

Конференции и совещания

Международное совещание по открытым ловушкам

3—7 декабря 1973 г. в Беркли (США) состоялось совещание по открытым ловушкам, организованное Ливерморской радиационной лабораторией им. Лоуренса (ЛРЛ). В работе совещания приняли участие около 50 физиков из различных лабораторий и университетов США, а также из Великобритании, СССР и Франции. Советские ученые выступили с докладами об исследовании устойчивости плазмы в открытых ловушках ПР-6, ПР-7 и «Огра-2Т», о разработке методов стабилизации плазменных неустойчивостей обратными связями и создании мощных инжекторов быстрых атомов. Эти доклады были встречены с большим интересом.*

В настоящее время исследования по открытым ловушкам в США почти полностью сосредоточены в Ливерморской лаборатории и ведутся на двух основных установках: 2ХII и «Бейсбол-II». Следует остановиться на новых результатах экспериментов на пробочной ловушке 2ХII, где исследуется распад плотной ($n \gtrsim 10^{13} \text{ см}^{-3}$) плазмы, создаваемой в результате инжекции из титановой пушки и последующего адиабатического сжатия.

1. С помощью инжекции пучка атомов водорода с энергией 16 кэВ и интенсивностью 5 эВ/а, использованного для диагностики, удалось измерить плотность плазмы во время сжатия и в ранней стадии распада. (Использовавшаяся ранее микроволновая интерферометрия не позволяла измерять плотности выше $4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$.) Оказалось, что в ранние моменты сжатия, когда магнитное поле еще не велико, плотность плазмы близка к 10^{14} см^{-3} , а величина β (отношение давления плазмы к магнитному давлению) достигает 0,4—0,6. Хотя значения $\beta \approx 1$ наблюдались ранее в экспериментах с быстрыми электронами, о таких больших β в опытах с горячими ионами сообщается впервые. Далее обнаружено, что величина β ограничена сверху и этот порог ограничения зависит от магнитного поля и пробочного отношения. Найденная зависимость с хорошей точностью соответствует ограничению, накладываемому на β , «зеркальной» неустойчивостью.

2. Обнаружена связь между вакуумными условиями и скоростью распада плазмы. Вакуумные условия регулировались изменением площади поверхности стенки, запыляемой титаном. Переход от полного запыления к запылению лишь за пробочных областей при энергии ионов 1,5—2 кэВ (при этой энергии в любых условиях распад происходит плавно без быстрых сбросов) увеличил $n\tau$ в два раза (от $0,8 \cdot 10^{10}$ до $1,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}$), что почти совпадает с фоккер-планковскими расчетами кулоновского распада. При энергии ионов 3 кэВ этот переход увеличил $n\tau$ с $0,6 \cdot 10^{10}$ до $(2,6 \div 4,2) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \times \text{сек}$ и устранил быстрые сбросы. Улучшение удержания наблюдалось с увеличением плотности за пробочной плазмы до 4% от плотности плазмы в центре ловушки. При полном запылении плотность за пробочной плазмы порядка 1% от плотности в центре ловушки, однако и это существенно выше значения, ожидаемого в том

случае, если бы плотность за пробками целиком определялась потоком плазмы, выходящим через них. Отметим, что в предыдущих работах этой группы утверждалось полное отсутствие корреляции между плотностью за пробочной плазмы и скоростью распада плазмы.

3. Попытки подтвердить теорию квазиклассического рассеяния Болдуина — Коллена путем измерения зависимостей удержания от средней энергии ионов w_i , температуры электронов T_e и их отношения не увенчались успехом.

4. Эксперименты по лазерному рассеянию показали, что температура электронов от импульса к импульсу меняется в диапазоне 30—200 эВ. В большинстве случаев она близка к 70—100 эВ, что при средней энергии ионов 1,5—2 кэВ составляет 0,05 от энергии ионов, тогда как при кулоновском распаде $T_e/w_i = 0,1$. С увеличением энергии ионов T_e не повышается, и отличие от кулоновского значения возрастает. Наблюдаемое расхождение можно частично объяснить тем, что время распада меньше кулоновского и электроны не успевают нагреваться от ионов.

5. В режимах с ускоренным распадом (w_i выше 2 кэВ) зондовые измерения показали наличие колебаний с частотами вблизи ионно-циклотронной частоты и с характерными волновыми числами $k_{\perp} \approx 4/a_i$, где a_i — ларморовский радиус для иона с энергией w_i .

