

Советско-французский семинар по высокочастотным методам нагрева плазмы в замкнутых системах

Семинар состоялся 12—17 ноября 1975 г. в Центре ядерных исследований в г. Гренобле (Франция). Советская делегация была представлена семью специалистами.

На семинаре много внимания уделялось нагреву плазмы в тороидальных установках в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса. В докладе П. Лалия приводились расчеты положения областей трансформации волн и линейного поглощения высокочастотной энергии с учетом тепловых эффектов. При высокой температуре ($T > 1$ кэВ) эти области сдвигаются в сторону меньших концентраций от положения «холодного» резонанса. Практически это означает возможность нагрева в отсутствие поверхности, на которой выполняются условия нижнего гибридного резонанса. Вычислены положения указанных областей для установок «Вега» и JET. Показано, что в процессе нагрева плазмы на установке JET до температуры ~ 10 кэВ зона трансформации может смещаться от $r = 0$ до $r = 0,5$ а. Эффект компенсируется, если в процессе нагрева увеличивается частота генераторов примерно на 10%.

Оптимизация и согласование волноводной возбуждающей системы типа «Грилл» подробно рассматривались в докладе М. Брамбиллы (Франция). В настоящее время такие системы считаются наиболее перспективными для нагрева плазмы в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса. Проведены конкретные расчеты для возбуждающих систем, состоящих из двух и четырех волноводов. Определен оптимальный размер волновода, при котором коэффициент отражения минимален ($\sim 20\%$), если сдвиг фаз между соседними излучателями составляет 180° .

В докладе Нгуен Тронга (Франция) освещались технические аспекты нагрева плазмы на частотах нижнего гибридного резонанса. В настоящее время фирмы США и Франции выпускают клистронные усилители мощностью до 250 кВт в непрерывном режиме. Можно надеяться на возможность разработки в ближайшее время генератора мощностью ~ 600 кВт. Эксперименты по нагреву плазмы в установке JET предполагается провести в две стадии. На первой планируется использование двух таких генераторов. Далее мощность будет увеличена до 10 МВт за счет применения 16 генераторов. Ожидается, что КПД клистронов достигнет ~ 50 —55% при коэффициенте стоячей волны ~ 2 (10% отраженной мощности).

В докладе, сделанном В. В. Аликаевым (СССР), обсуждался высокочастотный нагрев плазмы в демонстрационном термоядерном реакторе-токамаке (Т-20). Нагревать плазму предполагается как с использованием нижнего гибридного, так и электронно-циклотронного резонансов, так как в этой области частот в настоящее время нам более ясны системы ввода высоко- и сверхвысокочастотной энергии в установках больших размеров.

В обзорном докладе Е. Каноббио (Франция) рассматривалось состояние высокочастотных методов нагрева плазмы в замкнутых ловушках. Отмечалось, что в диапазоне частот от ионно-циклотронной до нижней гибридной существует серьезная опасность параметрических неустойчивостей на поверхности плазмы. Такие неустойчивости будут приводить к поглощению высоко-

частотной энергии на периферии и снижать КПД нагрева. Такой опасности нет в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса и магнитной накачки на пролетном времени. В последнем случае возникающие при процессах распада волны не могут быть собственными модами, так как длина волны существенно больше размеров плазмы. Ввиду этого отсутствуют резонансные неустойчивости. В случае ионно-циклотронного резонанса функция распределения ионов по энергии деформируется таким образом, что появляются моды с отрицательной энергией и могут возникать неустойчивости взрывного типа. По мнению автора, это делает данный метод бесперспективным.

Параметрические неустойчивости в диапазоне частот гибридного резонанса были рассмотрены в докладе А. Д. Пилия (СССР). Показано, что на поверхности плазмы должна возникать узкая зона параметрической турбулентности. Однако оценить степень опасности такой неустойчивости пока трудно.

В докладе Г. Шмитта (Франция) приведены результаты расчетов эволюции функции распределения частиц по скорости при нагреве на гармониках циклотронного резонанса. В случае нагрева на первой гармонике функция распределения остается максвелловской, на высших гармониках она «обогащается» частицами с большой скоростью.

