

## Конференции и совещания

### VI Европейская конференция по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы

С 30 июля по 4 августа в Москве проходила VI Европейская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу. В работе конференции приняли участие 553 делегата и 200 гостей из 22 стран мира, в том числе из США, Японии и других неевропейских стран.

Первое заседание конференции было посвящено памяти академика Льва Андреевича Арцимовича — признанного лидера термоядерных исследований в СССР и во всем мире. С воспоминаниями о Л. А. Арцимовиче выступили председатель отделения физики плазмы Европейского физического общества П. Ванденплас, акад. Я. Б. Зельдович (СССР), директор Калемской лаборатории (Великобритания) Р. Пиз, директор Принстонской лаборатории (США) М. Готлиб, один из ближайших сотрудников Л. А. Арцимовича С. В. Мирнов.

На утренних пленарных заседаниях было заслушано 16 обзорных докладов по различным проблемам физики плазмы, на вечерних заседаниях (работало параллельно три секции) — 153 оригинальных сообщения.

Около трети представленных работ связано с исследованиями на токамаках. С обзорными докладами на эту тему выступили акад. Б. Б. Кадомцев, Г. Фюрт (США), П. Ребю и Г. Лаваль (оба Франция).

Отметив успехи в получении плазмы с высокими параметрами на токамаках (плотность  $n_e = 7 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ , температура электронов  $T_e$  до 3 кэВ, температура ионов  $T_i$  до 600 эВ, параметр удержания  $n_e \tau$  до  $10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{сек}$ ) и в понимании ряда происходящих в токамаках процессов (неоклассическое время жизни ионов, обнаружение классического эффекта концентрации примесей на оси разряда), Б. Б. Кадомцев остановился на основных проблемах, стоящих перед исследованиями на токамаках. Доминирующим механизмом потери энергии является электронная теплопроводность, которая в 10—100 раз больше, чем предсказывает неоклассическая теория. Эту величину пытались описывать псевдоклассической формулой Л. А. Арцимовича, лишь весьма грубо соответствующей эксперименту. По мнению докладчика, необходим поиск новых путей теоретического описания электронной теплопроводности. С точки зрения моделирования условий будущего реактора большой интерес представляют эксперименты, когда ионы становятся бесстолкновительными (переходят из области «плата» в «банановый» режим). Однако попытка перейти в этот режим на установке Т-4 в ИАЭ им. И. В. Курчатова не увенчалась успехом, так как с увеличением разрядного тока частота ион-ионных столкновений тоже оказалась увеличенной из-за большого количества примесей с высоким зарядом ядра.

Другим препятствием, ограничивающим путь к высоким плотностям, является так называемая дестабилизирующая неустойчивость. Как показали исследования, проведенные в ИАЭ на установке Т-6, возникновению этой неустойчивости предшествует развитие винтовых модов. Нелинейная теория образования пустот в плазме токамаков, развитая Б. Б. Кадомцевым и О. П. Погуде, устанавливает связь между винтовыми модами и дестабилизирующей неустойчивостью и, по-видимому, дает наконец-то теоретическую основу для понимания происходящих процессов.

В интересном докладе Г. Фюрта рассмотрены последние результаты, полученные в Принстоне на установке АТС, и в их свете перспективы использования адиабатического сжатия и нейтральной инжекции. Использование адиабатического сжатия позволило в сравнительно малой установке АТС получить параметры плазмы ( $n_e \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ,  $T_e \approx 2,5 \text{ кэВ}$ ,  $T_i \approx 600 \text{ эВ}$ ) не хуже, чем в больших машинах Т-4 и ST. Первые эксперименты с инжекцией нейтрального пучка относительно малой мощности (30—45 кВт при энергии частиц 15 кэВ) показали отсутствие вредных эффектов и небольшой, но соответствующий расчетам эффект нагрева ионов. Докладчик указал на преимущество объединения адиабатического сжатия с нейтральной инжекцией: на облегчение проблемы проникновения пучка нейтралов в плазму, если инжекция проводится до сжатия в плазму малой плотности (в противном случае для реакторных систем необходимы нейтральные пучки мегавольтных энергий, получение которых весьма затруднительно), на эффективное умножение мощности инжекции при адиабатическом сжатии, отрыв плазмы от стенок и облегчение проблемы примесей и переразрядки пучка. Основной недостаток подобных систем — увеличение в три раза энергии тороидального поля — представляется не столь существенным ввиду необходимости увеличения объема поля для размещения дивертора. Рассматривая возможность «мишенного» варианта реактора (инжекция пучка быстрых дейтронов в тритиевую плазму токамака с электронной температурой  $\sim 10 \text{ кэВ}$ ), докладчик отметил, что на основе этого принципа реактор нулевой мощности может быть построен уже при размерах, принятых для следующего поколения токамаков (Т-10, PLT). Этот принцип в особенности при использовании blankets с делящимся материалом кажется самым многообещающим для скорейшей демонстрации возможности получения полезной энергии с помощью управляемого синтеза.

