

широкого исследования (от каждой из участвующих сторон в составлении Отчета приняли участие около ста человек). Указаны исследования и разработки, которые требуется выполнить в обоснование проекта термоядерного реактора. Этот материал должен помочь в составлении целевых программ по этой проблеме.

В шестой главе Отчета приведены предварительные оценки стоимости, времени сооружения и людских ресурсов. Согласно этим оценкам реактор ИНТОР мог бы быть спроектирован, сооружен и введен в эксплуатацию за 10—11 лет, т. е. примерно в 1990 г.

Обсуждался вопрос о продолжении деятельности МРГ и о новых шагах в направлении ее развития. Была высказана общая точка зрения, что в следующей фазе дефиниции и эскизного проектирования, которая может продолжаться до середины 1981 г., еще нет необходимости в дополнительных решениях на уровне правительства. Работу можно было бы продолжить на основе национальных программ. Вместе с тем уже со следующего года необходимо выработать законодательную основу для ИНТОРа, для чего следует создать подгруппу МСТС по выработке правового статуса ИНТОРа.

КАДОМЦЕВ Б. Б., ПИСТУНОВИЧ В. И.

Совещание технической группы экспертов МАГАТЭ по примесям в токамаке (источники, влияние, контроль)

В совещании, состоявшемся 8—12 октября 1979 г. в Алуште, приняли участие 35 представителей советских и зарубежных научных центров, занятых исследованиями по программе УТС. Цель совещания — подвести итог сегодняшним представлениям о поведении примесей в плазме, источниках их поступления и способах защиты плазмы от примесей. Было сделано 28 сообщений.

Поведение примесей в плазме нельзя понять, не предположив аномальной диффузии плазмы порядка $(2 \div 4) \times 10^3 \text{ см}^2/\text{с}$. Такая диффузия объясняет быстрое проникновение многозарядных ионов в центр и их сравнительно малое время жизни. Распределение примесей по сечению шнура обнаруживает на ряде установок максимум вблизи оси, на других — плоское распределение. Это явление необходимо исследовать в дальнейшем. Одной из причин уплощения распределения примесей может быть неустойчивость внутреннего срыва, как было показано на установке «Пульсатор».

В сообщениях В. Абрамова (СССР) и Д. Поста (США) обсуждался эффект увеличения излучательных потерь вследствие перезарядки многозарядных примесных ионов на атомах водорода. Этот эффект может быть важен при нагреве плазмы пучками быстрых атомов. В сообщении А. Гибсона (Великобритания) дан анализ возможных излучательных потерь установки JET с учетом результатов, полученных на установке PLT, показавший чрезмерно высокие потери. Не исключено, что придется отказаться от идеи самоподдерживающейся реакции ($nT = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$) в пользу двухкомпонентного токамака. Для этого необходимо поднять энергию инжектируемых атомов до 160 кэВ. На установке TFR исследовалось излучение примесей в режиме циклотронного ионного нагрева. Интенсивность излучения по линиям железа, никеля и хрома увеличивалась по крайней мере в два раза, что намного больше, чем в опытах с инжекцией быстрых атомов. Это может стать препятствием на пути ВЧ-нагрева.

Контроль уровня и состава примесей может проводиться либо активно с помощью магнитных диверторов, либо пассивно путем выбора материала и конструкции диафрагмы, а также специальной подготовкой стенки. Опыт работы полоидального дивертора установки DIVA и тороидальной установки DITE показывает, что дивертор может быть эффективным инструментом защиты плазмы токамака от примесей. В частности, в сообщении К. Охаза (Япония) отмечено, что если в токамак DIVA инжектировать алюминий в режиме работы без дивертора, то в центр шнура проникает ~20% инжектированного вещества, при включенном диверторе — только 5%. Если же инжектировать алюминий в диверторную камеру, то в центр шнура попадает только 0,3%. Включение дивертора на установке DITE в обычных условиях снижает уровень излучательных потерь плазмы в 3—4 раза.

Важным параметром, характеризующим работу дивертора, является поперечный перенос плазмы в диверторном

слое. В установке DIVA соответствующий диффузионный коэффициент составляет 0,1 от бомовского, в установке DITE ~1. Возможно, это следствие того, что магнитные возмущения, вносимые тороидальным дивертором, несколько выше, чем при полоидальном. Скорость течения плазмы в дивертор вдоль магнитного поля составляет 0,2 — 0,5 от скорости ионного звука.

