

потоках мощности в короне развиваются коллективные эффекты. Однако, предсказываемого теорией сильного отражения падающего света в этих условиях не наблюдалось.

Симметрия сжатия была установлена в экспериментах, когда в D — T-смесь добавляли небольшое количество вещества с большим Z. Тогда при асимметрии падающего потока меньшей 10% в стадии максимального сжатия интенсивное рентгеновское свечение жатой сердцевинки было симметричным и свидетельствовало об отсутствии перемешивания материала оболочки с D — T-смесью. Проведены измерения зависимости степени сжатия оболочкой от асимметрии падающего потока света. Эти зависимости были сопоставлены с результатами двумерного численного расчета. Такое сопоставление показало, во-первых, что закон теплопроводности и величина коэффициента теплопроводности в короне соответствует классическим и, во-вторых, если существует самогенерация магнитных полей в ко-

роне, то величина магнитного поля достаточно мала и не влияет на коэффициент теплопроводности.

Главное утверждение К. Бракнера, сделанное на основе расчетов и экспериментов, проведенных в KMS, состоит в том, что выполненные эксперименты моделируют процесс полномасштабного термоядерного взрыва. Такие газодинамические параметры, как температура короны, степень сжатия, поток падающей мощности лазерного света будут сохраняться в крупномасштабном взрыве. Увеличение массы мишени требует пропорционального увеличения энергии. Однако, для достижения положительного выхода при десятипроцентной эффективности лазера требуется иметь в импульсе наносекундной длительности не менее сотни килоджоулей.

Таким образом, успех в программе получения термоядерной реакции с помощью лазера существенно будет зависеть от прогресса лазерной техники и повышения эффективности лазеров.

РУДАКОВ Л. И.

V Конференция МАГАТЭ по исследованию в области физики плазмы и управляемого синтеза

11—15 ноября 1974 г. в Токио проходила V Конференция МАГАТЭ по исследованиям в области физики плазмы и управляемого термоядерного синтеза. В ней участвовали около 500 делегатов более чем из 20 стран мира, а также множество гостей и наблюдателей. Было сделано 47 репортерских сообщений, обобщивших свыше 180 работ, и несколько индивидуальных докладов.

Наибольший интерес в последние годы вызывают исследования на токамаках. Им было посвящено 62 работы (26 экспериментальных, 30 теоретических и 6 инженерных проектов термоядерного реактора). Экспериментальные работы можно условно разделить на две группы: а) эксперименты на установках возрастающих масштабов и б) новые методы нагрева плазмы и диагностики, позволяющие «развязать» параметры плазмы и более детально исследовать физику протекающих процессов.

К работам первой группы относятся эксперименты на французском токамаке TFR — самом крупном из существующих в настоящее время. В этой установке с магнитным полем 50 кэс и диаметром плазменного столба 40 см достигаются разрядные токи до 300 кА при длительности разряда до 0,5 сек. Средняя плотность плазмы $4 \cdot 10^{13}$ см⁻³, средняя температура электронов 1 кэВ (в центре до 2,5 кэВ), температура ионов водорода в центре 1 кэВ, энергетическое время удержания до 17 мсек. Исследования зависимостей параметров плазмы от разрядного тока показали, что энергетический баланс для ионного компонента правильно описывается неоклассической теплопроводностью и перезарядкой. Температура ионов монотонно растет с ростом разрядного тока. Однако ожидавшегося существенного роста электронной температуры и энергетического времени жизни с увеличением тока выше 200 кА не происходит. Является ли обнаруженное насыщение зависимостей от тока первым признаком будущих затруднений или еще не найдены надлежащие режимы работы при больших токах, в настоящее время не ясно. Другой загадкой, которую задали эксперименты на TFR, является отсутствие накопления примесей на оси разряда, которое согласно классическим представлениям и экспериментальным результатам токамака T-4 следовало ожи-

дать при столь больших длительностях разряда. На TFR, однако, эффективный заряд не возрастает выше четырех. Большой интерес представляет анализ аварии на TFR в июне 1973 г., когда во время разряда при 150 кА в плазме плотностью $6 \cdot 10^{12}$ см⁻³ была прожжена стенка вакуумной камеры. Оказалось, что при плотностях ниже 10^{13} см⁻³ неустойчивость на «убегающих» электронах приводит к генерации электронов с энергией до 50 кэВ, запертых между локальными пробками, возникающими из-за неоднородности тороидального поля между катушками. В результате дрейфа этих электронов в неоднородном поле происходит их выброс на стенку. Выделение энергии при этом локализовано на площади около 1 см² и достигает 200 Дж за разряд, что достаточно для разрушения стенки толщиной 0,5 мм.

