

чения в битум и замораживания. Рассматривается процесс комбинирования цементирования с битумированием.

Исследования болгарских специалистов показали, что битумные блоки могут храниться как на поверхности, так и под землей.

В Нидерландах, как отметили представители этой страны, нет еще значительных количеств высокоактивных отходов. Они появятся когда потребуется переработка отработавших твэлов. Предварительно изучается возможность захоронения отвержденных высокоактивных отходов в соляные формации. Рассматриваются четыре случая попадания воды в места хранения и возможные последствия этого. Соляные формации считаются наиболее подходящими для захоронения отвержденных высокоактивных отходов.

В интересном сообщении, представленном Францией, рассматривается два способа окончательного захоронения: в безопасные геологические формации (соляные выработки, глубокие горные пласты) и в хранилища, построенные на месте отверждения, хорошо охлаждаемые в течение необходимого периода циркулирующим воздухом. Второй способ рассматривается как более предпочтительный, так как не требует транспортировки высокоактивных отходов, легко поддается контролю и в случае необходимости позволяет вторично перерабатывать эти отходы. Начатые в 1957 г. работы по отверждению в 1967 г. были перенесены на опытную установку с имитаторами, а в 1969 г. начаты работы по отверждению отходов полного уровня активности.

Испытываются два процесса: полунепрерывный (остекловывание в тиглях) и непрерывный, состоящий из двух стадий (кальцинации во вращающейся печи и остекловывания в тигле с периодическим сливом). Производительность последнего процесса примерно 10 л/ч. Промышленную установку предполагается пустить в 1974 г. С начала пуска опытной установки выработано 8 т стекла, содержащего более 2 млн. *кюри*. Оно хранится в могильниках, состоящих из 32 бетонных камер, которые находятся под землей на глубине 10 м. В каждой камере имеются обыкновенные забетонированные стальные трубы, вмещающие 20 банок или 3 тигля (~1,5 т стекла). Охлаждение проводится циркуляцией воздуха. В этом докладе рассматриваются перспективы хранения высокоактивных отходов.

Большую дискуссию вызвало сообщение советских представителей о методике выбора условий захоронения отвержденных отходов, учитывающей их свойства и уровень активности (что было основной целью совещания).

Участники совещания согласились с тем, что современный уровень знаний позволяет создать методику выбора условий захоронения отвержденных отходов низкого и среднего уровней активности в зависимости от их свойств, и обратились с просьбой к Секретариату МАГАТЭ выработать рекомендацию по такой методике с учетом высказанных предложений.

Совещание прошло на высоком научном уровне в дружественной обстановке.

Б. С. КОЛЫЧЕВ

V Европейская конференция по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы

С 21 по 25 августа 1972 г. в Гренобле (Франция) проходила V Европейская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, организованная Отделением физики плазмы Европейского физического общества*.

В работе конференции, на которой было представлено 177 оригинальных и 20 обзорных докладов, приняли участие (по официальному списку) 378 человек из 19 стран мира, в том числе из США, Японии и других неевропейских стран.

На утренних пленарных заседаниях заслушивались обзорные и приглашенные доклады, на вечерних заседаниях секций (работало параллельно по четыре секции) — оригинальные сообщения. Больше по сравнению с предыдущей конференцией в Риме число обзорных докладов, в том числе обзоры по состоянию и перспективам термоядерных исследований в СССР, США и Европе, сделанные соответственно Л. А. Арцимовичем (доклад был прочитан Б. Б. Кадомцевым), Р. Гулдом и Д. Палумбо, дало участникам конференции сравнительно полное представление о современном состоянии термоядерных исследований во всем мире.

Успешные эксперименты на токамаках, проведенные в ИАЭ им. И. В. Курчатова, привели к тому, что многие

лаборатории Европы и США пересмотрели свои планы и переключились на сооружение и исследование установок этого типа. Поэтому эксперименты на токамаках были в центре внимания конференции. Хотя «токамачный бум» еще не привел к резкому увеличению потока научной экспериментальной информации (большинство установок в настоящее время находится в стадии сооружения или пуска-налагодочных работ), на конференции были сообщены новые, интересные результаты.