Сейчас эксперименты на установке 2ХII прерваны, установка демонтирована, и на ее месте быстрыми темпами (на работы отпущено около 4 млн. долл.) сооружается новая установка 2ХIIB. Она будет отличаться более длительным существованием магнитного поля (до 20 мсек) и возможностью установить состоящий из 12 модулей инжектор быстрых атомов с суммарным эквивалентным током до 600 а. Модуль инжектора с током 50 а, энергией инжекции 20 кэВ и длительностью импульса до 10 мсек создан в ЛРЛ. Этот модуль представляет собой ионный источник без магнитного поля, в котором большой ионный ток получается за счет большой площади эмиссии. Ионный поток извлекается из 105 щелей длиной 7 см и шириной 2 мм каждая. Для «освещения» эмиссионной поверхности плазмой в источнике зажигается дуговой разряд с накаленным катодом без магнитного поля (ток дуги 4000 а, напряжение до 70 в). Газовый к. п. д. источников достигает 38%. Перезарядка ионов происходит непосредственно вблизи источника на вытекающем из него газе. Отсутствие магнитного поля позволяет легко собирать модули в мощный инжектор. В настоящее время в ЛРЛ разрабатывается еще больший модуль на 200 а, в котором площадь эмиссии порядка 1000 см^2 , а ток дуги 20 ка. Достигнутые успехи в создании сильноточных инжекторов позволяют по-новому подойти к экспериментам на открытых ловушках. При токе инжекции 600 а в объеме ловушки 2ХII можно поддерживать плазму с плотностью $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ даже при времени жизни $\tau \approx 200 \text{ мсек}$ (это в два раза хуже, чем получается в настоящее время при энергии ионов 2 кэВ). При этом за счет перезарядки быстрых атомов на ионах плазмы энергия ионов быстро возрастает до энергии инжекции. Таким образом, созданная техника позволяет получить и исследовать плазму с параметрами, весьма близкими к термоядерным: $n \gtrsim 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $w_i \gtrsim 10 \text{ кэВ}$. Исследования устойчивости

* Работы советских ученых и ученых других европейских стран рассматривались на VI Европейской конференции по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы (см. «Атомную энергию», 1973, т. 35, с. 447).

такой плазмы, несомненно, дадут более важные и решающие результаты, чем любые модельные эксперименты.

На установке «Бейсбол-II» — ловушке с инжекцией быстрых атомов проводились эксперименты по программе накопления плазмы с постоянным поддержанием устойчивого кулоновского распределения. Для этого инжекция велась в хороших вакуумных условиях (τ перезарядки составляло несколько секунд) и при низкой энергии инжекции ($w_i \approx 1$ кэв), так что даже при плотности плазмы $n \approx 10^8$ см⁻³ время перезарядки было больше времени кулоновского рассеяния. В этих экспериментах действительно удалось получить полностью устойчивую плазму с кулоновским распределением ионов по скоростям при плотностях до нескольких единиц на 10^9 см⁻³. При таких плотностях перезарядочные потери были в шесть раз меньше, чем потери из-за ухода в конус при парных соударениях, и все параметры плазмы хорошо соответствовали фоккер-планковским расчетам. Однако при попытках увеличить плотность была обнаружена неустойчивость, снижающая время жизни до 0,1 сек, устраняющая кулоновский вид ионной функции распределения и препятствующая дальнейшему накоплению. Исследования показали, что порог неустойчивости определяется не самой плотностью, а ее отношением к квадрату магнитного поля и может быть записан в виде

$$\varepsilon = \frac{\omega_{oi}^2}{\omega_{Bi}^2} = 0,4.$$

Неустойчивость приводит к преимущественному выбросу ионов за пробки и сопровождается колебаниями на ионной циклотронной частоте ω_{Bi} , частоте прецессии ионов с энергией инжекции в неоднородном магнитном поле ω^* и ростом потенциала плазмы. При небольшом превышении порога выброс ионов происходит из поверхностных слоев плазмы. При дальнейшем увеличении плотности область потерь захватывает всю плазму. В настоящее время неясно, какие колебания — высокочастотные (ω_{Bi}) или низкочастотные (ω^*) — являются причиной потерь. Попытка повлиять на низкочастотные колебания с помощью электростатической системы обратной связи привела к увеличению плотности на 30%. Этот и другие факты заставляют экспериментаторов, работающих на «Бейсболе-II», склоняться в пользу гипотезы о доминирующей роли низкочастотных колебаний. С теоретической же точки зрения более правдоподобно предположение о первичной роли циклотронных колебаний. Не исключено, что предел по ε определяется циклотронной неустойчивостью, локализованной вначале в поверхностном слое плазмы, где плотность слишком мала для установления столкновительного устойчивого распределения. Однако независимо от природы неустойчивости ясно, что первоначальная программа — пройти от самых малых до максимальных плотностей при полной устойчивости плазмы — в ее первоначальном виде без привлечения каких-либо новых идей невыполнима. При наличии неустойчивости наблюдаемые на «Бейсболе-II» времена жизни еще достаточно велики, чтобы при более мощной инжекции продвигнуться к высоким плотностям. Однако при энергии инжекции 1—3 кэв трудно надеяться на получение токов инжекции более 20—30 ма. Поэтому сейчас на «Бейсболе-II» устанавливается новый инжектор с энергией ионов 20 кэв и током до 0,5 а. Будет сделана попытка увеличить плотность с помощью «грубой силы».

