

III Международная конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу

Б. Б. КАДОМЦЕВ, А. М. СТЕФАНОВСКИЙ

УДК 533.9

В августе 1968 г. в Новосибирске состоялась Третья международная конференция по исследованиям физики высокотемпературной плазмы и управляемому термоядерному синтезу. В работе конференции приняли участие 700 делегатов и гостей из 20 стран. Кроме официальных заседаний, на которых было заслушано около 130 докладов, состоялось большое число различных семинаров, посвященных разнообразным частным вопросам физики плазмы. На конференции не было каких-либо сенсационных сообщений, и поэтому постороннему наблюдателю она, возможно, могла показаться неяркой. Однако для самих участников конференции это была не только благоприятная возможность представить себе общую картину развития термоядерных исследований, но и довольно впечатляющая демонстрация прогресса по всем направлениям и неослабевающего продвижения в область термоядерных параметров плазмы.

Наиболее характерная особенность конференции — заметно возросший уровень понимания физических процессов в плазме. Это проявлялось во всем: и в более подробном и глубоком исследовании физических явлений в крупных установках, и в постановке специальных небольших экспериментов по исследованию отдельных, теоретически предсказанных эффектов, и в приближении теоретических работ к условиям эксперимента, и в широком использовании результатов вычислений на электронно-вычислительных машинах. Даже такой внешний показатель, как явный перевес числа экспериментальных докладов над теоретическими, связан по существу с тем, что экспериментальные работы стали выдавать гораздо больше научной (и при том тщательно обработанной) информации, чем в прежние времена.

Как и на предыдущей конференции в Калэме, в Новосибирске наибольшее внимание было уделено тороидальному направлению, которое многим кажется наиболее перспективным в смысле выхода к термоядерному реактору. Здесь, как и в других направлениях, прогресс определяется, с одной стороны, чисто внешними показателями, т. е. достигнутыми температурой, плотностью и временем удержания плазмы, с другой стороны, — степенью пони-

mania соответствующих физических процессов.

По достигнутому к настоящему времени параметрам плазмы наиболее продвинувшимися являются установки типа «Токамак». Доклад академика Л. А. Арцимовича о результатах исследования поведения плазмы в этих установках еще раз наглядно продемонстрировал преимущества, которыми обладает магнитная система «Токамак». Достаточно глубокая магнитная яма, сравнительно большое значение шира и, наконец, осевая симметрия системы позволили получить в установках этого типа плазму с очень высокими параметрами: плотностью до 10^{14} см⁻³ и температурой 3—5 млн. градусов. Очень важным выводом доклада было заключение о том, что термоизоляция плазмы не ухудшается с ростом температуры и плотности, а время жизни частиц в системе значительно больше боровского времени. Проведенные в последнее время измерения скорости поступления нейтральных частиц в плазменный шнур с помощью спектроскопической методики позволили определить среднее время жизни частиц, которое оказалось в 50 раз больше боровского и по порядку величины близко к классическому с учетом эффекта «перемешивания» из-за дрейфа в неоднородном магнитном поле.

Удержание плазменного шнура магнитным полем продольного тока осуществляется также в английской установке «Зета». Как известно, на этой установке был обнаружен так называемый период улучшенной стабильности плазмы. Проведенные в настоящее время измерения показали, что в течение этого периода наблюдается некоторое увеличение температуры электронов и времени удержания энергии в плазме, что, по-видимому, указывает на относительную устойчивость плазмы в системе. Интересно, что период улучшенной стабильности в «Зете» наблюдается на спаде разрядного тока в плазме, т. е. тогда же, когда наблюдается максимальное время удержания энергии в «Токамаке». Поскольку причина и механизм стабилизации до сих пор не очень ясны, трудно сказать, является ли это совпадение случайным или имеет более глубокие корни. Во всяком случае тщательное изучение этого явления представляется безусловно важным и может пролить

свет на дальнейшие возможности стабилизации плазмы в такого рода системах.