Обзор исследований на токамаках в СССР был сделан В. С. Стрелковым. Наблюдается заметный прогресс в параметрах получаемой плазмы (см. рисунок). На самой большой советской установке этого типа Т-4 в настоящее время температура электронов достигает нескольких килоэлектронвольт, температура ионов дейтерия — больше 600 эв, время удержания энергии порядка 10^{-2} сек, время удержания частиц — порядка 0,1 сек. Дальнейшие исследования направлены на изучение методов дополнительного нагрева плазмы, устойчивостей, зависимостей процессов переноса от параметров плазмы. Эксперименты, проведенные на установках Т-3а и Т-6, показали, что с помощью программирования тока в плазме, а также приближения к ее поверхности проводящего кожуха можно получить МГД-устойчивую плазму при значениях запаса устойчивости q вплоть до 1, что значительно меньше ранее считавшегося необходимым для устойчивости значения $q = 3$. Эксперименты по электроно-циклотронному нагреву (они только начинаются) показывают, что

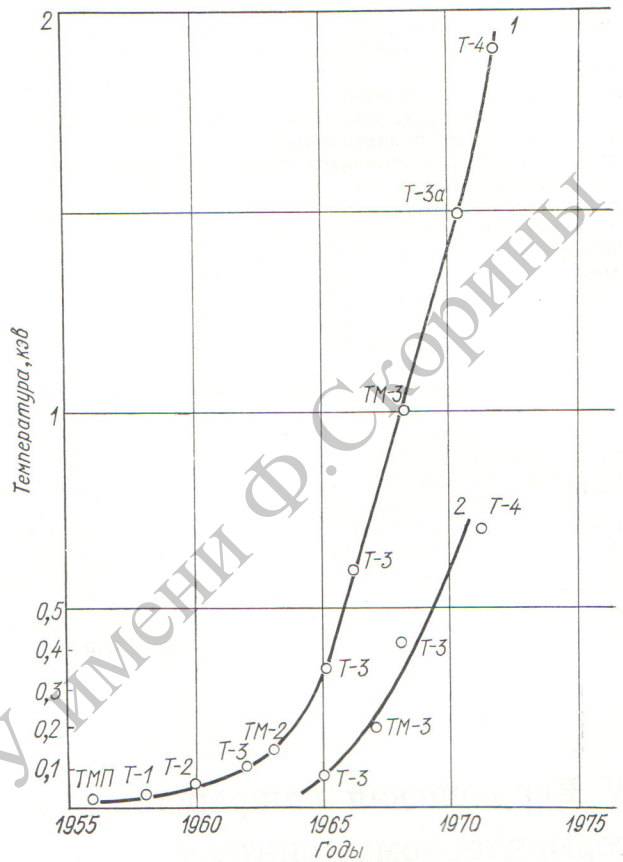
* Труды конференции (кроме обзорных и приглашенных докладов, которые будут опубликованы позднее) были изданы организаторами до начала конференции и розданы участникам.

ВЧ-энергия поглощается в плазме. Все это позволяет ожидать дальнейший рост температуры плазмы. Дополнительный нагрев дал возможность «развязать» параметры плазмы и исследовать зависимость ее удержания от температуры при заданном токе в плазме. В экспериментах на ТМ-3 показано, что время удержания энергии возрастает с повышением температуры электронов по крайней мере при низких плотностях.

