

ленность населения Земли определяется существующими темпами его роста. Поэтому полученные данные пригодны только для сравнения циклов или внутри них, но не могут использоваться как абсолютные величины.

Показано, что полная коллективная ожидаемая доза от радиоактивных отходов, образующихся на стадии переработки руд, определяется их полным диспергированием в течение ~ 1000 лет и переходом наиболее критического элемента ^{226}Ra сначала в поверхностные воды, а затем в океан. Для оценки миграции радиоактивных нуклидов из геологических хранилищ отверженных отходов было принято допущение, что эти радионуклиды достигнут поверхности земли через 10^6 — 10^8 лет и затем будут перенесены поверхностными водами в океан. (Это допущение также основано на известных экспериментальных данных о подвижности нуклидов в грунтовых водах, сорбции их породами и скорости движения вод.)

Полученные результаты показывают, что в рассмотренных ЯТЦ вклад естественных радионуклидов в полную коллективную ожидаемую дозу будет того же порядка величины, что и вклад техногенных радионуклидов, поступающих из отверженных отходов, находящихся в геологических хранилищах. Однако в любом случае вклад, вносимый отходами топливных циклов, составит лишь несколько процентов полной коллективной ожидаемой дозы, которую население Земли получит от природных фоновых источников.

Проведена сравнительная оценка стоимости обращения с отходами ЯТЦ. Технико-экономические расчеты осуществлялись на основе ряда допущений, позволяющих проводить относительные сопоставления между циклами, но ограничивающих количественные заключения. Все расчеты отнесены к выработке электроэнергии, равной 50 ГВт·год; экстраполяция на меньшие величины (например, 10 ГВт·год) повысит стоимость обращения с отходами на ~ 10 —25%.

Стоимость обращения с отходами и их захоронения составляет лишь несколько процентов стоимости вырабатываемой электроэнергии. Различия в стоимости предложенных топливных циклов незначительны и не могут рассматриваться как фактор, определяющий выбор того или иного цикла. Основные расходы на обращение с отходами во всех циклах уменьшаются при захоронении в геологические хранилища в солях и гранитах (стоимость захоронения в гранитах несколько выше, чем в солях).

VIII Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

Исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) проводятся в настоящее время в десятках стран и наиболее интенсивно в США, СССР, странах Евратома и Японии. Главные усилия сосредоточены в наиболее развитом направлении токамаков. Здесь наряду с осуществлением национальных программ исследований разрабатываются международные проекты. Страны Евратома сооружают в Калеме (Великобритания) объединенный европейский токамак JET. Под эгидой МАГАТЭ разрабатывается проект ИНТОР — международного демонстрационного токамака-реактора. Успехи, достигнутые на токамаках, повысили интерес мировой общественности к проблемам УТС.

Как бы увертюрой к VIII Международной конференции по физике плазмы и УТС (1—10 июля 1980 г., Брюссель) стало специальное заседание, состоявшееся 30 июня, где были представлены четыре доклада о работе Международной рабочей группы по физико-техническому обоснованию и инженерным проблемам ИНТОР.

Тщательные исследования были проведены при оценке пригодности различных видов отходов для использования делящихся материалов в немирных целях (с точки зрения возможности диверсий). Для этого все отходы подразделили на следующие категории:

Отходы, содержащие обедненный уран. Возможность их немирного использования проблематична, поскольку необходимы выделение и обогащение урана или же его облучение с последующей переработкой.

Отвержденные отходы, содержащие плутоний. Они потребуют разработки новых, сложных и трудоемких технологий выделения из матрицы диспергированного плутония.

Отработавшее топливо (рассматривается в ряде циклов как отходы), содержащее весь уран и плутоний. Только вначале отработавшее топливо в силу своей высокой активности будет представлять определенные затруднения для переработки, но с течением времени доступность этого вида отходов возрастет. По этой причине отработавшее топливо должно входить в систему гарантий.

Таким образом, открытые топливные циклы уязвимы еще в одном отношении: они небезопасны с точки зрения нераспространения ядерного оружия. Все это свидетельствует о преимуществе замкнутых топливных циклов перед открытыми.

