

1) выбранные специалистами различных стран расчетные модели твэлов близки и по основным характеристикам совпадают, однако в этом направлении необходимы дальнейшие исследования;

2) недостаточно изучены еще вопросы, связанные с выбором критериев надежной работы твэлов, позволяющих правильно подойти к оценке ресурса работы твэла;

3) анализ твэлов, вышедших из строя, не позволил однозначно определить причины разрушения оболочек;

4) выход отдельных твэлов из строя не требует специальных незапланированных остановок реактора; реактор может эксплуатироваться с негерметичными твэлами до плановой остановки.

Симпозиум подтвердил возможность достижения промышленной экономичности АЭС с быстрым реактором при использовании уран-плутониевого окисного горючего. Твэлы на основе такого горючего обеспечивают экономически эффективные параметры реактора.

Дальнейшее повышение технико-экономических показателей быстрого реактора связано с использованием более перспективных видов горючего. Основное внимание в различных странах уделяется разработкам карбидного, карбонитридного и нитридного горючего. В докладах, посвященных исследованиям этих видов горючего, рассматриваются следующие основные вопросы:

- 1) технология получения исходных соединений и изготовление сердечников из них;
- 2) совместимость карбидного и карбонитридного горючего с материалами оболочки;
- 3) методы расчета твэлов;

4) результаты облучения горючего. Технология получения карбидного, карбонитридного и нитридного уран-плутониевого горючего основывается на использовании в качестве исходного материала как окислов ( $U_3O_8$ ,  $UO_2$ ,  $PuO_2$ ), так и металлов, причем предпочтения какому-либо из этих методов не отдается. Рекомендуемое содержание кислорода в таком горючем должно составлять не более 0,1—0,15 вес.%, уменьшение его ниже указанных величин улучшает совместимость.

Французские ученые считают, что стоимость изготовления сердечников из бескислородных соединений на 20—30% выше, чем из уран-плутониевого окисного горючего.

Твэлы с карбидным, карбонитридным и нитридным горючим показали достаточно хорошую работоспособность до требуемого ресурса (выгорание 7—10% тяжелых атомов), низкую степень коррозии нержавеющей аустенитных сталей.

Натриевый подслои целесообразно применять для обеспечения высокой степени выгорания (более 7% тяжелых атомов). В карбидном, карбонитридном и нитридном горючем наблюдается сегрегация плутония от центра к периферии. Трудности, связанные с большей, чем у окисного горючего, величиной распухания (1,6—2% на 10 000 Мет·сутки/м), могут быть, по мнению специалистов разных стран, разрешены путем различных конструктивных мер. На симпозиуме указывалось на необходимость расширения исследований этого вида горючего с целью накопления обширных данных о стойкости твэлов в условиях, характерных для быстрого энергетического реактора.

БИБИЛАШВИЛИ Ю. К.

## XI Международная конференция по явлениям в ионизованных газах

Конференция состоялась в Праге в начале сентября 1973 г. Она собирается один раз в два года. X Конференция проходила в Оксфорде (Великобритания) в 1971 г. XI Конференция была организована Институтом физики и физики плазмы Чехословацкой Академии наук, факультетами математики и физики Карловского университета и факультетами инженеров-электриков и инженеров-атомников Чешского политехнического университета.

В конференции приняли участие около 600 ученых из 26 стран.

Число оригинальных работ составляло ~ 500, и по традиции была принята репортерская система. Во второй половине каждого дня работало одновременно шесть секций, длившихся около 50 мин (30 мин занимало репортерское сообщение и около 20 мин дискуссия по докладам). Ежедневно работало 20—24 секции. Первая половина дня была отведена для обзорных докладов. В качестве лекторов Оргкомитет пригласил 13 наиболее видных ученых из различных стран (в том числе пять из социалистических государств).

Труды конференции издаются в двух томах: в первый том, который был напечатан к началу конференции и раздавался ее участникам, вошло 485 оригинальных сообщений; во второй том (предполагается издать его

к началу 1974 г.) войдут обзорные доклады и доклады, присланные в Оргкомитет после 1 мая 1973 г.

