

Второе совещание МАГАТЭ по большим токамакам

В работе совещания, состоявшегося 26 ноября — 1 декабря 1976 г. в Принстоне (США), участвовали 100 специалистов из США, Франции, Италии, Англии, Японии, ФРГ, Голландии, Швеции и СССР. Участники совещания заслушали доклады об установках TFTR, JT-60, JET, T-20, T-10M, а также ознакомились с работами по управляемому термоядерному синтезу в PPL и ходом сооружения установок PDX и TFTR.

Общая характеристика проектов. После дубненского совещания (июнь 1975 г.) в идеологии зарубежных проектов больших токамаков не произошло существенных изменений. Основные физические и технические параметры установок, за исключением T-20, остались практически прежними. В связи с реконструкцией T-10 и созданием на базе ее T-10M со сверхпроводящими магнитными катушками и мощной системой нагрева T-20 освобождена от решения части физических задач. Ввиду этого возрастает значение дейтерий-тритиевого эксперимента, получения предельных нейтронных потоков на первой стенке, отработки различных инженерных и технологических проблем термоядерного реактора. В отличие от зарубежных проектов, в развитии которых за последние годы сделан значительный шаг в изучении практической реализации проектов, при проектировании T-20 более подробно рассматривались новые задачи, такие как бланкет и усиление радиационной защиты, отдельные технические и физические параметры.

Зарубежные проекты представляют интерес с точки зрения детальных расчетов развития первой стадии разряда в плазме, инженерных и расчетных методик конструирования различных систем, конкретного решения задач монтажа и демонтажа, разработки систем питания. Во всех проектах предусматривается начальный накопительный режим индуктора с последующим перемангничиванием сердечника. Предлагаются комбинированные варианты систем питания от сети и машинных генераторов.

Программы по инжекторам объединяет общий подход к решению инженерно-конструкторских вопросов на основе уже имеющегося опыта работы. Энергия частиц и мощность, вводимая в плазму потоками быстрых нейтральных частиц, выбираются следующим образом: JET — 80/160 кэВ, 25 МВт; TFTR — 120 и 20; JT-60 — 65 и 15—20; T-20 — 80/160 и 50.

Конструкция разрядных камер и тритиевых систем не претерпела больших изменений.

Установка JET (Евратом). Существенные результаты достигнуты в анализе полоидальных полей, и на основании расчетов проведена коррекция параметров обмоток с учетом эффекта магнитопровода и насыщения центрального сердечника. Рассчитана стоимость как отдельных элементов системы питания (двух типов), так и всей системы с учетом эксплуатационных затрат.

Рассматривается вариант покрытия внутренней поверхности вакуумной камеры материалом с малым Z, например графитом. Предложен новый порядок операций на установке. Суть его сводится к тому, что на начальной стадии формирования плазменного шнура, в процессе его расширения, включается мощная инжекция нейтральных частиц сравнительно низкой энергии. Так как подобные пучки частиц захватываются на периферии плазменного шнура, камера равномерно заполняется горячей плазмой. Затем начинается инжекция нейтральных частиц высокой энергии для

дальнейшего нагрева. При этом предполагается, что температура на периферии 10—50 эВ. Данный вывод базируется на новых расчетах излучения атомов железа в плазме.

Отдельный доклад был посвящен активации аппаратуры и конструктивных элементов под действием нейтронного излучения. В нем изложена методика расчета и приведена карта уровней активности в различных частях установки.

Количество трития, используемого установкой за один импульс, определяется парциальным давлением изотопов водорода в вакуумной камере от 10^{-5} до 10^{-3} мм рт. ст. Для осуществления в конечной стадии экспериментов 100 разрядов на смеси дейтерия с тритием предусматривается иметь общее количество трития до 10^6 Ки (для покрытия возможных потерь).

Проект установки закончен. На его разработку израсходовано около 13 млн. долл. Сооружение всего комплекса оценивается в 250 млн. долл. Место строительства еще не определено.

Установка TFTR (США). В отличие от других проектов, где магнитное поле осталось без изменения, здесь изыскивается возможность его увеличения с 5,2 до 6—7 Т. В 1975 г. были уточнены конструкция катушек на 5,2 Т, их технология, проведены расчеты тепловых и механических нагрузок. Это позволило вплотную подойти к их промышленному изготовлению.

Оборудование установки предполагается питать от двух ударных генераторов с суммарным запасом энергии 4500 МДж и мощностью 475 МВА. При этом потребляемая от сети мощность не превысит 40—50 МВт. Решено использовать ударные низкооборотные генераторы вертикального исполнения. В машинном зале предусмотрено место для третьего генератора с соответствующим оборудованием, что даст возможность в будущем повысить надежность системы питания и расширить ее возможности.

