

Конференции, семинары

2-я Всесоюзная конференция по инженерным проблемам термоядерных реакторов

На конференции, состоявшейся в июне 1981 г. в Ленинграде, присутствовали 300 специалистов из различных организаций нашей страны, социалистических стран, Великобритании, США, ФРГ, Японии. На трех пленарных и пятнадцати секционных заседаниях обсуждено около 250 докладов. Большое число докладов, активность участников свидетельствуют о том, что практическое использование энергии управляемого термоядерного синтеза (УТС) становится важнейшей задачей века. Развитие работ стимулируют сейчас результаты, полученные на T-10 (СССР) и PLT (США). Плазма нагрета до температуры, близкой к температуре зажигания D — T-плазмы, получено предсказываемое теорией время ее удержания.

Наибольшее внимание на конференции было уделено строительству крупных установок, предназначенных для получения и исследования плазмы с термоядерными параметрами и решения инженерных проблем создания термоядерных реакторов: T-15 (СССР), JET (Евратом) и JT-60 (Япония). Экспериментальные результаты, достигнутые на T-10, PLT, «Дублет III», «Алкатор» и других, вселяют оптимизм и веру в то, что задачи, стоящие перед строящимися установками, будут выполнены, и откроется путь для сооружения следующего поколения установок.

Установка T-15 по параметрам плазмы близка к установкам JET, JT-60 и TFTR (США), главное ее отличие состоит в крупной сверхпроводниковой обмотке тороидального поля с запасом энергии в магнитном поле на конечной стадии 760 МДж. В последние годы построены менее крупные установки, решающие различные физические и технологические вопросы: T-7 (ИАЭ им. И. В. Курчатова) — первый токамак со сверхпроводниковой обмоткой тороидального магнитного поля; TM-4 (ИАЭ им. И. В. Курчатова) для изучения взаимодействия плазмы с горячей камерой; T-13 (ИАЭ им. И. В. Курчатова) для исследования диверторов и адиабатического сжатия плазмы; «Туман-3» (ЛФТИ им. А. Ф. Иоффе) с системой автоматического управления положением и формой плазменного шнура для исследований нагрева плазмы посредством адиабатического сжатия и ввода СВЧ-мощности; «Ураган-3» (ХФТИ) — торсатрон с бесиловой магнитной системой и полоидальным дивертором; ASDEX (ФРГ) с двумя диверторами; токамак MT-1 (ВНР) и др.

Значительное число докладов было посвящено инженерным проблемам создания термоядерных реакторов, в том числе на основе торсатрона, компактного тора, магнитной ловушки с минимумом B и др. Часть докладов касалась системного анализа и оптимизации параметров, что имеет первостепенное значение для получения высоких технико-экономических показателей термоядерных реакторов. Представляет интерес исследование инженерных проблем токамака с сильным полем для получения плазмы с зажиганием, выполненное специалистами ИАЭ им. И. В. Курчатова, НИИЭФА им. Д. В. Ефремова и Сухумского ФТИ. На конференции впервые рассматривались специальные вопросы реакторостроения, такие как анализ надежности и максимальной проектной аварии реактора-токамака, использование роботов с дистанционным управле-

нием и др. Значительно продвинулись работы, связанные с созданием реакторов на основе инерционного удержания плазмы. Успешно сооружается первая очередь «Ангара V», исследования на которой ответят на многие вопросы о перспективах развития этого направления. К сожалению, на конференции недостаточно были освещены работы по инерционному удержанию плазмы с использованием пучков тяжелых ионов. Тем не менее представленные проекты различных схем реакторов говорят о широком поиске путей оптимального и наиболее экономичного решения проблемы.