Конференция охватила очень широкий круг вопросов: элементарные процессы (включая химические реакции и поверхностные явления), электродные явления; различные стадии газового разряда и различные типы газовых разрядов; волны и неустойчивости в плазме; излучение плазмы; экспериментальные методы диагностики; взаимодействие электромагнитных волн и пучков заряженных частиц с плазмой.

Физика высокотемпературной плазмы на этот раз была представлена меньше, чем обычно, что, по-видимому, объясняется проведением в текущем году ряда конференций \*. Лишь две проблемы, которые интенсивно исследуются в Чехословакии (взаимодействие пучков заряженных частиц и электромагнитных волн с плазмой) были представлены достаточно полно. В обзорном докладе П. Шунка (Чехословакия) «Нелинейные эффекты в пучково-плазменных системах» и в докладах группы

\* См. «Атомная энергия», 1973, т. 35, с. 289; 447.



К. Юнгвирта (Чехословакия) и И. Ф. Харченко (СССР) подробно анализировались роль захваченных частиц и модуляции пучков в развитии разряда. Моделирование космических явлений (полярных сияний) с помощью пучково-плазменного разряда без магнитного поля проведено И. Ф. Харченко с сотрудниками.

В работах, посвященных взаимодействию ВЧ-волн с плазмой, основное внимание уделялось нелинейным процессам, приводящим к аномальной диссипации, впервые обнаруженной на опыте И. Р. Геккером и Г. М. Батановым (СССР). В новых экспериментах И. Р. Геккера исключено влияние стенок волновода на эффект поглощения волн. Анализ спектра рассеянного назад излучения выполнен Ф. Кроуфордом с сотрудниками (Великобритания).

Главной причиной аномальной диссипации большинство авторов считает параметрическую неустойчивость. Г. М. Батанов и К. А. Саркисян представили дополнительные экспериментальные свидетельства в пользу этого механизма.

Неоднородность на границе плазмы может приводить к ряду эффектов при взаимодействии с ВЧ-полем. Понимание этих эффектов чрезвычайно важно для лазерного нагрева плазмы до термоядерных температур. В докладе В. И. Карпмана с сотр. (СССР) были теоретически рассмотрены электростатические и магнитно-звуковые волновые пакеты в неоднородной плазме. Результаты экспериментов по отражению электростатических волн в неоднородной плазме представили А. Ратнер и др. (США). Из опытов видно, что длинноволновые колебания практически полностью отражаются от границы плазмы, тогда как колебания с длинами волн, меньшими характерного размера неоднородности, наоборот, практически полностью поглощаются на границе. Общие свойства токового движения в плазме, подвергнутой действию ВЧ-волн, были проанализированы Р. Клима (Чехословакия). Докладчик показал, что появление прямых токов в тороидальных системах с ВЧ-нагревом — всегда следствие сохранения обобщенного импульса.

Важное для интерпретации опытов с турбулентной плазмой наблюдение сделали Р. Франклин, Т. Смит и С. Хамбергер (Великобритания). Они показали, что наличие даже слабых крупномасштабных низкочастотных флуктуаций может привести к существенному уширению спектра плазменных колебаний и тем самым к маскировке других нелинейных процессов взаимодействия волн.

По-прежнему в центре внимания были вопросы стабилизации неустойчивостей, в частности дрейфовых волн. Так, в Центре ядерных исследований в Фонтене-о-Роз выполнены эксперименты (П. Броссие и др., Франция) по стабилизации электронных дрейфовых волн градиентом температур электронов, создаваемым с помощью локального нагрева плазмы внешним источником СВЧ-мощности. Другая возможность стабилизации была продемонстрирована в докладе С. С. Соболева (СССР): неустойчивость потенциальных колебаний в плазме Q-машины удалось подавить прямыми магнитно-звуковыми волнами. Заметное уменьшение коэффициента аномальной диффузии в экспериментах С. С. Соболева привлекло внимание специалистов, и в дискуссиях была отмечена возможность использования этого эффекта в ряде прикладных задач.