Внутренней неустойчивости и неустойчивости, связанной с появлением отрицательных «пичков» напряжения, посвящен доклад А. Саме (Франция). Вблизи резонансных поверхностей ($q = 1$, $q = 2$) может происходить разрушение магнитных поверхностей и образовываться слой сильно «перепутанных» силовых линий. Сильные электрические поля, образующиеся при перестройке магнитных поверхностей, закорачиваются из-за радиального перемещения силовых линий и не приводят к макроскопическим эффектам. Внутри такой области профили плотности тока и температуры становятся плоскими, но на краю возникают большие электрические поля, вызывающие неустойчивость, и в результате область расширяется. Отрицательный «пичок» на напряжении возникает тогда, когда неустойчивая зона достигает диафрагмы. Такая картина имеет место при неустойчивости в области значения $q = 2$, расположенной сравнительно близко к границе шнура.

Об одном из возможных способов борьбы с уменьшением области протекания тока в токамаках сообщалось в докладе К. Мерсье (Франция). Приводились результаты численных расчетов профилей I ; T_e ; T_i и n_e при инъекции нейтральных атомов. Показано, что при достаточно больших углах инъекции становятся более плоскими профили тока и температуры.

Результаты экспериментов по нагреву плазмы в установке ТМ-3 при продольных магнитных полях до 25 кЭ обсуждались в докладе, представленном Ю. А. Соколовым (СССР). С помощью лазерной диагностики показано, что в процессе электронно-циклотронного нагрева растет температура основного компонента плотности электронов в соответствии с классическим механизмом нагрева. В режиме с малым током разряда получено значение $\beta_I \approx 2,2$. Нагрев плазмы в диапазоне частот нижнего гибридного резонанса исследовался в прямой

системе с магнитными пробками (доклад Ю. В. Скосырева). Эффективный нагрев плазмы наблюдался при увеличении ее диаметра до 150 мм.

Результаты исследования возбуждения несимметричных магнитно-звуковых волн в установке ТМ-1-ВЧ обсуждались в докладе В. Л. Вдовина. В экспериментах использовалась система возбуждения, состоящая из двух асимметричных витков, позволявшая вводить в плазму до 150 кВт высокочастотной мощности. Магнитно-звуковые волны в области гармоник ионно-циклотронной частоты затухают слабо, вследствие чего наблюдаются собственные колебания тороидального плазменного шнура. Циклотронные волны испытывают сильное затухание. Наблюдался нагрев ионов на гармонике ионно-циклотронной частоты. Программа исследований ионно-циклотронного нагрева плазмы на установке ТФР была представлена в докладе Ж. Адама (Франция). На этой установке исследуются дисперсионные зависимости и затухание волн на малом уровне мощности (~ 1 кВт). В дальнейшем предполагается провести эксперименты с мощным генератором ~ 500 кВт.

Группа экспериментаторов установки ТФР представила первые результаты по инжекции пучков нейтральных атомов. Подготовлена система из пяти источников. Мощность пучка каждого источника 170 кВт при энергии атомов от 25 до 35 кВ. Направление инжекции составляет $\sim 10^\circ$ по отношению к большому радиусу установки. Длительность инжекции, а также работы источников может достигать 100 мс. Эксперименты проведены при плотности плазмы $(2-4) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, токе 140–160 кА и мощности пучка нейтральных атомов ~ 150 кВт. Получено приращение ионной температуры ~ 200 эВ, причем ее прирост пропорционален вводимой мощности при изменении последней в 4 раза.