Большое внимание уделялось отдельным системам реакторов, что вызвано более глубокими их проработками, а также трудностями, с которыми сталкиваются при создании даже экспериментальных установок. Многие системы и элементы работают в напряженных условиях, часто необходимы новые конструкционные материалы, технологические процессы и незаурядные технические решения. Это относится к электромагнитным системам, разрядным камерам, первой стенке, диверторам, бланкетам, системам тритиевого цикла. Во многих докладах обсуждались электромагнитные системы термоядерных установок. В сооружаемых установках с умеренным магнитным полем силы, которые будут действовать на катушку тороидального поля, превысят 10^7 Н, опрокидывающие моменты — миллионы Н·м, в установке с сильным магнитным полем (доклад специалистов ИАЭ им. И. В. Курчатова и НИИЭФА им. Д. В. Ефремова) максимальные механические напряжения в материале бандажа $1,1 \cdot 10^9$ Н/м², проводника — $2,5 \cdot 10^8$ Н/м², суммарная радиальная сила составит $1,1 \cdot 10^8$ Н, суммарный опрокидывающий момент — 3×10^7 Н·м. Естественно, что при создании таких систем необходим тщательный анализ механических конструкций, выбор оптимальной и надежной конструкции, а также использование специальных материалов. Приводились расчеты магнитных и тепловых полей, напряженно-деформированного состояния в условиях нормальной работы и при ее нарушении, анализировались конструктивные решения.

Наряду с обсуждением резистивных стационарных и импульсных магнитных систем значительное внимание было уделено криорезистивным и сверхпроводниковым магнитным системам, имеющим первостепенное значение для создания термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы со стационарными и квазистационарными магнитными полями. Несколько работ было посвящено исследованию конструкционных и изоляционных материалов при низкой температуре, изучению свойств и устойчивости сверхпроводников к импульсным магнитным полям и разработке методов повышения устойчивости сверхпроводниковых магнитных систем к импульсным магнитным полям, криогенному охлаждению, криоткачке и криообеспечению установок.

Во многих докладах рассматривались системы питания. Это и понятно, так как мы имеем здесь дело с мощностью (при использовании теплых обмоток) сотни МВт. Так, в проекте токамака с сильным магнитным полем максимальная импульсная мощность, потребляемая установкой,

составляет 960 МВ·А при расходе энергии за импульс ~ 2 ГДж. Такую мощность, как правило, нельзя потреблять непосредственно от сети, поэтому необходимо применять различные накопители — машинные преобразователи, индуктивные и емкостные накопители, а часто сочетание их в различных комбинациях. Исследования свидетельствуют о важности создания систем электропитания и необходимости разработки коммутационной аппаратуры, главным образом, в связи с использованием индуктивных накопителей. Характерной особенностью конференции являлось обсуждение работ по коммутационной аппаратуре многократного действия, проблем питания сверхпроводниковых магнитных систем и устройств дополнительного нагрева. К наиболее важным и интересным следует отнести комплекс работ по созданию коммутационной аппаратуры многократного действия. В НИИЭФА им. Д. В. Ефремова разработаны два типа размыкателей с паузой тока мощностью до 10^9 Вт, замыкатель на 100 кА, 10 кВ. Создание этой аппаратуры позволило разработать систему питания полонидальных полей Т-15 и подтвердило правильность основной идеологии ее построения для токамаков следующего поколения. Создан двухступенчатый размыкатель со сменными элементами и рекордными параметрами: 40 кВ, 150 кА, разрывная мощность $6 \cdot 10^9$ Вт, точность синхронизации ~ 10 мкс. Разработаны турбогенератор кратковременного действия на 200 МВт и источники питания «Ангары».

Значительно продвинулись работы по источникам дополнительного нагрева — генераторам пучков нейтральных атомов и ВЧ-излучения. В различных лабораториях создаются или работают генераторы пучков нейтральных атомов суммарной мощностью до 12 МВт (например, ТФТР). В Т-15 предполагается дополнительно нагревать плазму инжекцией быстрых атомов и посредством электромагнитных волн на электронно-циклотронной частоте. Мощность СВЧ-нагрева, вводимая в камеру токамака, составит до 5 МВт; длительность импульса нагрева 1—2 с, длина волны генераторов 3,6 мм. Главной трудностью является разработка генераторов большой единичной мощности. Поэтому принято решение использовать большое число генераторов единичной мощностью по 0,2—0,3 МВт. В Т-15 будет три инжектора по 3 МВт энергией атомов 40—80 кэВ, длительностью импульса 1,5 с. Для изучения инженерных и физических вопросов инжекторов сооружается экспериментальный стенд на 160 кВ, 100 А, 20 с.

