

ные для каждой зоны реактора, позволяют перейти к программам FGS, DGV, где пространственное описание реактора более детально. В программе FGS до 150 зон в xy - или rz -геометрии. По программе DGV расчет ведется в двумерной геометрии по гексагональной сетке с учетом выгорания полиномами, коэффициенты которых зависят от энерговыделения. Время счета по всем программам 1—3 мин (БЭСМ-6).

В докладе А. А. Шкурпелева и других был представлен быстродействующий алгоритм для эксплуатационных расчетов физических характеристик активной зоны реактора РБМК. Отмечается, что эксплуатация предъявляет особые требования к моделям реактора, в частности требуется большая точность расчета неравномерности нейтронных полей. Разработанный алгоритм позволяет в 2—3 раза ускорить расчеты по сравнению с известной программой ВОРК—СОBS. Затрачиваемое время 6—8 мин на ЭВМ ЕС-1033.

Представляет интерес также описанная в докладе В. И. Будникова и С. В. Косолапова математическая модель динамики АЭС с реактором РБМК при различных схемах контура циркуляции и настройке систем регулирования АЭС. Модель включает уравнения кинетики реактора, тепло- и массопереноса, барабана-сепаратора и т. п. Реализована модель в виде программы для ЭВМ. Для расчета 1 с переходного процесса требуется 20 мин на ЭВМ М-222. Модель позволяет учитывать влияние на динамику реактора интесификаторов теплообмена,

замены электронасосов турбонасосами и т. п. Зависимости динамических ограничений, полученные на данной модели, могут быть использованы в технико-экономических оптимизационных моделях реакторов.

Как показало обсуждение, при разработке моделей следует учитывать опыт проектирования. Отмечено также, что полезен обмен блоками моделей. Во многих выступлениях подчеркивалась разница между проектными и эксплуатационными моделями. Значение последних непрерывно растет. Нужны системы моделей, которые следили бы за состоянием реактора как за динамической системой, постоянно изменяющейся при эксплуатации. При этом надо учитывать обратные связи.

На семинаре отмечено, что уже созданы разнообразные математические модели реакторов. Наступает время, когда необходимо унифицировать расчетные методики, исходные данные и требования к ним. Необходимо обратить особое внимание на вопросы безопасности и устойчивости, а оптимизацию проводить на возможно более ранних стадиях проектирования. Работы в области математического моделирования реакторов еще очень много.

Семинар прошел достаточно успешно, позволил установить личные контакты между исследователями, обменяться новыми идеями и подходами в области математического моделирования реакторов.

Сборник докладов семинара будет опубликован в СЭИ СО АН СССР.

СМИРНОВ В. Г.

Третья сессия Международной рабочей группы по ИНТОРУ

16—27 июня 1980 г. в Вене состоялась третья сессия Международной рабочей группы (МРГ) по ИНТОРУ на стадии определения и эскизного проектирования. Работа группы проходила в рамках той структуры, которая была определена на второй (мартовской) сессии 1980 г.: Руководящий комитет, Координационный совет, рабочие группы.

Координационный совет на своих заседаниях рассмотрел следующие вопросы: безопасные условия работы, нормы проектирования, основные параметры ИНТОРа, физические характеристики реактора. Обсуждение первых двух вопросов проходило на основе материалов, представленных каждой делегацией, следующих двух — на основе материалов предыдущих сессий и результатов дискуссий, проходивших в рабочих группах данной сессии. Результаты работы делегаций до июньской сессии систематизированы по всем вопросам, согласована таблица основных параметров ИНТОРа, выбраны и зафиксированы физические характеристики реактора и составлен физический сценарий его работы. Материалы, выданные Координационным советом, после их обсуждения в Руководящем комитете и на пленарном заседании служат основой для эскизного проектирования реактора. Таким образом, данная сессия завершила работу по определению параметров реактора и констатировала переход к следующей стадии — эскизному проектированию.

Итоговые материалы Координационного совета основаны на результатах работы отдельных рабочих групп и обсуждений на совместном заседании нескольких групп.

