

Еще один вопрос, который был затронут на конференции,— ремонтоспособность и связанные с этим радиоэкологические проблемы при выработке АЭС проектного срока службы и ресурса работы оборудования.

Сделанный обзор касается только части докладов и сообщений, посвященных новым или наиболее контрастным аспектам сложной и многогранной экологической проблемы ядерной энергетики. Наблюдавшееся несогласие и несовпадение точек зрения является, несомненно,

отражением сложности энергоэкологических проблем и говорит о необходимости дальнейшего углубленного их изучения. Нужны и эксперименты, и эколого-математическое моделирование, и эколого-экономическая методология расчета эффектов взаимодействия энергетических объектов с природной средой. По этому поводу на конференции было принято соответствующее решение.

КОРЯКИН Ю. И.

Советско-итальянский семинар по эксплуатации больших токамаков

Семинар состоялся во второй половине сентября 1980 г. во Фраскати (Италия). На нем было обсуждено 7 советских и 10 итальянских докладов, касающихся основных вопросов физики плазмы токамака: процессы переноса, скейлинги для энергетического времени жизни; поведение примесей и диверторы; методы нагрева плазмы инжекцией пучков быстрых атомов, вводом ВЧ-мощности и адиабатическим сжатием; проекты токамаков, рассчитанных на получение плазмы с термоядерными параметрами; результаты работ по созданию сверхпроводящих катушек большого диаметра и с высоким магнитным полем; диагностические методы исследования плазмы.

В Италии экспериментальные исследования по изучению тороидальных плазменных конфигураций ведутся на токамаках FT и FT-U во Фраскати, Thot в Миланском университете ($R = 52$ см, $a = 17$ см, $B = 1$ Тл, $I = 40$ кА) и установке ЕТА-Бета II — тороидальном пинче с обратным полем ($R = 65$ см, $a = 12,5$ см, $I = 300$ кА) в Падуанском университете. Последняя отличается от токамака малым тороидальным магнитным полем и большим током плазмы.

Программой предусмотрено изучение плазмы большой плотности ($n \geq 10^{14}$ см⁻³) в токамаках с умеренно сильным действующий FT и планируемый FT-U) или сильным магнитным полем (планируемый IGNITOR в Миланском университете). Параметры разрабатываемых установок приведены в таблице. Там же для сравнения указаны характеристики установки ZEPHYR (ФРГ), в разработке которой участвуют итальянские специалисты.

В ближайших 10 лет планируется получить плазму с термоядерными параметрами и достичь условий зажигания; исследовать устойчивость горения при удержании плазмы в течение нескольких секунд; изучить вопросы, связанные с α -частицами, которые рождаются в термоядерных реакциях. Создание FT-U или IGNITOR позволило бы в той или иной степени решить эти проблемы.

На FT заканчивается монтаж системы для нагрева плазмы на нижнем гибридном резонансе. Предполагается, что на первом этапе экспериментов мощность ВЧ-нагрева составит 0,5 МВт, затем повысится до 1 МВт. В FT-U мощность достигнет 8 МВт, в IGNITOR планируется вначале нагреть плазму адиабатическим сжатием, затем α -частицами, получающимися в результате термоядерных реакций.

Работы по созданию сверхпроводящих магнитных катушек ведутся в двух направлениях: создание сверхпроводящих материалов и конструкций кабелей с высокой плотностью тока в сильном магнитном поле и исследование конструкций и разработка сверхпроводящих магнитных систем большого размера. В разработке технологии производства кабеля на основе сверхпроводника А-15 (Nb₃Al), пригодного для изготовления магнитов с сильным полем, участвуют промышленные предприятия. Теоретическое значение критического поля для этого сверхпроводника 32 Тл. В настоящее время используется сверхпроводник в виде кабеля, состоящего из многожиль-

ных проводников (400 жил), которые навиты на медную трубку квадратного сечения 14,6 × 14,6 мм с отверстием 8 × 8 мм для протока жидкого гелия.

