

621.039.6

НА ПУТИ К ТЕРМОЯДЕРНОМУ РЕАКТОРУ *)

Р. Пост, Т. Фаулер

Предлагаемая статья посвящена анализу усилий, затрачиваемых на получение управляемой термоядерной энергии. Уже более десяти лет исследования по управляемому термоядерному синтезу (УТС) вызывают энтузиазм большой группы физиков и инженеров, работающих во многих странах. Энтузиазм этот можно объяснить двумя важными обстоятельствами.

Во-первых, термоядерная энергия могла бы окончательно решить для человечества проблему постоянно увеличивающейся потребности в энергии на нашей планете. Наша планета имеет ограниченные запасы угля и нефти и не может бесконечно загрязнять свою атмосферу продуктами их сгорания. Если же проводить сравнение с атомной энергией, использование которой уже стало реальностью, то следует отметить, что термоядерная энергия будет безопасной и свободной от радиоактивных отходов. Кроме того, термоядерное топливо — дейтерий — дешев, легко доступен, имеется в изобилии в морской воде.

Второе обстоятельство связано с развитием новой научной дисциплины: физикой горячей плазмы. Сами по себе термоядерные реакции, изученные в лабораториях, хорошо известны как источник энергии Солнца и других звезд и в них нет ничего загадочного (рис. 1). Поэтому исследования УТС сосредоточены фактически на изучении поведения плазмы. В настоящее время решающей проблемой является изучение устойчивости (или неустойчивости) плазмы.

Близкое родство между УТС и физикой плазмы лежит в природе этого процесса. УТС — это своего рода огонь, который может быть зажжен только при исключительно высоких температурах, характерных для центра звезд. Для того чтобы получить на Земле энергию от УТС, мы должны нагреть топливо (дейтерий) до температуры воспламенения, которая превышает 100 млн. градусов. При такой температуре топливо превращается в плазму, т. е. в полностью ионизованный газ, состоящий из свободных электронов и атомных ядер или положительно заряженных ионов.

Задача заключается в том, чтобы удержать горячую плазму до тех пор, пока не произошла реакция синтеза между значительным числом ядер. Необходимое время удержания меньше, если плазма плотная, но энергия при этом будет выделяться со взрывной скоростью. Чтобы получать энергию контролируемым образом, а не в результате взрыва, необходимо иметь дело с довольно разреженной плазмой, удерживаемой в относительно большее время. Плотность плазмы должна быть не больше, чем

*) T. K. Fowler and Richard Post, Progress toward Fusion Power. Sci. Amer. 215, 21 (1966). Перевод М. С. Рабиновича.

тысячная или, может быть, даже стотысячная часть плотности воздуха при нормальных условиях. При таких плотностях время удержания должно измеряться десятками долями секунды. Это время в миллионы раз больше, чем требуется иону, чтобы пересечь весь объем плазмы. Следовательно, на поверхности плазмы должны действовать силы, многократно отражающие ионы, другими словами, плазму должно что-то удерживать. Это что-то не может быть сделано из вещества. Контакт со стенками

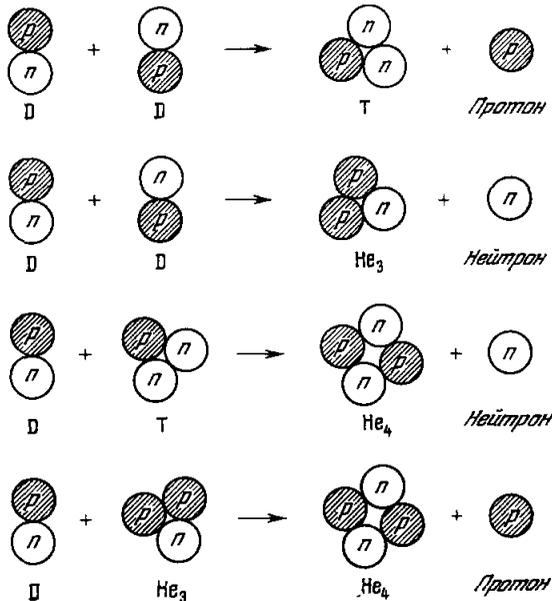


Рис. 1. Реакция синтеза гелия происходит, если изотопы водорода и гелия имеют достаточную энергию, чтобы преодолеть силы отталкивания. Если изотопы имеют достаточную энергию, образуется плазма: полностью ионизованный газ, состоящий из ионов и электронов. Чтобы получить самоподдерживающуюся термоядерную реакцию, плазма, состоящая из тяжелых изотопов водорода, должна иметь температуру около 100 млн. градусов. Такая температура соответствует энергии 10 *кэв*.

тонкой струе воздуха: флуктуации в потоке воздуха или какое-то произвольное неверное движение мяча приводит к его падению.

Уже примерно 15 лет назад, когда впервые была выдвинута идея магнитного удержания плазмы*), стало ясным, что если при указанных условиях плазма устойчива, то проблема УТС будет решена. Наоборот, макроскопическая неустойчивость плазмы привела бы к провалу идеи магнитного удержания плазмы. В те времена почти ничего не было известно о поведении горячей плазмы в магнитном поле. Не было теории, не было экспериментов, так как тогда отсутствовали методы нагрева плазмы до термоядерных температур в лабораторных условиях. Первые эксперименты по УТС окончились неудачей из-за неустойчивости плазмы. Это обстоятельство разбило всякие надежды на простое решение проблемы.

*) В Советском Союзе впервые идея магнитного удержания плазмы была высказана А. Д. Сахаровым и И. Е. Таммом в 1950 г. (Прим. перев.)