О первых экспериментах на крупнейшем в настоящее время токамаке ТФР (Фонтенэ-о-Роз, Франция) рассказал в своем докладе П. Ребю. Токамак ТФР имеет



большой радиус 98 см, радиус камеры по диафрагме 20 см, магнитное поле до 60 кГс, максимальный ток в плазме до 400 кА, длительность разряда до 0,5 сек. До настоящего времени эксперименты проводились с полями до 40 кГс и токами до 200 кА. При плотности  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  достигнуты электронные температуры 2—3 кэВ, температура ионов порядка 600 эВ, что хорошо согласуется с результатами предшествующих экспериментов на других установках. Предварительные данные указывают на постепенное накопление примесей в плазме, а также на возникновение турбулентности в центре шнура, где запас устойчивости  $q < 1$ , что приводит к понижению электронной температуры и уменьшению энергетического времени жизни в длинных разрядах после 150-й миллисекунды разряда.

Первые результаты получены еще на ряде новых установок типа токамак. Начаты эксперименты по нейтральной инжекции на установке «Ормак» (Ок-Ридж, США). Работает в режиме токамака с нейтральной инжекцией установка «Клео» (Калэм, Великобритания). Получены первые экспериментальные данные на токамаке «перстенькового» типа в ИАЭ. Результаты, однако, носят весьма предварительный характер. Достаточно подробные данные появятся, по-видимому, лишь в будущем году. Следует отметить две четко проявляющиеся тенденции: во-первых, растущую популярность нейтральной инжекции, которая уже используется или планируется в большинстве новых экспериментов. Данные, полученные до сих пор, соответствуют малым (по сравнению с омическим нагревом) мощностям инжекции и их можно интерпретировать как «отсутствие вредных эффектов». Ближайшие эксперименты, в первую очередь на установке «Ормак», должны продемонстрировать эффекты нейтральной инжекции при больших мощностях. Во-вторых, большое значение имеют примеси, особенно при длинных разрядах и высоких параметрах плазмы (Т-4, ТФР, «Ормак»), и поэтому растет интерес к экспериментам с дивергторами. Эта тенденция должна быть учтена уже в настоящее время при проектировании крупных установок следующего поколения.

Если исследования по токамакам развивались в последнее время весьма интенсивно с большим строительством новых установок, то в других традиционных областях термоядерных исследований наблюдается относительное затишье. Исследования на стеллараторах указывают на классическое или близкое к нему удержание. По-видимому, действительно новых и важных результатов в этой области можно ожидать лишь после сооружения больших установок, планируемых и сооружаемых в настоящее время, таких как «Вендельштейн-VII» (Гархинг, ФРГ).

Эксперименты с открытыми ловушками в течение прошедшего года тоже не дали существенно новых результатов. Работы, проведенные в ИАЭ им. Курчатова, а также в Ливерморской лаборатории (США), вопреки предсказаниям упрощенной теории показали принципиальную возможность устойчивого существования столкновительной плазмы в пробочной ловушке. Последняя серия работ М. С. Иоффе с сотрудниками (ИАЭ) подтвердила отмеченную Р. Постом (Ливермор, США) роль холодной плазмы в подавлении конусных неустойчивостей в открытых ловушках. Однако эксперименты по длительному поддержанию устойчивости столкновительной плазмы с помощью нейтральной инжекции, проводимые на установке 2X-II (Ливермор), еще не дали окончательного ответа. На конференции сообщено об инжекции пучка нейтралов с энергией

20 кэВ и током 10 А в плазму, полученную на установке 2X-II путем адиабатического сжатия плазменного сгустка. Эти эксперименты находятся в настоящее время на том же уровне, как и инжекция в токамаке: вредных эффектов нет, для положительных — мощность инжекции слишком мала. Для поддержания в пробочной ловушке в течение всего времени инжекции плазмы с плотностью порядка  $10^{13} \text{ см}^{-3}$  и ионной температурой 20 кэВ необходимо увеличить мощность инжекции на порядок. Инжектор на ~200 экв. А готовится в настоящее время.

