

## 5-е заседание международной Рабочей группы по ИНТОРУ

Заседание, состоявшееся в январе — феврале 1981 г., проходило в рамках структуры, принятой на предыдущих сессиях 1980 г.: Руководящий комитет, Координационный совет, Рабочие группы. Одновременно заседал Международный совет по термоядерным исследованиям, который рассмотрел результаты деятельности МРГ и принял решение после окончания фазы I в июне 1981 г. продолжить работу над проектом ИНТОРа на следующей фазе II-A с июля 1981 г. по июнь 1982 г. В течение этого времени должен быть сделан концептуальный проект комплекса ИНТОРа, в том числе систем энерго- и водоснабжения, горячих камер, дистанционного обслуживания и другого вспомогательного оборудования. На фазе II-A работа МРГ будет продолжаться в прежнем порядке. До июня 1982 г. должна быть решена судьба проекта, т. е. будет ли осуществляться техническое проектирование (фаза II-B) реактора.

На этом заседании делегации представили черновые варианты национальных эскизных проектов ИНТОРа. По основным вопросам проекта достигнуты согласованные решения. Сделан первый чертеж международного варианта поперечного сечения ИНТОРа. Вопросы, оставшиеся несогласованными, сформулированы в качестве домашнего задания к следующему заседанию МРГ. Согласованные решения позволяют надеяться на то, что концептуальный проект будет выполнен к июню 1981 г.

Более детально определены цели ИНТОРа. Основная задача фазы III реактора — достижение нейтронной нагрузки около  $5 \text{ МВт} \cdot \text{лет}/\text{м}^2$  в течение не более 40 лет. Окончательно определены основные параметры реактора: плазменный шнур с малым радиусом 1,2 м, вытянутостью поперечного сечения 1,6 м в магнитном поле 5,5 Тл на оси камеры при токе в плазме 6,4 МА будет производить 620 МВт(тепл.) термоядерной мощности при средней нейтронной нагрузке на стенку  $1,3 \text{ МВт}/\text{м}^2$  и  $\beta = 5,6\%$ . Плазма в ИНТОРе может быть нагрета до зажигания термоядерной реакции инжекцией пучков быстрых атомов энергией 175 кэВ при полной мощности в пучке 75 МВт. В качестве альтернативного способа рассматривается ВЧ-нагрев.

Физическая группа предложила увеличить длительность рабочего импульса горения реакции на второй и третьей стадиях работы ИНТОРа со 100 до 200 с. Рекомендация принята. Вероятность срывов тока уменьшена на первой стадии с  $10^{-2}$  до  $10^{-3}$ , общее число срывов за все время работы реактора составляет около  $10^3$ . Определена форма сепаратрисы полойдальной диверторной конфигурации магнитного поля с нулем, расположенным в нижней части тора. Это позволило набросать контуры первой

стенки реактора, включая диверторную камеру, бланкет, защиту и тороидальные магнитные катушки.

Участники инженерной группы согласовали монтаж бланкета, защиты и вакуумной камеры; систему полойдального поля; проект конструкции катушек тороидального поля; конфигурацию дивертора; проектные допустимые критерии; инжекторы пучков быстрых атомов; вакуумные и криогенные системы; электромагнитные проблемы; коэффициент технического использования. Согласовано также положение плазмы относительно центра тороидальных катушек и конфигурация осевой линии тороидальной катушки. Принято предложение о создании области промежуточного вакуума между внутренней стенкой криостата и наружной стенкой радиационной защиты. Для лучшей организации работы из состава инженерной группы сформирована бригада, основной задачей которой является согласование основных геометрических размеров и конфигурации ИНТОРа.

Реакторная группа рекомендовала использовать плоскую конфигурацию первой стенки толщиной 12—16 мм без графитового экрана. Сравнены различные конструкции диверторных пластин. Съем тепла с них в диапазоне  $1,5\text{—}3 \text{ МВт}/\text{м}^2$  допустим при толщине вольфрамового и молибденового покрытия 5—8 мм, что обеспечивает работу конструкции около года. Обсуждались требования к литиевому бланкету реактора. Была подтверждена необходимость получения коэффициента воспроизводства трития не ниже 0,6. Для дальнейшего рассмотрения приняты варианты бланкета с твердым литийсодержащим материалом, расположенным как в каналах, так и в межканальном пространстве и с теплоносителем в трубах. Для окончательного выбора следует провести серию расчетов бланкета с тяжеловодным замедлителем, что позволит повысить коэффициент воспроизводства. Была проведена дискуссия и составлен перечень испытаний и требований для них в экспериментальных устройствах реактора.