Некоторые доклады на конференции были посвящены исследованию поведения плазмы в тороидальных ловушках — стеллараторах, левитронах, мультиполах. Главным вопросом в этих исследованиях по-прежнему оставался вопрос об удержании плазмы. Напомним, что еще десять лет назад на стеллараторах в Принстоне (США) был обнаружен эффект аномально быстрой утечки плазмы поперек магнитного поля. Соответствующий коэффициент поперечной диффузии оказался на несколько порядков больше классического и приблизительно равным бомовскому. С тех пор загадка бомовской диффузии стала камнем преткновения как для экспериментаторов, так и для теоретиков, и для ее разрешения были проведены многочисленные эксперименты на тороидальных ловушках самых разнообразных конфигураций с плазмой, параметры которой могли изменяться в очень широких пределах. И хотя окончательного ответа на вопрос о причинах бомовской диффузии еще не получено, на тороидальных ловушках накоплена чрезвычайно обширная и интересная информация, которая и была доложена на конференции.

Прежде всего следует отметить интересный доклад А. Гибсона и др. (Англия), в котором были изложены результаты экспериментального исследования удержания отдельных частиц в стеллараторе. Авторы использовали метод заполнения стелларатора β -частицами от распада трития, ранее примененный С. Н. Родионовым для адиабатических ловушек. Измерения показали, что электроны могут совершать в стеллараторе более 10^7 оборотов внутри ловушки до выхода на стенку. Подобный результат можно интерпретировать как доказательство существования тороидальных дрейфовых поверхностей с точностью, вполне достаточной для задач термоядерного синтеза. Вместе с тем он свидетельствует о том, что аномальная диффузия имеет коллективную природу — отдельные частицы ей не подвержены. Значительно менее радужными оказались результаты измерения времени жизни не отдельных частиц, а плазмы в различных стеллараторах. В трехзаходном тороидальном стеллараторе в Калэме (Англия) и двухзаходном стеллараторе в ФИАНе время жизни инжектированной извне плазмы оказалось равным примерно $10-15\tau_B$ (τ_B — бомовское время). В результате тщательных измерений на стеллараторе «С» (Принстон, США) обнаружены еще меньшие относи-

тельные значения времени жизни $\sim 5\tau_B$ как для плазмы, инжектированной извне, так и для ксеноновой плазмы, созданной с помощью электронно-циклотронного резонанса. Хотя эти результаты и являются в какой-то мере разочаровывающими, они все же не так безнадежны, как те, которые получались несколько лет назад, когда при любых параметрах плазмы наблюдалась бомовская диффузия.

Главным результатом исследований на стеллараторах является обнаруженное в отдельных случаях (ФИАН, Принстон) несоответствие измеренных турбулентных потоков плазмы с наблюдаемым спадом плотности плазмы со временем. Это может свидетельствовать о существовании дополнительного, не связанного с колебаниями и в то же время достаточно мощного механизма потерь частиц из плазмы.

В некотором смысле диаметрально противоположными оказались результаты, доложенные физиками из Гархинга (ФРГ), наблюдавшими почти классическое удержание бариевой плазмы, созданной с помощью термоионизации в тороидальном двухзаходном стеллараторе. К сожалению, некоторые детали самого эксперимента (например, наличие не изолированной от плазмы проводящей подвески мишени, а также расхождения в результатах измерений (скорость ионообразования и потери плазмы поперек магнитного поля, измеренные периферийным коллектором) оставляют определенные основания для сомнений. Тем не менее полученные результаты представляются весьма интересными, а развитие этих работ — безусловно важным.

В экспериментах с бариевой плазмой так же, как и на стеллараторе в ФИАНе, была обнаружена связь резонансов магнитных поверхностей с временем жизни плазмы. В условиях, когда магнитная силовая линия замыкалась на себя после m (m — целое число) обходов вдоль ловушки, время жизни плазмы заметно уменьшалось, притом тем больше, чем меньше m . Является ли это результатом расщепления магнитных поверхностей или следствием возникающего разделения зарядов и появления азимутальных электрических полей, пока неясно. Сам факт влияния, неоднократно обсуждавшийся в теории, достаточно примечателен.

По сравнению со всеми стеллараторными экспериментами несколько необычными являются исследования, проведенные в Новосибирском институте ядерной физики СО АН СССР, где плотность плазмы была очень низкой (10^6-10^9 см $^{-3}$), но имелась возможность регу-

лировать частоту столкновений электронов с атомами нейтрального газа, поддерживая его давление P_0 достаточно высоким. Обнаруженные при этом в ИЯФ зависимости времени жизни плазмы от магнитного поля (пропорционально H^{-2}) и частоты столкновений (пропорционально P_0) заметно отличаются от аналогичных зависимостей, наблюдаемых в ФИАНе и Принстоне. Поэтому, видимо, потребуется некоторое время для того, чтобы установить соответствие этих результатов с общей картиной поведения плазмы в стеллараторах.

