

Солнечной активностью; 36-летний — климатическими изменениями.

В докладе П. Повинца (ЧССР) рассмотрены возможности изучения солнечной активности в прошлом на основании измерения концентрации космогенных изотопов в лунных образцах. Лунные образцы (как скальные, так и песчаные) могут быть использованы для оценки вариации космического излучения и солнечной активности в прошлом. Анализ данных позволил автору предположить вариации солнечной активности в прошлом.

Большой интерес и оживленную дискуссию вызвал доклад Б. М. Владимирского о связи между явлениями на Солнце и в биосфере. Анализ результатов много-

численных экспериментов показал, что естественное электромагнитное поле Земли в диапазоне низких и особенно сверхнизких частот является важным экологическим фактором, и поэтому оно должно учитываться в современной биометеорологии и климатической медицине. В связи с тем, что возмущения электромагнитного поля Земли протекают квазипериодически, важную роль в реализации связи биологических показателей с солнечной активностью играют явления типа принудительной синхронизации биоритмов.

На закрытии семинара выступили С. Пинтер (ЧССР), Е. Барге (ФРГ) и Г. Е. Кочаров (СССР).

КОЧАРОВ Г. Е.

Научно-технические связи

Исследования по управляемому термоядерному синтезу и физике плазмы в Англии

В соответствии с долгосрочной программой научно-технического сотрудничества с 20 по 31 октября 1976 г. в Великобритании находилась делегация ГКАЭ СССР, изучавшая состояние исследований по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (УТС). В ходе визита она посетила Калэмскую лабораторию УАЭ Великобритании, лаборатории физики плазмы Оксфордского университета и Лондонского имперского колледжа, лаборатории высоковольтной техники и газового разряда Ливерпульского университета, отдел технической сверхпроводимости лаборатории им. Резерфорда и электротехническую фирму «Брентфорд электрик».

Основное внимание было уделено знакомству с состоянием и перспективами работ по УТС в Калэмской лаборатории, где сосредоточены практически все крупные программы по УТС и физике плазмы (за исключением работ по лазерному термоядерному синтезу). Ее штат насчитывает 825 человек, из них 260 научных сотрудников и дипломированных инженеров. Бюджет лаборатории в 1976 г. составлял 8,2 млн. ф. ст.

В Калэме делегация получила подробную информацию о ходе исследований на основных экспериментальных установках (табл. 1), о теоретических исследованиях, о работах по инженерным проблемам УТС, о со-

Характеристики основных термоядерных установок Калэмской лаборатории

Таблица 1

Название и тип установки	Основные размеры, см *	Магнитное поле, кГс	Плотность плазмы, см ⁻³	Температура, эВ		Время удержания плазмы, с	β **
				электронная	ионная		
CLEO, стелларатор	42; 90	< 20	2,5 · 10 ¹³	350	150	2 · 10 ⁻³	3 · 10 ⁻³
DITE, токамак	27; 117	28	3 · 10 ¹³	1000	350	5 · 10 ⁻³	~ 10 ⁻²
HBTX I пинч с реверсным полем	6; 100	10	1 · 10 ¹⁶	< 100	< 100	4 · 10 ⁻⁵	0,3—0,5
LEVITRON, мультиполь	10; 30	7	1 · 10 ¹²	~ 10	~ 10	2,5	< 10 ⁻⁴
TORSO, стелларатор	6,5; 40	20	< 10 ¹³	200	50	3 · 10 ⁻⁴	~ 10 ⁻³
TOSCA, токамак	10; 30	14	> 5 · 10 ¹³	300	100	3 · 10 ⁻⁴	~ 10 ⁻²
PF, плазменный фокус	0,1 · 1	2000	2 · 10 ¹⁹	2000	1000	2 · 10 ⁻⁸	0,7

* Малый и большой радиусы тороидальной плазменной камеры соответственно.

** β — отношение давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля.

вместных программах Калэма и других научно-исследовательских организаций и т. д.