Группа физики. Как и на второй (мартовской) сессии 1980 г., детально обсуждались основные вопросы физических основ проекта: конфигурация катушек полоидального магнитного поля, диверторы, требования к величине гофрировки магнитного поля и управлению горением реакции, неустойчивость срыва тока, физический сценарий работы реактора. Отмечается, что при изменении давления плазмы от нуля до оптимального значения (это характерно для фазы нагрева плазмы и выхода на режим

зажигания) можно контролировать положение и форму поперечного сечения плазменного шнура с помощью полоидальных обмоток, расположенных снаружи тороидальных катушек. При этом энергия полоидального магнитного поля составляет около 7 ГДж. Существенных различий в потребляемой мощности в случае диверторной конфигурации с одним и двумя нулями нет.

При рассмотрении физики дивертора особое внимание было уделено сравнению полоидального дивертора с одним и двумя нулями. Оценка преимуществ и недостатков этих диверторов позволила отдать небольшое предпочтение полоидальному дивертору с двумя нулями. Рассмотрены три возможных режима работы реактора: режим с малой плотностью дейтерий-тритиевого газа на периферии плазмы, режим с большим напуском газа между сепаратрисой и стенкой камеры и режим с большим излучением примесей с периферии плазмы. Все три режима были рекомендованы другим группам для предварительного рассмотрения возможности их осуществления. В результате обсуждений инженерная группа высказалась за вариант полоидального дивертора с одним нулем, а группа нейтроники отдала предпочтение первому варианту работы реактора. Вариант для эскизного проектирования был выбран координаторами после обсуждения этого вопроса на пленарном заседании рабочей группы. Этот вариант не является самосогласованным, а представляет собой набор наиболее трудно осуществимых параметров из рассмотренных трех вариантов.

Достаточно детально обсуждались методы контроля горения термоядерной реакции в ИНТОРе и возможные потери быстрых ионов и α -частиц при увеличении гофрировки тороидального магнитного поля.

Большое внимание было уделено экспериментальной информации о неустойчивости срыва тока на работающих токамаках. Обнаружено различие в величине времени спада тока и выделения энергии из плазмы, с одной стороны, на установках Т-10, «Алкатор», «Пульсатор», «Дива» и, с другой — на ПЛГ, для которой все значения времени

примерно в 10 раз меньше. Для ИНТОРа рекомендовано рассмотреть возможность срывов с вероятностью 10^{-2} на первой стадии и 10^{-3} на второй и третьей стадиях работы реактора. Время выделения энергии принято равным ~ 20 мс, время спада тока — более 20 мс.

По предложению координаторов группа физики представила детальный физический сценарий работы реактора, включая стадию подъема тока разряда и нагрева плазмы до зажигания, горение реакции, стадию ее гашения и выключение тока разряда. По всем обсуждавшимся вопросам было составлено домашнее задание, которое должно быть подготовлено к следующей сессии МРГ.

Группа инженерии. Представлены материалы по следующим разделам: общая компоновка ИНТОРа, инженерные испытания, коэффициент технического использования, монтаж и обслуживание. Объем и содержание материала свидетельствуют о большой работе, проделанной каждой стороной.

По ряду технических проблем представители различных национальных групп имеют общую согласованную точку зрения на предлагаемые решения. Расхождения имеются по вопросам компоновки дивертора и диверторных пластин, размещения испытательных модулей, компоновки катушек поперечного поля. Решено продолжить более детальную разработку, чтобы к следующей сессии разрешить эти расхождения. Для четвертой сессии составлен список технических проблем, требующих детальной проработки, и определено «домашнее» задание: проекты катушек тороидального и поперечного полей, бланкет с тритиевым бриддингом, электромагнитные процессы в структуре, стабилизация сверхпроводящих катушек против импульсных возмущений, электромеханические проблемы первой стенки, транспортировка активированных материалов, проект дивертора, проект первой стенки и небланкетной части.

Предложена и обсуждена стратегия разработки эскизного проекта ИНТОРа, общая идея которой состоит в следующем: должны одновременно разрабатываться как отдельные компоненты реактора, так и общий вид, чтобы решить вопросы взаимодействия различных систем, механических конструкций и определить методы монтажно-демонтажных операций и обслуживания ИНТОРа в различных условиях. Национальные проекты должны быть выполнены на основе общих технических решений к январю 1981 г. В дальнейшем, к апрелю 1981 г., потребуются лишь доработка для сведения их в единый эскизный проект ИНТОРа.