Сложная геометрия стеллараторных полей давно вызывала у физиков определенную неудовлетворенность и в конце концов заставила их обратиться к экспериментам с тороидальными осесимметричными ловушками. Характерной особенностью таких ловушек являются токонесящие кольца, помещенные внутрь плазмы, имеющей форму тороидальной оболочки, окружающей эти кольца. Число колец, естественно, может быть различным, и кроме их полоидального магнитного поля в отдельных случаях имеется и осесимметричное тороидальное поле. Изменением числа колец можно менять глубину магнитной ямы (переход от квадруполя к октуполю), а наложение тороидального поля позволяет получить и большее значение шира. Ловушки с одним кольцом (левитрон, сфератор) по типу магнитной конфигурации по существу очень близки к «Токамаку». Таким образом, тороидальные осесимметричные ловушки позволяют исследовать поведение плазмы в разнообразных магнитных конфигурациях. Поэтому сообщения о результатах подобных экспериментов ожидалось с большим интересом.

К сожалению, огромные технические трудности проведения экспериментов на мультиполях сделали невозможным получение исчерпывающей информации за сравнительно короткие сроки. Дело в том, что точная установка и фиксация внутри плазмы проводящих колец являются очень сложной технической задачей и могут быть достигнуты либо путем их левитации, либо с помощью поддержек. Пока лишь немногие установки работают с левитированными кольцами, тогда как в остальных используются поддержки, которые не только нарушают осевую симметрию системы, но и пересекают магнитные поверхности, на которых удерживается плазма. При малой скорости перемещения плазмы поперек магнитных поверхностей следовало ожидать, что основным механизмом потерь частиц из плазмы будет их рекомбинация на поддержках. Однако измерения потоков

частиц отдельно на кольца, поддержки и внешние стенки камеры, о результатах которых сообщалось в докладе физиков Висконсинского университета (США), обнаружили неожиданно большую скорость поперечного движения плазмы, создававшейся в октупольной установке как с помощью внешней инжекции, так и методом электронно-циклотронного резонанса. Как и в стеллараторах, в этом эксперименте потери плазмы поперек магнитного поля намного превышали величину измеренного (по $\langle \tilde{n} \nabla \tilde{\phi} \rangle$) турбулентного потока частиц. По существу аналогичными оказались и результаты исследования поведения плазмы в сфераторе SP-1 (Принстон, США), доложенные С. Иошикавой. В этой ловушке, так же как и в октуполе Висконсинского университета, наблюдались весьма значительные потери плазмы поперек магнитного поля на внешней стенке и на токонесящее кольцо. Время жизни плазмы оказалось много меньше рассчитанного теоретически с учетом потерь на поддержках и не зависело от типа магнитной конфигурации (т. е. от наличия шира или магнитной ямы). При этом оно заметно возрастало при переходе к плазме с тяжелыми ионами, что, как известно, характерно для ситуации, когда отсутствует равновесие плазмы. На установках в Принстоне (SP-1 и LM-1 — линейный мультиполь) измеренные турбулентные потоки частиц также оказались меньше наблюдавшихся потерь плазмы поперек магнитного поля, что, по мнению авторов доклада, вероятно, можно объяснить присутствием квазистатических электрических полей, связанных с особенностями заполнения ловушек плазмой и наличием поддержек.

Последнее предположение, казалось бы, весьма очевидное, не нашло, однако, однозначного подтверждения в других экспериментах, где токовое кольцо, помещенное в плазму, могло левитироваться с помощью магнитного поля. Так, в докладе ок-риджских физиков (США) приводится результат: время жизни плазмы в левитированном квадруполе, измеренное по ионному току насыщения на зонд, существенно зависело от глубины его погружения в плазму. Этот результат (хотя подобная интерпретация не является единственной), казалось бы, указывает на существенное влияние рекомбинации частиц на поверхности зонда (аналогичного поддержкам) на время жизни плазмы в установке. С другой стороны, как следует из доклада ливерморских физиков (США) поведение инжектированной плазмы в левитроне при не очень больших полоидаль-

ных магнитных полях центрального кольца практически не зависело от наличия или отсутствия поддержек. Об этом же свидетельствуют и тот факт, что практически во всех мультипольных ловушках измеренное время жизни плазмы составляло от 10 до 30 τ_V независимо от того, какой способ подвески колец использовался в установке.