Обсуждались различные диверторы для ИНТОРа: полоидальный, предложенный Д. Мидом (США), тороидальный, предложенный А. Попядухиным (СССР), а также близкий по схеме дивертор группы английских авторов. Во всех проектах отмечалось, что размеры плазменного шнура ИНТОРа недостаточно велики относительно размеров радиационной защиты, поэтому в диверторных витках необходимо пропускать непропорционально большие токи или (в случае тороидального дивертора) допускать на оси шнура локальное понижение поля до 15%.

В 1980 г. в США и ФРГ вступят в строй большие токамаки с диверторами PDX, ASDEX. Они должны обладать мощной инжекцией быстрых атомов (6 и 2 МВт), позволяющей им работать в диапазоне термоядерных температур. Опыт работы этих установок станет решающим при проектировании дивертора для реактора УТС.

В настоящий момент еще не ясно, насколько велики механические нагрузки в конструкциях предложенных диверторов, а также целесообразны ли они экономически, поэтому параллельно предложены различного рода диафрагмы, частично выполняющие диверторные функции. Так, Н. Оябу (Япония) предложил с помощью внешних полоидальных витков, подобных диверторным, растянуть границу плазменного шнура и тем самым вывести ряд граничных силовых линий на стенку, которая станет играть роль распределенной диафрагмы. Таким образом, предполагается снизить удельное энерговыделение на ее поверхности. Токи в витках оказываются при этом несколько ниже, чем в случае полоидального дивертора. Расчеты предполагается проверить экспериментально на установке DOUBLET III. По сообщению Л. Орнстайна (Нидерланды), в кольцевой установке RINGBOOG II удалось смоделировать излучательный бланкет реактора УТС. Водородная плазма с плотностью $n_e = 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, электронной температурой $T_e = 10 \text{ эВ}$ и малой примесью кислорода (~0,1—1%) излучала на стенку ~1 МВт/м².

Предложение автора настоящей статьи сводилось к тому, чтобы изменить в качестве диафрагмы поток графитовых или металлических шариков, пересекающих край шнура. Это позволило бы упростить энергосъем с диафрагмы, рекуперацию трития, замену диафрагмы. Кроме того, поток отдельных шариков должен затруднять развитие униполярных дуг.

Широко известно, что титановое покрытие стенок разрядной камеры токамака позволяет существенно снизить содержание примесей в плазме. Известно также, что с помощью графитовых диафрагм можно уменьшить уровень

загрязнений в энергонапряженных режимах токамака. Были представлены результаты, полученные на установке DIVA в режиме работы с покрытием стенок тонким (~1 мк) слоем графита, осаждавшимся либо из газовой фазы (разряды в метане), либо путем распыления графитовой диафрагмы. В последнем случае слой графита был очень рыхлым. Устойчивый разряд был получен только при одновременном включении дивертора. Параметры разряда мало отличались от полученных в условиях титанового распыления. Сделан вывод о перспективности таких методов защиты стенок.

Другой возможный способ защиты стенок — покрытие их слоем кислорода. В работе Х. Верникеля (ФРГ) и др. методом резонансной флюоресценции исследовалось распыление нержавеющей стали, покрытой слоем окислов, оказавшееся в 15 раз слабее, чем у непокрытого образца. Очистка происходит под действием бомбардировки поверхности водородом, дейтерием и гелием в количествах соот-

ветственно 10^{18} , $4 \cdot 10^{17}$ и $1 \cdot 10^{17}$ атомов. Таким образом при интенсивности бомбардирующего потока $\sim 10^{15}$ см⁻²с⁻¹ защитного слоя хватило бы на импульсы длительностью 100—500 с. Подобный вариант защиты предстоит испытать в будущем.

Итак, за последние 5 лет достигнут серьезный прогресс на пути получения чистой плазмы в токамаках с помощью новых методов очистки стенок, титанового распыления и применения графитовых диафрагм. Дальнейшее увеличение энергонапряженности и длительности разрядов заставит искать новые методы борьбы с примесями. Самый перспективный из них — применение магнитных диверторов, хотя возможны и альтернативные методы. Одна из ближайших задач заключается в исследовании поведения плазмы и примесей в условиях длительных рабочих импульсов (10—30 с). Первой установкой, на которой предполагаются такие исследования, будет JET.

МИРНОВ С. В.

Вторая Международная конференция по импульсным энергосистемам

Конференция проходила 12—14 июня 1979 г. в Лаббоке (США). Она была организована электроинженерным факультетом Техасского технологического университета и Южным отделением IEEE. Участвовали 270 представителей многих стран и организаций. Каждый день работы конференции начинался пленарным заседанием, на котором заслушивались три доклада (по 30 мин); затем продолжалась на трех одновременно работающих секциях. На пленарных заседаниях с докладами выступили советские представители: Г. А. Месяц («Мегавольтные наносекундные коммутаторы») и А. М. Пасечников («Ускорительный модуль установки «Ангара-5»).

