

**О СОСТОЯНИИ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО УПРАВЛЯЕМЫМ
ТЕРМОЯДЕРНЫМ РЕАКЦИЯМ*)***Л. А. Ариимович*

Закончившаяся сегодня конференция продемонстрировала широкий размах исследований, связанных с проблемой управляемого термоядерного синтеза. Более 250 экспериментальных и теоретических работ было представлено в качестве материалов для конференции, и более 30 часов стремительный поток новой научной информации низвергался с этой кафедры на головы многочисленных слушателей. Обмен мнениями и результатами как в рамках официальных заседаний, так и во время так называемых «неформальных» дискуссий и отдельных бесед был очень интенсивным, и обсуждение научных вопросов носило плодотворный, хотя иногда, быть может, и очень горячий характер.

И все же, подводя итоги работы конференции, мы вынуждены признать, что за много лет интенсивного труда пройден лишь первый, сравнительно небольшой этап на пути к поставленной цели и мы еще только приближаемся к главному барьеру, преграждающему вход в область сверхвысоких температур.

Нагретая до высокой температуры плазма очень легко освобождается от накопленной тепловой энергии посредством различных механизмов неустойчивости. В экспериментах, осуществленных до сих пор, плотную плазму удавалось удерживать при относительно высокой температуре в течение промежутков времени, по порядку величины не превышающих сотни микросекунд. До сих пор интенсивность так называемых «настоящих» термоядерных реакций в плазме оказывается настолько малой, что они могут быть полностью замаскированы различными ускорительными процессами. Пока еще не установлен достаточно тесный контакт между результатами экспериментальных исследований и теоретического анализа. В особенности это относится к важнейшему вопросу об устойчивости плазмы. Вследствие этого пока еще слабо продвинута разработка методов стабилизации плазменных неустойчивостей.

Ответственность за такое положение вещей ложится, конечно, прежде всего на экспериментаторов. Однако у них есть все же серьезное оправдание. Оно следует из специфических свойств изучаемого объекта, которые крайне осложняют постановку и проведение экспериментов. Получение достаточно чистой водородной или дейтериевой плазмы само по себе представляет нелегкую задачу, так как из-за взаимодействия со стенками вакуумной камеры сгустки горячей плазмы очень быстро загрязняются

*) Заключительный доклад на Международной конференции по мирному применению атомной энергии, состоявшейся в г. Зальцбурге (Австрия) в сентябре 1961 г.

атомами и ионами примесей тех веществ, которые адсорбированы на поверхности стенок, вследствие чего возникают очень большие радиационные потери. В качестве примера заметим, что в опытах с тороидальными плазменными шнурами, даже после длительной вакуумной тренировки, при каждом разряде вспыхивает интенсивное излучение примесей. Это один из основных факторов, мешающих подъему температуры плазмы в опытах подобного рода. Очень большие трудности возникают при самой попытке исследовать свойства плазмы в таких кольцевых шнурах, так как здесь проявляется своеобразный принцип неопределенности, состоящий в том, что чистота условий опыта находится в непримиримом противоречии с использованием диагностической методики. Спрятанный за металлическими оболочками и сложными обмотками плазменный шнур оказывается, вследствие своей недоступности и крайней чувствительности к любому прикосновению, исключительно неудобным объектом для исследования. В установках, принцип действия которых основан на инжекции быстрых частиц в магнитное поле, нас встречает другая трудность: из-за малой эффективности источников потоки частиц имеют сравнительно небольшую интенсивность, и поэтому для заполнения ловушек требуется длительное время. За это время даже сравнительно слабые неустойчивости или же такие явления как перезарядка на остаточном газе успевают увести частицы из объема, и поэтому не удается получать плазму с заметной концентрацией.

Если же мы пытаемся инжестировать в ловушку струю плазмы, то возникает сразу три до сих пор не решенные проблемы: 1) как добиться, чтобы произошел захват плазмы, 2) как превратить направленный поток частиц струи в сгустки с более или менее изотропным распределением скоростей и 3) как избавиться от нейтрального газа, который вместе с плазменной струей выходит из инжектора.

После этих общих замечаний, которые в какой-то степени оправдывают сравнительно медленное продвижение вперед интересующей нас области науки, я перехожу к очень краткому и, естественно, также очень поверхностному обзору основных результатов, установленных в работах последних лет.