или даже с воздухом немедленно понизит температуру плазмы ниже точки «воспламенения».

Если не обнаружится что-то неожиданное, то, по-видимому, практическим методом удержания плазмы будет метод «магнитной ловушки». Плазма помещается в вакуумную камеру, чтобы избежать контакта с воздухом. Сильное магнитное поле сжимает плазму и держит ее частицы вдали от стенок камеры. Это происходит в результате взаимодействия магнитного поля со свободными заряженными частицами плазмы — электронами и ионами.

Можно обеспечить равновесие между кинетическим давлением частиц, многократно пытающихся покинуть плазму, и силами магнитного поля. Вопрос состоит в том, можно ли такой точный баланс сил длительно поддерживать. Ситуация в некотором отношении похожа на игру в мяч, качающийся в

Тем не менее было найдено, что при некоторых условиях магнитное удержание, по крайней мере частично, эффективно.

Вдохновленные даже такой слабой надеждой, многие лаборатории мира разработали широкую программу исследований. Начиная с 1958 г., после того как все страны рассекретили свои программы, исследования по УТС проводились на основе весьма тесной международной кооперации. Достиagnутые успехи производят сильное впечатление. Сейчас мы имеем разработанную новую технику, новую основу знаний, которые оказали влияние не только на исследования по УТС, но и на развитие астрофизики, космических исследований и многие другие разделы науки и техники.

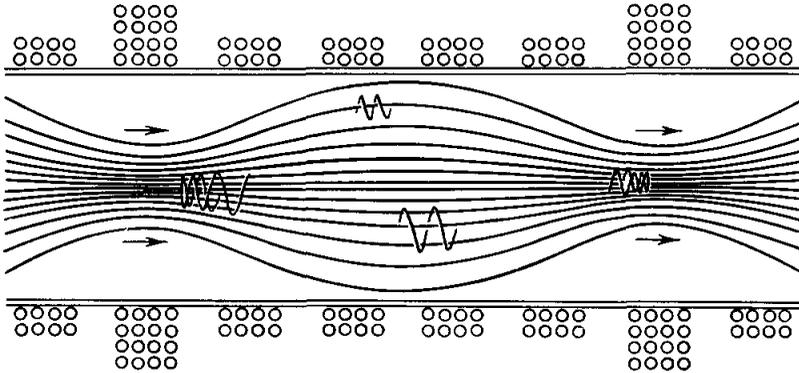


Рис. 2. Удержание частиц плазмы в магнитной ловушке, в которой магнитное поле усилено на обоих концах (в пробках). Более сильное поле в пробках уменьшает радиус обращения частиц около силовых линий и заставляет их двигаться вдоль силовой линии в противоположном направлении.

Исследования по УТС базируются теперь на глубоком понимании причин неустойчивости плазмы. Более важно, что с ростом понимания возникли новые методы (некоторые из них уже проверены на опыте), с помощью которых можно управлять некоторыми типами неустойчивости.

Теперь доказано, что некоторые наиболее опасные типы неустойчивостей плазмы могут быть подавлены несколькими методами. Первый метод, который мы обсудим, базируется на самых общих принципах и поэтому его важность в будущих исследованиях, по-видимому, не вызывает сомнения. Этот метод осуществляется в комбинированной конфигурации с минимумом магнитного поля и связан с особой формой силовых линий магнитного поля, удерживающего плазму, и определяется влиянием этой формы на устойчивость. Он применяется для подавления макроскопической неустойчивости движения плазмы как целого. Метод комбинированного магнитного поля весьма эффективно осуществляет контроль над этой неустойчивостью. Стабилизирующее действие таких полей хорошо понято и проверено во многих экспериментах, доложенных на последней конференции по УТС в Англии в сентябре 1965 г.

Для того чтобы объяснить принцип действия комбинированной магнитной конфигурации с минимумом магнитного поля, мы вынуждены сделать небольшой обзор основных фактов о поведении плазмы в магнитном поле. В первых экспериментах по УТС старались удержать плазму в самосжатом разряде («пинч-эффект») магнитным полем, созданным током, протекающим через плазму. Однако было доказано, что такие системы неустойчивы, и поэтому вскоре перешли к установкам, в которых магнитное поле создается внешними обмотками с током.

Простейшая форма магнитной ловушки показана на рис. 2. Напряженность магнитного поля увеличена на концах (пробках), так что частицы плазмы отражаются от мест сгущения силовых линий обратно в ловушку. Поле на каждом конце усиливается специальной катушкой, так что силовые линии сгущаются. Как только частица подходит к этой области, увеличивающееся магнитное поле останавливает частицу и отражает ее обратно.

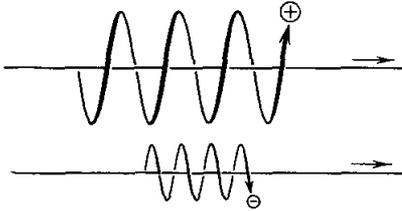


Рис. 3. Частицы плазмы в магнитном поле движутся по спирали вокруг силовых линий магнитного поля.

Таким образом, частицы движутся туда и обратно между магнитными пробками.

Однако в поперечном направлении, в районе, где магнитные линии выгнуты наружу, напряженность магнитного поля уменьшается по мере удаления от оси. Это дает возможность частицам уйти из ловушки. Когда частицы движутся назад и вперед вдоль силовых линий, они одновременно вращаются вокруг этих линий (рис. 3).