В. Стодрик (США) подытожил результаты исследований на токамаке ST в Принстоне. Результаты изучения энергетического баланса плазмы, неустойчивостей и других исследований в общем совпадают с данными советских исследований, однако широкое использование лазерной диагностики позволило американским физикам получить детальную картину эволюции радиальных профилей температуры и плотности плазмы. На ранних стадиях разряда наблюдается небольшое скиннирование температуры, которое затем сменяется тепловой контракцией шнура: профиль температуры электронов становится со временем все более и более узким. Потери энергии в центре шнура, как и в экспериментах на Т-3 и Т-4, определяются аномальной электронной теплопроводностью. Омическое сопротивление плазмы хорошо описывается формулой Спизера с учетом сравнительно большого количества примесей (кислород составляет 12—14% общего числа атомов). Отсутствие аномальности сопротивления позволило американским физикам рассчитать распределение тока по сечению шнура, зная профили температуры, плотности и концентрации примесей. Расчет показывает, что в центре шнура запас устойчивости $q < 1$. Этот и другие результаты позволяют автору сделать вывод, что ограничение электронной температуры и изменение ее профиля в конце разряда вызваны МГД-неустойчивостью в центре шнура. В докладе отмечается, что плазма на токамаках хорошо удерживается лишь в узком диапазоне плотностей вблизи $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. При больших плотностях наблюдается МГД-неустойчивость, которую автор идентифицирует как резистивные моды винтовой неустойчивости. Высокие моды этой неустойчивости не дают катастрофических последствий для плазменного шнура в целом. Развитие моды $m = 2$ приводит к выбросу плазменного столба на стенки, существенным потерям энергии плазмы, отрицательным пучкам напряжения на разряде и другим явлениям, известным как «дизруптивная неустойчивость».

Из теоретических работ по токамакам следует отметить работу Дж. Лавалия и др. (Фонтенэ-о-Роз, Франция), в которой рассмотрена устойчивость тороидального шнура эллиптического сечения с однородным током относительно винтовой неустойчивости. Показано, что при увеличении эллиптичности одновременно с уменьшением критического q происходит расширение, а затем и перекрывание областей неустойчивости различных азимутальных мод, так что переход к «перстеньковому токамаку» может ухудшить условия МГД-устойчивости. Неблагоприятный эффект, по мнению авторов, должен быть слабее, но все же сохранится и для более реальных распределений тока.

По сравнению с предыдущими конференциями существенно вырос удельный вес докладов по численному моделированию процессов в плазме, причем большинство работ посвящено токамакам: численным расчетам равновесия плазменного шнура, в том числе с некруговым сечением, расчетам пространственной и временной эволюции параметров плазмы, нагрева плазмы пучком быстрых нейтралов. Цель почти всех работ — определение и оптимизация параметров установок, сооружаемых в настоящее время.



Рост электронной (1) и ионной (2) температур плазмы на установках типа токамак в СССР за последние 15 лет.

Другое традиционное направление термоядерных исследований — изучение ловушек с магнитными пробками. Большой интерес вызвал обзорный доклад Ф. Кеичена об экспериментах на установке 2ХII в Ливерморской лаборатории (плотность плазмы $6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, температура ионов — несколько килоэлектронвольт). Установлено, что характер распада плазмы зависит от распределения ионов по поперечным энергиям. Если это распределение имеет два максимума, наблюдаются колебания на циклотронной частоте ионов и ее гармониках и распад неустойчив. Если максимум только один (а этого можно добиться, выбирая задержку между инжекцией плазмы и импульсным включением магнитного поля), то видимых признаков неустойчивостей нет, а константа распада лишь в два-три раза отличается от расчетного значения, полученного в предположении, что распад определяется лишь классическим кулоновским рассеянием ионов. Однако по мере уменьшения плотности это расхождение возрастает. Не согласуется с кулоновской и зависимость времени жизни от энергии частиц. Эти расхождения между теорией и экспериментом устраняются при учете нового эффекта — «коллективного рассеяния» ионов на шумах, возникающих из-за конвективной формы конусной неустойчивости Поста-Розенблюта. Теория эффекта, развитая Д. Бол-

дуином и Дж. Коллином, была сравнена с экспериментальными данными, полученными на установках 2X и 2XII. Оказалось, что этот эффект может объяснять зависимость скорости распада от плотности плазмы, магнитного поля и температуры ионов. В настоящее время продолжают эксперименты по проверке теории. Ее справедливость будет означать, по-видимому, усиление (хотя и не очень существенное) ограничений на длину плазмы в пробочном реакторе.

