

им новом детекторе для нейтронно-спектрометрических исследований.

Заключительное заседание было посвящено дискуссии по актуальным вопросам ядерной физики. На нем были заслушаны обзорные доклады академика А. С. Давыдова о некоторых вопросах теории ядра, В. М. Струтинского о нуклонных оболочках и флюктуациях плотности в ядрах и А. Г. Ситенко о дифракционных ядерных процессах. Участники совещания подчеркивали все возрастающую роль нейтронной физики в изучении структуры ядер и механизма ядерных реакций. Совещание подтвердило, что нейтронная физика самым тесным образом связана с практическими вопросами реакторостроения, проблемы гарантий, защиты и т. д. В связи с новыми требованиями на повышенную точность в ядерных данных вопросы понимания механизма взаимодействия нейтронов с ядром и практи-

ка прецизионных измерений ядерных констант начинают составлять две стороны одной проблемы, для решения которой необходимо всестороннее развитие нейтронной физики и особенно дальнейшее улучшение ее методических возможностей. Поскольку координация всех работ является необходимым условием быстрого достижения поставленных практикой целей, участники совещания пришли к мнению о целесообразности периодического проведения подобных совещаний или конференций (с приглашением ученых из других стран). Успеху совещания способствовала большая работа, проведенная сотрудниками ИЯИ АН УССР. Труды совещания, содержащие все оригинальные и обзорные доклады, будут изданы отдельным сборником в начале 1972 г.

С. П. СУХОРУЧКИН

II Международный рабочий симпозиум по технологии термоядерных реакторов

С 28 июня по 2 июля 1971 г. в Ок-Ридже (США) проходил II Международный симпозиум по технологии термоядерных реакторов. В работе симпозиума приняли участие более 150 специалистов. Цель симпозиума — рассмотреть технологические и инженерные проблемы термоядерных реакторов, обсудить возможности современной техники в создании реактора, наметить необходимые разработки и эксперименты в области создания магнитных систем, источников питания, стенок реактора, blankets и пр., оценить экономические возможности и воздействия на окружающую среду термоядерной энергетики.

Работа симпозиума носила неформальный характер, и выступления могли касаться как частных, так и общих вопросов; время выступления колебалось от 5 до 50 мин; обычно на одном заседании выступало 15—25 человек. Издаваться будут не доклады, а краткие резюме.

В качестве наиболее вероятных систем реактора принимались замкнутые системы, открытые ловушки и θ -пинчи. Из замкнутых систем рассматривались токамаки и стеллараторы. Ливерморская группа американских физиков рассмотрела открытую ловушку с прямым преобразованием энергии, а из Лос-Аламоса был представлен проект тороидального θ -пинча («Супер-Сциллак», в котором, по мнению авторов, возможно выполнение критерия Лоусона. Оба эти проекта обсуждались на IV Международной конференции по физике плазмы в Медисоне (США).

Доклады секций «Инженерные проблемы проектирования blankets» и «Нейтронная физика» были в основном посвящены проблемам blankets. Наиболее полно этот вопрос был исследован в работе Д. Митчелла (Калем, Великобритания). Бланкет состоит из трех частей: литий для воспроизводства трития, графит и защита катушек магнитного поля. Каждая часть имеет толщину по радиусу 64, 36 и 60 см соответственно, т. е. общая толщина blankets 1,6 м. Бланкет охватывает катушки продольного магнитного поля, заключенные в общий ребристый каркас. Для защиты катушек от нейтронов используется борированная вода с железом вместо обычного свинца. Докладчик утверждает, что эта замена весьма эффективна. Для съема

тепла применяется жидкий натрий, вопросам перекачки которого в сильном магнитном поле уделено большое внимание.

На секции «Нагрев плазмы и зажигание реакции» обсуждались различные методы нагрева плазмы: омический нагрев, турбулентный нагрев, ВЧ-нагрев, адиабатическое сжатие и ударные волны, нагрев с помощью лазера, электронного пучка и метод создания плазмы с помощью пучков быстрых атомов.

В докладе Г. Милса (Принстон, США) обсуждены возможности нагрева плазмы джоулевым теплом в токамаке при наличии только тормозных потерь энергии из плазмы. Для увеличения эффективности нагрева предлагается после предварительного нагрева током использовать адиабатическое сжатие за счет перемещения плазменного шнура поперечным магнитным полем в область более сильного продольного магнитного поля.