В целом в состоянии проблемы, несомненно, произошел очень большой сдвиг по сравнению с тем уровнем, который был продемонстрирован на Женевской конференции в 1958 г. Тогда основной объем научной информации по существу представлял собой нечто такое, что можно назвать выставкой идей. Эти идеи в большинстве своем были лишь слегка задрапированы грубыми и плохо проверенными экспериментальными данными, имевшими рекогносцировочный характер.

В противоположность этому сейчас почти по каждому разделу общей термоядерной программы можно назвать большое число тщательно выполненных экспериментальных работ и очень ценных результатов, образующих в своей совокупности достаточно надежный фундамент, опираясь на который можно будет в дальнейшем значительно ускорить темп исследований. Знаменательно, что при этом запас основных физических идей практически остался неизменным — за последние три года не было предложено ни одного существенно нового метода получения высокотемпературной плазмы. Вместе с тем произошло заметное перемещение центра тяжести в усилиях, направленных на разработку отдельных направлений общей программы.

В начальной стадии разработки проблемы управляемых термоядерных реакций особенно большое внимание уделялось экспериментальному исследованию простейшего способа получения высоких температур, в основе которого лежит использование линейных импульсных разрядов очень большой мощности и очень малой длительности (это так называемый быст-

рый линейный пинч). Усилия, направленные на исследование быстрого пинч-эффекта, позволили еще до Женевской конференции получить ясную картину явлений, происходящих при разрядах такого типа, и найти механизм, лежащий в основе динамики плазменного шнура. Как известно, этот механизм заключается в ускорении плазмы под действием электродинамических сил. Одной из наиболее интересных черт, характерных для процессов указанного рода, является возникновение жестких излучений: нейтронов (в дейтериевой плазме) и гамма-лучей. В настоящее время мы знаем, что в типичных условиях эксперимента жесткие излучения обусловлены ускорительными процессами, причиной которых являются определенные формы неустойчивости, свойственные плазменным шнурам с большой силой тока. По-видимому, главную роль в возникновении быстрых положительных ионов (а следовательно, и нейтронов) играют неустойчивости типа перетяжек, а за возникновение быстрых электронов ответственна винтовая неустойчивость, связанная с тенденцией плазменного шнура к образованию так называемых «бессиловых конфигураций».

Хотя в опытах с линейными пинчами удалось получить в плазме температуры, превышающие один миллион градусов, вскоре, однако, выяснилось, что вряд ли может быть серьезной надежда на практическое использование такого метода для получения интенсивных термоядерных реакций в масштабе, представляющем техническое значение. Поэтому интересы, естественным образом, переместились в сторону изучения систем несколько иного типа, в которых быстрое сжатие плазмы происходит под действием нарастающего внешнего поля. Речь идет о процессах, получивших название тета-пинч. При тета-пинч-эффекте достигается максимальная концентрация магнитной энергии в малых объемах. Поэтому сжатие плазмы внешним полем представляет значительно более эффективный метод создания высоких температур, чем линейный разряд. Сравнительная простота экспериментальной аппаратуры и заманчивые перспективные исследования в этой области привели к тому, что изучение свойств тета-пинча стало за последние годы одной из наиболее популярных тем в репертуаре исследований по управляемому синтезу. Об интересе к этому направлению говорит с достаточной ясностью большое количество докладов, представленных на конференцию (20 по сравнению с 2—3 в Женеве). Если дело пойдет так и дальше, то мы скоро приблизимся к осуществлению лозунга «Каждая домашняя хозяйка должна иметь свой собственный θ -пинч».

Основные факты, установленные при исследовании устройств, в которых образуется тета-пинч, сводятся к следующему: обычно в таких процессах внутри плотного цилиндрического слоя сжимающейся плазмы сохраняется захваченное магнитное поле, по направлению противоположное тому, которое давит на внешнюю поверхность плазмы. Работа сил магнитного сжатия расходуется в начальной стадии процесса главным образом на ускорение ионов, а релаксация захваченного внутреннего магнитного поля может вносить существенный вклад в нагревание электронной компоненты. Тета-пинч не является устойчивым плазменным образованием. Это обнаруживается особенно отчетливо на фотографиях свечения плазмы, полученных с помощью СФР. В плоскости, перпендикулярной к силовым линиям поля, сжимающийся комок плазмы напоминает чернильную кляксу или отдыхающего осьминога с дырой посередине. Мы имеем здесь дело с типичным случаем магнитогидродинамической неустойчивости так называемого желобкового типа. Она обусловлена, во-первых, тем, что в процессе быстрого сжатия и последующих радиальных пульсаций плазма испытывает сильное ускорение, и, во-вторых, тем, что линии поля имеют неблагоприятную форму (выпуклостью наружу). Несмотря на недостаточную согласованность данных, которые приводятся различными авторами,