Рабочая группа рассмотрела юридические и организационные аспекты обращения с отходами. Особое внимание уделено организации и размещению геологических хранилищ. Они подразделены на три вида: национальные, мультинациональные и интернациональные хранилища. Признано целесообразным строительство последних двух видов геологических хранилищ как с позиций нераспространения ядерного оружия, так и с экономической точки зрения.

Основное и наиболее важное заключение, к которому пришли специалисты, сводится к утверждению, что применяемая в рассмотренных ЯТЦ технология обращения с радиоактивными отходами, включая их последующее захоронение, обладает высокой степенью надежности, безопасности и не представляет риска для населения и окружающей среды. Иными словами, специалисты многих стран мира подтвердили, что ядерная энергетика может полноценно развиваться наряду с другими принятыми способами получения энергии.

КУЗНЕЦОВ Ю. В., АГЕЕНКОВ А. Т., РАКОВ Н. А.

Открытие конференции состоялось в присутствии короля Бельгии Бодуэна I. С лекцией, посвященной памяти Л. А. Арцимовича, выступил руководитель исследований по УТС Евратома проф. Д. Палумбо, отметивший выдающуюся роль советского ученого в развитии международного сотрудничества в исследованиях по УТС и призвавший к дальнейшему укреплению этого сотрудничества.

В докладах по токамакам описан большой объем исследований, проведенных как на хорошо известных установках PLT, T-10, T-11, ISX-B, DITE и др., так и на вновь введенных в действие крупных установках ASDEX в Гархинге (ФРГ) и PDX в Принстоне (США). В этих установках плазменный шнур примерно такого же размера, как в PLT, T-10, но катушки тороидального магнитного поля имеют гораздо больший объем, вмещающий в себя диверторные устройства.

На многих установках с дополнительными, кроме омического, средствами нагрева плазмы устойчиво получают довольно высокие значения параметра $\beta = 8\pi p/B^2$.

На оси локальное значение β в установках TOSCA, JFT-2, ISX-B, T-11 составляет 6—9%. Среднее по объему β в некоторых установках достигает 2,5%, что лишь в два с небольшим раза меньше необходимого для реактора. Полученные значения близки или даже несколько превышают теоретический предел, но какого-либо ухудшения удержания не отмечается. Максимальная температура ионов около 7 кэВ при концентрации плазмы $3 \cdot 10^{13}$ см⁻³ получена на PLT (США) с помощью инжекции пучков быстрых атомов. Коэффициент теплопроводности ионов, находящихся при этих параметрах далеко в «бесстолкновительной» области, лишь в 2—4 раза превышает неокласическое значение.

Важные результаты дали исследования роли полоидального дивертора. Ранее опыты с полоидальным дивертором проводились лишь на небольших установках DIVA в Японии и T-12 в СССР. Выводы, полученные на этих установках в отношении экранирующей роли дивертора и распределения потока энергии из плазмы на стенку камеры, теперь подтверждены и детализированы в результате опытов на крупных установках ASDEX, PDX, DOUBLETIII с достаточно долгоживущей плазмой. Показано, что сочетание дивертора, эффективно экранирующего тяжелые примеси, и гетерирования стенок вакуумной камеры позволяет получить устойчивые чистые разряды (с эффективным зарядом ионов $Z_{эф} \approx 1$) с низким значением запаса устойчивости $q(a) \approx 2$. Следует отметить, что наиболее низкие значения $q \approx 2$ в устойчивых режимах достигнуты пока на установке T-10 (СССР), не имеющей дивертора.

Очень существенным для перспективы токамака было наблюдение на установке DITE (Великобритания) значительного снижения напряжения обхода в плазменном шнуре во время инжекции пучка быстрых атомов. Это свидетельствует о генерации пучком электрического тока и подтверждает идею Т. Окавы о возможности поддержания тока в токамаке путем инжекции быстрых атомов. В связи с этим следует отметить теоретический доклад Я. И. Колесниченко и др. (СССР), в котором показано, что в реактирующей D — T-смеси поддержание тока возможно и за счет естественных потерь продуктов термоядерной реакции — α -частиц. Все это открывает интересные возможности осуществления стационарного токамака.