При таком движении по спирали частицы попадают в более слабое магнитное поле, когда они отходят от силовой линии в одну сторону, и в более сильное поле, когда они отходят в другую сторону (ближе к оси). Таким образом, радиус кривизны орбит во внешней части ловушки больше, чем во внутренней. Это значит, что, помимо движения по спирали, частица дрейфует по большим окружностям с центрами, лежащими на магнитной оси.

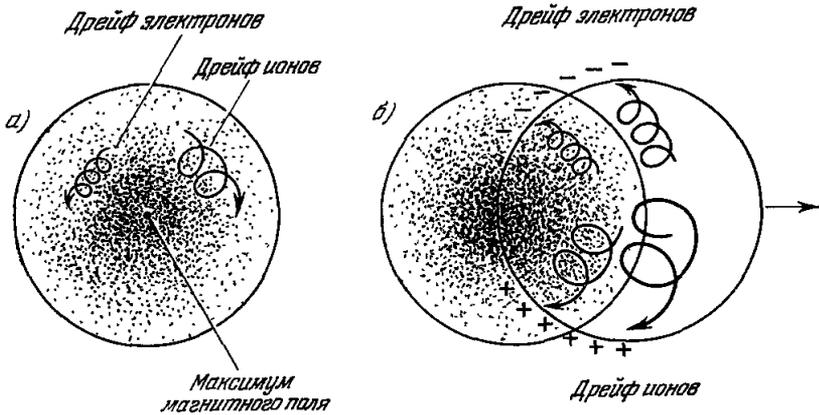


Рис. 4. Конвективная неустойчивость возникает потому, что кривизна орбит изменяется при изменении напряженности магнитного поля. Это приводит к дрейфу электронов и ионов поперек поля в противоположных направлениях. В равновесии (слева) дрейф частиц происходит параллельно поверхности, и нейтральность плазмы не нарушена. Если плазма сместится (справа), дрейфующие частицы пересекут поверхность, что приведет к разделению зарядов. Если магнитное поле имеет конфигурацию, показанную на рисунке, возникшее электрическое поле сместит плазму еще дальше.

Допустим, что вся плазма или ее часть мгновенно сместится в сторону от оси. Тогда дрейф частиц, который по-прежнему происходит вокруг магнитной оси, перенесет частицы за край смещенной области, причем ионы и электроны дрейфуют через разные участки границы смещенной области (рис. 4). Это связано с тем обстоятельством, что дрейф частиц с противоположным знаком заряда происходит в противоположных на-

правлениях (по часовой стрелке и против часовой стрелки). При разделении зарядов возникает электрическое поле, которое быстро выбрасывает плазму из магнитного поля. Катастрофическое следствие этих событий называют конвективной неустойчивостью.

Неустойчивость плазмы в простой ловушке аналогична неустойчивости шара, находящегося на вершине холма. Достаточно небольшого смещения, чтобы шар скатился вниз. Аналогично, если небольшие возмущения смещают плазму поперек магнитного поля, плазма скатывается с магнитного холма, т. е. движется в сторону меньшего магнитного поля в поперечном направлении. Если бы шар находился не на вершине холма,

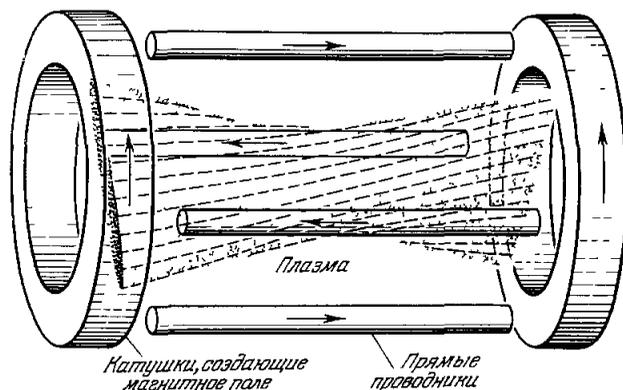


Рис. 5. «Магнитную яму» можно создать, если обычную магнитную ловушку окружить четырьмя прямыми проводниками с током. В результате получится вращающееся в пространстве магнитное поле, напряженность которого увеличивается во всех направлениях и поэтому частицы, стремящиеся уйти из плазмы поперек линии магнитного поля, отражаются обратно к центру. Стрелки показывают направление тока в проводниках. Идея «магнитной ямы» позволила значительно продвинуться в попытках удерживать плазму.

а на дне ямы, то его положение было бы устойчивым. Эта аналогия вызывает вопрос: каким образом следует создавать магнитное поле, сжимающее плазму, чтобы она не могла бы вытекать ни в каком направлении?

Ответ базируется на том факте, что макроскопическое движение плазмы затруднено в направлении возрастания абсолютной величины напряженности магнитного поля. Мы уже столкнулись с таким эффектом, когда рассматривали движение плазмы вдоль силовых линий магнитного поля. В этом случае мы указали, что частицы отражаются в пробках поля. Аналогичная картина получается при движении поперек силовых линий магнитного поля, так как электрическое поле такой же величины, как и в конвективной неустойчивости, но противоположно направленное, возвращает плазму в первоначальное положение. Поэтому в принципе плазма была бы устойчива, если бы она была помещена в магнитное поле, напряженность которого возрастала бы во всех направлениях, т. е. если бы она была помещена в магнитную яму. Хотя такие магнитные конфигурации были предложены давно *), первое экспериментальное доказатель-

*) Принципиально новым шагом группы М. С. Иоффе явилось создание «магнитной ямы» без нарушения адиабатичности магнитной ловушки. В этой системе магнитный момент электронов и ионов, так же как и в обычной ловушке, является инвариантом. (Прим. перев.)