можно все же принять, что на установках с предельными параметрами, построенных в Вашингтоне и в Лос-Аламосе, удастся на время порядка нескольких микросекунд получать сгустки плазмы с концентрацией 10^{16} и температурой порядка 10^8 эв. Я не хочу здесь затрагивать вопрос о природе нейтронного излучения, наблюдаемого в некоторых случаях быстрого сжатия дейтериевой плазмы, так как этот вопрос имеет чисто спортивный интерес. Заметим, что если бы кто-либо из счастливых наблюдателей этого эффекта привез с собой в Зальцбург горсточку чистых нейтронов, образующихся в среднем за один разряд, то ее вряд ли хватило бы для того, чтобы подарить в качестве сувенира всего по одному нейтрону каждому гражданину гостеприимной Австрии.

Следует признать, что, несмотря на многочисленные ценные исследования свойств тета-пинча, выполненные в Англии, СССР, США и других странах, природа этих процессов остается достаточно темной во многих отношениях (сюда относится вопрос о механизме релаксации захваченного поля, о причинах вращения плазменного сгустка, об утечке частиц и т. д.). Неизвестно также, можно ли рассчитывать на то, что с помощью быстрого сжатия удастся в дальнейшем без существенных изменений формы магнитного поля получить достаточно устойчивый комок горячей плазмы. Анализируя вопрос о дальнейшей судьбе этого направления исследований, мы должны принять во внимание, что в настоящее время нет способов, которые позволяли бы создавать более плотные сгустки горячей плазмы, чем те, которые получаются в устройстве типа тета-пинча. Поэтому можно предположить, что на протяжении ближайших лет экспериментальные исследования сверхбыстрого сжатия плазмы нарастающим полем будут продолжаться, хотя, по-видимому, мало вероятно, чтобы они имели самостоятельные практические перспективы в рамках термоядерной программы.

Традиционным разделом термоядерной программы является исследование так называемых квазистационарных, или медленных, разрядов в тороидальных камерах. В этом разделе до сих пор было два основных направления. Первое из них происходит от идеи создания парамагнитного плазменного шнура с током, впитывающего в себя продольное магнитное поле сравнительно небольшой напряженности. Эта идея, как известно, реализована в установках «Зета», «Альфа» и «Скептр». Второе направление основано на идее стабилизации тороидального разряда продольным полем, во много раз превышающим магнитное поле тока. Установки, принадлежащие к семейству «Токамак», являются материальным воплощением этого принципа. По существу, к тому же типу можно отнести «Стелларатор», если он работает в режиме омического нагрева.

Рассмотрим сначала ту ситуацию, которая сложилась на первом из указанных здесь основных направлений. Уже из доклада работников Харуэлла и Олдермастона на Женевской конференции выяснилось, что парамагнитный плазменный шнур становится жертвой неустойчивости. Последующие работы, выполненные как в Англии, так и в СССР на установке «Альфа», подтвердили эти первоначальные заключения. Однако это не должно было привести и в действительности не привело к прекращению работ. Эксперименты продолжались и дали ряд ценных сведений о поведении парамагнитных шнуров и свойствах образующей их плазмы. Мы укажем здесь только наиболее значительные результаты этих исследований.