Приведенные выше результаты исследования поведения плазмы в замкнутых системах свидетельствуют о том, что многое в этих экспериментах еще остается неясным, несмотря на значительный прогресс в понимании отдельных явлений. Сопоставление различных экспериментальных результатов не всегда может быть сделано достаточно корректно из-за большой разницы используемых плазм и огромного разнообразия экспериментальных установок. Тем не менее некоторые результаты измерений прослеживаются во многих экспериментах и, возможно, имеют достаточно общий и фундаментальный характер. К таким результатам следует прежде всего отнести наблюдаемое на многих установках несоответствие между измеренными потерями плазмы и поперечными турбулентными потоками. Это может означать, что существует достаточно сильный механизм потерь, не связанный с колебательными полями и, возможно, обусловленный отсутствием равновесия всей плазмы или группы частиц в замкнутых системах. Понятно, что на фоне этого механизма, видимо нечувствительного к типу магнитной конфигурации, стабилизация широм или магнитной ямой плазменных неустойчивостей не приводит к заметному улучшению удержания плазмы.

В чем заключается этот механизм, пока еще не ясно. Многие физики склоняются к тому, что аномальные потери могут быть связаны с нескомпенсированными дрейфовыми потоками, принимающими вид своеобразных конвективных ячеек. В связи с этим следует упомянуть о том, что в последнее время заметно возрос интерес к дрейфовым движениям отдельных частиц в плазме и связанным с ними дополнительным потокам. В частности, недавно А. А. Галеевым, Р. З. Сагдеевым и Г. П. Фюртом, а затем Л. М. Коврижных был количественно рассмотрен эффект «перемешивания», много лет назад указанный Г. И. Будкером. Этот эффект состоит в сильном увеличении классической диффузии и теплопроводности в разреженной плазме за счет частиц с малой продольной скоростью (так называемых запертых и локализованных частиц), которые могут весьма далеко

сдрейфовывать от магнитных поверхностей. Один лишь этот эффект может существенно увеличить коэффициенты переноса, так что разница между соответствующим столкновительным коэффициентом диффузии и бомовским становится не такой уж большой (вплоть до двух и даже одного порядка). Более того, утечка частиц из тороидальных установок должна происходить не только в результате столкновений с частицами другого сорта, но и в результате столкновений с частицами того же сорта, что является свидетельством по крайней мере частичного отсутствия равновесия для отдельных групп частиц плазмы. Появление электрических полей в плазме с эквипотенциалами, не совпадающими с магнитными поверхностями, могло бы еще больше усилить соответствующие эффекты. Возможности появления таких полей обсуждались на конференции в теоретическом докладе Г. П. Фюрта и М. Н. Розенблюта.

На конференции были представлены также другие теоретические доклады по равновесию и устойчивости плазмы в тороидальных системах, представляющих собой дальнейшее развитие представлений о физических свойствах магнитного удержания плазмы. Сюда относятся доклады А. Кента и Т. Е. Стрингера (Англия), М. Н. Розенблюта, Б. Коппи и др. (США), С. Е. Росинского, В. Г. Рухлина и А. А. Рухадзе (СССР) по детальному исследованию кинетических неустойчивостей в тороидальных ловушках, а также доклад Л. С. Соловьева, В. Д. Шафранова, Э. И. Юрченко, в котором показано, что в тороидальных ловушках происходит «самоуглубление» магнитной ямы по мере заполнения их плазмой, так что устойчиво удерживаемое β (с точки зрения МГД-неустойчивостей) может быть значительно больше относительной глубины вакуумной магнитной ямы. В докладе А. А. Бланка и др. был рассмотрен интересный вопрос о равновесии плазмы с большим β .

Второе крупное направление в термоядерном синтезе — адиабатические ловушки — было представлено большим числом интересных докладов. Как можно судить по этим докладам, удержание плазмы в прямых пробочных ловушках с минимумом магнитного поля существенно зависит от метода заполнения ловушки плазмой. При этом наиболее четкие физические результаты, хорошо совпадающие с теоретическими расчетами, получены на установках, использующих инжекцию возбужденных быстрых атомов, которые ионизируются в магнитном поле ловушки, образуя плазму с горячими