Эксперименты с тороидальными пинчами различной формы для получения плазмы с высоким  $\beta$  (отношением давления плазмы к давлению магнитного поля) проводятся в Лос-Аламосской лаборатории США и в ряде лабораторий Европы. Эти эксперименты, как правило, сравнительно легко позволяют получить достаточно горячую плазму, однако наблюдаемые времена жизни еще очень малы и лежат в микросекундном диапазоне. Проведенные в Лос-Аламосе и Гархинге (ФРГ) эксперименты показали возможность получения бестоковых равновесных тороидальных конфигураций плазмы с высоким  $\beta$ . Основной проблемой является неустойчивость этих конфигураций относительно моды  $m = 1$ . Показана принципиальная возможность стабилизации этой моды динамическими методами и обратными связями, но применение этих методов в технических масштабах связано с огромными трудностями. Поэтому в настоящее время планируются эксперименты с весьма малым радиальным сжатием плазмы при нагреве, в которых должен проявиться эффект стабилизации моды  $m = 1$  проводящей стенкой. Из токовых конфигураций наиболее перспективной представляется конфигурация бэлт-пинча, фактически приближающаяся к перстеньковому токамаку. В экспериментах с бэлт-пинчем (Гархинг) наблюдались  $\beta$  порядка 0,5 при температуре 10 эВ и временах существования плазменного образования до 100 мксек. Сильных неустойчивостей не наблюдалось, и время существования плазмы было, по-видимому, ограничено классической диффузией. Два новых эксперимента этого типа: TENQ в Юлихе (ФРГ) и Бэлт-пинч II в Гархинге сооружаются в настоящее время и начнут работать в 1974 г. С их помощью физики надеются достичь температуры около 1 кэВ и времени удержания до 1 мсек.

На этой конференции впервые широко представлены новые направления термоядерных исследований: электронные пучки и сверхмощные лазеры. Использованию лазеров в термоядерном синтезе посвящено два обзорных доклада из США. Л. Вуд из Ливерморской лаборатории привел результаты расчетов по схеме сверхсилового сжатия вещества вследствие сферической имплозии. К. Брюкнер (США) рассказал о работах, проводимых по лазерному синтезу фирмой KMS, и о лазерной системе, дающей в 3-нсек импульсе 840 дж и способной при некоторой форсировке ламп накачки дать до 1400 дж в импульсе. Облучение мишени проводится с двух сторон. Готовится система для профилирования переднего фронта импульса. Сообщено также о первых экспериментах с этим лазером, в которых наблюдались нейтроны и жесткие  $\gamma$ -кванты. Наблюдаемый выход нейтронов (несколько сот за 3 нсек при энергиях 100—200 дж) находится в согласии с численными расчетами. Согласно тем же расчетам электронная температура должна быть порядка 2 кэВ, а ионная — около 500 эВ. Никаких экспериментов по сжатию до сих пор не было.



Обзорный доклад по релятивистским электронным пучкам сделан Р. Суданом (Корнельский университет, США). Параметры электронных пучков, достигнутые в настоящее время, поистине впечатляющи: энергия до 15 Мэв, ток более  $10^6$  а, энергия в импульсе до 3 Мдж, мощность  $\sim 10^{13}$  вт, плотность тока до  $5 \cdot 10^6$  а/см<sup>2</sup>, длительность импульса 100 нсек.

Эти параметры в сочетании с высоким к. п. д. ускорителя делают электронные пучки достойным соперником сверхмощных лазеров при использованиях в схемах со сверхсжатием, а также обещают электронным пучкам много других применений в управляемом синтезе: для создания плазмы, ее нагрева, генерации полей с минимумом  $B$  в тороидальных конфигурациях. Основные проблемы использования электронных пучков для сверхсильного сжатия связаны с необходимостью укоротить импульс до времени, меньшего 10 нсек, при сохранении его энергии, а также сфокусировать пучки до плотностей тока  $10^8$ — $10^9$  а/см<sup>2</sup>. При использовании пучков в схемах магнитного удержания основные проблемы связаны с их инжекцией и захватом в тороидальное магнитное поле. В настоящее время

специалисты ищут решения всех этих проблем. В частности, для фокусировки весьма полезны эффекты пинчевания сильноточных пучков, введение плазмы в диод, возможно использование сходящихся внешних полей. Сильное собственное магнитное поле пучка позволяет разработать оригинальные методы инжекции в тороидальное магнитное поле, когда поле пучка на короткое время меняет общую топологию поля и позволяет захватить пучок в тороид. В заключение Р. Судан указал, что пришло время всерьез рассмотреть генерацию сильноточных ионных пучков, используя соответствующую модификацию уже развитой технологии: подавление электронной эмиссии поперечным магнитным полем, создание ионно-эмиттирующих плазменных поверхностей с помощью лазеров и т. д.