Главной проблемой в теории токамаков остается объяснение неустойчивости срыва и аномальных потерь энергии по электронному каналу. В части докладов продолжает развиваться идея о срыве как следствии нелинейного взаимодействия двух винтовых мод возмущений. В этой связи обращает на себя внимание новым подходом работа Сайкса и Вессона. В ней срыв интерпретируется как результат отсутствия в некоторой области параметров равновесия деформированного шнура. В трех докладах (СССР и США) приведены выводы новых формул для коэффициента электронной теплопроводности турбулентной плазмы. Развивается теория дрейфовых неустойчивостей плазмы в торе. Несколько докладов было посвящено численному моделированию процессов в плазме и на ее границе, а также проблеме очистки плазмы от примесей.

Сделано сообщение об очень важном шаге в развитии стеллараторной программы. На установке «Вандельштейн УПА» (ФРГ) путем снижения во времени тока омического нагрева при одновременной инжекции быстрых атомов и повышении тока в винтовых (стеллараторных) витках удалось вывести стелларатор в бестоковый режим с достаточно высокой температурой плазмы ($T_e > 350$ эВ, $T_i > 500$ эВ) и сравнительно высоким β (около 0,5%). Без тока заметно возросло энергетическое время жизни, хотя в настоящее время оно определяется радиационными потерями.

Определенный шаг сделан и в развитии тороидальных пинчей с обращенным тороидальным магнитным полем. На недавно введенной в строй установке ЕТА-ВЕТА в Падуе (Италия) с металлической камерой и, следовательно, улучшенными по сравнению с прежними установ-

ками вакуумными условиями удалось превзойти радиационный порог по энергии плазмы и достичь $T = \sim 100$ эВ.

Проведены эксперименты по запертию открытых магнитных ловушек амбиполярными барьерами (установка ТМХ в Ливерморе, «Федрус» в Медисоне) и ВЧ-полем. На установке ТМХ при плотности и температуре плазмы в центральной ловушке $n = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $T_i = 350$ эВ время удержания плазмы возрастает в 9 раз при заполнении концевых запирающих ловушек плазмой с параметрами $n = 4 \cdot 10^{13}$ см⁻³, $T_i = 10$ кэВ, $T_e = 260$ эВ. Эффект запертия ВЧ-полем получен на установке RFC XX в Нагое (улучшение в 4 раза). Одновременно развивается теория тандемных ловушек. Рассчитаны ограничения на параметр β из-за неустойчивости баллонных мод (Д. Д. Рюгов, Г. В. Ступаков), проведен расчет «теплового барьера», позволяющего существенно снизить отношение плотностей в запирающих барьерах и основном соленоиде тандемной ловушки (Д. В. Балдин и др.).

В последнее время под влиянием работ Р. Х. Куртмулаева с сотрудниками (ИАЭ им. Ч. В. Курчатова) получили значительное развитие компактные торы без стабилизирующего тороидального поля или при его наличии. Если это поле заморожено внутрь тора (аналог стабилизированного пинча), то подобная конфигурация называется сферомаком. К компактным торам подвели и исследования по удержанию плазмы высокого давления в открытых ловушках (конфигурации с обращенным магнитным полем). Компактные торы по своей геометрии — это предельные торы без «дырки». Для них не требуется тороидальных систем (катушек тороидального магнитного поля, тороидальной камеры). Значение β в таких системах близко к единице, и это открывает перспективу осуществления практически «чистой» термоядерной реакции на смеси D — T. Не без существенного выхода нейтронов. Компактным торам было посвящено целое заседание.