Начала работать группа по безопасности. Она рассмотрела соответствующие главы национальных эскизных проектов и отметила, что нормы на радиоактивные выбросы и максимально допустимые магнитные поля в рабочих помещениях во всех вариантах проекта одинаковые. Группа составила детальную схему главы по безопасности и охране окружающей среды, которая должна войти как в каждый национальный, так и в международный эскизный проект.

На сессии была создана новая группа по научно-исследовательским и опытно-конструкторским работам, основная деятельность которой предполагается на фазе II-A и позднее.

ПИСТУНОВИЧ В. И.

## ТК МАГАТЭ «Критический анализ альтернативных термоядерных концепций»

В совещании Технического комитета (ТК) МАГАТЭ, состоявшегося в марте 1981 г. в Эриче (Италия), участвовали специалисты Советского Союза, США, ФРГ, Великобритании, Италии, Японии, Нидерландов, Австрии, Аргентины, Италии, Швеции и представители Евратома. Основное внимание на нем было уделено стеллараторам, открытым ловушкам, пинчам с обращенным полем, компактным торами и элмо-бамши-торусу. Обсуждались также проблемы, связанные с плотным линейным пинчем, скрю-

пичем, плазменным фокусом, зет-пинч-лайнером и открытой ловушкой с  $\beta \approx 1$ .

**Стеллараторы.** В одном из докладов ФРГ отмечались преимущества и недостатки стеллараторов по сравнению с токамаками. Достоинства таких систем состоят в стационарных магнитных полях и стационарном термоядерном горении; создании плазмы в имеющих магнитных поверхностях с предсказуемым удержанием частиц и энергии во времени; низкой циркулирующей мощности; воз-

возможности удаления примесей и золы магнитными лимитерами и геликоидальным полоидальным дивертором, которые образуются как естественное следствие топологии магнитной конфигурации; отсутствия крупных срывов плазмы, которые привели бы к интенсифицированному локальному выбросу энергии на первую стенку (или на бланкет, защиту, катушки) и вспомогательных обмоток для управления положением шнура или профилем поля, умеренном аспектном отношении ( $\sim 10$ ), что облегчает доступ при обслуживании. Недостатками стеллараторных систем являются сложность винтовых обмотки и обусловленные этим технологические трудности. Одна из основных проблем — достижение параметра  $\beta \approx 25\%$ .

В Принстонской лаборатории США предложен один из способов преодоления технологических сложностей, связанных с винтовой обмоткой путем ее изготовления из большого числа модулей.

На установке «Гелиотрон-Е» (Япония) получены три режима работы: А — температура электронов и ионов  $T_e = 100-300$  эВ,  $T_i = 100-200$  эВ, плотность плазмы  $n = (2-4) \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ , энергетическое время жизни  $\tau_E = 30-50$  мс, параметр удержания  $n\tau_E = 2 \cdot 10^{12}$  см $^{-3}$ ·с, ток омического нагрева  $I_{0,н} = 10-20$  кА; Б —  $T_e = 1$  кэВ,  $T_i = 150$  эВ,  $\tau_E = 2$  мс,  $n = 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $I_{0,н} = 80$  кА; В —  $T_e = 300$  эВ,  $T_i = 200$  эВ,  $n = 8,5 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $\tau_E = 30$  мс,  $I_{0,н} = 30$  кА.

В экспериментах по электронно-циклотронному нагреву (ЭЦН) плазмы используются гиротроны фирмы «Вариан» (частота 28 ГГц, мощность 200 кВт). Температура электронов увеличена с 50 до 100 эВ. Готовится эксперимент по нейтральной инжекции при мощности пучка 2 МВт. На 1982 г. запланирован комбинированный нагрев плазмы до нескольких кэВ (ЭЦН + нейтральная инжекция).

Теоретические проблемы удержания и нагрева плазмы в установках стеллараторного типа обсуждались в докладе А. Шлютера (ФРГ). Приведены результаты детальных расчетов конфигурации магнитных поверхностей, предельного значения  $\beta$ , устойчивости плазмы.