На установке CLEO до 1975 г. исследовался режим токамака, а затем были проведены эксперименты в стеллараторном режиме с углом вращательного преобразования 0,3 и средним радиусом вписанной в диафрагму поверхности ~ 10 см. Основные результаты получены для магнитного поля 13 кГс и тока в плазме 17 кА длительностью 40 мс. Установлено, что для системы CLEO нет существенной разницы в качестве удержания плазмы в режимах токамака и стелларатора. Более того, время удержания энергии электронов в режиме стелларатора оказалось несколько выше, чем в режиме токамака, что, очевидно, определяется более плавной формой радиального распределения электронной температуры. Относительно низкая ионная температура связана, вероятно, с большим уровнем примесей в плазме. В ближайшем времени на CLEO предполагается исследовать бестоковый режим удержания. Начальная плазма при этом будет создаваться током, а затем поддерживаться с помощью инжекции нейтральных пучков. Планируется также использовать для формирования плазмы испарение D- или Li-таблеток с помощью CO_2 -лазера.

Главной особенностью токамака DITE является наличие локального (bundle) дивертора. Задача экспериментальной программы — исследование работы дивертора в режиме нагрева плазмы с помощью внешней инжекции. Дивертор при этом должен удалять из разрядной камеры плазму, движущуюся к стенкам, а также примеси, поступающие со стенок. Уже в начальных экспериментах (установка вступила в строй в 1976 г.) получены обнадеживающие результаты. При включении дивертора плотность плазмы у стенок уменьшалась в несколько раз. В специальных экспериментах с импульсным пуском в систему кислорода продемонстрированы защитные свойства дивертора — кислород ионизируется в диверторном слое и выводится из разрядной камеры. Планы будущих экспериментов связываются с увеличением мощности инжекции нейтральных пучков до 1,5 МВт и магнитного поля (при включенном диверторе) до 28 кГс.

Исследование тороидальных плазменных конфигураций с обратным направлением магнитного поля в плазме (система НВТХ) является традиционным направлением для Калэмской лаборатории, начиная с установки ZETA. Преимущество таких систем по сравнению с токамаками состоит в том, что устойчивое удержание плазменного шнура может быть достигнуто при значительно меньших тороидальных магнитных полях. В последнее время на установке НВТХ I удалось достигнуть стабильного режима разряда при токе 60 кА. Кроме того, получен устойчивый эффект самообращения магнитного поля в плазме. На основе этого принято решение о расширении работ по данной программе и сооружении более крупной установки RFX, которая должна обеспечить проверку законов подобия, что позволит сделать обоснованные заключения о перспективности направления для создания демонстрационного термоядерного реактора. Основные параметры RFX: большой и малый радиус тора 180 и 60 см соответственно, ток в плазме 0,7—1 МА, время поддержания тока 10—20 мс, температура плазмы 1—3 кэВ. Проект практически готов. Отдельные элементы установки уже изготавливаются. Стоимость сооружения оценивается в 5—6 млн. ф. ст., однако окончательное решение о финансировании строительства еще не принято.

Параметры термоядерных реакторов Калэмской лаборатории

Таблица 2

Характеристика	Мк I	Мк II
Мощность, МВт:		
электрическая	2500	2500
тепловая	5830	5830
Большой радиус тора, м	12,6	7,4
Радиус плазмы в среднем сечении, м	2,5	2,1
Эллиптичность сечения плазмы	1,0	1,75
Магнитное поле на оси, кГс	76,0	40,0
Ток в плазме, МА	9,7	11,7
β_t , %	1,6	9,3
Плотность плазмы, см^{-3}	$1,8 \cdot 10^{14}$	$3,5 \cdot 10^{14}$
Энергетическое время удержания плазмы, с	1,8	1,5
Нагрузка на первую стенку, МВт/м ²	4,6	6,7
Стоимость, млн. ф. ст.:		
реактора	280	?
электростанции	893	?