Из-за малой величины газокинетического давления в плазменном шнуре создается бессильная геометрия магнитного поля, т. е. ток везде течет почти точно вдоль линий результирующего магнитного поля. Заметим, между прочим, что в квазистационарном режиме такая конфигурация

поля и тока формально эквивалентна состоянию с предельной анизотропией электропроводности. Энергия, вводимая в плазму от источника электрического питания, в режимах с относительно небольшой мощностью уходит в виде излучения примесей, а в более напряженных режимах выбрасывается на стенку потоками частиц. Спектроскопические измерения, выполненные на всех трех перечисленных выше установках, обнаруживают полное согласие в одном пункте: из них следует, что средняя энергия ионов в разряде значительно выше, чем тепловая энергия электронов. По поводу зависимости энергии ионов от заряда Z и массы M единого мнения, по-видимому, не существует. Из измерений, выполненных в Харуэлле, как будто бы следует, что энергия ионов растет линейно с M и практически не зависит от заряда. Опыты на «Альфе» дают существенно иной результат, указывая на то, что энергия многозарядных ионов приблизительно пропорциональна Z^2 и не очень сильно зависит от массы. Происхождение быстрых ионов пока еще не выяснено. Очень интересным эффектом является обнаруженное на «Зете» аномальное сопротивление плазмы, которое играет существенную роль в общем ходе процесса при низком начальном давлении газа в камере. Ответственность за резкое увеличение сопротивления плазмы можно а priori возлагать на самые различные формы неустойчивости. Однако от этого еще очень далеко до настоящего объяснения.

Несмотря на большое количество важной и интересной научной информации, представленной на конференции различными лабораториями, в которых ведутся исследования парамагнитных плазменных шнуров, все же складывается впечатление, что это направление приближается к тому моменту, когда источник свежих данных будет исчерпан.

Говоря о результатах работ, выполненных на установках типа «Зета», нельзя не отметить, что эти работы стимулировали развитие целого ряда новых методов диагностики плазмы. Одним из самых блестящих методических достижений последнего времени является разработанный в Харуэлле способ измерения излучения плазмы на длинах волн субмиллиметрового диапазона. Несомненным методическим достижением является также тонкая техника измерения энергетического спектра частиц плазмы, разработанная в Ленинграде и использованная на установке «Альфа».

Изучение процессов омического нагревания плазмы, находящейся в сильном магнитном поле, пока прошло только начальную стадию. Установлено, что при достаточно большой величине отношения H_z/H_ϕ (H_z — напряженность продольного поля, а H_ϕ — напряженность поля тока) внешние признаки грубой неустойчивости исчезают. Вместе с тем обнаружено, что диффузия плазмы поперек силовых линий в таких системах имеет аномальный характер. Коэффициент диффузии на много порядков превышает значение, вытекающее из классической теории, и приближается к той предельной величине, которую дает эвристическая формула Бома. Аномальная диффузия приводит к очень быстрому уходу частиц из плазменного шнура и в существующих установках ограничивает время его существования в лучшем случае несколькими сотнями микросекунд. Однако имеются некоторые экспериментальные факты, указывающие, что измерение скорости ухода частиц характеризует только поведение периферических областей плазменного кольца в тороидальной камере, в то время как внутри этого кольца существует более плотный ствол, в котором концентрация частиц удерживается на довольно высоком уровне (10^{12} – 10^{13}) в течение длительных промежутков времени. Истинный механизм процессов, являющихся причиной аномальной диффузии в системах типа «Токамак» и «Стелларатор», в настоящее время является предметом обсуждения.

Теория может предложить несколько возможных объяснений этого явления: магнитогиродинамические неустойчивости высших мод, неустойчивость, характерная для плазмы с неоднородным распределением температуры, генерация ионного звука и т. д., однако имеющихся экспериментальных данных пока еще недостаточно для того, чтобы произвести окончательный выбор между этими возможностями. Пуск в ход «Стелларатора С», с которым мы все должны поздравить ученых и инженеров, работающих в Принстоне, вероятно, позволит значительно ускорить получение информации, необходимой для окончательного разъяснения механизма аномальной диффузии при омическом нагреве плазмы.

Вряд ли могут существовать какие-либо надежды на то, что с помощью одного лишь омического нагрева в системах «Токамак» или в «Стеллараторах» удастся довести плазму до термоядерных температур. Однако не исключено, что этот метод создания горячей плазмы может быть очень полезен на первой стадии, когда температура поднимается до нескольких сотен электрон-вольт.

Исследования квазистационарных разрядов в сильном магнитном поле представляют несомненную ценность также с точки зрения физики плазмы. В таких разрядах плазма с высокой концентрацией заряженных частиц впервые предстает перед нами как объект с достаточно хорошо очерченной геометрической формой, освобожденный от тех катастрофических деформаций, которые за несколько микросекунд меняют все параметры в мощных разрядах малой длительности.