В докладе В. А. Канаева и Е. Е. Юшманова (СССР) об экспериментах на пробочной ловушке ПР-6 показано, что распад столкновительной плазмы с плотностью 10^{12} см^{-3} и температурой ионов 100 эв , начинающийся как «классический», по мере распада ускоряется и сопровождается появлением неустойчивости. Доклад вызвал большой интерес, так как он продемонстрировал явление нелинейной обратной связи между параметрами плазмы, переводящей плазму из более равновесного состояния в менее равновесное. По мнению авторов, это явление имеет универсальный характер и может оказаться препятствием на пути достижения устойчивого удержания в пробочных системах.

Об экспериментах на стеллараторах было рассказано в обзорном докладе Д. Лиза (Калем, Великобритания) и в оригинальных сообщениях, представленных СССР и Японией. На всех установках наблюдаемое время удержания примерно на порядок меньше, чем должно быть при чисто столкновительной диффузии в соответствии с «неоклассической» теорией. Однако на установках «Ураган» (СССР) и «Прото-Клео» (Великобритания) наблюдаемые зависимости удержания от температуры и плотности близки к неоклассическим. Уточнение теории, проведенное Т. Стрингером, позволило получить даже количественное согласие между экспериментом и теорией. Поэтому большой интерес представляет проверка столкновительного характера диффузии независимым методом. Для этого на стеллараторе «Прото-Клео» была предпринята попытка обнаружить продольный ток, который согласно теории должен возникать под действием столкновительной диффузии. Эксперименты, чувствительность которых в 50 раз превышала ожидаемую величину тока, дали отрицательный результат. Возможно, что ток просто не успевает установиться в данных экспериментах из-за недостаточного времени удержания, тем не менее его полное отсутствие вызывает сомнение в столкновительной природе наблюдаемых потерь плазмы. В этой связи вновь возникает вопрос о влиянии колебаний на удержание плазмы в стеллараторах. Согласно экспериментам, выполненным в Великобритании, роль колебаний незначительна, однако прямые эксперименты на стеллараторе Л-1 Физического института АН СССР показывают, что подавление колебаний приводит к удвоению времени жизни, а из результатов экспериментов в Новосибирске, доложенных В. И. Волосовым, следует, что наблюдается большая азимутальная неоднородность радиальных потоков плазмы под действием колебаний. Поэтому сделанные на основе локальных измерений выводы о малой роли колебаний могут оказаться ошибочными.

Заметное внимание как в Европе, так и в США уделяется работам по пинчам различных типов. По этому вопросу было заслушано три обзорных доклада и более десятка оригинальных сообщений. Д. Робинсон рассказал об экспериментах на тороидальном пинче с высоким β в Калеме, где пытаются получить устойчивую конфигурацию с обратным полем снаружи от плазменного шнура. Эксперименты показали возможность создания устойчивой плазмы в такой конфигурации, но из-за быстрой диффузии магнитного поля при низкой

температуре плазмы время ее жизни невелико. Ф. Ягода (Лос-Аламос, США) сделал сообщение о состоянии работ по проекту «Сциллак». Сооружение полного тороида только планируется, но на тороидальном секторе показано, что комбинация гофрированного и винтового ($l = 1$) полей позволяет компенсировать тороидальный дрейф. На прямом пинче «Сцилла-4» введена в действие мощная система обратной связи для стабилизации МГД-неустойчивости с $m = 1$. Первые эксперименты подтвердили справедливость принципов, положенных в основу работы системы.