ство возможности стабилизации конвективной неустойчивости в магнитной яме впервые было продемонстрировано группой сотрудников Института атомной энергии им. И. В. Курчатова под руководством М. С. Иоффе в 1961 г.

Относительно простой вариант системы с магнитной ямой показан на рис. 5. Катушки на концах системы создают магнитные пробки. Четыре прямых проводника с током окружают всю систему. Ток в соседних прямых проводниках течет в противоположных направлениях. Таким образом, на оси системы (дне магнитной ямы) магнитное поле от всех прямых проводников взаимно компенсируется. Следовательно, поле на оси создается только катушками, а вне оси к полю катушек прибавляется поле прямых проводников. Поэтому магнитное поле, слабое в центре, постепенно увеличивается по мере приближения к прямым проводникам.

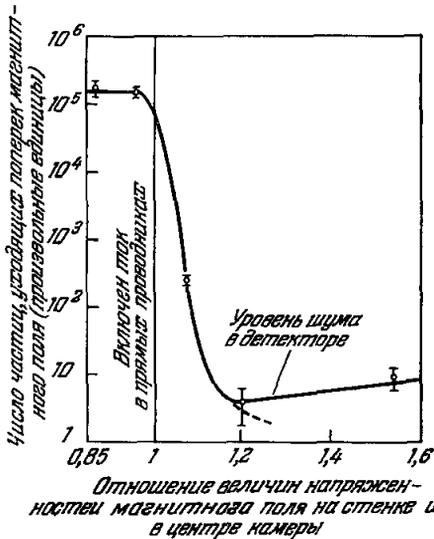


Рис. 6. Результаты экспериментов с «магнитной ямой», проведенных в Радиационной лаборатории имени Лауренса (США). По оси ординат отложено число частиц, уходящих из плазмы до и после создания «магнитной ямы».

уходят на стенку и плазма живет в системе несколько микросекунд. Если включить ток в прямых проводниках, то поток частиц на стенку уменьшается в сотни тысяч раз (рис. 6).

Идея создания магнитной ямы является вехой в исследовании УТС. Успех в подавлении неприятной конвективной неустойчивости посеял надежду, что тот же самый принцип может быть использован для подавления других макроскопических неустойчивостей, в частности, некоторых неустойчивостей в «замкнутых» системах. В таких системах, например, можно избежать одной неприятности систем с открытыми концами, которую мы сейчас обсудим.

В системах с пробками на концах магнитные силовые линии уходят наружу за пробки. Сильное поле на концах отражает частицы, вращающиеся вокруг силовых линий. Но любая частица, движущаяся почти параллельно силовой линии, может уйти через пробку. Причиной, приводящей к тому, что некоторые частицы начинают двигаться вдоль силовых линий, являются соударения между ними. Таким образом, всегда происходит медленный уход частиц из системы. Уход частиц через пробки отсутствует в замкнутых тороидальных системах. В таких системах магнитные силовые линии не имеют ни конца, ни начала (рис. 7) [см. статью Л. Спитцера «Стелларатор», УФН 71, 327 (1960)].

Однако было обнаружено, что в торе частицы довольно быстро уходят поперек силовых магнитных линий. Возможно, что на этот уход влияют

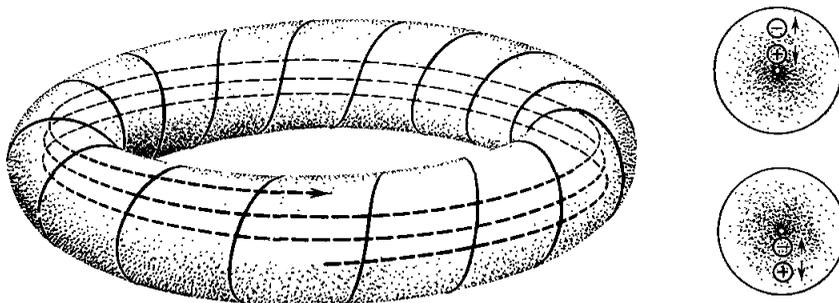


Рис. 7. Торoidalное магнитное поле — основная черта «стелларатора», разработанного в Принстонском университете. В простом торoidalном соленоиде создается неоднородное поле, приводящее к разделению зарядов, как это показано на рис. 4, и к разрушению плазмы. Для того чтобы избежать этого, используется дополнительная обмотка, что приводит к вращению силовых линий таким образом, что это препятствует разделению зарядов. На рисунке слева горизонтальная линия — это часть магнитной силовой линии, которая образует торoidalную поверхность. Каждая магнитная силовая линия находится в некотором поперечном сечении сверху от оси тора, а в другом сечении — снизу от оси тора; эти два сечения показаны справа. В результате такого характера линий электроны и ионы дрейфуют от оси в одном сечении и по направлению к оси — в другом.

и другие причины, хотя имеются указания, что причиной этих потерь могут быть макроскопические неустойчивости. Если это так, то, воспользовавшись идеей о магнитной яме, мы могли бы ожидать, что уход плазмы прекратится, если вдоль длины тора была бы создана глубокая магнитная яма, т. е. напряженность магнитного поля возрастала при движении от оси тора наружу. К сожалению, это невозможно сделать с помощью обмоток или прямых проводников. Как мы видели, магнитная яма создается силовыми линиями, выпуклость которых направлена всюду внутри системы. Силовая линия при обходе тора переходит с его внутренней стороны на наружную, поэтому кривизна линии должна изменять знак. Если смотреть изнутри тора, то можно увидеть, как в некоторых местах выпуклость силовых линий направлена наружу.

