопии АН СССР). Хотя эти системы не перспективны с точки зрения создания энергетических термоядерных систем, они могут эффективно использоваться для исследований общих для многих импульсных установок физических процессов, в том числе возможного радиационного схлопывания плазмы.

Некоторые новые научные сообщения были посвящены рассмотрению теоретических моделей поведения плазмы в самосжимающихся разрядах, в том числе с применением лайнеров, разработке метода определения температуры и плотности плазмы по характеру магнитогидродинамических возмущений зэт-пинча в случае, когда применение для этих целей лазерного метода затруднено. В одном из сообщений (ИИПМ АН СССР) рассмотрены специфические автомодельные режимы сжатия и разрежения конечной массы плазмы, допускающие обращение времени в диссипативной среде.

На установке Кальмар (ФИАН) проведены исследования по взаимодействию излучения неодимового лазера с различными мишенями. Изучение динамики процессов в плазменной короне свидетельствует о согласии с теоретической моделью «стационарной короны» и классическом характере теплопроводности в диапазоне световых потоков плотностью $10^{13} - 10^{15} \text{ Вт/см}^2$. В экспериментах исследовались собственное рентгеновское излучение мишеней и поведение плазмы в области критической плотности методом комбинационного рассеяния зондирующего света.

Совокупность результатов подтверждает преимущества режима гидродинамического сжатия мишени (режим «сжимающейся оболочки»), предложенного в свое время в ФИАНе.

В опытах по ускорению тонких фольг при воздействии мощных лазерных импульсов (ИАЭ им. И. В. Курчатова) показано, что при потоке плотностью до $5 \cdot 10^{13}$ Вт/см² теплопроводность является классической и расчеты процесса разлета плазмы совпадают с экспериментальными данными при учете ее собственного рентгеновского излучения. В некоторых сообщениях приведен подробный теоретический анализ на основе различных моделей взаимодействия мощного лазерного излучения с мишенями. Цель этих работ — оптимизация системы лазер — мишень для зажигания термоядерного топлива. Так, отмечается значительная зависимость требуемой для этого энергии от длины волны излучения. Многочисленные теоретические и экспериментальные работы, выполненные на различных установках, говорят о правомерности описания экспериментов при потоках лазерного излучения плотностью менее или $\sim 10^{14}$ Вт/см² в рамках гидродинамической модели с классическими процессами переноса. Ведутся работы по параметрическому анализу будущих лазерных энергетических установок, в том числе гибридного типа. Как показывает анализ, экономически наиболее выгодной может оказаться установка, вырабатывающая электро-энергию и ядерное топливо (для обычных АЭС) на основе

сравнительно дешевого газового лазера и с жидкой защитой стенок камеры.

В последнее время наряду с использованием для иницирования термоядерных реакций лазеров и ускорителей релятивистских электронов активно обсуждается возможность применения в качестве источников энергии пучков легких и тяжелых ионов. Ионный пучок характеризуется малым пробегом и высокой эффективностью торможения в твердой мишени, возможностью группировки пучка и отсутствием тормозного излучения, высоким к. п. д. системы. Вместе с тем для осуществления условий зажигания термоядерной реакции сила тока и энергия легких ионов в пучке должны составлять 10 МА и несколько МэВ, в случае тяжелых ионов соответственно несколько десятков кА и 10—20 ГэВ (при мощности 100—200 ТВт). В ФИАНе на модельной установке ЭРГ исследуется возможность создания сильноточных протонных пучков энергией до 2 МэВ.

На открытии сессии с лекцией, посвященной памяти академика М. А. Леонтовича, выступил Б. Б. Кадомцев. Последние 30 лет жизни М. А. Леонтовича были отданы разработке теории плазмы, основоположником которой он считается по праву в мире. Труды коллектива теоретиков, воспитанных им, во многом определили успешное развитие исследований в области высокотемпературной плазмы и управляемого термоядерного синтеза.