ионами и сравнительно холодными электронами. Характерной особенностью плазмы, получаемой таким способом, является сильно анизотропное распределение ионов по скоростям, что, согласно предсказаниям теории, может быть причиной неустойчивости, когда циклотронная частота ионов (или ее гармоники) совпадает с частотой продольных колебаний электронов. Именно такого рода колебания и наблюдались на установках «Огра-2» (ИАЭ), «Феникс» (Калэм, Англия), «Алиса» (Ливермор, США) и др. Развитие неустойчивости, как правило, приводит к перераспределению ионов по скоростям и утечке частиц в основном через пробки. Вследствие этого максимальная плотность полученной до сих пор плазмы не превышает $2-3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$. В работах, выполненных на установках с инжекцией нейтральных атомов, приведены интересные результаты не только по изучению возбуждения неустойчивостей, но и по успешному использованию различных методов улучшения устойчивости плазмы в этих системах. В одном из методов («Алиса», США) с помощью модуляции ускоряющего ионы напряжения получалось более широкое, чем обычно, распределение ионов плазмы по энергии. Максимальная плотность плазмы при этом возросла примерно на 25%, однако характер неустойчивости остался прежним. Очевидно, что получение плазмы с равновесным распределением ионов по энергиям и направлениям скоростей с помощью этого метода является чрезвычайно сложной технической задачей и поэтому вряд ли перспективно. Существенно новый принцип стабилизации желобковой неустойчивости в ловушке «Огра-2» был предложен и успешно применен В. В. Арсениным, В. А. Жильцовым и В. А. Чуяновым. Этот метод основан на использовании обратной связи между регистрируемым на поверхности плазмы потенциалом желобковых колебаний и потенциалами на окружающих плазму специальных электродах. Метод может быть использован и для других неустойчивостей плазмы. Другой способ улучшения устойчивости плазмы («Феникс», «Алиса») заключался в повышении энергии холодных электронов и использовании возникающего при этом затухания Ландау. При нагреве электронов с помощью циклотронного резонанса неустойчивости на верхних гармониках ионной циклотронной частоты действительно подавлялись, однако в широком диапазоне изменения плотности плазмы возникала новая неустойчивость на основной циклотронной частоте ионов.

Предельная плотность горячих ионов, получавшаяся в этих условиях, примерно вдвое превышала плотность, полученную без нагрева электронов. К сожалению, определить природу новой неустойчивости пока не удалось, что в немалой степени связано с характером теоретических расчетов возникновения тех или иных колебаний, часто относящихся к бесконечно протяженной плазме. Здесь уместно отметить, что окончательная идентификация неустойчивости на циклотронных гармониках на установке «Феникс» стала возможной лишь благодаря теоретическим расчетам этой неустойчивости, принимавшим во внимание и конечные размеры плазмы, и конкретный вид магнитного поля в этой системе.

Тенденция к более полному учету в теории конкретных особенностей экспериментальных условий проявилась и в представленных на конференцию теоретических докладах. Так, например, в докладе М. Н. Розенблюта, Р. Ф. Поста, Л. Д. Перлштейна и др. было подробно рассмотрено влияние на конусные неустойчивости неоднородности плазмы и магнитного поля, а учет неоднородности поля в докладе Б. Б. Кадомцева и О. П. Погуце позволил обнаружить новую модификацию неустойчивости отрицательной массы, которая оказалась ответственной за сбросы плотности плазмы в ловушке ПР-5.

На основе материалов, представленных на конференцию, можно сделать вывод, что заполнение магнитных ловушек плазмой с помощью инжекции монохроматического пучка нейтральных атомов принципиально приводит к получению такой плазмы, которая оказывается неустойчивой. Использованные до сих пор методы стабилизации, хотя и подавляли первоначальную неустойчивость, но либо в недостаточной степени, либо вызывали новые неустойчивости. Удастся ли найти способ стабилизации, подавляющий опасные неустойчивости и в то же время сохраняющий те преимущества, которые присущи методу инжекции нейтральных атомов, пока не очень ясно.

Заполнение ловушек плазмой с помощью плазменных пучков с последующим сжатием магнитным полем, как видно из докладов, описывающих результаты экспериментов на установках MTSEII (Англия) и 2-X (Ливермор, США), замечательно прежде всего параметрами образующейся плазмы: плотность в таких системах достигает $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ при температуре ионов в несколько киловольт. Даже небольшие утечки частиц и энергии из такой плазмы представляют собой мощные энергетические

