

Советско-американский симпозиум по гибридным термоядерным реакторам

На 3-м симпозиуме, состоявшемся в январе 1979 г. в Принстоне (США), были представлены результаты научно-исследовательских работ, проводимых в более чем 15 научных лабораториях и промышленных фирмах США. Советские работы были представлены докладами в основном сотрудников ИАЭ им. И. В. Курчатова, ИВТАНа, ВНИИМа.

Исследования возможностей использования гибридных термоядерных реакторов в энергетике будущего проводятся в СССР и США в течение последнего десятилетия. Успехи, достигнутые в области управляемого термоядерного синтеза, в частности на токамаках, позволяют рассчитывать на создание в ближайшее время демонстрационных термоядерных установок с уровнем мощности, характерным для энергетических станций. В будущем чистые термоядерные станции могут войти в энергетику, обеспечив решение важных задач защиты окружающей среды и др. В более близкой перспективе, однако, оказывается выгодным использовать энергию термоядерного синтеза в качестве источника нейтронов, при захвате которых в blankets реактора, содержащем сырьевые ядерные материалы (уран-238, торий), нарабатываются делящиеся изотопы. Полученный плутоний или уран-233 после переработки твэлов (или без нее) может быть применен для подпитки ядерных реакторов. Включение гибридных термоядерных реакторов в энергетику является одним из путей решения топливной проблемы ядерной энергетики, которая по большинству прогнозов остро встанет в начале следующего века.

На симпозиуме были рассмотрены проекты гибридных реакторов, базирующихся на различных концепциях термоядерных установок с магнитным и инерционным удержанием плазмы. В настоящее время наиболее хорошо разработаны реакторы на основе токамаков. Проекты этих реакторов были представлены с американской стороны Принстонской лабораторией и фирмой «Вестингауз», а также некоторыми другими лабораториями. В отличие от научных разработок предыдущих лет проекты содержат детальные технические решения по таким принципиальным вопросам конструкции реактора токамака, как дивертер, разобный blanket и др. Особенно интересным является проект демонстрационного гибридного реактора токамака мощностью 1—1,5 ГВт (тепл.), предназначенного для выработки 300—400 МВт (эл.) мощности и наработки 250—400 кг/год урана-233 или плутония. Принятые технические решения (размещение blankets во внешней части установки, канальная конструкция ТВС, водяное охлаждение, внешнее размещение обмоток пологодального поля и др.) базируются на современной технологии и позволяют создать установку с большими экспериментальными возможностями. По предположениям авторов, такая установка может быть создана в начале 90-х годов.

Симпозиум отразил заметный интерес к линейным системам с магнитным удержанием плазмы. Причиной является их более удобная геометрия, что важно при реалистическом инженерном рассмотрении. В первую очередь это относится к реакторам на основе открытых ловушек с двойными пробками, работы по которым с американской стороны были представлены Ливерморской лабораторией им. Лоуренса, фирмами «Дженерал атомик», «Дженерал электрик», «Бечтел» и др., с советской — ИАЭ им. И. В. Курчатова и ИВТАНа.

Использование таких систем в качестве основы гибридного термоядерного реактора с плазменным коэффициентом усиления 1—2 представляется весьма перспективным. Системы могут работать при инъекции нейтронов энергией 200 кэВ. Существенным для характеристик таких систем является использование прямого преобразования энергии плазмы, утекающей через крайние ловушки, с коэффициентом полезного действия 0,7—0,8. Общий коэффициент преобразования тепла в электричество (нетто) может достигать 0,25—0,3 при сохранении производства ядерного топлива 600—1000 кг/ГВт (тепл.) год. Преимущество открытых ловушек с двойными пробками состоит в их линейной геометрии, позволяющей относительно легко решить вопросы разборки и эксплуатации реактора, в возможности достижения непрерывного режима работы и в требовании относительно малого магнитного поля в основной энергетической части ловушки. В Ливерморской лаборатории сооружена экспериментальная установка такого типа. Работы по открытым ловушкам планируются расширить в 1979—1980 гг.