**Открытые ловушки.** Основные усилия в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса (США) в настоящее время сконцентрированы на исследованиях удержания плазмы в tandemных (амбиполярных) ловушках. Концепция тандема была проверена на установке ТМХ, где была получена «тандемная» конфигурация плазмы, которая сохраняет устойчивость в течение 25 мс; продемонстрировано электростатическое удержание плазмы в центральной ловушке; значительно улучшено удержание электронов, снижены энергетические потери электронного компонента, достигнута температура электронов 200 эВ. К октябрю 1981 г. установка будет модернизирована: установлена новая магнитная система, увеличена мощность нейтральной инжекции и будет применен ЭЦН. Размеры установок ТМХ и ТМХ-У: длина боковой ловушки 0,9 и 3 м; длина центральной ловушки 5,5 и 8 м; пробочное отношение 2 : 1 и 4 : 1 соответственно. Основная задача модернизированной установки — проверка идеи тепловых барьеров.

Удержание плазмы в большой тандемной ловушке с тепловыми барьерами будет исследоваться на установке МФТФ-В, решение о сооружении которой принято Министерством энергетики США. Эта установка будет включать в себя уже сооружаемую МФТФ с минимумом В в качестве одной из боковых ловушек. Планируется завершить сооружение МФТФ-В в октябре 1984 г. На ней предполагается достичь значение  $Q \approx 1$  (в пересчете на D — T, хотя в экспериментах будет использоваться только D — D). Длина установки 57, диаметр боковых ловушек 12 м.

В Центре ядерных исследований Карлсруэ (ФРГ) ведутся работы по сверхпроводимости, инжекторам отрицательных ионов и материаловедению. Разрабатывается проект термоядерного реактора TASKA на основе тандемной ловушки, который может быть следующим шагом после установки МФТФ-В. Тепловая мощность 100 МВт, нейтральная нагрузка на первую стенку 1—1,5 МВт/м $^2$ . Основ-

ная причина выбора открытой ловушки — сложность технологических проблем реактора-токамака.

Работы по открытым ловушкам ведутся в Институте физики плазмы Нагойского университета (Япония). Установка RFC-XX состоит из центральной ловушки — солеоида и двух боковых типа «антипробкотрон». Запирание щелей и удержание плазмы в боковых ловушках осуществляется с помощью мощного ВЧ-поля. Длина системы 10 м, диаметр боковых ловушек 3 м, мощность ВЧ-генератора 4 МВт, частота 20—80 МГц. Предложена концепция реактора (длиной  $\sim 100$  м) на этом принципе.

**Пинчи с обращенным полем.** Основная концепция пинчей с обращенным полем, современные состояния исследований и ближайшие перспективы Калэмской лаборатории (Великобритания) излагались в двух докладах специалистов этой лаборатории. Преимущества систем такие: тороидальное поле в пинче для установок одних размеров значительно меньше, поэтому существенно меньше запасаемая энергия, магнитные силы и можно обойтись без сверхпроводящих обмоток; омический нагрев более эффективен ( $\sim 10$  раз), так как ток для одинаковых условий больше, чем в токамаке; упрощаются инженерные проблемы, так как нет необходимости работать с малым аспектным отношением.

В настоящее время эксперименты проводятся на установках «Эта-бета II» (Италия), TPE I (Япония), ZT-40 (США), НВТХ-1А (Великобритания). Подтверждены экспериментально физические принципы этой системы, установленные законы подобия позволили спроектировать установку следующего поколения НВТХ, которая будет построена в Калэмской лаборатории совместными усилиями западноевропейских стран (Италия, Нидерланды и др.).

Подробно сообщалось о результатах экспериментов на установке «Эта-бета II». Ее параметры:  $R = 0,65$  м,  $a = 0,125$  м,  $I_T = 300$  кА,  $\tau_{нарастания} = 100$  мкс,  $P_0 = 0,4-3,3$  Па. Получена плазма с  $T_e = 100$  эВ,  $T_i = 80$  эВ. Начались первые эксперименты на ZT-40 М, которая вступила в строй в феврале 1981 г. после модернизации ZT-40, заключавшейся в замене керамического лайнера металлическим. В результате значительно уменьшились энергетические потери плазмы.