потоки, поэтому плазма с такими параметрами, близкими к необходимым для термоядерного синтеза, ставит перед исследователями новые проблемы, в том числе и в области вакуумной технологии. Именно эти новые проблемы, по-видимому, и создали трудности, существенно замедлившие темпы получения четкой физической информации. Поэтому, отдавая должное искусству экспериментаторов, которым пришлось преодолеть огромные трудности при создании упомянутых выше установок, следует сказать, что физические результаты исследования поведения плазмы в них, изложенные в докладах, носят пока предварительный характер. В самом деле, на установке MTSEII измеренное время жизни плазмы (порядка сотен микросекунд) не противоречит представлениям о классических потерях, т. е. потерях, вызванных кулоновскими соударениями. Однако ценность этого вывода, как это следует из доклада, несколько снижается обнаруженным сопутствующим механизмом охлаждения ионов на электронах, температура которых остается на уровне 30—40 эв из-за контакта с холодной плазмой, существующей за магнитными пробками. Очевидно, что холодная плазма могла существенно влиять и на устойчивость горячей плазмы. Возможно поэтому авторам не удалось наблюдать каких-либо неустойчивостей в плазме, в том числе и конусно-дрейфовую.

Судя по докладу американских физиков, примерно аналогичная картина имеется и в отношении результатов, полученных на установке 2-X, где многие явления (например, разница в поведении редкой и плотной плазмы, влияние состояния титановой пленки на стенке вакуумной камеры и т. п.) пока недостаточно ясны.

Результаты исследования поведения плазмы с промежуточной плотностью (до 10^{11} см⁻³) в установке ПР-6 (ИАЭ) были представлены в докладе М. С. Иоффе с сотрудниками, которые использовали для заполнения ловушки метод ионного магнетрона и специальные режимы взаимодействия электронного пучка с плазмой. Как известно, в предшественнице установки ПР-6 — установке ПР-5 — после окончания инъекции наблюдался довольно резкий спад плотности плазмы, который, по предположениям, мог быть вызван конусно-дрейфовой неустойчивостью. Теоретически критерий появления этой неустойчивости связывает значение плотности плазмы и величину магнитного поля в ловушке. Поэтому при увеличении магнитного поля можно было ожидать увеличения плотности стабильно удерживаемой плазмы после

периода быстрого распада. Именно такого рода эксперименты и были выполнены на установке ПР-6. Измерения, однако, показали, что плотность стабильно удерживаемой плазмы очень слабо зависит от величины магнитного поля, и поэтому начальный спад плотности, вероятно, не связан с проявлениями конусно-дрейфовой неустойчивости. Более того, в некоторых случаях плотность стабильной плазмы в несколько раз превышала вычисленное (по заведомо завышенным оценкам) значение критической плотности, при которой следовало бы ожидать развития конусно-дрейфовой неустойчивости. В этих же экспериментах обнаружено, что максимальная плотность стабильно удерживаемой плазмы существенно зависит от поперечного пробочного отношения. Природа этого эффекта пока неизвестна и требует дальнейшего экспериментального изучения.

Из других результатов, полученных на прямых ловушках, по-видимому, следует отметить наблюдение неустойчивости «отрицательной массы» на установках ДСХ-2 и ПР-5. Известная в теории циклических ускорителей со слабой фокусировкой, эта неустойчивость своеобразно проявляется и в прямых пробочных ловушках. Теоретические расчеты, проведенные в обоих случаях с учетом реальных размеров плазмы и пространственной геометрии поля, достаточно хорошо совпали с экспериментальными данными и, таким образом, позволили определить природу наблюдавшейся неустойчивости.

Наиболее интересным из перечисленных выше результатов безусловно является то, что считавшаяся в последние годы наиболее опасной дрейфово-конусная неустойчивость плазмы в открытых ловушках пока однозначно не проявилась ни в одном из обсуждавшихся на конференции экспериментов. Является ли это следствием недостаточной точности теоретических критериев или недостаточной корректности проведенных экспериментов, сказать пока трудно. Практически нет оснований сомневаться в существовании этой неустойчивости, однако, по-видимому, требуется дальнейшее уточнение критериев ее появления с учетом реальных условий эксперимента.