Наиболее широкий размах за последние годы приобрела разработка широкого класса систем, которые можно объединить под общим названием магнитных ловушек. Сюда относятся различные типы так называемых «зеркальных» машин, магнитные системы с остроконечной геометрией, «Астрон» и системы, в которых плазма должна удерживаться высокочастотным полем. К этой же категории следует отнести и «Стелларатор», так как по основному принципу действия он не связан с квазистационарными разрядами. В магнитных ловушках функция удержания плазмы возлагается на внешние поля и величина p может быть в принципе сколь угодно мала по сравнению с $H^2/8\pi$. При малой величине $8\pi p/H^2$ плазма не оказывает существенного влияния на сильное внешнее поле, и это облегчает задачу стабилизации некоторых опасных форм плазменной неустойчивости.

Рассмотрим сначала состояние экспериментальных исследований «по зеркальным» машинам. Системы, в которых плазма образуется путем инжекции и последующего захвата быстрых частиц, представлены в настоящее время «Огрой» и «ДСХ» (я говорю только о действующих установках). На «Огре» в течение последних лет изучался метод образования плазмы, основанный на инжекции молекулярных ионов, которые затем диссоциируют при столкновении с молекулами остаточного газа в камере. Обнаружено, что получающаяся таким путем плазма с низкой концентрацией подвержена действию характерной неустойчивости, которую можно рассматривать как предельный случай желобковой неустойчивости магнитогиродинамического типа. Эту неустойчивость можно резко ослабить с помощью электрического поля. Однако даже при наличии такой стабилизации и при большой величине инжектируемого ионного тока пока удалось поднять концентрацию быстрых ионов только до уровня порядка 10^7 см³. На установке «ДСХ», в которой диссоциация молекулярных ионов происходит на дуге, также наблюдаются явления, свидетельствующие о наличии неустойчивости (изменение энергетического спектра и распухание области занятой плазмы). Однако в этом случае механизм процессов, приводящих к потере устойчивости, может носить совершенно иной характер, чем в других магнитных ловушках, так как в «ДСХ» мы имеем дело с совершен-

но своеобразным коллективом частиц (большая ионная карусель в атмосфере привязанного к ней электронного газа).

У тех, кто в настоящее время изучает свойства ловушек рассматриваемого типа, заботы связаны не только с поисками методов подавления неустойчивости, но еще в большей степени с разработкой новых методов инжекции и захвата частиц, так как метод инжекции, основанный на диссоциации молекулярных ионов, не представляется особенно эффективным. В связи с этим полезную роль могут сыграть интересные опыты, сделанные в Олдермастоне. Речь идет об образовании атомов с высшими возбужденными уровнями в процессе диссоциации молекулярных ионов водорода. Ионизация потока таких возбужденных атомов магнитным полем даст новый механизм захвата заряженных частиц в ловушку. Однако условия для того, чтобы такой метод захвата был достаточно эффективным, очень критические, так как вероятность ионизации должна экспоненциально зависеть от величины $v \times H$.

Существенное значение для выяснения важнейшего вопроса об устойчивости плазмы в зеркальных ловушках имеют тщательные исследования свойств плазмы, которые в течение ряда лет проводились в Институте атомной энергии Академии наук СССР на установке, получившей название ионного магнетрона. Плазма с концентрацией быстрых ионов порядка 10^9 — 10^{10} , заполняющая камеру ионного магнетрона, обнаруживает характерную неустойчивость, которая ограничивает длительность удержания частиц в магнитном поле промежутками времени порядка 100 микросекунд. Анализ спектра и геометрического распределения высокочастотных колебаний плазмы показывает, что в данном случае имеет место типичный случай развития желобковой неустойчивости. Вместе с тем этот результат интересен еще в одном отношении — он демонстрирует, что грубая оценка времени распада неустойчивой плазменной конфигурации, в которой не учитывается стабилизирующее действие стенки, и скорость развития деформации определяется в линейном приближении, может давать результат, на два порядка отличающийся от полученного на опыте. Это означает, что к интерпретации измерений времени удержания плазмы нужно подходить с очень большой осторожностью: благодаря действию целого ряда стабилизирующих факторов бурная неустойчивость, разбрызгивающая сгустки плазмы за время, измеряемое долями микросекунды, может превратиться в медленное рассасывание плазмы, продолжающееся десятки доли миллисекунды.