В одном из докладов анализировались законы подобия для пинчей с обращенным полем, и они сравнивались с токамаком. Основным параметром для пинча является отношение тока к линейной плотности. При малом значении этого параметра энергетическое время жизни ограничено радиационными потерями, при большом — быстро возрастающими флюктуациями плотности. Законы подобия позволяют утверждать, что на REX будет получена плазма с параметрами, близкими к достигаемым на токамаках (для сравнимых размеров установок). При дальнейшем увеличении тока (и соответственно размеров) пинчи с обращенным полем могут оказаться предпочтительнее токамаков.

**Элмо-бампи-торус (ЕВТ).** На действующей установке в США экспериментально проверены основные физические принципы. Используются гиротроны фирмы «Вариан» ( $N = 200$  кВт,  $\tau = 2$  мс,  $f = 28$  ГГц). Получена плазма с  $T = 100$  эВ,  $n = 10^{11}$  см $^{-3}$ . В настоящее время строится более крупная установка ЕВТ-Р, на которой предполагается получить плазму с  $n \sim 1,7 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T_e \sim 2$  кэВ,  $T_i \sim 0,4$  кэВ,  $B \sim 2$  Тл. Делаются реакторные проработки этой системы. Отмечаются следующие преимущества: стационарность; возможность достижения большого  $\beta$ ; большое аспектное отношение; модульная конструкция; простота магнитной системы.

**Компактные торы.** Перечислялись основные схемы формирования компактных торов, проведена их классификация, сформулированы главные физические вопросы, требующие детального исследования. Отмечаются следующие достоинства этих систем: возможность достижения большого  $\beta$ , а также пространственно-временного разделения формирования плазменного тороида и его нагрева;

сравнительно малые размеры; простота конструкции и технологических проблем (по сравнению с токамаком). По способу формирования компактные торы подразделяются на сферомаки, тороиды с обращенным полем (типа системы, разрабатываемой в ИАЭ им. И. В. Курчатова) и типа «Астроны», формируемые кольцами быстрых частиц. Кроме того, компактные торы подразделяются на импульсные, стационарные и движущиеся. В последнем случае тороид движется вдоль линейной системы. Таким способом можно решить многие инженерные проблемы, поскольку уменьшается нагрузка на первую стенку.

Сообщалось об экспериментальных и теоретических работах Принстонской лаборатории по сферомаку. В настоящее время действует небольшая модельная установка «Proto-S 1», сооружается более крупная «SI» с  $R = 0,5$  м,  $a = 0,25$  м,  $I_T = 500$  кА,  $I_p = 1,5$  МА,  $n = 10^{14}$  см $^{-3}$ . Установка будет введена в строй в 1982 г.

Проводятся эксперименты по быстрому формированию плазменных тороидов с помощью коаксиальной пушки с продольным магнитным полем. Получена плазма с  $T = 30$  эВ,  $n = 10^{14}$  см $^{-3}$ ,  $\tau = 100$  мкс. Такие тороиды используются для инжекции в открытую ловушку 2XIB, которая теперь называется «Beta-2».

В Лаборатории ВМФ США продолжаются работы по проекту LINUS. Предполагается сжимать плазменный тороид вращающимся жидкометаллическим лайнером. Тороид формируется в продольном магнитном поле при инжекции кольцевого электронного пучка. Сжатие лайнера происходит при открывании клапанов резервуаров высокого давления ( $\sim 15$  МПа), содержащих гелий. Работа

циклическая: сжатие-расширение. Сейчас экспериментально продемонстрировано сохранение симметрии вращающегося жидкометаллического лайнера при сжатии. Монтируются мощные генераторы электронных пучков.

Сообщалось о получении при обращении магнитного поля в тета-пинчах плазменных тороидов с  $n \sim 4 \cdot 10^{13}$  см $^{-3}$ ,  $T \sim 200$  эВ,  $\tau_E \sim 50$  мкс,  $n\tau_E \sim 2 \cdot 10^{11}$  см $^{-3} \cdot$ с,  $\beta \sim 0,9$ .

В США создается установка ST-TRX1 для исследования компактных торов, формируемых в тета-пинче с обращенным полем. В ней планируются предионизация z-рядом, актуальные барьерные поля и радиальный ударный нагрев. Магнитная система обеспечивает получение максимального значения магнитного поля 1,6 Тл при времени спада 0,1 с. Разрабатывается проект импульсного термоядерного реактора TRACT, основанный на этом принципе.

Рассматривался теоретический анализ устойчивости компактных торов на основе энергетического принципа, а также работы по формированию электронных и ионных колец.