На секции электродных явлений в плазме газового разряда обсуждались вопросы эмиссии заряженных и нейтральных частиц, устойчивости электродных пятен и их влияния на характер пространственного протекания тока в межэлектродном зазоре. Из содержания

докладов и их обсуждения видно, что в настоящий момент представляется реальным использование катодов прямого и косвенного подогрева для создания пространственно однородной плазмы, используемой в газоразрядных лазерах.

В обзорном докладе В. Нигана (США) отмечено, что неустойчивости, возникающие на электродах и ограничивающие вклад электрической энергии в разряд, можно подавить, создавая турбулентность в потоке газа. Турбулентное перемешивание позволяет исследователям США увеличить рабочий объем CO<sub>2</sub>-лазеров с прожачкой и повысить рабочее давление смеси газов (N<sub>2</sub>, He, CO<sub>2</sub>) до 200 мм рт. ст.; применение электронных пучков для предионизации газа увеличивает мощность светового излучения, снимаемую с единицы объема, в ~ 10 раз и, что практически наиболее важно, позволяет работать при давлении газа  $\geq 1$  атм. В докладе был дан анализ кинетических процессов в CO<sub>2</sub>-лазерах, в частности влияния диссоциации CO<sub>2</sub> на эффективность генерации.

Большой прогресс достигнут сейчас в создании газовых лазеров для получения термоядерной плазмы коротким ( $\leq 10^{-9}$  сек) импульсом излучения. В ряде докладов советских ученых (В. Ю. Баранова, Г. А. Месяца, В. П. Смирнова, Р. И. Солоухина, В. Д. Письменного) были описаны импульсные лазеры, работающие на различных смесях газов CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He при повышенных давлениях с использованием электронных пучков с большой плотностью тока ( $> 10^2$  а/см<sup>2</sup>). Видимо, в скором времени на этой основе будут созданы лазеры с энергией излучения 10<sup>4</sup> Дж. Весьма перспективен для термоядерных исследований также лазер на молекулярном ксеноне Xe<sub>2</sub> ( $\lambda = 1730$  Å), впервые реализованный в 1970 г. Н. Г. Басовым с сотрудниками Дж. Жерардо и А. Джонсон (США) исследовали работу такого лазера при давлении ~ 10 атм и возбуждении релятивистским (~ 1,5 Мэв) электронным пучком с током ~ 250 а.

Успехи в создании мощных лазеров стали возможны благодаря более глубокому пониманию процессов, происходящих в низкотемпературной молекулярной плазме. В обзорном докладе М. З. Новгородова и Н. Н. Соболева (СССР) было подытожено современное состояние исследований в этой области, а для лазеров на CO<sub>2</sub> и СО показана справедливость простой модели, объясняющей инверсную населенность молекул электронными столкновениями. В дискуссии по этому докладу подчеркивалась необходимость тщательного исследования функции распределения электронов по скоростям, поскольку даже небольшие деформации в высокоэнергетичных хвостах могут сильно повлиять на скорости протекания процессов с участием электронов.

Образование плазмы при воздействии лазерного излучения на твердую или газовую мишень обычно объясняют с помощью теории многофотонной ионизации. Однако эта общепринятая точка зрения не является единственно возможной. Оригинальную теорию механизма пробоя и ионизации газа в фокусе лазерного излучения предложили канадский физик Е. Панарелла. Предположив существование некоторого нелинейного взаимодействия компонентов поля световой волны, он вместо обычного соотношения между частотой и энергией фотона  $\epsilon = h\nu$  ввел более общее:  $\epsilon = h\nu/[1 - \beta_{\nu} f(I)]$ , где  $f(I)$  — функция интенсивности света, а  $\beta_{\nu}$  — некоторый коэффициент, такой, что  $\beta_{\nu} f(I)$  заметно отличается от нуля только при очень высокой интенсивности света. На этом пути Е. Панарелла удалось получить великолепное согласие с экспе-



риментальными данными по пробое и ионизации, не прибегая к многофотонным или каскадным механизмам.