Из работ второй группы в первую очередь следует отметить, по-видимому, эксперименты по электронно-циклотронному нагреву на установке ТМ-3 (ИАЭ), где удалось получить отношение давления плазмы к давлению магнитного поля тока $\beta_{\text{пол}}$ существенно больше единицы, показав тем самым, что наблюдавшееся ранее универсальное соотношение $\beta_{\text{пол}} = 1$ определяется физикой омического нагрева, а не физикой удержания.

Нагрев с помощью нейтральной инжекции исследовался на двух токамаках «Ормак» (Ок-Ридж, США) и АТС (Принстон, США). Во всех случаях при тангенциальной инжекции вдоль направления тока наблюдается нагрев в хорошем соответствии с предсказаниями теории. При инжекции навстречу току в «Ормаке» нагрев не наблюдается и заметно общее ухудшение параметров плазмы. Причиной является, по-видимому, плохое удержание инжектируемых ионов и их выход на стенку с последующим выделением газа и примесей. Это подтверждается тем, что инжекция навстречу току при меньшей энергии частиц, когда удержание лучше, в АТС проходит успешно. Нормальная инжекция, когда можно ожидать еще более плохого удержания быстрых ионов, запираемых в локальных пробках, и на АТС не дает положительных результатов.

Эксперименты, выполненные на японских токамаках JFT-2 и JFT-2A, были посвящены взаимодействию плазмы со стенками. На JFT-2 для выяснения роли диафраг-

мы в поступлении примесей, формировании разряда и равновесии плазмы были проведены эксперименты с подвижной диафрагмой. Однако скорость открывания диафрагмы, достигавшая 9 м/сек, оказалась недостаточной: граница плазмы всегда успевала смешаться за диафрагмой благодаря диффузии. Токамак JFT-2A предназначен для исследования осесимметричного дивертора. Эксперименты на этой машине начались перед самой конференцией, и единственное, что пока можно утверждать, это то, что дивертор не мешает формированию разряда.

Следует отметить, что примеси в токамаке явились одной из основных тем теоретических исследований. На конференции были представлены подробные расчеты поступления и ионизации примесей, а также предлагались различные методы их удаления, например с помощью ВЧ-полей.

Экспериментальные результаты, полученные на стеллараторах, не принесли неожиданностей. Как в Харькове, так и в Гархинге (ФРГ) было показано, что потери частиц описываются неоклассической теорией, а перенос тепла увеличен и подчиняется, как и на токамаках, псевдоклассической теории. Было показано, что теплоперенос пропорционален квадрату ларморовского радиуса электронов, вычисленного по полному пологоидальному полю, т. е. включая поле винтовых обмоток, так что вращательное преобразование, добавляемое винтовыми обмотками, улучшает удержание. Это позволяет с оптимизмом ожидать результатов экспериментов на новых больших стеллараторах, сравнимых по размерам с токамаками, которые должны вступить в строй в ближайшем будущем.

Аналогичное положение наблюдается и с открытыми ловушками. Ожидалось, что перед самой конференцией вступит в строй в Ливерморской лаборатории (США) новая большая установка 2XII-B с инжекцией в мишенную плазму, приготовленную адиабатическим сжатием, мощного пучка атомов дейтерия с энергией 20 кэВ и интенсивностью 600 а. Во время конференции установка находилась в стадии физического пуска, так что первые результаты, которые во многом определяют термоядерное будущее этого направления, должны появиться в 1975 г.