Конференция не принесла неожиданностей. Решающие эксперименты еще впереди.

Следующая VII Европейская конференция по физике плазмы и управляемому синтезу состоится в Лозанне (Швейцария) в сентябре 1975 г.

ЧУЯНОВ В. А.

## Семинар по сварке при монтаже оборудования АЭС

С 31 мая по 2 июня 1973 г. Главтеплоэнергомонтаж и Информэнерго Министерства энергетики и электрификации СССР провели на Белоярской АЭС им. И. В. Курчатова семинар, посвященный проблемам сварки при монтаже оборудования атомных электростанций. В семинаре участвовали представители институтов и монтажных организаций Минэнерго и ГКАЭ СССР.

В. А. Казаров (Главтеплоэнергомонтаж) рассказал о задачах Минэнерго СССР по вводу энергетических мощностей на АЭС в IX пятилетке и вытекающих отсюда задачах монтажных организаций.

Доклады С. А. Белкина и В. В. Шефеля (Оргэнергострой), В. П. Тавровского (Центроэнергомонтаж) и В. И. Гриненко (ГКАЭ СССР) были посвящены проблемам автоматизации сварочных работ при монтаже оборудования АЭС. Представители Оргэнергостроя доложили о своих результатах по разработке технологии и созданию автоматов для сварки трубопроводов АЭС, а также представили данные, основанные на анализе производственного опыта и лабораторных исследований, о необходимом уровне механизации сварочных работ и типах автоматов, которыми должны быть оснащены службы сварки монтажных организаций при сооружении АЭС. В. И. Гриненко поделился богатым опытом монтажных организаций ГКАЭ по проектированию, изготовлению и эксплуатации автоматов для сварки трубопроводов АЭС. Центроэнергомонтаж сообщил о применении автомата своей конструкции для сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром  $560 \times 32$  мм из стали ОХ18Н12Т при монтаже Ново-Воронежской АЭС.

Г. М. Гинзбург (Центроэнергомонтаж) рассказал об опыте применения ручных методов (электродугового и аргоно-дугового) сварки трубопроводов из аустенитных сталей на АЭС, особо подчеркнув меры, направленные на повышение сплошности металла шва.

Интересные сообщения сделали С. А. Гельперн (Севзапэнергомонтаж), В. В. Цыганков (Востокэнергомонтаж) и В. А. Павлаков (ГКАЭ) об опыте сварки при

монтаже оборудования и трубопроводов Кольской, Билибинской и Ленинградской АЭС. Докладчики подробно осветили организацию работ по сборке, сварке и контролю качества сварных соединений, рассказали о структуре служб сварки и контроля, а также об особенностях технологии сварки отдельных узлов.

В докладе В. Б. Богода (Энергомонтажпроект) о методах контроля качества сварных соединений оборудования АЭС в монтажных условиях были рассмотрены области применения различных методов неразрушающего контроля.

Представитель Южтеплоэнергомонтажа С. Ш. Ройтенберг сообщил о проводимых трестом экспериментах по совершенствованию технологии сварки применительно к монтажу оборудования Армянской и Чернобыльской АЭС.

Результаты эксплуатации сварных соединений оборудования ряда отечественных АЭС обобщил Ф. А. Хромченко (Всесоюзный теплотехнический институт). Он сделал подробный анализ дефектов металла и сварных соединений оборудования Ново-Воронежской АЭС.

После обмена мнениями участники семинара наметили конкретные мероприятия, направленные на повышение качества монтажа АЭС и уменьшение трудоемкости сварки и контроля. Основное направление усовершенствования должно заключаться в максимальной механизации сварки, особенно трубных систем. Для этого необходимо организовать на одном из заводов Минэнерго СССР изготовление специальных сварочных автоматов и источников питания, а также расширить проектно-конструкторскую и исследовательскую базу. Наряду с улучшением методов контроля качества сварных соединений, разработкой и внедрением технологии и средств дефектоскопии, повышающих надежность, оперативность и производительность контроля, должны быть установлены технически обоснованные нормы по объему контроля и оценке качества сварных соединений оборудования АЭС.

ЯКОБСОН С. С.