Конференция уделила много внимания результатам исследования поведения очень плотной горячей плазмы, давление которой сравнимо с давлением окружающего ее магнитного поля. Плазмы с такими параметрами получают в плазменном фокусе нецилиндрического z-пинча и в θ -пинчах. Представленные в докладах результаты тщательного изучения

энергетического спектра и пространственного распределения нейтронного излучения подтвердили его термоядерную природу в большинстве экспериментов с плазменным фокусом. В докладе Н. В. Филиппова говорилось и о том, что в момент образования фокуса большая часть тока (около $1\,000\,000\text{ а}$) переносится электронами, ускоренными до энергии $60\text{--}100\text{ кэВ}$. Удалось также установить, что в ряде случаев область плазменного фокуса имеет спиралевидную структуру и не только быстро перемещается в пространстве, но и вращается с нарастающей скоростью по мере движения вдоль оси разрядной камеры. Все эти сведения, безусловно, являются очень важными для понимания образования и эволюции плазменного фокуса и составят основу для дальнейшего развития работ в этом направлении.

Результаты исследования поведения плазмы в θ -пинчах весьма обширны и интересны. Как известно, поведение плазмы в θ -пинчах характеризуется следующими особенностями. После сжатия плазмы к оси системы в ее центре наблюдается период спокойного состояния плазмы длительностью от $8\text{--}10$ до $20\text{--}25\text{ мксек}$, после которого возникает интенсивное развитие МГД-неустойчивостей и быстрый распад плазмы. Естественно, что основное внимание экспериментаторов было приковано к выяснению причин возникновения сильной МГД-неустойчивости, а также к характеру удержания плазмы в спокойный период. Наиболее интересные результаты по этим пунктам были доложены группой английских физиков, которые на 8-метровой установке в Калэме провели тщательные измерения длительности спокойного периода состояния плазмы в зависимости от длины системы и температуры электронов. Оказалось, что длительность «спокойного периода» практически линейно растет с длиной θ -пинча и, следовательно, возникновение МГД-неустойчивости, по-видимому, связано с концевыми эффектами. По порядку величины «спокойный период» равен времени прохождения альфвеновской волной половины длины установки, но в то же время несколько уменьшается с увеличением энерговклада на частицу в плазме. Измерение диффузии плазмы поперек магнитного поля в спокойный период, проведенное на этой же установке, привело к заключению, что диффузия плазмы близка к классической и во всяком случае не превышает $1/20$ бомовской диффузии. Несколько отличные результаты были получены другой группой английских ученых, которые на коротком полуметровом

θ -пинче, где концевые эффекты могли быть более существенными, наблюдали аномальную диффузию, близкую к бомовской.

Следует отметить две интересные попытки американских ученых устранить развитие МГД-неустойчивости в θ -пинчах путем изменения традиционной для них геометрии магнитного поля. Одна из них, о которой на конференции докладывал А. Колб (США), связана с введением жесткого токопровода вдоль оси θ -пинча и созданием сильного азимутального магнитного поля, способного противостоять давлению сжимающейся плазмы. Возникающая при этом магнитная конфигурация аналогична конфигурации «Токамака» и в соответствии с теоретическими расчетами в некоторых условиях может обеспечить МГД-устойчивость горячей и плотной плазмы, существующей в θ -пинчах. К сожалению, эксперименты в этом направлении пока находятся в начальной стадии.

Вторая попытка устранения потерь, вызываемых концевыми эффектами, связана с изгибанием θ -пинча в тор. Однако в этом случае возникает необходимость устранения радиального движения плазмы, связанного с кривизной, т. е. обеспечения равновесия плазмы. Предполагается, что этого можно достичь гофрировкой плазменного шнура. К сожалению, при этом возникает опасность появления других мод МГД-неустойчивости и необходимости их стабилизации. О результатах моделирования этой неустойчивости на прямолинейной установке «Сцилла-IV» длиной 1 м и попытках ее стабилизации пропусканием постоянного или переменного продольного тока сообщалось в докладе американских ученых из Лос-Аламоса. К сожалению, влияние концевых эффектов не позволило в этих экспериментах получить условия, необходимые для стабилизации МГД-неустойчивости, возникающей из-за гофрировки, и поэтому результаты измерений пока тоже имеют предварительный характер.

Определенный интерес среди участников конференции вызвало предложение А. И. Морозова (ИАЭ) о создании термоядерных устройств на основе компрессионных МГД-течений плазмы, образующих стационарный плазменный фокус. Теоретические расчеты этого явления указывают на возможность получения в таких системах весьма большой степени сжатия плазмы. Проведенные к настоящему времени эксперименты в принципе подтвердили существование такого класса течений и образование плазменного фокуса. Следует отметить, что образование плазменного фокуса в компрессионных течениях

отличается от образования плазменного фокуса в нецилиндрических z -пинчах. В последнем случае сжатие подвергается немагнитная плазма, тогда как в первом — замагнитенная. Удастся ли в этих условиях получить плазму с параметрами, необходимыми для термоядерных реакций, решат дальнейшие эксперименты.