Таким образом, несмотря на существенный прогресс, достигнутый в последние годы на токамаках, во многих странах, проводящих термоядерные исследования, развиваются альтернативные системы. Значительные технологические трудности, с которыми сталкиваются ученые и инженеры при проектировании термоядерного реактора на основе токамака, заставляют искать другие технологически и конструктивно более простые подходы к решению термоядерной проблемы.

КОРЖАВИН В. М.

## VII Всесоюзное совещание по ускорителям заряженных частиц

В работе совещания, состоявшегося 14–16 октября 1980 г. в Дубне, участвовали, кроме наших специалистов, ученые зарубежных ускорительных центров. По традиции сообщениям о крупнейших сооружаемых и проектируемых ускорителях предшествовал доклад о наиболее актуальных проблемах физики высоких энергий и требованиях к новому поколению ускорителей, а приглашенные доклады были заслушаны на двух пленарных заседаниях.

Центральное место на совещании занял доклад о ходе работ по ускорительно-накопительному комплексу ИФВЭ (УНК ИФВЭ), в котором предполагается ускорить  $\sim 6 \times 10^{14}$  прот./имп. до 3 ТэВ и организовать  $pp$ -встречные соударения энергией  $0,4 \times 3$  ТэВ и светимостью  $\sim 10^{32}$  см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$ . Первая ступень комплекса представляет собой синхротрон с железным электромагнитом и предназначена для накопления и предварительного ускорения протонов до 400 ГэВ. Ускорение до конечной энергии будет происходить во второй ступени со сверхпроводящими магнитами. В перспективе намечено организовать  $pp$ -встречные соударения энергией  $2 \times 3$  ТэВ (после сооружения второго сверхпроводящего кольца), а также  $pp$ -встречные соударения с использованием электронного охлаждения: реализация новой схемы антипротонного источника позволит получить скорость накопления  $\sim 5 \cdot 10^7$  антипротонов в секунду и осуществить  $pp$ -встречные соударения с высокой светимостью ( $\sim 3 \cdot 10^{30}$  см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$ ) при энергии взаимодействия  $2 \times 3$  ТэВ (ИФВЭ, ИЯФ СО АН СССР).

Необходимо отметить существенный прогресс в разработке различных систем и создании прототипов сверхпроводящих магнитов УНК ИФВЭ. В частности, сообщалось о результатах исследования однометровых прототипов сверхпроводящих диполей комплекса, в которых получено проектное магнитное поле при хорошей однородности

в апертуре (ИФВЭ). В некоторых сообщениях обсуждались вопросы разработки сверхпроводящих магнитных систем: рассмотрены пути конструирования сверхпроводящих обмоток, высказаны рекомендации по организации циркуляции охлаждающего сверхпроводящего потока гелия. Большой интерес вызвал доклад об эскизном проекте системы криогенного обеспечения УНК ИФВЭ (НПО «Криоген-маш»).

На совещании сообщалось о работах, обеспечивших повышение интенсивности протонного синхротрона ИФВЭ на энергию 76 ГэВ до  $5,3 \cdot 10^{12}$  прот./имп., что более чем в 5 раз превышает проектное значение. Несколько теоретических и экспериментальных работ было посвящено изучению опасных неустойчивостей и методов их подавления. Последнее особенно важно в связи с работами по УНК ИФВЭ и предстоящим вводом в строй бустера на 1,5 ГэВ, что даст возможность увеличить интенсивность синхротрона ИФВЭ — будущего инжектора комплекса — до  $5 \times 10^{13}$  прот./имп. Были заслушаны также доклады о численном моделировании поведения частиц в проектируемых и модифицируемых ускорителях (МИФИ, ФИАН, ИЯФ СО АН СССР), результаты которого, относящиеся как правило к пучкам большой интенсивности, могут найти применение и в других ускорительных центрах.

Ученые ИЯФ СО АН СССР продолжают разработку установок на энергию  $2 \times (100-300)$  ГэВ и светимость соударений  $10^{32}$  см $^{-2} \cdot$ с $^{-1}$  на основе встречных линейных  $e^-e^+$ -пучков (ВЛЭПП). Основные усилия в настоящее время направлены на создание экспериментального модуля с темпом ускорения  $\sim 100$  МэВ/м. В отдельном докладе был рассмотрен способ получения в такой установке встречных пучков с заданным направлением их поляризации (ИЯФ СО АН СССР). Важным достоинством уста-