Мощные инжекторы с током до 50 а, созданные в Беркли, изменили идею экспериментов на установке «Бейсбол-II». В настоящее время здесь рассматривается

вариант замены инжекции в вакуум инжекцией в предварительно созданную мишень. Возможность такой инжекции изучалась и раньше, но при малых токах инжекции для успешного накопления требовалось, чтобы температура электронов плазмы-мишени была не менее нескольких килоэлектронвольт. При токе инжекции 50 а температура электронов может составлять несколько десятков электронвольт, так как время накопления горячих ионов в этом случае мало и можно допустить сильное охлаждение ионов на электронах мишени. Рассматриваются два варианта: инжекция в водородную дугу и инжекция в плазму, образованную испарением твердой мишени лазерным светом. Лазерные плазменные мишени в настоящее время уже успешно создаются в лаборатории фирмы «Юнайтед эйркрафт» (Бостон). Здесь под руководством А. Хота создается ловушка «Лайт» с бейсбольным полем, инжекцией нейтралов и лазерной мишенью. Лазерная мишень образуется облучением 20-микронной сферы из дейтрита лития импульсом неодимового лазера мощностью 500 Мвт и длительностью 8 нсек. Температура ионов мишени ~ 100 эв, время их жизни в ловушке ~ 150 мксек, характер распада кулоновский ($\tau \sim w_i^{3/2}$). В эту мишень (ее параметры должны быть несколько улучшены) будет инжектироваться пучок атомов водорода с энергией 10 кэв и током до 0,5 а. Хот представил расчеты накопления, согласно которым для замещения ионов мишени быстрыми ионами пучка и получения плотности $\sim 10^{13}$ см⁻³ достаточна плотность инжектируемого потока быстрых атомов в мишени выше 5 ма/см², что представляется вполне реальным. Физический пуск установки «Лайт» намечен на весну 1974 г.

При исследованиях пробочного удержания в ЛРЛ широко используются вычислительные машины. Обзор работ, проводимых в этом направлении, был сделан Дж. Киллином. Их можно разделить на четыре группы: фоккер-планковские расчеты кулоновского удержания; расчеты МГД-равновесия при больших β в реальных магнитных конфигурациях; решение дисперсионных уравнений и нелинейных задач в бесстолкновительном приближении; расчеты накопления при инжекции с учетом столкновений в реальной геометрии. Имеющиеся фоккер-планковские программы позволяют (предполагая разделение переменных) рассматривать любое количество компонентов (ионов разного сорта, электронов, α -частиц и т. д.). Для учета реальных характеристик инжекции и магнитных полей создан двумерный код, не предполагающий разделения переменных. Проведенные недавно в Гренобле (Франция) Ф. Веркоффом расчеты кулоновского рассеяния без предположения сферической симметрии потенциалов Розенблюта — Трубникова показали примерно удвоенные значения времен удержания по сравнению с прежними данными. Для проверки этого результата аналогичная программа создана в ЛРЛ. Расчеты по этой программе не дали существенного улучшения удержания. Во время совещания Ф. Веркофф и Дж. Киллин сравнили свои программы, однако причин расхождения результатов не выяснили.

Расчеты равновесия при конечном β позволили найти максимальные β и получить распределения полей в присутствии плазмы для таких реальных ловушек, как 2XII и «Бейсбол-II». Из результатов решений нелинейных задач был сделан следующий важный вывод: на нелинейной стадии развития колебаний в их спектре доминируют циклотронная частота и ее гармоники независимо от реальной частоты на линейной стадии колебаний. Поэтому спектр частот, наблюдаемый в нели-

нейной стадии развития неустойчивости, можно использовать для ее идентификации лишь с большими предосторожностями.

Недавно сотрудники ЛРЛ предложили вариант пробочного реактора с инжекцией быстрых атомов дейтерия в холодную тритиевую мишень. В докладе, сделанном по этому вопросу Р. Постом, лишь указаны проблемы, требующие разработки, но нет никаких решений. В этом направлении в ЛРЛ ведется интенсивная вычислительная работа. В частности, создана специальная программа для расчета вытекания плазмы вдоль расширяющегося магнитного поля с учетом эффектов на металлической границе и ионизации газа.