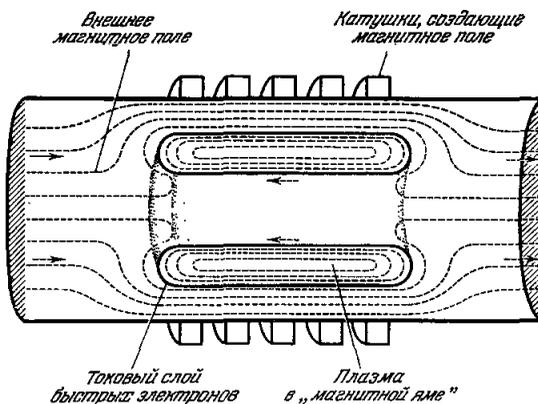


Рис. 8. Астрон — установка, разрабатываемая в филиале Радиационной лаборатории имени Лауренса в Ливерморе. В установке используются слой быстрых электронов (так называемый E-слой) и обычные обмотки, чтобы создать магнитную яму в торoidalной области, из которой не уходят магнитные силовые линии. Такая торoidalная яма может существовать только в той области пространства, где течет ток. E-слой как раз и создает такую область. Ожидается, что соударение между быстрыми электронами и плазмой создаст необходимые высокие температуры для УТР.

Существуют два метода разрешения этой дилеммы. Первый метод осуществляется в программе «Астрон». Как показано на рис. 8, плазма создается E-слоем электронов, движущихся почти со скоростью света, по своей

форме похожим на кольцо для салфеток. Электроны, вращаясь во внешнем магнитном поле, сами создают магнитное поле, которое образует тороидальную магнитную яму для удержания плазмы. Хотя, как мы уже говорили, невозможно создать тороидальную магнитную яму, используя только обычные металлические проводники, внутри проводников, где поле слабое, существует глубокая магнитная яма. Циркулирующий ток электронов в E -слое дает пример ямы, существующей в проводниках. Для того чтобы яма, созданная электронами, была эффективной, напряженность магнитного поля электронов должна быть больше напряженности внешнего управляющего поля, поэтому ток электронов в E -слое

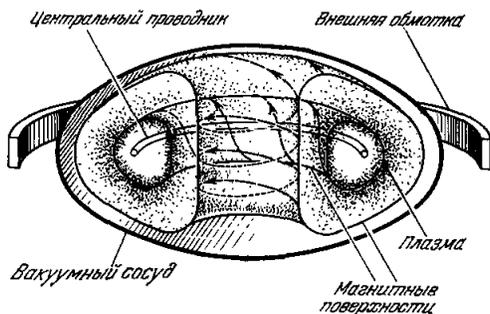


Рис. 9. Тороидальная установка с широм, названная «сфератором», в настоящее время сооружается в лаборатории физики плазмы Принстонского университета. В установке создаются замкнутые магнитные поверхности, которые удерживают плазму. «Шир» создается из-за того, что силовые линии имеют различный вид на разных поверхностях. Образуется также «усредненная магнитная яма». Это означает, что в среднем магнитное поле минимально в области расположения плазмы.

хую» область за время, в течение которого не успевает развиться макроскопическая неустойчивость. До тех пор, пока мы говорим о макроскопической неустойчивости, эффект определяется средней силой, действующей на частицы во время их движения вдоль силовых магнитных линий. Если они проводят больше времени в «хороших» районах, чем в «плохих», то «хорошие» районы играют большую роль, и плазму можно стабилизировать, подобно тому как корабль, подверженный действию переменного ветра, может проложить свой курс, когда благоприятные периоды перевешивают неблагоприятные (рис. 9).

Первые испытания этого метода «усредненной ямы» были весьма обнадеживающими. Был создан тор, магнитное поле в котором создавалось четырьмя проводниками, очень похожими на проводники, использованные в прямолинейных системах для создания магнитной ямы, но согнутыми по окружности (рис. 10). Замкнутые магнитные силовые линии окружают проводники. Частицы плазмы, движущиеся вдоль силовых линий, попадают в область уменьшающегося поля за проводниками. Однако при полном обороте стабилизирующие силы превалируют. Пока экспериментальные результаты как будто указывают на то, что макроскопическая неустойчивость не проявляется.

Кроме метода магнитной ямы, существует второй важный метод преодоления макроскопической неустойчивости. Его можно назвать методом

должен быть большим. Решающим является вопрос об устойчивости самого адекватного E -слоя. По-видимому, устойчивый E -слой уже был реализован в лаборатории, однако поле, созданное электронами, еще очень мало по сравнению с управляющим внешним полем.

Второй метод создания магнитной ямы в замкнутой системе основан на некотором компромиссе и использует обычные проводники с током. Хотя истинная тороидальная магнитная яма и невозможна, не исключена возможность создания тороидальной цепочки из «хороших» и «плохих» участков поля, связанных силовыми линиями, лежащими на тороиде. Если расстояние между «хорошими» участками с магнитной ямой достаточно мало, то быстро движущаяся плазма проходит «пло-

«короткого замыкания», так как любое разделение зарядов может быть ликвидировано «коротким замыканием».

В магнитном поле плазма обладает хорошей электрической проводимостью вдоль силовых магнитных линий, так как при движении вдоль магнитного поля никакие силы не действуют на частицы. Наоборот, в направлении, перпендикулярном к магнитному полю, проводимость очень плохая. Этим, в частности, объясняется, почему так долго разделены заряды при развитии конвективной неустойчивости, когда положительные и отрицательные заряды дрейфуют поперек магнитного поля в разные стороны. Можно сказать, что они изолированы в различных продольных магнитных трубках. Предположим однако, что мы введем проводник, который соединит трубки. Это создаст путь, по которому может течь ток поперек магнитного поля, и группы разделенных положительных ионов и электронов быстро вернуться в первоначальное смешанное состояние.