Характеристики импульсных гибридных термоядерных реакторов с инерционным удержанием плазмы рассматривались в работах Лос-Аламосской научной лаборатории, университета штата Висконсин, фирмы «Бечтел» и ИАЭ им. И. В. Курчатова и ИВТАНа. Обсуждались системы с поджигом мишени лазером и пучком релятивистских электронов. В докладах высказывались достаточно оптимистические взгляды на возможность создания таких систем, однако степень их проработки гораздо ниже, чем систем с магнитным удержанием плазмы. Все системы требуют либо коэффициента усиления плазмы 100—1000, либо значительного усиления энергии в blankets за счет приближения его к критичности. Наиболее существенными остаются проблемы циклических термических напряжений в первой стенке и твэлах при числе циклов 10^7 — 10^8 , для систем с релятивистскими электронными пучками — транспортировка пучка. В то же время экономические оценки показывают, что системы с инерционным удержанием могут быть не менее выгодны, чем с магнитным удержанием плазмы.

Существенное внимание на симпозиуме было уделено рассмотрению топливных циклов (уран-плутониевого, ториевого) и возможностей обогащения твэлов из естественного или отвального урана в blankets гибридного реактора. Проведенный с учетом инженерных соображений анализ показывает, что один гибридный термоядерный реактор может обеспечить подпитку 4—6 реакторов типа ВВЭР той же мощности при использовании уран-плутониевого цикла и 5—10 — ториевого цикла. Однако при ториевом цикле требуются большие удельные нагрузки на первую стенку камеры, поэтому этот цикл имеет лучшую перспективу для использования в blankets импульсных гибридных реакторов, где размеры камеры прямо не связаны с термоядерным источником. Для реакторов типа токамака получение удельных нагрузок 4—5 МВт/м² все еще является сомнительным при приемлемой полной мощности установки 5—7 ГВт (тепл.).

Интересны разработки симбиозных систем, в которых твэлы, изготовленные из естественного или обедненного урана или тория, обогащаются делящимся

изотопом при облучении в бланкете гибридного реактора и помещают затем в ядерный реактор без дополнительной переработки и рефабрикации. В принципе такой цикл может быть повторен несколько раз. В этом случае один гибридный реактор может подпитывать примерно два ядерных реактора типа ВВЭР, но стоимость электричества, вырабатываемого такой системой, увеличивается. Превысят ли эти экономические соображения выгоды, получаемые за счет отсутствия переработки и рефабрикации твэлов в такой системе, покажут дальнейшие исследования.

На симпозиуме рассматривались также вопросы, связанные с исследованиями и конструкторскими разработками гибридных термоядерных реакторов. Среди них можно отметить следующие.

В области исследования принципиальных систем синтеза обсуждался реактор токамак, работающий на D — D-плазме, поддерживаемой мощной инжекцией. Плазменный коэффициент усиления такого реактора невелик (>1), и он может рассматриваться в основном как реактор для производства делящихся изотопов. В этой области его преимущества в связи с отсутствием необходимости воспроизводства трития очевидны. Один такой реактор мог бы подпитывать 20—25 реакторов типа ВВЭР аналогичной мощности. Однако для таких выводов необходимо более детальное инженерное рассмотрение.

Большое внимание уделялось поиску материалов, способных выдержать без разрушения полный срок (20—30 лет) работы реактора. Наряду с широко рассматриваемыми аустенитными сталями во многих про-

ектах предпочтение отдавалось ферритным из-за их малого распухания и достаточной пластичности при флюенсе $\sim 10^{23}$ нейтр./см².

Большая дискуссия состоялась о возможности проведения экспериментальных исследований на модулях бланкета в таких строящихся и проектируемых в настоящее время термоядерных установках, как TFTR (Принстон), «Шива-Нова» (Ливермор), T-20 (СССР). Представлены проекты таких модулей. Особенно интересны предложения о проведении работ на установке TFTR, которые могут быть выполнены в 1983—1984 гг. Высказывались пожелания о международном сотрудничестве при проведении таких испытаний.