Докладывались итоги теоретических и экспериментальных исследований, выполненных в университетах США, в Лос-Аламосской и Ливерморской лабораториях, в Нагое и других лабораториях. Главное внимание сейчас уделяется созданию сферомака и конфигураций с обращенным полем. Проведено численное моделирование сложного процесса создания конфигурации сферомака. Наблюдена предсказанная теоретиками неустойчивость перекоса вытянутых сферомаков в цилиндрическом кожухе и увеличения времени их жизни при использовании кожуха, в котором сферомак имеет форму скажого эллипсоида. В Ливерморе проведены первые опыты по созданию с помощью коаксиального инжектора конфигураций с обращенным полем для открытых ловушек. Экспериментальные результаты по созданию компактного тора в Ливерморе хорошо моделируются на ЭВМ. Однако «хвост» холодной плазмы мешает отрыву конфигурации от инжектора путем перезамыкания магнитных силовых линий и для отрыва требуется отклонять холодную плазму с помощью специальной пластины — «разделителя». Выполнен ряд теоретических исследований неустойчивостей системы и методов борьбы с ними (с учетом конечности ларморовского радиуса, профилирования формы конфигурации и т. п.). Общее состояние работ по компактным торам не позволяет еще сделать вывод об их перспективности.

Доклады о плазменном фокусе были представлены от СССР, ФРГ, Италии, Японии, Румынии. В них описано исследование динамики разряда и механизма образования нейтронов. В настоящее время четко установлено наличие двух групп дейтронов, инициирующих ядерные реакции, — относительно мягкие с энергией до сотен килоэлектрон-вольт и жесткие с энергией до 1,5 МэВ. Образование последних связывается с динамической диссипацией магнитного поля при разрыве внешней токовой оболочки. В некоторых экспериментах плазменный фокус используется как мишень для лазерного облучения. Это позволило в несколько раз повысить нейтронный выход (СССР), обнаружить эффект резонансного поглощения на верхней гибридной частоте (Япония).

Обнадеживающие опыты по обжатию термоизолированной магнитным полем плазмы алюминиевым лайнером (цилиндр высотой и диаметром 60 и толщиной стенок 1 мм) выполнены в Лос-Аламосе. При разрядке на лайнер батареи Сциллака достигнута скорость, близкая к необходимой (около 10^6 см/с); наблюдался нагрев плазмы до десятков электронвольт.

В исследованиях инерционного термоядерного синтеза, основанного на обжатии микроскопического количества D—T-смеси сферической оболочкой, к которой за десятки пикосекунд должна быть подведена энергия во много килоджоулей, происходит поиск наиболее приемлемых путей дальнейшего развития. Цель представленных докладов по лазерному инициированию обжатия — переоценка параметров лазеров, необходимых для осуществления УТС, углубленное изучение физики взаимодействия лазерного излучения с веществом. На самой крупной установке «Shiva» в Ливерморе от режимов с взрывающейся оболочкой-поршнем, дающей быстрое сжатие, высокие температуры 6—7 кэВ, до 10^{11} нейтр., но в перспективе недостаточное выгорание, перешли к более важному абляционному режиму, позволяющему за счет сжатия холодной тяжелой мишени удерживать плазму в сжатом состоянии достаточно длительное время. Достигнутая плотность достатой D—T-смеси в 100 раз превышает плотность твердого тела. В ряде докладов изучались опасные для абляционного режима «горячие» электроны. Применение нелинейных кристаллов для удвоения частоты лазерного излучения позволило французским, американским и японским физи-

кам изучить зависимость температуры этих электронов от длины волны лазерного излучения. Подтверждено преимущество использования для нагрева мишени коротких длин волн.

Исследованию нагрева мишеней сильноточными пучками легких ионов были посвящены три доклада от США и Японии; применению релятивистских пучков — доклад от СССР. Изучалась фокусировка пучков в диоде путем профилирования анода. В Научно-исследовательской лаборатории Военно-морского флота США успешно проведены первые эксперименты по транспортировке вдоль плазменного канала ионного пучка плотностью тока 50 кА/см². Сообщалось также о запуске сильноточных ускорителей ионов, из которых наиболее крупный PBFA-1 (Сандиевская лаборатория, США) мощностью $2 \cdot 10^{13}$ Вт при энергии 0,8 МДж. В докладе В. П. Смирнова, И. И. Рудакова и др. наряду с анализом проблемы использования пучков электронов для нагрева мишеней предложено применять разработанные наносекундные генераторы для ускорения с помощью пинч-эффекта миниатюрных лайнеров, обжимающих D—T-смесь.

Конференция в Брюсселе продемонстрировала неуклонный прогресс во всех развивающихся направлениях исследований по УТС, особенно в области магнитного удержания. Результаты, полученные на токамаках, подтвердили надежность тех данных, на которых основывается программа создания реактора-токамака.