Большой интерес вызвало обсуждение возможностей осуществления термоядерного синтеза с помощью сверхмощных лазеров. О современном состоянии исследований в этой области было рассказано Дж. Бобенем (Лимейл, Франция). По его мнению, быстрый прогресс лазерной техники позволяет надеяться, что к 1975 г. будут созданы лазеры на неодимовом стекле с энергией наносекундных и субнаносекундных импульсов 10 кдж и CO_2 -лазеры с мощностью наносекундных импульсов 200 Гвт . Интересна разработка химических лазеров на иоде и ультрафиолетовых лазеров на ксеноне, обещающих очень высокий к. п. д. (более 50%). Уже сейчас лазеры с мощностью светового потока порядка 10^{14} вт/см^2 позволяют при облучении твердых мишеней получить плазму температурой электронов $\sim 1 \text{ кэв}$, ионов $\sim 500 \text{ эв}$ и нейтронным выходом 10^2 — 10^5 нейтр/см^2 . Два важных вопроса стоят в настоящее время перед экспериментом: линейна или нелинейна природа процессов поглощения светового излучения и каков механизм нагрева плазмы поглощенной энергией. Теоретики предлагают две модели нагрева: тепловую волну и свободный факел, ведомый лазерным пучком. Так как данные модели приводят к разным зависимостям выхода термоядерных нейтронов от энергии (выход нейтронов пропорционален для тепловой волны квадрату энергии и для факела — энергии в пятой степени), экспериментальное изучение этой зависимости поможет внести ясность в эту проблему.

Результаты, полученные в разных лабораториях, показывают, что, если наблюдаемые нейтроны являются термоядерными, то при малых световых потоках они рождаются в свободном факеле, а при больших мощностях доминирующим механизмом является тепловая волна. Однако термоядерная природа нейтронов еще не доказана, а корреляция выхода нейтронов с увеличенным отражением лазерного света, появлением очень горячих ионов и генерацией жесткого рентгеновского излучения позволяет предположить наличие неустойчивостей, связанных с нелинейным поглощением лазерного света плазмой. Теоретических работ по этому вопросу много, а экспериментальные исследования только начинаются.

В ближайшие годы при работе с более мощными лазерами нелинейные эффекты станут доминирующими и их изучение будет составлять важнейшую часть исследовательской программы.

Далее Дж. Бобенем рассмотрены обсуждаемые в настоящее время следующие схемы применения лазеров для управляемого синтеза:

1. Нагрев плазмы плотностью 10^{18} см^{-3} при ее одномерном разлете в магнитном поле, равном 1 — 10 Мгс , с помощью CO_2 -лазера. Для достижения термоядерных условий в этом случае нужны энергии порядка 10^8 дж/см^2 .

2. Быстрый лазерный нагрев твердой крупинки. При этом энергия лазерного импульса должна составлять 10^8 — 10^{12} дж (наиболее вероятная оценка 10^9 дж). Ее можно существенно уменьшить за счет сильного сжа-

тия вещества:

$$w = 10^9 (n_s/n)^2 \partial \nu,$$

где n_s — плотность твердого тела; n — плотность вещества. Детальные расчеты, проведенные Нукольсом в Ливерморской лаборатории, показывают, что при симметричном облучении крупинки лазерным импульсом со специально подобранным фронтом нарастания могут быть достигнуты плотности, превышающие плотность твердого тела более чем в 1000 раз. При этом минимальная энергия лазера снижается до 10^3 — 10^6 Дж (в зависимости от сжатия).

С незапланированным докладом по теоретическим проблемам лазерного нагрева выступил М. Розенблют (США). Он остановился на трудностях, которые могут возникнуть на пути осуществления сверхсильного сжатия при очень больших мощностях лазерного пучка: в частности, на возможности появления аномально большого отражения лазерного света и генерации быстрых электронов. Эти электроны могут преждевременно прорвать сердцевину мишени и помешать сжатию.

Исследования плотной плазмы, получаемой в плазменном фокусе, продолжают в ряде лабораторий

Европы и США. В обзорном докладе Ш. Мезонье (Фраскати, Италия) были развиты новые представления о процессах в плазменном фокусе и генерации нейтронов. Согласно Ш. Мезонье, после первого сжатия в расширяющемся плазменном образовании возникает аномальное сопротивление, в 100—1000 раз превышающее классическое, на котором диссипирует запасенная магнитная энергия. Это приводит к турбулентному нагреву и генерации основного импульса нейтронного излучения. При этом плазменный фокус имеет относительно большие размеры.

Конференция продемонстрировала прогресс во всех областях термоядерных исследований и перспективы достижения их конечной цели. В связи с этим, как видно из доклада Р. Гулда о состоянии термоядерных исследований в США, КАЭ США планирует существенное увеличение ассигнований на термоядерные исследования в США.