Итальянские специалисты совместно со швейцарскими и голландскими создают магнит наружным диаметром 2

Основные характеристики токамаков

Параметр	FT	FT-U	IGNITOR	ZEPHYR
Магнитное поле, Тл	8	8	10—15	6—9
Радиус плазмы, см:				
большой	83	90	91—70	203—135
малый	18,5	30	32—28	61—50
Ток плазмы, МА	0,6	1,6	4,2	3,7
Запас устойчивости:				
на оси шнура	—	1	0,8	1
на границе шнура	—	—	2	2,4
Начальная температура на оси, кэВ:				
электронов	1,3	1,6	3,9	2,2
ионов	1	1,6	3,9	2,2
Начальная средняя электронная температура, кэВ	—	0,8	2,6	1,5
Время жизни, с	—	0,07	0,15	0,15
Средняя плотность плазмы, 10 ¹⁴ см ⁻³	4,5	4,5	10,7	3,9
Мощность джоулева нагрева, МВт	—	0,94	2,4	2,5
Мощность дополнительного нагрева, МВт	—	4	—	10
Средняя электронная температура, кэВ	—	3,4	—	6,1
Температура электронов на оси, кэВ	—	6,8	—	9
Температура ионов на оси, кэВ	—	9,2	4	13,6
Мощность α -частиц, МВт	—	—	0,17	5,3
β , %	—	1,1	0,5	1,3
Энергетическое время жизни, с	0,04	0,16	0,3	0,4
$n\tau_E$, 10 ¹³ см ⁻³ ·с	0,15	0,7	2,94	1,4
Коэффициент сжатия по большому радиусу	—	—	1,43	1,5

Примечание: Для установок IGNITOR и ZEPHYR приведены по два значения магнитного поля, большого и малого радиуса плазмы — для начального состояния и после адиабатического сжатия.

и длиной 1,5 м. Расчетное поле на оси соленоида будет 7,6 Тл при диаметре внутреннего отверстия 1,3 м. На втором этапе этой работы предполагается изготовить внутреннюю часть с отверстием диаметром 50 см и полем на оси 12 Тл.

Следует отметить широкие международные научные связи итальянских лабораторий, в которых проводятся

работы по магнитному удержанию плазмы в тороидальных системах, с научными лабораториями других стран.

Итальянские специалисты высоко оценивают научные результаты, полученные на советских токамаках.

БРЕВОВ Н. Н.

XIV Европейская конференция по взаимодействию лазерного излучения с веществом

Конференция, состоявшаяся 15—19 сентября 1980 г. в пригороде Парижа Пализо, была посвящена обсуждению исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС). В ее работе участвовали около 150 специалистов, представляющих ведущие научно-исследовательские лаборатории европейских стран, Канады, США и Японии, в которых активно работают над проблемой инициирования термоядерного синтеза лазерным излучением. На пленарных заседаниях было заслушано 88 докладов о результатах оригинальных исследований, выполненных за время, прошедшее после проведения предыдущей конференции. В нескольких обзорных докладах сообщались планы и программы лабораторий и обсуждались перспективы развития по основным направлениям, определяющим возможность осуществления в ближайшие 3—5 лет демонстрационного эксперимента по термоядерному синтезу в системах с инерционным удержанием плазмы.

В настоящее время есть достаточно веские основания полагать, что достижение положительного энергетического выхода по отношению к вкладываемой в термоядерную мишень энергии будет возможно на установках, генерирующих импульсы лазерного излучения энергией 100—300 кДж и длительностью несколько наносекунд. Две установки такого класса сооружаются в США: «Шива-Нова», представляющая собой многоканальный лазер на неодимовом стекле (Ливерморская лаборатория им. Лоуренса), и CO_2 -лазер «Антарес» (Лос-Аламосская научная лаборатория). Финансирование строительства «Шивы-Новой» полностью обеспечено, введение в эксплуатацию первой очереди, рассчитанной на получение энергии 100 кДж в импульсе наносекундной длительности, планируется на 1984—1985 гг. В Лос-Аламосской лаборатории принято решение об ускоренном сооружении двух модулей «Антареса» с тем, чтобы уже в 1983—1984 гг. начать эксперименты (ранее предполагалось создание шести-модульной установки, каждый модуль которой обеспечивает пучок энергией ~ 20 кДж). Планы других лабораторий ограничиваются CO_2 -лазерами и лазерами на неодимовом стекле, работающими в диапазоне энергии, не превышающем ~ 10 кДж. На конференции сообщалось о двух установках такого класса, сооружаемых в ФИАНе — это лазерные системы на неодимовом стекле «Дельфин» и УМИ-35.