Несомненный интерес представляют исследования магнитных ловушек с динамическими полями, которые уже в течение многих лет проводятся в Ливерморской лаборатории. В этой лаборатории разработана остроумная техника обращения с плазмой, с помощью которой сгусток плазмы в несколько этапов передвигается из одного участка ловушки в другой, постепенно сжимаясь и нагреваясь. Таким путем, по-видимому, удастся получать плазму с энергией ионов в несколько киловольт и концентрацией частиц порядка 10^{12} — 10^{13} , существующую в течение нескольких десятков микросекунд. Вопрос об устойчивости плазмы в этих опытах пока еще остается открытым.

За последние годы появился ряд экспериментальных работ, посвященных исследованию удержания плазмы в ловушках с так называемой остроконечной геометрией. Магнитная система такой ловушки создает поле с силовыми линиями, имеющими гиперболическую форму. Напряженность поля возрастает во все стороны от центральной области, в некоторой точке которой $H = 0$. Согласно предсказаниям теории, плазма, наполняющая такую ловушку, должна быть магнитогидродинамически устойчивой.

Однако это преимущество по сравнению с системами типа обычных зеркальных машин получается дорогой ценой. Простые соображения показывают, что заряженные частицы могут ускользать из ловушки, подходя достаточно близко к боковому краю области, занятой плазмой (она имеет форму детского волчка).

Подсчет числа частиц, уходящих из плазмы таким путем (через кольцевую щель), очень сильно зависит от конкретных предположений, которые делаются при теоретическом анализе. Поэтому оценка времени удержания плазмы в ловушке с остроконечной геометрией поля может быть получена только из прямых экспериментов.

Имеющиеся до сих пор в СССР, Англии и США экспериментальные данные по ловушкам с гиперболическим полем носят лишь предварительный характер. Метод заполнения ловушки плазмой в большинстве экспериментов один и тот же. Струя плазмы из инжектора проходит ловушку и частично захватывается в ней под действием процессов, механизм которых еще не вполне ясен. В согласии с предположениями простейших теорий оказывается, что частицы уходят из магнитной системы в радиальном направлении через кольцевую «щель». Время удержания плазмы в таких установках составляет несколько десятков микросекунд. Большинство опытов до сих пор было проделано со сравнительно холодной плазмой ($T_i \sim 10$ эв), и поэтому в механизме ухода частиц могли играть определенную роль кулоновские столкновения. Следует отметить, что поведение плазмы в ловушке должно существенно зависеть от характера ее распределения в пространстве. Механизм ухода частиц может иметь совершенно различный характер в случае, когда плазма сосредоточена в объеме, из которого поле вытеснено, и в случае, когда плазма и поле перемешаны друг с другом. В проделанных до сих пор экспериментах имел место второй из указанных случаев.

Первые опыты, в которых плазменный сгусток, вдушенный в ловушку рассматриваемого типа, подвергается быстрому сжатию в нарастающем магнитном поле, пока еще не дали достаточно определенных результатов, но зато продемонстрировали хорошую экспериментальную технику.

В связи с тем, что как «зеркальные машины», так и ловушки с встречными магнитными полями обладают (по крайней мере теоретически) крупными дефектами и, вероятно, не могут служить для длительного удержания высокотемпературной плазмы, естественно возникает мысль о создании магнитной ловушки с полями комбинированного типа, в которых должны объединиться достоинства простых систем и исчезнуть их недостатки. Простым примером такой ловушки может служить устройство, в котором к полю магнитных зеркал добавляются поля токов, текущих по металлическим проводникам, расположенным вдоль линий магнитного поля зеркальной системы симметрично относительно оси. Первые же опыты с этой комбинацией полей, выполненные в Институте атомной энергии имени И. В. Курчатова, позволили обнаружить интересные факты. Оказалось, что с помощью проводников с таким расположением можно повысить время жизни быстрых частиц примерно на порядок величины.

Одновременно с увеличением длительности удержания ионов наблюдается резкое снижение амплитуды высокочастотных колебаний в плазме. Если этот сугубо предварительный результат получит дальнейшее развитие, то это будет означать, что имеется эффективное средство борьбы с той формой магнитогидродинамической неустойчивости, которая представляет главную опасность для систем с магнитными пробками.