ШАФРАНОВ В. Д.

Девятая международная конференция по термическому напылению

Девятая международная конференция по получению и применению защитных покрытий, нанесенных методом термического напыления, состоялась 19—23 мая 1980 г. в Гааге (Нидерланды). В ней участвовало около 350 специалистов из 31 страны.

Техника термического напыления сводится, в основном, к тому, что в поток высокотемпературного газа вводится порошок или проволока из напыляемого материала; последний плавится, разгоняется потоком газа и наносится на защищаемый объект, образуя слой, предохраняющий от абразивного износа, коррозии, эрозии и т. п. Существуют четыре основных метода нанесения защитных покрытий: газопламенное напыление (проволока или порошок расплывается в пламени автогенной горелки), плазменное (порошок подается в поток плазменного теплоносителя, генерируемого электродуговым разрядом), электродуговое (дуга горит между двумя проволоками, непрерывно подаваемыми с барабанов, расплавленный металл выносится потоком газа), детонационное (порошок выносится взрывной волной, получаемой при детонации смеси ацетилена с кислородом или воздухом). Напыление ведется в открытой или инертной атмосфере, а также в вакууме, расплывающаяся горелка может быть ручной или механической, напыляемая деталь неподвижна или движется с заданной скоростью.

На конференции обсуждено 68 докладов, распределенных по тематическому принципу на 14 секций. Система представления докладов — репортерская. Одновременно с конференцией проводилась выставка оборудования для получения защитных покрытий. В выставке участвовало 13 фирм из США, Нидерландов, ФРГ, Англии, Франции, Западного Берлина и Швеции.

Все доклады, представленные на конференцию, можно распечатать по следующим направлениям.

Использование защитных покрытий в атомной технике. Фирма «Union Carbide» применяет в атомной технике покрытия, полученные методом детонационного напыления. На скользящие элементы водяного контура легко-

водных реакторов наносятся износостойкие покрытия на основе композиций: карбиды хрома и вольфрама с никелевой связкой (биндером), карбид хрома с никромовым биндером. Покрытия из карбида хрома устойчивы к напряжениям, возникающим при облучении. Для защиты насосов используют покрытия из Al_2O_3 . Толщина покрытия $2 \cdot 10^{-4}$ м, шероховатость $5 \cdot 10^{-8}$ м.

В высокотемпературных реакторах с гелиевым охлаждением применяют покрытия на основе карбида хрома для защиты от износа регулирующих стержней, теплоизоляторов, генераторов пара, гелиевых турбин. Для температур до 1280 К применяют покрытие $Cr_{23}C_6$ (Cr_3C_2)NiCr, ниже 880 К — карбид хрома с никромовым биндером, ниже 880 К — сплав Ni—Mo—Cr. Карбид хрома с никромовым биндером применяют для защиты от нейтронной радиации и расплавленного натрия в быстрых реакторах. Детонационные покрытия из карбидов вольфрама и хрома с различными биндерами (например, с кобальтом) используют для защиты от износа шаровых клапанов запорной арматуры, плунжеров насосов и компрессоров, импеллеров, поршневых колец и трубчатых валов центробежных насосов. Такие же покрытия успешно применяют для защиты валов турбин, центробежных компрессоров и т. п.

Для защиты различных элементов ядерных реакторов в ФРГ успешно применяют износостойкие, устойчивые к коррозии покрытия из твердого сплава Ni—Cr—W—C. Если покрытие должно иметь, кроме всего, большое сечение захвата нейтронов, к порошок Ni—Cr—W—C подмешивают карбид гафния. Покрытия из Ni—Cr—W—C сплава сохраняют физико-механические свойства при высоких температурах: даже при 1300 К твердость покрытия составляет не менее 40% твердости при комнатной температуре. Термическое расширение регулируется соотношением компонентов. Покрытие хорошо выдерживает термическую качку. Для нанесения этого вида покрытий применяется плазменное напыление. Проверена стойкость Ni—Cr—W—C-покрытий к коррозии в азотной, серной, соляной и плавиковой кислотах.