В сообщении Г. Н. Пошкова и В. С. Стрелкова (ИАЭ, СССР) в качестве реактора рассмотрен токамак с учетом тормозных и циклотронных потерь, а также теплопроводности плазмы. Для оценки роли теплопроводности использовались как теоретические данные (неоклассика), так и результаты экстраполяции экспериментальных результатов в область термоядерных параметров.

Свитмен и Томпсон (Калем, Великобритания) обсудили вопросы использования пучков нейтральных частиц для инжекции в прямую ловушку, а также возможность рекуперации энергии частиц в такой системе.

Пост (Ливермор, США) рассказал о новой пробочной ловушке «Бейзбол II» с использованием сверхпроводящих материалов для магнитной системы и пучков нейтральных частиц для создания плазмы. Система для нагрева плазмы в замкнутой ловушке «Ормак» за счет инжекции пучка нейтральных частиц описана в сообщении Моргана (Ок-Ридж, США).

Доклад Ребю (Франция) был посвящен нагреву плазмы до термоядерных температур с помощью лазера.

Райб (Лос-Аламос, США) остановился на вопросах ударного нагрева плазмы в установке «Супер-Сциллак».

В докладе Кристинсена (США) рассмотрены вопросы ВЧ-нагрева плазмы на гибридных частотах до термо-

ядерных температур. Основное внимание уделено возможности расположения ВЧ-витков внутри бланкета, выбору материала для этих витков и их конструкции.

На заседании секции «Поверхностные явления» выступили 16 человек. Доклады были посвящены явлениям на первой стенке термоядерного реактора, возникающим в результате рентгеновского и нейтронного облучений, а также при бомбардировке заряженными и нейтральными частицами. Процессы, происходящие на стенке, будут приводить к ее эрозии и к загрязнению плазмы. Анализ зависимости различных процессов от энергии падающих частиц показывает, что для реактора существенным оказывается физическое распыление. Время жизни стенки из ниобия толщиной 1 см составляет около 5,5 лет при интенсивности нейтронного потока $4 \cdot 10^{15}$ нейтр./см²·сек. При этом в плазму будет поступать поток примесей $\sim 2 \cdot 10^{11}$ частиц/см²·сек.

Доклад Филиппа (Лос-Аламос, США) был посвящен анализу процессов, происходящих на стенке разрядной камеры в экспериментах с плотной плазмой. Исследованы процессы нагрева поверхностного слоя, передачи тепла и возникающих тепловых деформаций. Предлагается конструкция разрядной камеры, выполненной из набора алюминиевых шайб, изолированных Al₂O₃. Снаружи шайбы заключены в трубу из стеклотекстолита. Проведено исследование разрушений обычной фарфоровой и новой камеры.

В заключение председатель секции Каминский (США) указал, что для детальных расчетов эрозии стенки в реакторе необходимо знать абсолютные величины потоков частиц и квантов, попадающих на стенку. Эти сведения должны дать физики, занимающиеся плазмой, а ученым, изучающим поверхностные явления, предстоит разработать рекомендации по выбору материалов и очистке стенок в плазменных установках.

На секции «Инженерные исследования магнитных систем» было заслушано 24 доклада. В обзорном докладе по сверхпроводящим магнитным системам М. С. Лубелл (Ок-Ридж, США) привел параметры новых сверхпроводящих материалов и крупнейших сверхпроводящих магнитов для различных физических исследований. Выпускаемые в настоящее время сверхпроводники Nb₃Sn и V₃Ga имеют большую напряженность критического магнитного поля (225 и 210 кэ) при довольно высокой критической температуре (18,3 и 14,5° К).

В ближайшем будущем ожидается освоение новых сверхпроводящих материалов [например, Nb₃Al и Nb_{3,76}(Al_{0,73}Ge_{0,27})] с еще более высокими параметрами ($H_{кр} = 300 - 400$ кэ при 20° К).

В докладе приведены основные данные действующих и запускаемых в ближайшие месяцы магнитов, в которых в качестве сверхпроводящей проволоки применены NbTi, Nb₃Sn и V₃Ga. В малом объеме (диаметр внутреннего отверстия магнита несколько сантиметров) получены поля до 150 кэ. В больших объемах (магниты диаметром около 5 м для пузырьковых камер ЦЕРНа и Аргоннской лаборатории) ожидается получение полей около 50 кэ. Кроме того, изготовлено много специальных сверхпроводящих магнитных систем для плазменных исследований (мультиполи, «Бейзбол II» и др.), которые создают в больших объемах магнитные поля напряженностью в десятки килоэрсед.