Симпозиум показал, что объем работ по гибридным термоядерным реакторам в СССР и США неуклонно возрастает. Почти все промышленные фирмы США, занимающиеся производством ядерных реакторов, имеют сейчас группы, проектирующие гибридные термоядерные реакторы. Проведение регулярных симпозиумов по данной тематике позволяет оценивать сдвиги в разработке проблемы. В 1978 г. основной упор был сделан на инженерную проработку реакторов и детальную проработку демонстрационных гибридных реакторов, начало технического проектирования которых предполагается в ближайшие годы. Вопросы принципиальных возможностей гибридных реакторов в решении топливной проблемы ядерной энергетики, и ранее представлявшиеся доказанными, получили существенное инженерное подтверждение.

ШАТАЛОВ Г. Е.

XII Европейская конференция по взаимодействию лазерного излучения с веществом

Конференция, состоявшаяся в Москве в декабре 1978 г., была организована ФИАНом, ГКАЭ СССР и Всесоюзным обществом «Знание». В ней участвовали около 300 специалистов, в том числе более 50 ученых из Австралии, Бельгии, Великобритании, ГДР, Канады, Польши, США, Франции и Японии. Открыл конференцию академик Н. Г. Басов, с приветственным словом к участникам обратился вице-президент Академии наук СССР академик Е. П. Велихов.

На конференции были представлены доклады о последних достижениях различных лабораторий мира по следующим основным направлениям: мощные лазерные системы для УТС и программы работ; взаимодействие мощного лазерного излучения с веществом; лазерное сжатие и термоядерный синтез; диагностика лазерной плазмы.

Несколько докладов было представлено Ливерморской лабораторией им. Лоуренса (США), располагающей самой мощной на сегодня лазерной системой «Шива», которая позволяет проводить опыты при мощности до 30 ТВт в импульсе длительностью 1 нс на длине волны 1,06 мкм. Сообщалось, что нейтронный выход достигал $3 \cdot 10^{10}$, ионная температура — 6 кэВ. Дж. Мак-Колл из Лос-Аламосской научной лаборатории (США) рассказал о результатах, полученных на 8-лучевой CO₂-лазерной установке «Гелиос». В экспериментах, проведенных при мощности ~ 10 ТВт, продемонстрирован нейтронный выход $\sim 2 \cdot 10^8$. М. Лубин

из Рочестерского университета США сообщил об экспериментах на 6-лучевой установке «Зета» на неодимовом стекле. При мощности 3—4 ТВт наблюдался нейтронный выход $\sim 3 \cdot 10^8$. В Рочестере разработана и строится 24-лучевая лазерная система «Омега» на 16 ТВт, особенностью которой является использование в оконечных каскадах усиления активных зеркал вместо традиционных дисковых усилителей.

О широкой программе исследований по лазерному УТС рассказали польские ученые из варшавского Института физики плазмы и лазерного микросинтеза. В Институте введена в строй 4-лучевая установка на неодимовом стекле энергией в импульсе 4×50 Дж, ведется подготовка к экспериментам по сжатию сферических мишеней на этой установке. Здесь же разрабатывается CO₂-лазерная система с расчетным энергетическим выходом $4 \times 1,6$ кДж. Опробованы основные узлы установки, проведены эксперименты по сжатию D — T-смеси в конических мишенях при энергии импульса CO₂-лазера 200 Дж и длительности 100 нс. Нейтроны зарегистрировать не удалось. Завершено создание CO₂-лазера энергией 1,2 кДж для дополнительного нагрева плазмы в системах типа «плазменный фокус».

Японские ученые рассказали о получении нейтронного выхода $\sim 10^7$ на установке «Гекко IV» мощностью 4×1 ТВт на длине волны 1,06 мкм при длительности импульса 100 нс. В Осакамском университете завершается наладка 2-лучевой CO₂-лазерной системы «Лекко II»,