Проект нагрева плазмы в этой же установке с помощью инжекции гранул водорода обсуждался в докладе Ж. Кутана (Франция). Микрокристаллы водорода, содержащие от нескольких десятков до нескольких тысяч молекул, образуются при продувке холодного газа через сверхзвуковое сопло. Далее гранулы ионизируются электронным пучком и ускоряются до энергии 600 кВ. Предполагается инжектировать эквивалентный по протонам ток до 50 А. Согласно расчетам, при времени инжекции ~ 40 мс температура ионов и плотность плазмы должны удваиваться. На стеллараторе «Вега» планируется провести эксперимент по заплотнению вакуумной камеры плазмой, полученной при испарении и ионизации льдинки водорода или дейтерия в луче лазера. В докладе Ж. Тонона (Франция) освещена программа подготовки такого эксперимента. Для объема вакуумной камеры установки «Вега» $\sim 0,5 \text{ м}^3$ необходимо иметь $10^{18} - 10^{19}$ частиц в мишени, т. е. 1 мм^3 льда. Приведенные в докладе расчеты показывают, что необходимо использовать CO_2 -лазер с длительностью импульса $10^{-6} - 3 \cdot 10^{-6}$ с и энергией $10^2 - 10^3$ Дж.

В целом следует отметить, что эксперименты по высокочастотному нагреву плазмы во Франции находятся в стадии подготовки. В ближайшее время следует ожидать результатов экспериментов по нагреву плазмы в области частот нижнего гибридного резонанса на установке «Вега» (Гренобль). Токамак «Шетула» (Гренобль) реконструируется для применения метода нагрева плазмы магнитным сжатием на пролетном времени.

АЛИКАЕВ В. В.

Второй всесоюзный семинар по ядерной физике высоких энергий

Быстро развивающаяся область исследований — ядерная физика высоких энергий, лежащая на стыке физики частиц и «классической» ядерной физики, уже настолько разрослась, что настоятельно нуждается в специальном форуме для обсуждения своих проблем. Исходя из этого, совет по ядерным реакциям Отделения ядерной физики АН СССР принял в октябре 1974 г. решение о регулярном (раз в два года) проведении семинаров на базе Лаборатории ядерной физики высоких энергий Ленинградского университета. Первый семинар состоялся в июле 1974 г., второй проходил с 29 июня по 2 июля 1976 г. Основное внимание на семинаре было уделено направлениям, связанным с возможностью существования второй, более плотной фазы ядерной материи, проблемам ее экспериментального обнаружения и вопросу о существовании флюктуаций плотности в ядрах.

Доклады на семинар представили 14 институтов Москвы, Ленинграда, Дубны, Харькова, Новосибирска, Томска и Еревана. Всего было заслушано 27 докладов по пяти разделам.

1. π -Конденсат. В докладе А. Б. Мигдала был дан обзор современного состояния вопроса, отличавшийся высоким уровнем и ясностью изложения, а также были сформулированы задачи, стоящие как перед теоретиками, так и перед экспериментаторами. Интересным частным вопросам посвящались остальные доклады. Среди них следует отметить расчеты А. Б. Курепина

и О. А. Маркина по рассеянию пионов $E_{\pi} \leq 100 \text{ МэВ}$, предсказывающие обнаруживаемые эффекты π -конденсата при рассеянии на деформированных ядрах и предложения по поиску 0^- , 0^+ -изомеров и сверхплотных гиперядер в докладе В. Ф. Литвина.

2. Ударные волны. Надежды, возлагавшиеся физиками на возможность возникновения ударных волн в столкновениях релятивистских ядер и их использования для получения сверхплотных ядерных объектов, несколько поколебались. Эта мысль содержалась в докладе В. Д. Тонеева, который показал, что расчеты столкновений релятивистских ядер по каскадной модели удовлетворительно описывают эксперименты Грайнера — Шопера. Однако В. Е. Бунаков высказал соображения, по которым упомянутое выше согласие теории с экспериментом не исключает наличия «гидродинамических» эффектов в столкновениях релятивистских ядер.

3. Кумулятивный эффект. Современное состояние изучения кумулятивного эффекта было освещено в докладах В. С. Ставинского и Г. А. Лексина. Различные теоретические подходы к описанию явления содержались в докладах А. И. Титова, М. А. Брауна и др., В. Б. Ропелиовича. По-видимому, ядерный скейлинг можно считать установленным, а дальнейшее его изучение перспективным и для физики частиц, учитывая недавние указания на нарушение скейлинга в нуклон-нуклонных