Наиболее совершенной ловушкой с комбинированными полями является «Стелларатор». Однако он представляет собой настолько сложную

установку, что проведение экспериментальных работ на ней является очень нелегкой задачей. Поэтому необходимо искать также другие пути создания полей, обеспечивающих устойчивость плазменных конфигураций.

Следует сказать несколько слов о так называемой проблеме «универсальной аномальной диффузии», которая время от времени появляется на горизонте в качестве мрачного предвестника грядущих бедствий.

В настоящее время мы вряд ли можем согласиться с тем, что аномальная диффузия является неизбежным пороком плазмы, запертой в магнитном поле. Гораздо вероятнее, что она связана с характерными свойствами магнитных ловушек и зависит от тех манипуляций, которые проводятся с плазмой. Так, например, создается впечатление, что при омическом нагревании аномальная диффузия трудно устранима. Если же плазма не подвергается воздействию тока, текущего вдоль линий магнитного поля, то аномальная диффузия может полностью отсутствовать или же проявится в сильно ослабленной форме.

Разрешите мне перейти к заключению. Проблема управляемого термоядерного синтеза по своей трудности оставляет позади все другие научно-технические проблемы, порожденные успехами естествознания в XX веке. Эти трудности особенно резко заметны по контрасту с простотой тех физических идей, на которых основаны конкретные методы удержания и нагревания плазмы.

При оценке дальнейших перспектив наибольшую неопределенность представляет вопрос о том, какая опасность связана с различными формами неустойчивости плазмы. И вместе с тем именно этот вопрос и есть единственное по-настоящему большое место всей проблемы. Мы видим, что теоретические исследования все время обнаруживают новые механизмы возникновения неустойчивости. Вместе с тем они отнюдь не идут в сторону доказательства универсальной нестабильности плазмы. Нужно также иметь в виду, что степень убедительности всех прогнозов на устойчивость не очень велика, и поэтому в применении к практическим вопросам теория устойчивости дает скорее осторожные рекомендации, чем строгие правила. Хотя это и невозможно доказать, но все же создается убеждение, что при дальнейшем развитии способов нагревания и термоизоляции плазмы, известных в настоящее время, удастся, используя достаточно сильные магнитные поля, создать высокотемпературную плазму с довольно высокой плотностью, устойчивую в первом приближении и способную генерировать интенсивные термоядерные реакции. При этом, вероятно, величина $\beta = \frac{8\pi p}{H^2}$ будет

невелика. Это удастся выполнить, если разрабатываемые в настоящее время методы устранения наиболее опасной магнитогидродинамической формы неустойчивости дадут успешные результаты.

Такой ход событий не будет, однако, означать достижения окончательной практической цели, а лишь преодоление первого большого барьера на пути к ней. За этим барьером нас могут поджидать другие неприятности, роль которых станет вырастать по мере того, как мы будем шагать в сторону более высоких температур. Заметим, что если в плазме существуют флуктуации электрического поля с частотой порядка 1 Мгц , при напряженности всего лишь порядка 10 в/см , то и этого может оказаться достаточно, чтобы свести время жизни быстрых частиц до нескольких миллисекунд.

Сейчас всем ясно, что первоначальные предположения о том, что двери в желанную область сверхвысоких температур откроются без скрипа при первом же мощном импульсе творческой энергии физиков, оказались столь же необоснованными, как и надежда грешника войти в царство небесное, минуя чистилище.

И все же вряд ли могут быть какие-нибудь сомнения в том, что в конечном счете проблема управляемого синтеза будет решена. Неизвестно только, насколько затянется наше пребывание в чистилище. Из него мы должны будем выйти с идеальной вакуумной технологией, отработанными магнитными конфигурациями, с точно заданной геометрией силовых линий и с программированными режимами электрических контуров, неся в руках спокойную, устойчивую высокотемпературную плазму, чистую, как мысль физика-теоретика, когда она еще незапятнана соприкосновением с экспериментальными фактами.

От имени советской делегации я хочу выразить искреннюю признательность бургомистру города Зальцбурга за гостеприимство и секретариату МАГАТЭ за хорошую организацию конференции.