В качестве оптимальных мишеней для лазерных систем следующего поколения в диапазоне энергии 0,1—4 МДж рассматривались сферические мишени с двумя оболочками-поршнями, в которых наряду с внешней сжимающей оболочкой сравнительно большого диаметра (~ 1 мм), покрытой веществом с малым атомным номером (аблянтон), имеется капсула небольшого размера из материала с большим атомным номером и D — T-топливом. Пространство между оболочками заполнено D — T-смесью малой плотности. Проводятся численные оптимизационные расчеты для уточнения размера и конструкции мишеней такого типа с учетом сегодняшнего понимания физических процессов и явлений, протекающих при поглощении лазерного излучения в плазменной короне, сжатии и термоядерном поджиге. Предотвращение нагревания термоядерного топлива быстрыми электронами на ранних стадиях сжатия,

достижение высокого гидродинамического КПД и устойчивости сжатия, обеспечение термоядерного зажигания в центральной капсуле с последующим нагревом основной массы сжимаемой D — T-смеси за счет поглощения энергии α -частиц — продуктов реакции — вот те проблемы, решение которых позволяет свести к минимуму требуемую для осуществления демонстрационного эксперимента энергию лазерного импульса. При этом, естественно, налагаются более жесткие требования на качество изготовления мишеней. Следует, как показывают расчеты, остановиться на разумном компромиссе, выбирая мишени, создание которых допускает современный уровень техники, и не слишком увеличивая необходимую энергию лазерного излучения.

Интенсивно продолжаются экспериментальные исследования сжатия стеклянных микробаллончиков-мишеней, заполненных газообразной D — T-смесью, под воздействием лазерного излучения на действующих установках в США (фирма КМС, Ливерморская и Лос-Аламосская лаборатории, Рочестерский университет), СССР (ФИАН им. П. Н. Лебедева), Франции (Научно-исследовательский центр в Лиме), Великобритании (Резерфордская лаборатория) и Японии (университет в Осаке). В большинстве представленных на конференции работ сообщались результаты изучения процесса сжатия в абляционном режиме. Переход от малообещающего режима, известного под названием «режим взрывающейся оболочки-поршня», со значительным предварительным прогревом D — T-топлива и невысоким гидродинамическим КПД к абляционному сжатию осуществлялся увеличением до 5—15 мкм толщины слоя полиэтилена или другого пластикового материала на поверхности стеклянных баллончиков (их диаметр варьировался в различных опытах от 50 до 200 мкм). Одновременно повышается длительность лазерных импульсов (от 100—200 пс до 0,5—1,5 нс) и давление D — T-смеси. В результате оказалось возможным достижение плотности D — T-смеси $\sim 2\text{--}5$ г/см³ в 10—20 раз больше плотности в жидком состоянии при сравнительно скромной энергии лазерного импульса ~ 100 Дж. Рекордные параметры получены на «Шиве», где максимальная зарегистрированная плотность достигала 30—40 г/см³. В экспериментах энергия падающего на мишень излучения составляла ~ 4 кДж, поглощаемая энергия не превышала 700—800 Дж. Однако вследствие увеличения массы мишеней энергии лазерного излучения было недостаточно для эффективного нагревания сжатого топлива, и ионная температура, а следовательно, и нейтронный выход оказывались существенно ниже, чем в режиме взрывающейся оболочки-поршня. На «Шиве», например, температура снизилась с 6—7 до 0,5 кэВ, нейтронный выход уменьшился с $\sim 10^{10}$ до $10^6\text{--}10^7$ нейтронов.

Во многих лабораториях начаты эксперименты и получены предварительные результаты облучения сферических мишеней лазерными пучками с короткой длиной волны (как правило, соответствующей второй, третьей и четвертой гармоникам рабочей частоты излучения неодимового лазера). На конференции обсуждались теоретические работы и численные расчеты, показывавшие преимущества использования в ЛТС коротковолнового излучения. Крат-