Этот метод проверен в экспериментах с прямолинейными магнитными ловушками и все происходит так, как это и было предсказано. Вместо того чтобы создавать магнитную яму, помещаем хорошо проводящие металлические пластины на концах системы и добиваемся стабилизации конвективной неустойчивости. Однако мы интересуемся главным образом использованием этого метода для замкнутых тороидальных систем. В таких системах мы не можем использовать металлические торцевые пластинки, поскольку системы не имеют торцов. Совершенно отличная схема «короткого замыкания» в тороидах изучается уже в течение продолжительного времени.

Рассмотрим магнитное поле, в котором магнитные линии вращаются около центральной оси подобно винтовой нарезке или полосам на парикмахерском жезле *) (рис. 11). Говорят, что такое поле обладает «широм» (перекрещенностью силовых линий), если число шагов спирали изменяется по мере удаления от оси, т. е. с увеличением расстояния от оси наклон силовых линий либо уменьшается, либо увеличивается. В таких полях силовые линии не параллельны: они перекрещены. Это приводит к важным следствиям. Соседние области плазмы с противоположными зарядами, возникшими при развитии неустойчивости, могут быть связаны силовой линией, проходящей через обе области. Если расстояние не велико (а оно

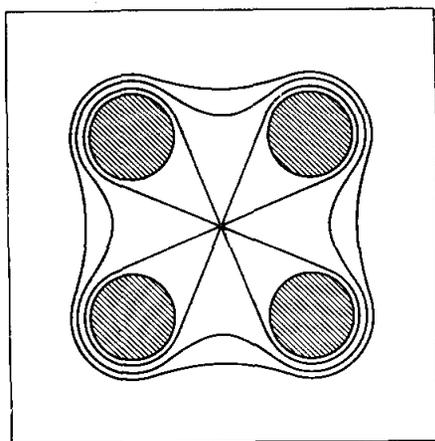
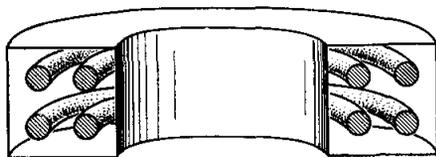


Рис. 10. Тороидальная «магнитная яма». Расположение проводников, показанное на верхнем рисунке, соответствует прямым проводникам рис. 8. На нижнем рисунке «хорошие» области поля лежат между проводниками, «плохие» области — в углах сечения камеры. При усреднении получается стабилизирующий эффект. Это было недавно экспериментально показано в лаборатории университета в Висконсине и «Дженерал Динамикс корпорейшн».

*) В США парикмахерский жезл (как символ профессии) разукрашен спиральными белыми и красными полосами. (Прим. перев.)

тем меньше, чем больше шир), то силовая линия будет действовать как линия «короткого замыкания». По силовой линии потечет ток, и заряды взаимно нейтрализуются. Хотя метод стабилизации широм нельзя считать новой идеей, для горячей плазмы он до сих пор экспериментально не исследован. При низких температурах эффект «короткого замыкания» уменьшается из-за плохой проводимости, зависящей от частоты соударения между частицами. Действительно, низкотемпературная плазма неустойчива, даже если она помещена в систему с большим широм. При более высоких температурах частота соударений мала, и действие шира должно

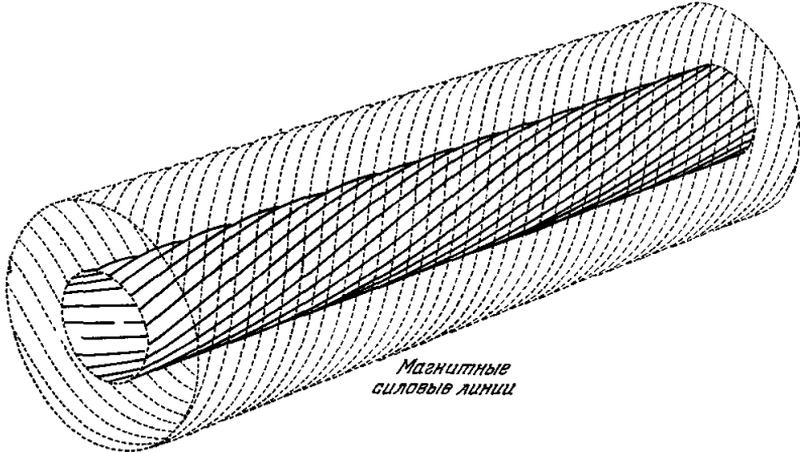


Рис. 11. Магнитное поле, обладающее «широм», позволяет осуществить метод «короткого замыкания» в плазме и таким образом воспрепятствовать разделению зарядов, приводящему к конвективной неустойчивости. Чтобы получить шир, магнитные силовые линии должны быть винтовыми и вращаться вокруг оси таким образом, чтобы количество шагов винта возрастало по мере удаления от оси. На рисунке показаны винтовые линии на двух различных расстояниях от оси.

быть более эффективным. В настоящее время проводятся исследования для выяснения, насколько целесообразно комбинировать систему с широм и усредненной магнитной ямой.