Сейчас основное внимание в программе ЛРЛ открытым ловушкам обращено на инжекцию очень мощных пучков нейтралов в мишени, способные обеспечить захват таких пучков. В этом направлении развиваются все эксперименты и ведутся дальнейшие теоретические поиски.

В заключение следует отметить хорошую рабочую обстановку совещания и ценный обмен идеями и опытом между физиками различных лабораторий мира, работающими в области исследований пробочного удержания плазмы.

ЧУЯНОВ В. А.

Итоги первого Международного симпозиума по плазмохимии

Для обсуждения перспективных направлений и проблем технологической (низкотемпературной) плазмы в Киле (ФРГ) 6—10 сентября 1973 г. был организован первый Международный симпозиум по плазмохимии. В симпозиуме участвовали около 200 представителей из СССР, США, ФРГ, Канады, Великобритании, Франции, Японии, Швейцарии, Италии, ГДР, Югославии, Бельгии.

Работали шесть секций, на которых обсуждено около 70 докладов.

1. Элементарные химические реакции в плазме (13 докладов). Здесь рассмотрены механизм и кинетика элементарных химических реакций в неравновесной плазме, параметры плазмы низкого давления с точки зрения плазмохимии, химические реакции в поле электрического разряда, реакции хемоионизации, химические превращения в различных зонах электрических разрядов, процессы прилипания электронов в электроотрицательных газах, масс-спектрометрический анализ химически реагирующей плазмы.

2. Химия газозафазных и гетерофазных процессов в плазме (15 докладов). На этой секции обсуждались термодинамические и кинетические аспекты гомогенных и гетерогенных химических реакций в изотермической плазме, превращение твердых частиц в плазменных теплоносителях, взаимодействие плазмы с конденсированными веществами, синтез и анализ углеводородов, восстановление железа, меди, и алюминия из руд, разделение различных компонентов руд.

3. Плазмохимическая диагностика (10 докладов). Рассмотрена применимость различных методов диагностики химических пламен и плазмы в случае химически реагирующей плазмы (масс-спектрометрии, а также эмиссионной и абсорбционной спектроскопии, метода электростатических зондов и т. д.). Обсуждены проблемы диагностики плазмы электрических разрядов в многоатомных газах, содержащих тяжелые элементы.

4. Инженерные приложения плазмы (14 докладов). Основные темы этой секции: техника получения высокотемпературных газов для инженерных и химических приложений; получение металлов восстановлением оксидов углеродом, галогенидов водородом или термическим разложением неустойчивых соединений (сульфидов); синтез микронных и субмикронных порошков; плавление тугоплавких веществ; разделение и обогащение различных руд и концентратов; получение высо-

котемпературных покрытий и полупроводниковых интегральных схем для микроэлектроники.

5. Органический и неорганический синтез (7 докладов). Доклады этой секции посвящены механизмам переноса энергии при плазмохимическом синтезе, возможностям и ограничениям последнего, синтезу тугоплавких карбидов и нитридов, органических и металлоорганических соединений, проблемам оптимизации плазмохимического процесса и реактора.

На шестой, заключительной, секции подведены итоги симпозиума, обсуждены перспективы развития и проблемы плазмохимии.

Можно отметить следующие направления использования плазмы в химии и технологии.

1. Плазма как химически активный или нейтральный теплоноситель для решения конкретных проблем (восстановления металлов, конверсии химических веществ, обогащения, распыления, обработки). Специфические свойства плазмы не имеют существенного значения, поскольку температура быстро падает за счет эндотермических эффектов в нагреваемых объектах при первоначальном взаимодействии с плазмой. При последующем взаимодействии температуры газа и нагреваемого вещества выравниваются, а затем температура системы падает за счет как эндотермики реакции, так и теплоотдачи по различным каналам (теплопроводность, конвекция, излучение).

2. Электроразрядная, термодинамически неравновесная плазма как зона химической реакции. В большинстве случаев речь идет о плазме низкого давления, в которой температура тяжелых частиц значительно меньше температуры электронов. Именно к такой плазме в первую очередь относится термин «плазмохимия». Потенциальные возможности неравновесной плазмы велики; уже сейчас имеются отдельные прикладные работы.

Проблемы, связанные с генераторами, плазматронами и диагностикой, сдерживают прогресс в плазмотехнологии. Плазмохимия как наука, лежащая на границе химии, физики, технологии, электроэнергетики, нуждается в выработке общих точек зрения и терминологии, а также в создании собственной теории для исследования и прогнозирования плазмохимических реакций.

Применение плазмы в химической технологии позволяет заменить процесс «в ванне» процессом «в потоке»,