Много работ было посвящено системам с большим β : тороидальным θ -пинчам и различным комбинациям $Z - \theta$ -пинчей. В качестве общего результата можно сказать, что во всех случаях теми или другими методами удается получить тороидальное равновесие при больших β , в том числе и в бестоковых системах («стеллараторы с большим β »). Дальнейший прогресс будет зависеть от успехов в борьбе с неустойчивостями. Остановимся более подробно на результатах крупнейшего из экспериментов такого типа — на установке «Спиллак» (Лос-Аламос, США). «Спиллак» — это θ -пинч, замкнутый в торе радиусом 4 м. Первые эксперименты на замкнутом торе были завершены как раз к началу конференции. Для компенсации тороидального дрейфа в «Спиллаке» используется комбинация гофрированного ($l = 0$) и винтового ($l = 1$) магнитных полей, получаемых путем специального профилирования стенок катушек θ -пинча. Такая комбинация позволяет получить тороидальное равновесие и устранить дрейф плазмы наружу по радиусу тора. Время жизни 6—10 мсек определяется неустойчивостью первого азимутального мода $m = 1$. Высшие моды отсутствуют. Для стабилизации мода $m = 1$ в настоящее время подготовлена магнитная система обратной связи. Другим методом стабилизации длинноволновых колебаний мог бы явиться отказ от адиабатического сжатия как метода

нагрева и переход к ударному нагреву. В этом случае плазма занимала бы большую долю камеры и стабилизирующее влияние металлической стенки на моду $m = 1$ должно быть достаточно для устойчивости. В настоящее время проводятся исследования такого метода нагрева на линейной системе.

На данной конференции, в отличие от прошлых, очень большое внимание было уделено микровзрывам с помощью сверхмощных лазерных и релятивистских электронных пучков. На конференции были впервые сообщены результаты расчетов лазерного сжатия многослойных мишеней. Такие сложные мишени не изменяют требований на полную энергию лазерного импульса, однако существенно уменьшают необходимую пиковую мощность и позволяют отказаться от сложного профилирования мощности импульса во времени.

В докладе исследовательской группы фирмы KMS (США) описаны эксперименты по сжатию D — T-мишени со стеклянной оболочкой. Полые стеклянные шарики диаметром 30—700 мк, толщиной стенки 0,5—12 мкм, заполненные D — T-смесью под давлением до 100 атм, сферически симметрично сжимались с помощью двух лазерных пучков, отраженных от эллипсоидальных зеркал. Мишень подвешивалась в общем фокусе двух зеркал на нити из окиси алюминия диаметром 3 мк. Энергия лазерного луча, подведенная к мишени, достигала 240 Дж. Желаемая форма импульса подбиралась сложением ряда импульсов длительностью 30 псек, задержанных на разные отрезки времени. Ширина полного импульса по уровню половинной мощности составляла от 0,03 до 1,0 нсек. Мощность излучения на поверхности мишени достигала $4 \cdot 10^{15}$ Вт/см². Наилучшие результаты были получены при диаметре мишени около 70 мк с толщиной стенки $\sim 0,9$ мк и давлении D — T-смеси 13—18 атм. При этом на мишень попадало ~ 50 Дж, из которых около 10 Дж поглощались. В этих условиях согласно измерениям мягкой части рентгеновского спектра температура плазмы в мишени достигала $\sim 1,3$ кэВ. Рентгеновские фотографии с помощью камеры-обскуры свидетельствуют о пятикратном уменьшении диаметра мишени, т. е. о 125-кратном объемном сжатии. В каждом импульсе генерируется до $4 \cdot 10^5$ нейтронов. Сжатия температуры и выход нейтронов достаточно хорошо согласуются.

Большое число работ, выполненных в СССР, США, Японии, Франции и Великобритании, было посвящено исследованию различных нелинейных явлений, происходящих при взаимодействии мощных световых пучков с плазмой. Общий вывод этих работ можно сформулировать следующим образом: в соответствии с теоретическими предсказаниями аномальное отражение и поглощение, генерация высших гармоник и быстрых частиц и другие нелинейные эффекты наблюдаются как в модельных экспериментах с «редкой» плазмой и СВЧ-волнами, так и непосредственно при облучении мишени мощными световыми пучками, однако вредные для термоядерных экспериментов последствия этих эффектов, по-видимому, не столь существенны, как это казалось на основе ранних теоретических работ.