Таким образом, пока речь идет о макроскопических неустойчивостях горячей плазмы, мы, основываясь на достигнутых успехах, уверены, что эти неустойчивости могут быть сделаны в конечном счете управляемыми. Теперь перейдем к другим, более слабым (кинетическим) неустойчивостям, которые возникают при наличии потоков и диффузии частиц плазмы. Эти неустойчивости микроскопические и не связаны с макроскопическим движением плазмы. Они менее чувствительны к стабилизации магнитной ямой и другими описанными выше методами. В поисках путей классификации и понимания природы этих слабых кинетических неустойчивостей физики вновь обратились к весьма древнему принципу — второму закону термодинамики.

Второй закон термодинамики связан с тенденцией к хаотизации. В применении к газу это означает, что газ неизбежно придет в равновесие, в котором (1) температура газа равна температуре окружающей среды; (2) плотность частиц в сосуде всюду одинакова; (3) движение частиц изотропно; (4) распределение скоростей максвелловское, т. е. большинство частиц движется почти со средней скоростью и только небольшое число имеют скорости, значительно большие или меньшие.

Горячая плазма, удерживаемая магнитным полем, очевидно, не находится в состоянии равновесия. Ее температура должна быть значительно выше температуры стенок камеры. Плотность плазмы не одинакова внутри вакуумной камеры, потому что плазма сдерживается магнитным полем в ограниченной области и по тем же самым причинам распределение скоростей не может быть полностью изотропным. Более того, распределение скоростей может заметно отличаться от максвелловского распределения.

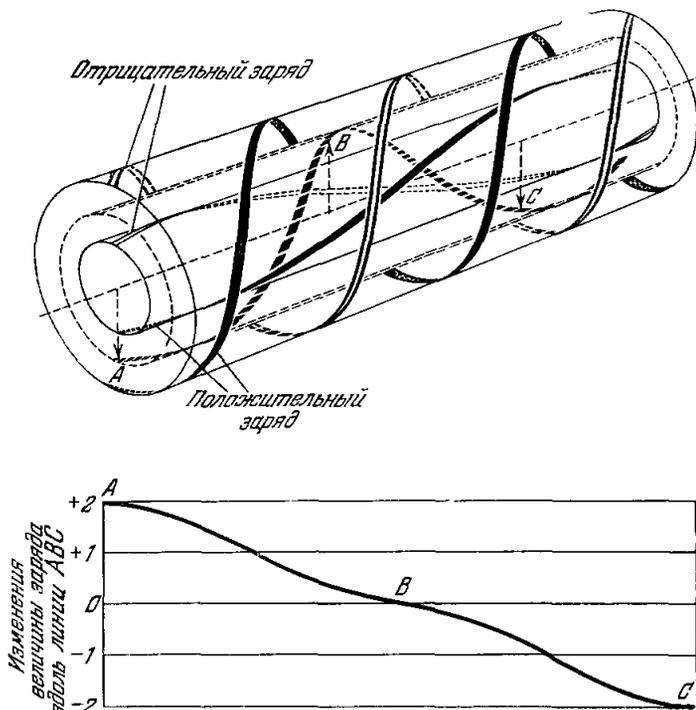


Рис. 12. Метод «короткого замыкания» осуществляется в магнитном поле, обладающем «широм», потому что некоторые силовые линии в промежуточном слое (линия ABC) связывают области разделенных зарядов. Область положительных зарядов, изображенная черной лентой, — это положительно заряженная силовая трубка. Область отрицательного заряда изображена светлой лентой; на левом и правом концах рисунка светлые и черные ленты находятся по разные стороны от оси. Это создает электрическое поле, которое приводит к развитию неустойчивости. Движение заряда поперек оси невозможно, так как частицы движутся в основном вдоль силовых линий. Однако электрическое поле можно ликвидировать, если заряды будут двигаться вдоль линии ABC . На нижнем графике показана величина заряда вдоль этой линии.

Если мы будем интересоваться проблемой УТС, все зависит от того, сколько времени потребуется для достижения равновесия (которое неизбежно должно быть достигнуто). Механизм приближения к равновесию в обычном газе известен — это соударения частиц. Если в плазме, удерживаемой магнитным полем, существует только такой механизм приближения к равновесию, то время удержания будет во много раз большим, чем это нужно для УТС. Однако в неустойчивой плазме приближение к равновесию может происходить значительно быстрее. Коллективное взаимодействие заряженных частиц создает большие по величине магнитные и электрические поля, которые разрушают магнитное поле плазмы. Крупномасштабные поля, возникающие при макроскопиче-

ских неустойчивостях, выбрасывают плазму целиком из области удержания как сплошное тело. С другой стороны, мелкомасштабные флуктуационные поля, связанные с кинетической слабой неустойчивостью, разрушают плазму, заставляя частицы диффундировать из области удержания, подобно тому как облако дыма исчезает из-за диффузии в окружающий воздух.

Из термодинамики следуют общие принципы уменьшения эффективности кинетических неустойчивостей. Энергия электрических и магнитных полей, созданных за счет коллективного взаимодействия частиц плазмы, взята из «свободной» энергии плазмы, т. е. из той части энергии, которая связана с ее отклонением от равновесия (несомненно, что газ в равновесии обладает энергией, заключенной в движении частиц, но эта энергия считается неизменной). Таким образом, если мы уменьшим отклонение плазмы от равновесия в наибольшей возможной степени, мы уменьшим долю энергии, которая используется при развитии неустойчивости, и уменьшим силы, создающие неустойчивость.