В докладах по физике горячей плазмы исследуются физические процессы, изучение которых углубляет наши представления о свойствах плазмы, а также представляет интерес с прикладной точки зрения использования их для целей достижения управляемого синтеза.

В нескольких докладах экспериментально изучались ударные волны в плазме. Явление ударных волн в разреженной плазме представляет как общефизический интерес, главным образом с точки зрения астрофизики, так и может найти практические применения как эффективный метод нагрева плазмы. В докладе Р. З. Сагдеева, суммирующем результаты многолетних исследований в ИЯФ, были представлены весьма интересные и обширные данные о различных ударных волнах в плазме: прямых (т. е. распространяющихся поперек магнитного поля), косых, а также волнах, возбуждаемых в плазме без магнитного поля. Весьма подробные данные об исследовании ударных волн были доложены также учеными и научными коллективами ИАЭ (СССР), США, Англии, ФРГ и Японии. Во многих экспериментах надежно установлено наличие аномального (т. е. нестолкновительного) сопротивления на фронте ударной волны, которое приводит к уширению фронта. Многие авторы придерживаются мнения, что аномальное сопротивление связано с раскачкой двухпотоковой ионно-звуковой неустойчивости, и это подтверждается экспериментально установленным сильным нагревом электронов. При больших числах Маха происходит еще большее уширение волны, связанное с ее опрокидыванием. В этих условиях происходит значительный нагрев ионов до энергии в несколько килоэлектронвольт.

Несколько докладов на конференции было посвящено исследованию процессов в спокойных плазмах. Сюда относятся, прежде всего, экспериментальные исследования на Q -машинах, посвященные более подробному изучению низкочастотных колебаний плазмы. В докладе Т. К. Чу, Х. В. Хенделя и др. было исследовано влияние вязкости и эффекта конечного ларморовского радиуса на дрейфовые волны, в частности исследована и сравнена с теорией раскачка волн конечной амплитуды (которые теоретически

рассматривались также в докладе В. Н. Ораевского, Х. Тассо, Х. Вобига). В докладе Е. Ф. Чена, Д. Мошера и К. Роджерса показано, что дрейфовая неустойчивость эффективно подавляется увеличением ширины и уменьшением длины столба плазмы.

Несколько докладов, как экспериментальных, так и теоретических, было посвящено исследованию нелинейных волн в плазме — их распространению и затуханию, распаду, влиянию на усредненную функцию распределения и нагрев, связи колебаний с диффузией. В теоретических докладах М. Н. Розенблюта, Б. Конни и Р. Н. Судана анализируется вопрос о взаимодействии волн положительной и отрицательной энергии в приложении к адиабатическим ловушкам, а в докладе Д. Доусона и Р. Шанни с помощью вычислительной машины изучается развитие пучковой неустойчивости.

Одно из заседаний было посвящено обсуждению результатов исследования плазмы, взаимодействующей с СВЧ-полями. Сюда относятся исследования по ВЧ-удержанию плазмы, по ее нагреву ВЧ-полями и стабилизации различных неустойчивых мод с помощью ВЧ-полей.

Интересными были доклады по турбулентному нагреву плазмы и коллективным взаимодействиям пучков с плазмой. Доклады показали, что в понимании физических процессов при взаимодействии пучков с плазмой достигнут существенный прогресс. В частности, в работе А. Г. Плахова, Д. Д. Рютова, В. В. Шапкина был детально исследован процесс пучкового нагрева электронной компоненты плазмы в адиабатической ловушке и развита его теория.

На заключительном заседании конференции академиком Г. И. Будкером была высказана мысль, что уже сейчас обширный круг принципиальных вопросов физики плазмы в значительной степени понят и следовало бы приступить к практическому сооружению термоядерного реактора. Надо сказать, что среди физиков-плазмистов проблема сооружения термоядерного генератора на базе замкнутых систем или θ -пинча действительно интенсивно обсуждается в течение последних лет. И хотя имеются значительные разногласия по многим вопросам сооружения таких установок, сам факт обсуждения этой проблемы, появление физически приемлемых проектов и расчетов характеризует тот значительный прогресс, который достигнут в последние годы в исследованиях по термоядерному синтезу.

Поступила в Редакцию 14/XI 1968 г.