Значительные успехи достигнуты по программе разработки инжекторов быстрых атомов водорода. В группе ионных источников создана газоразрядная камера с однородной плотностью плазмы на поверхности 10×20 см². Благодаря слабому магнитному полю (~ 10 Гс) и специальной геометрии электродов удалось поднять отношение ионного тока к току разряда до рекордного значения 0,78. Методом оптимизации на стадии численных расчетов найдены конфигурации электродов и распределения потенциалов, обеспечивающие получение ионных пучков с расходимостью в пределах 0,2°. Расчеты подтверждены экспериментально на модели ионного источника с нейтрализатором. Если результат подтвердится на полномасштабном модуле ионного источника, то создадутся исключительные возможности для компоновки инжекторов термоядерных реакторных систем.

Уже в течение ряда лет в Калэме ведутся работы по концепционному проектированию термоядерных реакторов, к которым широко привлекаются специалисты в области быстрых реакторов из атомных центров Харуэлла, Рисли и Уинфрита. Первый концепционный проект реактора токамака Мк I был разработан в 1972 г. Его экономические оценки, выполненные в Рисли, показали, что термоядерная электростанция на основе такого реактора окажется существенно дороже АЭС такой же мощности на основе реакторного топлива. В связи с этим в 1976 г. был разработан новый проект Мк II, основной задачей которого являлось снижение стоимости реактора за счет повышения отношения давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля β_t и увеличения тепловой нагрузки на первую стенку реактора (табл. 2). В настоящее время ведется экономический анализ Мк II.

Ряд исследовательских работ по физике плазмы и физике ионизированных газов ведется на факультете инженерной физики Оксфордского университета. Здесь в первую очередь следует отметить исследования аномального поглощения в плазме интенсивных электромагнитных излучений, позволяющие моделировать

с помощью микроволн механизм взаимодействия лазерных пучков с плотной плазмой. Изучаются процессы в плазме щелочных металлов, поведение разрядов в условиях интенсивной оптической накачки, механизм ускорения микрочастиц с помощью лазера. В настоящее время Оксфордский университет активно включился (совместно с лабораторией им. Резерфорда) в общую программу работ по лазерному УТС.

Кафедра физики плазмы Лондонского имперского колледжа была организована еще в 1947 г. В настоящее время там наряду с учебной работой в ограниченном масштабе ведутся экспериментальные и теоретические исследования по физике плазмы. На установке POLYTRON исследуется удержание плазмы тороидальной конфигурации в полях остроугольной геометрии. Магнитное поле создается 36 одновитковыми катушками, образующими тор и включенными навстречу друг другу. Ускорение ионов в магнитных «щелях» за счет эффекта Холла приводит к уменьшению радиальных потерь плазмы. Экспериментально изучаются механизмы взаимодействия пучка релятивистских электронов (300 кэВ, 45 кА) с нейтральным газом и плазмой. По контракту с Калемской лабораторией изучается возможность получения плотной (до 10^{20} см⁻³) плазмы с помощью сильнооточного z-пинча.

Серьезные исследования по физике электрических пробоев в газах и дуговым разрядам ведутся в лабораториях электротехнического факультета Ливерпульского университета. Практически все работы имеют прикладную направленность и выполняются по договорам с электротехническими фирмами. Исследования дуговых разрядов в потоках газа связаны с разработкой новых мощных коммутаторов с автоматическим гашением дуги для электрических сетей. Цикл исследований имеет целью оптимизацию плавких предохранителей на различную разрывную мощность. Изучаются вакуумные дуговые разрядники с лазерной инициацией. Следует отметить интересные результаты, полученные

при изучении механизмов электрических пробоев, в частности, доказательство того, что теория пробоя, основанная на механизме ускорения микрочастиц с анода, экспериментального подтверждения не находит.