Новую информацию о спонтанных магнитных полях в лазерной плазме представили американские ученые А. Купер и Р. Бард. С помощью магнитных зондов они исследовали влияние давления газа на величину таких полей и обнаружили их пространственную периодичность.

Детальное изучение этого явления очень важно для понимания процесса образования лазерной плазмы и ее динамики.

Значительная группа работ на секции лазерной плазмы была посвящена спектрометрическим измерениям параметров лазерной плазмы с концентрацией электронов  $\geq 10^{19} \div 10^{20} \text{ см}^{-3}$  и температурой  $\geq 100 \text{ эв}$ . Для диагностики такой плазмы широко используются интенсивности и профили линий многозарядных ионов. Например, Н. Г. Васов с сотрудниками анализировали спектральные линии  $\text{Al}^{\text{XIII}}$  и  $\text{Mg}^{\text{XIII}}$ . В дальнейшем, по-видимому, потребуются линии даже 30-кратно ионизированных атомов.

Большое место в программе конференции занимали и другие спектроскопические методы диагностики. На секции спектральных линий речь в основном шла о штарковском уширении. Сейчас усилия многих лабораторий США, Франции и ФРГ сосредоточены на детальном сравнении расчетных и измеренных профилей спектральных линий для простейших атомных систем. Цель этих усилий — создание прочной основы для расчета параметров линий любых атомов и ионов с учетом как эффектов давления, так и эффектов теплового движения и турбулентных осцилляций. Пока же согласие теории и эксперимента даже для простейшего случая  $L_{\alpha}$  оставяло желать лучшего.

Новые измерения профиля  $L_{\alpha}$  в капиллярной дуге высокого давления, представленные В. Оттом и К. Беринджером (США), как будто бы лучше согласуются с существующими теоретическими данными, чем ранние измерения Г. Болда и В. Купера. Однако немонотонный характер асимметрии в крыльях линии, по-видимому, указывает на значительную радиальную неоднородность плазмы и нарушение условий локального термодинамического равновесия. Таким образом, вопрос о расхождении теоретических и экспериментальных результатов остается пока открытым. На секции были представлены также новые экспериментальные данные по штарковскому уширению ряда линий аргона и хрома, которые отличаются от расчетных приблизительно в два раза. Все это указывает на необходимость совершенствования теории Баранжера — Грима — Колба — Эртеля, основные положения которой в целом хорошо подтверждены экспериментом. Попытка расширить рамки этой теории путем учета теплового движения ионов сделана Д. Восламбером (Франция). В его работе, однако, совершенно не учтены эффекты вращения ионного поля.

С интересом была встречена работа А. В. Демура и Г. В. Шолоина (СССР), в которой впервые дано количественное объяснение наблюдаемому на опыте красным сдвигам бальмеровских линий в плотной плазме. Результаты этой работы представляют особый интерес для астрофизики. Использование эффекта поляризации внутри контура спектральной линии для анализа турбулентных шумов в разреженной плазме было описано в работе М. В. Бабыкина и др. (СССР). Оригинальный подход к анализу профилей водородных спектральных линий при наличии самопоглощения развит Л. Г. Голубчиковым и др. (СССР). В основе этого подхода лежит детальный анализ асимметрии линии.

Специальная секция была посвящена излучению континуума. Здесь оживленную дискуссию вызвала работа В. Виме (Бельгия) о природе континуума в видимой области спектра, излучаемого низкотемпературной плазмой благородных газов. Прецизионные эксперименты привели автора к выводу, что в ксеноне континуум имеет молекулярную природу и использование непрерывного спектра при измерении температуры электронов в таких разрядах недопустимо. Для вакуумного ультрафиолета до сих пор ощущается недостаток в эталонах для абсолютных измерений. В. Отт и К. Беринджер (США) предложили использовать для этих целей водородную капиллярную дугу с температурой электронов  $\sim 20\,000^\circ \text{K}$  и концентрацией  $\sim 2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Другой метод калибровки для ближнего ультрафиолета был представлен учеными ГДР. Наиболее важный результат спектроскопических исследований плотной плазмы, — пожалуй, накопление данных, указывающих на недостаточность модели локального термодинамического равновесия даже в условиях дуги или плазмотрона, не говоря уже о высокочастотных разрядах.