В результате сопоставления противоположных требований сопротивление по обходу камеры выбрано равным 3,4 мОм. На основе детального прочностного анализа выбран силфон U-образной формы, формируемый гидравлическим способом. Роль диафрагм выполняют два подвижных вольфрамовых рельса, ограничивающие плазменный шнур по вертикали, и вольфрамовые пластины, расположенные на внутренней стороне лайнера.

Предполагается предварительный прогрев камеры до 500 °С и возможность тренировки частыми разрядами небольшой мощности. Для защиты от проникновения трития тонкие силфоны закрываются снаружи дополнительными вакуумными объемами с электроизоляцией. Общее количество трития предусматривается ограничить $5 \cdot 10^4$ Ки.

Для дополнительного нагрева плазмы предполагается установить четыре инжектора, резервируется место еще для двух. Система питания мощностью 100 МВт рассчитывается на подключение шести инжекторов с КПД, равным 28%, и длительностью импульса инжекции 0,5 с.

Проект TFTR закончен, изготовлена модель 1/6 части установки в натуральную величину. Выбрано место сооружения — Принстон. Физический пуск намечен на 1981 г.

Установка JT-60 (Япония). Это единственный проект, в котором полностью отказались от использования

Основные характеристики больших токамаков

Параметр	JET	TFTR	JT-60	T-20
Большой радиус, м	2,96	2,48	3	5
Малый радиус, м	1,25	0,85	0,95	1,61
Ток плазмы, МА	3,1—4,8	2,5 (1,0) *	2,7	5
Запас устойчивости на краю плазмы	6	3,0 (7,5)	2,5	2,3
Температура ионов, кэВ	5	12,4 (6)	5—10	7—10
Плотность ионов, см ⁻³	5·10 ¹³	11·10 ¹³ (8·10 ¹³)	(2—10) 10 ¹³	(5—10) 10 ¹³
Энергетическое время жизни τ_E , с	1	0,2	0,2—1,0	2
Произведение nT_E , см ⁻³ ·с	5·10 ¹³	2,2·10 ¹³ (1,6·10 ¹³)	(2—6) 10 ¹³	10 ¹⁴
Число D-T-нейтронов за импульс	10 ²⁰	10 ¹⁸	Нет	10 ²⁰ —10 ²¹
Сечение плазменного шнура	Эллиптическое	Круглое	Сплюснутое с наружным осе- симметричным дивергатором	Круглое
Форма катушек]	D-образные	Круглые	Круглые	D-образные
Тип магнитопровода	Железный	Воздушный	Воздушный	Железный

* В скобках указан другой вариант работы.

железа и решились на внутреннее расположение катушек полоидального поля. Авторы считают, что такая конструкция дает возможность многократно собирать и разбирать установку.

Для тороидальных катушек выбран проводник из бескислородной меди. Добавка 0,2% серебра на внутренних по радиусу участках повышает предел упругости на 40%. Такой проводник имеет остаточное удлинение 0,2% при хорошей электропроводности. Заключается изготовление полномасштабной модели, необходимой для выбора производственной технологии. Определена геометрия разрядной камеры, выполнены расчетные, экспериментальные и технологические работы, позволяющие приступить к рабочему проектированию. В отличие от других проектов вакуумная камера имеет одну стенку и состоит из восьми сифонных и восьми жестких секций с яйцеобразным поперечным сечением.

Нагрев плазмы осуществляется 16 инжекторами: по восемь для инжекции сверху и снизу под углом плюс и минус 35° соответственно. Откачка произво-

дится криопанелями, охлаждаемыми жидким гелием, со скоростью 10⁷ л/с.

Технико-экономическое обоснование проекта закончено. Стоимость установки определена в 320 млн. долл. Место строительства не определено, однако предпочтение отдается Токио. Физический пуск ожидается в 1980 г.

Проектные параметры установок приведены в таблице.

На совещании также были заслушаны и обсуждены два проекта крупных сверхпроводящих токамаков — советского T-10M и французского «Torus II» с весьма близкими параметрами ($R \sim 1,7$ м, $r \sim 0,65$ м, $H \sim 3$ Т, $I_{пл} \sim 1,5$ МА). Последний предполагается соорудить в Кадараше.

На одной из секций обсуждались три различных проекта TNS (следующих поколений установок после TFTR). В них также предполагается использовать сверхпроводящие катушки с полной тепловой изоляцией.

ГОЛУБЧИКОВ Л. Г.