Большое число докладов было посвящено конструкционным материалам, изменению их поверхностных и объемных свойств под воздействием излучения термоядерной плазмы. Эти доклады отразили возрастающий интерес

к взаимодействию факторов термоядерного реактора с первой стенкой. Результаты исследований касались большинства механизмов взаимодействия, по своему содержанию, однако, они не позволяют сделать каких-то обобщений принципиального характера.

В большой группе докладов приводились расчет и конструктивно-технологические характеристики разрядных камер токамаков и импульсных установок. Интерес представили доклады о вакуумной технологии экспериментальных установок, имплантационной и криогенной откачке водорода, различных методах откачки дейтерия и трития, отработке и испытаниях отдельных элементов вакуумных систем, использовании эффектов аномально высокой проницаемости материалов в контакте с неравновесными газовыми средами для решения задач вакуумной откачки реакторов, оптимизации диверторных систем откачки. Следует отметить, что некоторые важные вопросы материаловедения для термоядерных реакторов не нашли достаточного освещения. Мало данных о защитных покрытиях на поверхности первой стенки, влияния облучения на сверхпроводники, поведении материалов в циклических температурных полях.

Обсуждались проекты бланкета и его модулей, теплосъем в которых осуществляется с помощью газовых (например гелий) или жидкометаллических (литий) теплоносителей, для чистых и гибридных бланкетных систем. Выявлены сложности теплосъема с помощью жидкометаллических теплоносителей в магнитном поле, а также способы организации теплосъема с наименьшим МГД-сопротивлением в магнитном поле различной ориентации. Получены экспериментальные данные об МГД-течениях в моделях реальных конструктивных исполнений бланкета. К основным вопросам проектирования бланкета реактора относятся оценка распределения быстрых нейтронов в нем и радиационная защита. Были представлены материалы об исследовании спектров нейтронов, замедляющихся в средах, которые имитируют материальный состав бланкета и радиационной защиты.

Определенное внимание было уделено преобразованию тепловой энергии термоядерных реакторов (квазистационарных, импульсных, гибридных) в электрическую, стабилизации теплофизических и энергетических выходных параметров термоядерных систем. Предложены схемы для выравнивания выходных параметров некоторых импульсных термоядерных реакторов, а также схемы прямого преобразования тепловой энергии плазмы в электрическую.

Таковы основные научно-технические вопросы, по которым развернулась дискуссия.

ГЛУХИХ В. А.

Всесоюзная конференция по исследованию и разработке конструкционных материалов для термоядерных реакторов

Тематика конференции, состоявшейся в апреле 1981 г. в Дубне, вызвала интерес многих специалистов, так как одной из основных при создании термоядерных реакторов с магнитным удержанием плазмы является проблема материалов первой стенки разрядной камеры.

Работа проходила на пленарных заседаниях и в четырех секциях: условия работы, требования и технологии материалов для термоядерных реакторов; объемное радиационное повреждение материалов; взаимодействие плазмы с поверхностью материалов; методы исследования материалов для установок термоядерного синтеза. Всего было заслушано около 140 докладов.

Следует отметить, что за два года, прошедшие с момента первой конференции, некоторые представления о режимах работы термоядерного реактора изменились. В нескольких случаях они стали более конкретными. Выполненные за это время теоретические и экспериментальные исследования позволили более обоснованно подойти как к выбору материала, так и прогнозированию изменений его свойств в процессе работы. При выборе материалов следует учитывать требования, определяемые параметрами и режимом работы реактора-токамака, его конструктивными особенностями. Этому был посвящен доклад В. А. Глухих и др. Физические проблемы материалов первой стенки обсужда-