Доклад Ханкока (Калэм, Великобритания) был посвящен технике стабилизации сверхпроводящих соленоидов. Динамическая и адиабатическая стабилизация позволяет на порядок (до $0,5 \cdot 10^5$ а/см²) увеличить

критическую плотность тока. В работе обсуждается вопрос об оптимальном составе проволоки или шины для сверхпроводящих магнитов. На основе этих исследований во второй части доклада рассматривается сверхпроводящая магнитная система реактора-стеллятора со следующими параметрами: большой радиус тора $R = 10$ м, малый $r = 1,75$ м, $H_0 = 50$ кэ, $H_{макс} = 160$ кэ, толщина бланкета 1,5 м, размеры полюса винтовой обмотки $1,25 \times 1,25$ м. Сверхпроводящая магнитная система весит 5000 т (50 т сверхпроводника), причем 1/5 этого количества идет на создание винтовой обмотки.

После обзорных докладов на этой секции были рассмотрены работы, посвященные магнитным системам для физических исследований: магнит для пузырьковых камер (см. выше), для установок «Бейзбол», «IMP», «Bumpy Torus», W-7 и т. п. Все эти и ряд других американских установок (несколько токамаков и т. п.) вошли или войдут в строй в ближайшее время.

В докладе Мёрфи (США) подробно изложены результаты эскизных проработок вакуумной оболочки магнитной системы реактора-токамака. Вакуумная камера представляет собой сооружение высотой около 30 м и диаметром более 50 м. Докладчик рассказал об основных трудностях создания такой системы и возможных способах их устранения.

Ряд докладов был посвящен частным вопросам создания магнитных систем. Так, Фаил (Принстон, США) остановился на вопросе влияния формы тороидального магнита на характер распределения механических напряжений под действием пондеромоторных сил. Было показано, что в тороидальном магните, состоящем из отдельных катушек примерно овальной формы, практически отсутствует напряжение изгиба. Следует отметить, что аналогичная идея высказывалась в Советском Союзе в 1960 г.

Было заслушано также пять докладов по источникам питания импульсных магнитных систем и импульсным сверхпроводящим магнитам. Джеймс (Калэм, Великобритания) составил график роста энергии источников питания по годам, из которого видно, что если к 1970 году средняя величина энергии источника питания равнялась 15 Мдж, то к 1980 г. она возрастет до 100 Мдж.

Лакьюер (Лос-Аламос, США) рассказал о проекте сверхпроводящего накопителя для «Супер-Сциллака».

Доклад Макинтерфа (Брукхейвен, США) посвящен импульсным сверхпроводящим магнитам. В работе приведены теоретические оценки и экспериментальные данные о потерях, возникающих при получении импульсных полей со скоростями нарастания магнитного поля до 5 кэ/сек. Показано, что при металлической и интерметаллической изоляции (AgSn, SnCu) сверхпроводящих волокон потери сравнимы с возникающими при органической изоляции.

В заключение были рассмотрены магнитные системы тороидальных реакторов.

Ота (Япония) рассказывал о расчете оптимальных параметров реактора-токамака с учетом различных физических и технологических ограничений. Оптимальной считалась конструкция реактора, имеющего максимальный выход при заданном большом радиусе тора. Приведен пример оптимизированного реактора токамака с параметрами: $P = 5000$ Мвт, $P_{раб} = 20$ кэв, $\tau = 0,6$ сек, $R = 5,2$ м, $r = 1,1$ м, $H_0 = 80$ кэ.

В упомянутом выше докладе Файла (Принстон, США) представлен проект магнитной системы из сверх-

проводящих материалов реактора-токамака, работающего как на смеси дейтерия и трития, так и на чистом дейтерии. Размеры магнитной системы при этом составляют: большой радиус тора 5 м для ДТ и 10 м для ДД-реактора, малый радиус 1,7 м и 4 м, напряженность магнитного поля в обоих случаях 160 кэ.

Сообщение Лонга (Ок-Ридж, США) было также посвящено проекту магнитной системы реактора-токамака с радиусом 10,5 м. Утверждается, что система с общим вакуумным объемом технически и экономически более выгодна, чем отдельные криостаты для каждой катушки. Найденны значения тепловых потоков в системе, а также рассмотрены вопросы стоимости сверхпроводящих материалов и рефрижераторной установки.