В качестве основы для создания норм проектирования ИНТОРа Руководящий комитет принял существующий американский код ASME.

Группа нейтронки. Рассмотрены детали конфигурации первой стенки, лимитеров и диверторных пластин. При проектировании первой стенки анализировались конструкционные материалы — нержавеющая сталь и алюминий, которые позволяют создать конструкцию, работающую в нормальных условиях при потоках тепла на стенку $9-30$ Вт/см². Наиболее угрожающим режимом для первой стенки является срыв плазмы, при котором в течение 20 мс выбрасывается энергия $200-600$ Дж/см². В предельном случае скорость испарения материала стенки становится недопустимой для стали. Возможное решение этой проблемы — либо в создании режима с более равномерным выбросом энергии при срыве плазмы, либо в использовании специальных защитных экранов (напри-

мер, из графита). Отмечено, что примерно на 10% поверхности первой стенки вблизи диверторного канала потоки частиц возрастают до 10^{17} см⁻²·с⁻¹. Это вызывает значительные трудности при создании работоспособной конструкции.

При разработке диверторных пластин было предложено несколько конструкций. Потоки тепла и частиц на диверторные пластины составляют ~ 500 Вт/см² и 10^{18} см⁻²·с⁻¹ соответственно. Время работы пластин может составлять от одного месяца до одного года. Этот срок может быть увеличен, если будет разработана надежная технология дистанционного восстановления покрытий.

Обсужден вопрос о необходимости воспроизводства трития в бланкете экспериментального реактора ИНТОРа. Экономические оценки показывают, что выгода при введении такого бланкета может быть значительна. Рассматривались решения для двух литийсодержащих материалов — твердых (типа Li₂O, Li₄SiO₄) и жидких (Li, Li₁₇Pb₈₃). В обоих случаях при использовании полной поверхности тороидальной камеры для оптимизированных вариантов можно получить коэффициент воспроизводства трития 1,25—1,55. При реальном проектировании с учетом той части поверхности, которая занята диверторными каналами, вводами инжекторов и экспериментальными устройствами, можно надеяться на суммарный коэффициент воспроизводства 0,8—1. Принято решение на следующих этапах проектировать такой бланкет.

Обсуждена программа экспериментов и испытания соответствующих экспериментальных устройств на ИНТОРе. Она состоит из трех частей: испытания поведения материалов под облучением в специальных каналах или более крупных модулях; испытание элементов конструкций в модулях размером $1-4$ м² по поверхности тороидальной камеры; испытания крупномасштабных конструкций бланкета и защиты размером $20-30$ м². Материаловедческие испытания предусматривают облучение образцов до флюенса $\sim 10^{23}$ нейтр/см² в жестком спектре термоядерных нейтронов при скоростях образования газов (гелия и водорода) в интервале $(1 \div 5) \times 10^{-3}$ 1/атом. Эти условия позволяют сделать обоснованный выбор конструкционных материалов для будущих термоядерных реакторов.

Элементы конструкций предполагается испытывать в течение 3—6 мес. На первых стадиях работы ИНТОРа планируется провести около 30 испытаний различных конструкций, что позволит выбрать две-три полноразмерные конструкции бланкета для испытаний на последней стадии работы, которая должна продолжаться несколько лет и доказать надежность работы элементов энергетического термоядерного реактора.

Рассмотрен ряд вопросов безопасности работы реактора. Даны рекомендации по уточнению норм и допустимых величин выбросов радиоактивности и проведен предварительный анализ возможных путей развития аварий и мер по их ликвидации. Подробный анализ будет проведен на следующей стадии проектирования.

Таким образом, завершена стадия определения параметров ИНТОРа и выдано техническое задание для эскизного проектирования. Общее состояние разработок свидетельствует, что принципиальные конструктивные решения основных узлов либо найдены, либо будут найдены в ближайшее время. Проведение следующей сессии планируется на октябрь 1980 г.

ПШТУНОВИЧ В. И., ШАТАЛОВ Г. Е.