КУЗНЕЦОВ Э. И.

Научная конференция МИФИ

В конференции, состоявшейся в январе 1981 г., участвовали более 3000 человек, в том числе свыше 400 представителей различных организаций, работало 19 секций, было заслушано более 800 докладов и научных сообщений.

На секции «Ядерные процессы при низких и средних энергиях» А. Б. Мигдал и др. изложили новые аспекты наиболее продвинутого на сегодняшний день теоретико-полевого метода расчета свойств атомных ядер. Этот доклад предложен в связи с переизданием книги А. Б. Мигдала «Теория конечных ферми-систем и свойства атомных ядер». О свойствах уникальных физических систем нуклон-антинуклон и методах их наблюдения сообщалось в докладе И. С. Шапиро. Особенности спектров нейтронов, сопровождающих деления поляризованных ядер, и исследованиям несохранения пространственной четности в радиационном захвате и делении ядер были посвящены доклады Д. П. Гречухина и Г. В. Данилина. На специальных заседаниях обсуждались различные аспекты физики деления и резонансные ядерные реакции.

Физика ядерных реакторов, их использование в энергетике будущего, а также теплофизика ядерных энергетических установок рассматривались на секции «Физико-энергетические установки». На секции «Радиационная физика» интерес вызвали доклады В. Ф. Елесина и др., в которых предлагаются основы теории влияния радиационных дефектов на термодинамические свойства сверхпроводящих материалов со структурой А-15. Следует отметить результаты микродозиметрического анализа работы полупроводниковых приборов в ионизирующих полях, а также данные о распространении ионизирующих излучений на границе земля — воздух, содержащиеся в докладе В. И. Иванова и др.

На секции «Электрофизические установки и ускорители» излагались результаты разработки и создания линейных ускорителей электронов с бегущими и стоячими волнами. Часть докладов была посвящена созданию ускорительно-накопительного комплекса на энергию 300 ГэВ. Прикладному использованию современных достижений ядерной физики были посвящены заседания секции «Ядер-

ная физика и электроника в медицине, биологии и экологии». Основные сообщения здесь касались радиационно-индуцированных эффектов в клетках и субклеточных структурах. Эти исследования своим конечным результатом имеют выход в практику лучевой терапии, медицинской диагностики и т. п. Несколько докладов секции было посвящено методам измерения и анализа загрязняющих примесей как радиоактивной, так и нерадиоактивной природы.

На секции «Физика плазмы и термоядерных реакций» наибольший интерес вызвали доклады М. К. Романовского и В. А. Храброва о состоянии исследований импульсного термоядерного синтеза — лазерной плазмы, плазменного фокуса. Приводились результаты разработки современных методов нейтронной и рентгеновской диагностики лазерной плазмы.

Работа секции «Молекулярная физика» была посвящена рассмотрению фундаментальных и прикладных вопросов молекулярной физики, связанных с автоколебательными явлениями в пространственно-распределенных молекулярных системах. В частности, рассматривались вопросы образования инверсии заселенности колебательных уровней молекул при смешении сверхзвуковых потоков (доклад Н. М. Горшунова и др.). Предложены новые типы мощных высокоэффективных газодинамических и химических лазеров инфракрасного диапазона. Созданный в МИФИ макет квазинепрерывного лазера по характеристикам превосходит аналогичные системы в нашей стране и за рубежом.

Среди докладов, сделанных на секции «Квантовая радиофизика и физика твердого тела», большой интерес вызвало сообщение Ю. А. Быковского и др. об исследовании увеличения выхода низкоэнергетического рентгеновского излучения из лазерной плазмы. Результаты проведенного исследования имеют большое значение для углубленного понимания физики явлений в лазерной плазме. Кроме того, они важны для такого перспективного применения лазерной плазмы, как рентгенолитография в производстве микроэлектронных приборов.

Много докладов было заслушано на секции «Физическая электроника, электронные приборы и установки».