Конструкция обмоток из сверхпроводящих материалов для стелларатора W-7 описана в докладе Вифа (ФРГ). Большой радиус системы 2 м, внутренний радиус катушек 40 см, наружный — 70 см. Обмотки находятся в стадии изготовления.

Последние два доклада этой секции были посвящены исследованию магнитных систем термоядерного реактора-стелларатора.

В докладах Георгиевского (ХФТИ, СССР) и Хьюберта (Франция) показано, что применение для магнитных систем реактора винтовой обмотки торсотронного типа с модулированным по специальному закону углом навивки позволяет существенно упростить магнитную систему реактора-стелларатора. В результате экономические показатели реактора-стелларатора и реактора-токамака оказываются близкими. Кроме того, такой стелларатор имеет ряд преимуществ: позволяет работать в стационарном режиме; применять дивертор, не на-

рушающий конфигурацию магнитного поля; существенно уменьшает пондеромоторные силы, действующие на обмотку, и т. п.

Заключение

1. Симпозиум показал, что проблема создания термоядерного реактора не ограничивается задачами термализации и нагрева плазмы. Имеется широкий круг задач, связанных с разработкой больших магнитных систем и мощных источников питания, явлениями на стенке реактора и радиационной стойкостью материалов, необходимостью защиты сверхпроводящих материалов, воспроизводства трития и схода тепла с реактора. Для решения этих задач потребуется 5—10 лет.

2. За рубежом (в первую очередь в США, а также в ФРГ и Великобритании) проводится широкая программа исследований. Об этом свидетельствует большое число участников (от США более 120 человек, представляющих 11 университетов, 10 исследовательских центров и 8 фирм).

3. На симпозиуме обсуждались результаты предэскизной проработки различных аспектов тороидального реактора (токамака и стелларатора), реакторов на основе тороидального θ -пинча и открытой лопушки.

4. Термоядерный реактор представлялся участникам симпозиума как оптимальный, в смысле воздействия на окружающую среду, экономически приемлемый вариант решения проблем энергетики будущего.

В. С. СТРЕЛКОВ

Инженерные аспекты радиационного охрупчивания материалов реакторных корпусов

10—13 мая 1971 г. в Вене проходило совещание экспертов рабочей группы МАГАТЭ, на котором были заслушаны сообщения или выступления экспертов о влиянии облучения и других факторов, вызывающих охрупчивание корпусных сталей в рабочих условиях; обсуждены предложения представителей членов МАГАТЭ по проведению стандартных исследований «эталонной» марки стали в рамках национальных программ с целью сопоставления результатов и оценки радиационной стойкости различных марок сталей; рассмотрены основные направления материаловедческих исследований, проводимых для обеспечения надежности работы корпусов реакторов в течение всего срока эксплуатации АЭС.

В совещании рабочей группы, проходившем под председательством известного специалиста в области реакторных материалов Р. Николса (Инженерная и материаловедческая лаборатория в Рисли, Англия), приняли участие 17 ученых из Англии, Бельгии, Евратома, Италии, СССР, США, Франции, Швеции, ЧССР, Швейцарии и Японии.

В соответствии с решениями предыдущих совещаний рабочей группе экспертов было поручено подготовить «Стандартную минимальную программу исследования «эталонной» марки стали» для реализации в рамках национальных программ. Предложения по указанной программе были внесены представителями ФРГ, Япо-

нии, ЧССР и СССР. Принятые в качестве основы предложения экспертов СССР и ЧССР исходили из необходимости выполнения некоторого минимума исследований и использования уже существующих методик. Стандартная минимальная программа предусматривает исследование стали А533 (0,25% С, 1—1,5% Мп, 0,7—1% Ni, 0,5% Мо), поставляемой США всем странам-участникам без какой-либо оплаты, согласно соглашению с МАГАТЭ. При этом указываются: место отбора образцов из стального блока; нейтронная доза и температура облучения образцов; типы испытываемых образцов и определяемые свойства и желательный срок выполнения исследования.

Применительно к материалам корпусов реакторов существуют общие проблемы, в решении которых заинтересованы страны, строящие и эксплуатирующие реакторы корпусного типа. По мнению экспертов, к ним относятся:

1. Радиационное охрупчивание и влияющие на него факторы (структура и состав стали, методы контроля охрупчивания, практические и теоретические аспекты устранения радиационных повреждений термообработкой).

2. Влияние комплексного воздействия условий работы на свойства материалов корпуса (деформационное и тепловое старение в сочетании с действием облучения, поведение высокопрочных сталей и проблемы,