Эксперименты с релятивистскими электронными пучками еще находятся на более ранней стадии, чем лазерные работы. Однако доложенные на конференции успехи по фокусировке пучков (Сандиа, США; ИАЭ, СССР) позволяют надеяться, что в ближайшее время этот метод будет серьезно конкурировать с лазерным сжатием. О первых экспериментах по обжатию полый золотой сферы с помощью электронного пучка было сообщено в докладе лаборатории Сандиа (США). Оказалось, что достаточно хорошую симметрию сжатия можно полу-

чить даже с помощью только одного пучка. В настоящее время имеется возможность проводить эксперименты с пучками мощностью до 10^{12} вт, что на один — два порядка меньше, чем нужно для проверки критических вопросов физики термоядерного поджига. Для достижения столь больших мощностей потребуются, по-видимому, синхронизированные многоканальные системы. В лаборатории Сандиа сооружается ускоритель с шестью синхронизованными формирующими линиями на 10^{13} вт при энергии 1—3 Мэв.

В целом конференция показала, что термоядерные исследования успешно развиваются во всех направлениях и всюду вступают, или уже вступили, в стадию критических экспериментов по определению термоядерного «будущего» того или иного подхода.

Следующая конференция МАГАТЭ по физике плазмы и термоядерным исследованиям будет создана в Мюнхене (ФРГ) в 1977 г. Таким образом, решено проводить конференции с интервалом не в четыре, а в два года.

ЧУЯНОВ В. А.

Совещание по специализации производства ускорителей

В ноябре 1974 г. в Варшаве состоялось совещание по разделению труда в разработке и производстве ускорителей на низкие и средние энергии для промышленности, медицины и научных исследований. В совещании участвовали специалисты ГДР, Польши, СССР, Чехословакии и представители «Интератоминструмента».

Участники совещания обменялись информацией о типах ускорителей, разрабатываемых и выпускаемых в ряде социалистических стран (см. таблицу), проанализировали технические параметры ускорителей и возможности повышения их уровня, рассмотрели рекомендации о международном социалистическом разделении труда в области разработки и производства ускорительной техники.

Анализ технических параметров показал, что выпускаемые и разрабатываемые ускорители в основном соответствуют требованиям промышленности и медицины.

Совещание рекомендовало повышать энергии и интенсивности бетатронов, уменьшать размеры и вес линейных ускорителей (особенно дефектоскопических), увеличивать выход нейтронов нейтронных генераторов в 5—10 раз (с $2 \cdot 10^{11}$ до 10^{12} нейтр./с). Была отмечена заинтересованность в микротронах для дефектоскопии и медицины.

По мнению участников совещания, назрела необходимость установить международное разделение труда в проектировании и производстве ускорителей на низкие и средние энергии по следующей номенклатуре: бетатроны В-30-S (Польша), В5М-25 (СССР), В-2-10(100) и В-10 (Чехословакия); линейные ускорители ЛУЭ-8-5, ЛУЭ-8-5В, ЛУЭ-10-2Д, ЛУЭ-15М; микротрон СТ; нейтронный генератор НГ-150И; ускорители прямого действия «Электрон» и компактный циклотрон (СССР).

ЗОЛИНОВА Л. Г.

Ускорители на низкие и средние энергии, выпускаемые и разрабатываемые в социалистических странах

Страна	Модель, тип	Назначение	Основные параметры		Дополнительные сведения	Состояние
			Энергия, МэВ	Интенсивность, доза излучения		
ГДР	Прямого действия EVA-500	Облучение в вакууме	0,020—0,040	500 мА, 30 мрад при 2 м/с		Производится для внутренних потребностей
Польша	Прямого действия EVA-200	Облучение в вакууме	0,022	Два излучателя по 160 мА, 8 мрад при 1 м/с		Разработка будет закончена в 1976 г.
	Бетатрон В-30-S	Активационный анализ	8—34	100 Р/мин·м (γ-излучение)	Передвижной рентгенографический	Производится
	Бетатрон	Медицина	34	150 Р/мин·м (γ-излучение), 1000 Р/мин·м (электроны)	Передвижной терапевтический	Разработка будет закончена в 1976 г.
	Линейный	Физические исследования	4—8		Ускоритель со стоячей волной	Разрабатывается
СССР	Микротрон с прямолинейными промежуточными (рейстректовыми)	Активационный анализ	15	50 мкА	Может быть применен в рентгенографических целях	Разрабатывается
	Прямого действия «Электрон»: модели 3,4 и «Аврора»	Радиационная химия, стерилизация, дефектоскопия, активационный анализ	0,3—0,7	1—20 мА	Имеют местную биологическую защиту и могут быть размещены в обычных производственных помещениях	Производятся