В области диагностики наиболее интересными были измерения, проведенные английскими учеными (М. Форест, К. Муроака, Н. Пинок), магнитных полей в разреженной высокотемпературной плазме по спектру рассеянного излучения рубинового лазера и применение П. Ричардсоном и В. Тозером (Великобритания) лазера на красителях для флуоресцентного анализа ничтожного количества примесей в плазме.

Вопросы плазмохимии также занимали значительное место на конференции. В обзорном докладе Г. Зур (ФРГ) четко обрисовал современное состояние исследований в этой области. Сейчас два плазмохимических процесса (получение ацетилена и озона) внедрены в производство и используются в коммерческих целях. В стадии внедрения находятся процессы получения различных цианидов, соединений азота с кислородом, гидразин и других продуктов реакций озонирующего типа. Весьма перспективным оказалось изучение процессов на поверхности металлов, граничащих с плазмой. Образование в этих условиях пленок с различными оптическими, механическими и электрическими свойствами может представлять интерес для ряда технологических разработок. Поверхности органических веществ при контакте с плазмой также испытывают сложные процессы полимеризации. Основные требования к плазмохимическим реакторам: возможно большая плотность реагирующих веществ, отсутствие контактов со стенками и достаточно высокий ресурс. На конференции было представлено несколько перспективных для плазмохимии установок: мощные стабилизированные СВЧ-разряды, дуга в тороидальном магнитном поле и впервые реализованная на опыте кольцевая стабилизированная дуга (В. Тиллер, ФРГ).

Изменению скорости химических реакций при отклонениях от термодинамического равновесия в плазме были посвящены работы групп Л. С. Полака (СССР) и И. Преиза (Чехословакия). Группа итальянских ученых из Центра по изучению химии плазмы (П. Капезутто и др.) представила результаты исследований химических процессов в СВЧ-разряде при средних давлениях (5—7 мм рт. ст.).

Метастабильные состояния атомов и молекул являются дополнительными источниками энергии. Они могут существенно влиять на кинетику распределения электронов и тем самым на кинетику остывания плазмы и скорости химических реакций. Эти вопросы были рассмотрены в обзорном докладе Ж. Делькруа, С. Фер-



рейра и А. Рикарда (Франция) и ряде оригинальных сообщений американских и французских ученых. Главное же внимание в плазмохимических исследованиях уделяется сейчас разработке методов контроля таких физических параметров, как температура и плотность электронов, парциальный состав, колебательная, вращательная и трансляционная температуры молекул, а также степень их диссоциации в разрядах.

В целом конференция при всей широте своей программы остается одним из главных форумов, куда уче-

ные представляют результаты новых методических и фундаментальных исследований в области плазменной науки. Показателем растущий интерес к плазменным явлениям со стороны физиков, занимающихся созданием мощных лазеров, и со стороны химиков, что, по-видимому, отражает современные тенденции развития науки и техники.

Следующую XII конференцию намечено провести в 1975 г. в Эйндховене (Нидерланды).

ПОЛИН Г. В.

## Совещание по применению новых ядерно-физических методов для решения научно-технических и прикладных задач

Современный ядерно-физический эксперимент характеризуется быстрым развитием новых методов, существенно расширяющих возможности измерений и повышающих их точность. Одновременно происходит совершенствование уже известных приборов и методик, сопровождающееся, как правило, их упрощением и удешевлением. Все это создает условия для эффективного применения ядерно-физических методов в смежных областях науки и техники и для использования их при решении важных народнохозяйственных задач.