В лаборатории им. Резерфорда делегации была предоставлена возможность ознакомиться с разработками по технической сверхпроводимости. До последнего времени основные разработки лаборатории были связаны с ускорительной тематикой (импульсные дипольные магниты для протонных синхротронов, магниты каналов транспортировки пучков ускоренных частиц и т. п.). В последнее время начаты работы и в области УТС. По заказу Калемской лаборатории разрабатывается проект сверхпроводящей магнитной системы для крупного токамака с энергией, запасенной в магнитном поле, $1,2 \cdot 10^{10}$ Дж.

Фирма «Брентфорд электрик» специализируется на разработке и выпуске широкого спектра источников питания. Значительную часть продукции составляют системы питания электрофизических установок. По заказу ЦЕРНа изготовлены источники питания электромагнитов каналов транспортировки пучков с высоким уровнем стабилизации ($5 \cdot 10^{-6}$). Для термоядерных лабораторий Гархинга, Юлиха (ФРГ), Калэма и Фонтене-о-Роз (Франция) разработаны и изготавливаются источники питания инжекторов нейтральных частиц. Интересна схема калемского источника питания на напряжение 0—60 кВ и ток 20 А, в которой для стабилизации выходного напряжения используется электро-механическое управление коэффициентом трансформации первичного трансформатора. Фирмой освоено выпуск источников стабилизированного тока напряжением до 800 В и током до 1500 А с погрешностью стабилизации $5 \cdot 10^{-6}$.

В заключение хотелось бы отметить гостеприимство, оказанное советской делегации сотрудниками Калемской лаборатории и других научных центров, включенных в программу визита. ЕЛИСЕЕВ Г. А.

Переработка и хранение радиоактивных отходов в Канаде

До 1971 г. в Канаде не существовало проблемы радиоактивных отходов, поскольку свыше 99% радиоактивных продуктов деления, обусловленных работой ядерных реакторов, вывозилось за пределы страны. Вместе с тем исследовательские реакторы эксплуатируются более 26 лет, и за этот период выполнена большая научно-исследовательская программа по реакторному топливу, потребовавшая ряд разработок и частных решений в области радиоактивных отходов. Развитие ядерной энергетики в настоящее время сделало проблему радиоактивных отходов для Канады актуальной.

Знакомству с программой переработки и захоронения радиоактивных отходов была посвящена поездка в Канаду советских специалистов в октябре 1976 г.

Долголетняя программа по обращению с радиоактивными отходами, учитывающая собственный опыт, накопленный в Чок-Ривере, и мировой, разрабатывается с 1973 г. в исследовательском центре Уайтшелл. Экономика страны в настоящее время неблагоприятна для развития работ, и такое положение предполагается до 80-х годов. Поэтому в ближайшие годы отходов от регенерации ядерного топлива не будет, так как оно будет храниться непосредственно в виде отработанных элементов с учетом извлечения плутония в будущем.

До последнего времени для хранения и сброса отходов использовались главным образом поверхностные грунтовые формации. Принят ряд технических решений по переработке отходов, которые либо проверены, либо находятся в стадии подготовки к проверке на пилотных и крупномасштабных установках (обратный осмос, сжигание, упаривание).

Для хранения отработанного топлива разрабатывается альтернатива созданию сухого хранилища после пятилетней выдержки топлива в водных бассейнах. Прототип бетонной канистры для этой цели создан и испытывается в Уайтшелле.

Канистры цилиндрической формы (диаметр 335,5 см, высота 488 см, толщина 76,25 см) вмещают 220 сборок реактора CANDU, т. е. около 4,4 т топлива. Топливо в корзинах помещается в свинцовый контейнер, облицованный жестью, который вкладывается в бетонные канистры на месте их сооружения. В Уайтшелле испытывается несколько таких канистр, где моделируется тепловое поле с помощью электронагревателей и проверяется стабильность защиты во времени при загрузке отработанного топлива. Параллельно разрабатывается и проверяется транспорт для перевозки сборок.