На пленарных заседаниях были представлены обзоры по различным направлениям термоядерного синтеза с инерциальным удержанием. Г. Кэванан (Министерство энергетики США) рассмотрел состояние работ и планы по программе стеклянных лазеров (установки «Шива» и «Нова»). Программа, рассчитанная на пять лет, предполагает переход от экспериментов с субтераваттным уровнем мощности к созданию устройств, способных подводить к мишени мощность до 100 ТВт. Предусматривается возможность применения не только стеклянных и CO₂-лазеров, но и более коротковолновых лазеров, а также пучков электронов, легких и тяжелых ионов. Успехи в основном будут направлены на создание систем однократного действия, так как их стоимость значительно ниже. Однако по мере развития программы внимание будет уделяться также узлам и подсистемам периодического действия. Исходные источники энергии — конденсаторные батареи (отмечалась тенденция к снижению стоимости конденсаторов), а для «Нова» — инерционные накопители с генераторами компрессионного типа, способные генерировать мощные импульсы длительностью около 500 мкс, необходимые для системы накачки. О возможности применения индуктивных накопителей ни в выступлениях, ни в вопросах вообще не упоминалось.

Т. Мартин (Сандия, США) изложил программу создания энергетического реактора на основе системы с мощными электронными пучками. В 1981 г. должна быть запущена установка EBFA I с 36 модулями напряжением 2 МВ, током 15 МА и энергией в пучке 1 МДж при длительности импульса 35 нс, а в 1984 г. — установка EBFA II с такими же 72 модулями. В установке EBFA I 36 генераторов Маркса помещаются в заполненном трансформаторным маслом (объем масла 1,9·10⁶ л). Генератор Маркса разряжается на водяную линию. Энергия передается к мишени по вакуумной линии с магнитной изоляцией длиной 6,8 м. Плотность потока мощности на мишень

в 1982 г. составит 10¹³ Вт/см² (EBFA I), а к 1985 г. достигнет 0,5·10¹⁵ Вт/см² (EBFA II).

Развитие исследований в Сандиевской лаборатории по передаче энергии в вакууме, повышению плотности энергии в модуле, увеличению импульсной прочности изоляции позволит в относительно недорогих установках превзойти мощность 100 ТВт. В частности, говорилось о возможности поднять мощность до 400 ТВт при полной энергии пучка 16 МДж.

Дж. Дженсен (Лос-Аламос, США) доложил о проекте «Антарес» — CO₂-лазерной установке с энергией 100 кДж и плотностью потока мощности 3·10¹⁶ Вт/см². Ее сооружение начато в 1979 г. Представлен обзор по системам с инерциальным удержанием. Отмечено, что результаты исследований по синтезу с инерциальным удержанием могут быть использованы в военных разработках. Об этом сказал и представитель Министерства обороны США.

Таким образом, к 1982—1984 гг. на всех крупных установках мощность на мишени достигнет 100—300 ТВт. Они явятся прототипами реакторов. После сравнения и анализа результатов будет выбрано наиболее перспективное направление, и в 1987 г. планируется создать инженерный опытный реактор, в 1995—1997 гг. — инженерный прототип реактора, а в 2004 г. — демонстрационный.

Доклады на секциях в основном были посвящены узлам и элементам таких установок. В большей части докладов рассматривались коммутационная аппаратура, главным образом, разрядники (эрозийная стойкость электродов, снижение разброса времени срабатывания, уменьшение индуктивности канала разряда, согласование импедансов разрядника и передающей линии и т. п.). Хорошие результаты получены при поджиге разрядников лазером с помощью волоконной оптики, причем задержка регулируется длиной оптического канала.

В докладе группы сотрудников Научно-исследовательской лаборатории военно-морского флота обсуждалась возможность получения мощных сверхточных разрядных импульсов с помощью индуктивного накопителя, который заряжается гомополярным генератором и разряжается по трансформаторной схеме. Ток вторичной цепи 0,5 МА переключается на нагрузку при напряжении 0,5 МВ. Первичная обмотка предварительно отключается от генератора и нагружается на защитное сопротивление. Эффективность передачи энергии в цепь вторичной обмотки зависит от напряжения, которое выдерживает отключатель источника зарядки. В другом докладе тех же авторов сообщается о мощном генераторе мегавольтных импульсов «Грайдент». Коаксиальный индуктивный накопитель с индуктивностью 3,5 мкГн заряжается током 500 кА от конденсаторной ба-