Проведение следующей европейской конференции по контролируемому синтезу и физике плазмы запланировано в Москве в 1973 г.

В. А. ЧУЯНОВ

Международная конференция по изучению структуры ядер с помощью нейтронов

Конференция, состоявшаяся 31 июля — 5 августа 1972 г. в Будапеште, была организована Центральным физическим институтом и Физическим обществом Эвеша при содействии Академии наук и Комиссии по атомной энергии Венгрии, а также Международного союза чистой и прикладной физики. На конференции присутствовали более 200 ученых из 25 стран. Наиболее многочисленными были делегации СССР, ФРГ, Франции, США. На пленарных заседаниях было заслушано 20 обзорных докладов по следующим разделам: 1) статистическая модель ядра; 2) отклонения от статистической модели и промежуточная структура; 3) оптическая модель ядра; 4) радиационный захват нейтронов; 5) свойства делящихся ядер; 6) ультрахолодные нейтроны; 7) высокоинтенсивные источники нейтронов. По первым четырем разделам на трех параллельных секциях было сделано около 100 кратких сообщений. Советская делегация представила 20 докладов, из них пять обзорных. Все краткие сообщения были опубликованы до начала конференции. Обзорные доклады будут опубликованы в конце 1972 г.

Г. Вайденомюллер (ФРГ) осветил новые направления в развитии статистической модели, связанные с учетом двухчастичного характера ядерных сил (TBRE-ансамбли). Экспериментальная проверка новых идей основана на изучении статистических свойств распределений расстояний между далекими уровнями компаунд-систем. Согласно первым расчетам, выполненным для матриц конечной размерности, эти свойства должны быть различны для TBRE и ранее использованных гауссовских (GOE) ансамблей. В работах А. Джейна и др. (Франция) на ядрах Pu^{239} , Ho^{165} , Tm^{169} , $Nd^{142, 146, 148}$ получены результаты в пользу TBRE-модели. Однако, как стало известно в ходе конференции, новейшие расчеты привели к выводу, что в пределе для матриц бесконечной размерности свойства распределений расстояний для GOE- и TBRE-ансамблей должны совпадать, т. е. анализ расстояний между уровнями

не является критерием для выбора модели. Дж. Гаррисон развил метод статистического анализа нейтронных сечений для случая, когда средние ширины не малы по сравнению с расстояниями между резонансами. Метод основан на сравнении экспериментальных сечений и сечений, статистически генерированных со средними резонансными параметрами.

Значительное место заняли работы по поискам и анализу нестатистических эффектов. Современное теоретическое представление о подобных эффектах и обзор имеющихся экспериментальных результатов были даны в докладе К. Махо (Бельгия). Отмечено, что многие экспериментальные результаты о нестатистических эффектах еще не подкреплены убедительными доказательствами. В этой связи в докладе рассмотрены статистические критерии анализа структур в сечениях реакций.

Корреляционный анализ энергетических интервалов между нейтронными резонансами (С. И. Сухоручкин, СССР; К. Идено, Япония) подтверждает полученные ранее данные о наличии квазипериодической структуры. Попытки связать эту структуру с параметрами уровней не дали положительных результатов (Ю. П. Попов и др., СССР). В докладе В. Г. Соловьева (СССР) на основе развиваемого автором полумикроскопического подхода к описанию сложных компаунд-состояний ядер предсказывается широкий класс нестатистических эффектов в реакциях с резонансными нейтронами. В частности, эффект усиления приведенных вероятностей α -распада компаунд-состояний на однофоновые состояния 2^+ по сравнению с α -распадом в основное состояние был экспериментально наблюден (Ю. П. Попов).

Наибольшее развитие за последние годы получили исследования радиационного захвата нейтронов, чему способствовали техника полупроводниковых детекторов и мощные источники нейтронов (высокопоточный реактор Брукхейвенской лаборатории, линейные ускорители в Ок-Ридже и Желе, импульсный реактор в Дуб-