Обсуждению новых возможностей, выяснению наиболее важных и перспективных направлений, консультациям о полученных результатах и проводимых исследованиях было посвящено совещание специалистов десяти стран — участниц ОИЯИ, проходившее в Дубне, в Лаборатории ядерных реакций, 20—23 ноября 1973 г.

Первоначально предполагалось, что совещание будет посвящено лишь методам активационного анализа, хотя они и занимали доминирующее положение в докладах и дискуссиях, совещание обсудило также другие ядерно-физические методы, перспективные с точки зрения их применения для решения актуальных народнохозяйственных задач в странах — участницах ОИЯИ. В совещании участвовало свыше 80 специалистов.

Первыми на совещании выступили польские и вьетнамские физики (Р. Дыбчиньски и Фам Зуи Хьен), сделавшие обзорные доклады о современном состоянии и перспективах развития работ по активационному анализу в институтах своих стран. Обзору работ Института ядерной физики АН УзССР, который является головной организацией нашей страны в области активационного анализа, был посвящен обстоятельный доклад А. А. Киста. С интересным сообщением об организации национального центра по активационному анализу выступил чехословацкий физик М. Крживанек.

В докладах и сообщениях специалисты приводили многочисленные примеры использования активационного анализа в геологии, металлургии, биологии, сельском хозяйстве, криминалистике и т. д. Многие из этих применений дали значительный экономический эффект.

Вместе с тем отмечалось, что, хотя в принципе метод активационного анализа сравнительно прост, разработка конкретных аналитических методик часто является довольно сложной задачей, требующей высокой квалификации и большой изобретательности. В значительной степени это объясняется недостатком интенсивных и дешевых источников излучений и их индикаторов, обладающих высоким разрешением по энергии, что услож-

няет разработку методик и увеличивает время их освоения. Другой недостаток заключается в том, что метод активационного анализа часто применяют для решения мелких задач, не дающих большого экономического эффекта, когда основное время затрачивают не на разработку методики, а на учет специфических особенностей рассматриваемой задачи.

Выбор наиболее важных и актуальных проблем для эффективного применения активационного анализа является сейчас одной из основных проблем, стоящих перед специалистами. Это подчеркивал в своем выступлении академик Г. Н. Флёрв, который выделил четыре направления, представляющих весьма перспективными: 1) вопросы экологии, 2) контроль чистоты материалов, 3) геологоразведка, 4) технологический контроль добычи полезных ископаемых.

Большой интерес вызвал доклад В. Н. Никитина о применении активационного анализа и радиоизотопных исследований на Норильском горно-металлургическом комбинате, где эти работы широко развернуты с 1970 г. на основе ядерного реактора РГ-1 с потоком нейтронов в центральном канале  $2,7 \cdot 10^{12}$  нейтр/сек·см<sup>2</sup>. Реактор имеет 11 экспериментальных каналов с системой пневмотранспорта, оснащен современными многоканальными анализаторами с полевыми и сцинтилляционными детекторами, установками совпадений и антисовпадений, электронно-вычислительными машинами. Нейтронно-активационный анализ выполняется в двух вариантах: радиохимическом с использованием долгоживущих изотопов и неdestructивным по короткоживущим излучателям. Продолжительность цикла радиохимического анализа на благородные металлы составляет 12—15 ч, инструментального — 10—30 мин при использовании короткоживущих изотопов и 5—7 суток при условии применения долгоживущих излучателей.

Об интересных применениях активационного анализа для определения примесей в особо чистых материалах сообщили физики из ГДР З. Низе и Х. Клейберг.

Несколько докладов было посвящено проблемам контроля загрязнения окружающей среды. Приведенные данные показывают, что для экспрессного многокомпонентного анализа среды на содержание вредных и опасных элементов требуются индикаторы излучений с разрешением  $\leq 1$  кэв, однако в ряде случаев важные результаты могут быть получены и с помощью менее чувствительной аппаратуры.

Участники совещания высказывали мнение о целесообразности организации лабораторий по контролю за чистой окружающей среды и другим актуальным