Так как плазма, удерживаемая магнитным полем, не может быть в равновесии с окружающей средой, мы никогда не можем полностью исключить источники «свободной» энергии. Тем не менее можно создать условия, при которых некоторые из этих источников не появятся в плазме. Примером является действие магнитной ямы на макроскопическую неустойчивость. Здесь то, что мы называем «свободной» энергией, аналогично энергии, освобождаемой при расширении пара в паровой машине. Плазма удерживается в магнитной яме, не может аналогичным образом расширяться и, следовательно, не может использовать этот резервуар энергии.

Остающиеся резервуары энергии могут быть существенно уменьшены, если распределение частиц по скоростям сделать почти максвелловским, а распределение плотности почти однородным. В этом месте мы можем использовать термодинамику для оптимистического предсказания. Если известны доступные источники «свободной» энергии, можно провести расчеты максимального уровня флуктуации магнитного и электрического полей, которые могут возникнуть при развитии кинетической неустойчивости. Используя эти данные, возможно рассчитать максимальную скорость потерь плазмы из-за развития таких неустойчивостей. Если не принимать во внимание макроскопических неустойчивостей, которые, как теперь видно, могут быть подавлены, и если источники «свободной» энергии, приводящей к кинетическим неустойчивостям, могут быть уменьшены до пределов, допускаемых современной теорией, тогда можно сделать предсказание о том, что можно будет построить реактор, дающий положительный выход термоядерной энергии, и размеры реактора не будут превышать практически достижимый предел. Эти предсказания на основе законов термодинамики не указывают, конечно, каким образом добиться этого успеха. Задача нахождения наилучшей геометрии магнитного поля для удержания плазмы требует знания условий возникновения всех неустойчивостей, включая слабые кинетические.

Кинетические неустойчивости можно было бы более точно назвать неустойчивостями взаимодействия волн и частиц. Возникают они как раз из-за взаимодействия волн и частиц, а неустойчивая плазма напоминает чем-то море в шторм. Горячая плазма — беспокойное вещество. Хаотическое движение ее частиц создает мгновенные флуктуации плотности и электрического тока. Последние в свою очередь генерируют слабые электромагнитные волны. Эти волны охватывают широкий спектр частот, главным образом в радио- и микроволновом диапазоне. Любая отдельная слабая волна быстро затухает, если только не будет усилена. Частицы плазмы могут

усилить волну, если частота волны совпадает с собственной частотой периодического движения частиц (например, ионы, вращающиеся вокруг силовых линий, движутся периодически с циклотронной частотой). Такой резонанс позволяет частицам передать часть своей энергии волне. Если источники «свободной» энергии частиц достаточно велики, то интенсивность волны может возрасти до больших значений и развалить плазму.

Другой источник энергии для неустойчивостей при взаимодействии волн и частиц связан с потоками частиц — с «ветрами» внутри плазмы. Поточковые неустойчивости хорошо известны в электронных приборах, таких, как лампа с бегущей волной. Они напоминают также затор в движении транспорта на перегруженной магистрали. Движение транспорта происходит спокойно, пока нет никаких происшествий. Но если произойдет несчастный случай, движение задерживается, и автомобили скапливаются около места происшествия. Аналогичная ситуация имеет место в плазме. Мгновенное увеличение плотности ионов в некоторой точке создаст избыток положительного заряда в этой точке. Остальные ионы потока будут отталкиваться положительным зарядом и замедляться. Вскоре создастся затор (то же самое справедливо и для потока электронов); такой тип неустойчивости называется пучковой неустойчивостью.

В плазме, удерживаемой магнитным полем, всегда возникнут потоки. Например, взаимодействие плазмы с магнитным полем приведет к возникновению тока на поверхности. Сильная неустойчивость, связанная с этим током, была обнаружена и идентифицирована в ряде экспериментов. Она, по-видимому, может быть подавлена, если воздействовать на ее источник — ток. Ток уменьшается с увеличением магнитного поля или диаметра плазмы. Следовательно, источник неустойчивости может быть уменьшен до допустимого уровня при использовании сильных полей и при соответствующих геометрических размерах плазмы. Если движение частиц достаточно хорошо хаотизировано, можно полагать, что будет достаточно иметь диаметр плазмы порядка одного метра.

Другой источник пучковой неустойчивости имеется в линейных системах даже при наличии магнитной ямы (рис. 13). Как мы видели, в магнитных прямолинейных ловушках уход частиц через пробки увеличивает

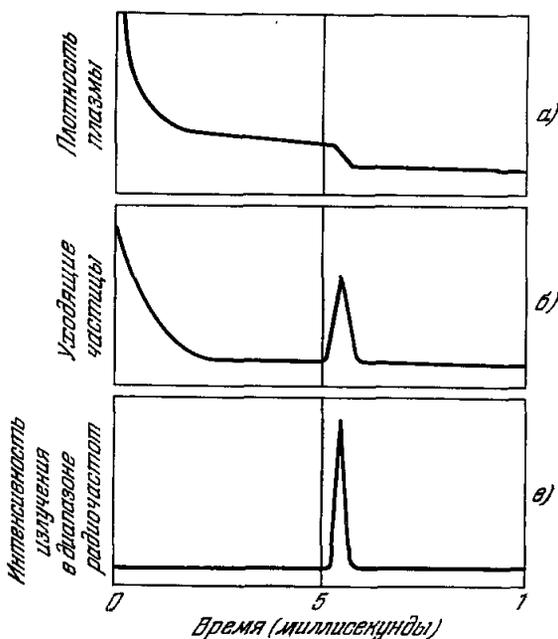


Рис. 13. Неустойчивость взаимодействия волн и частиц происходит даже в магнитной яме и это показано на типичных осциллограммах. Внезапное уменьшение плотности плазмы (а) совпадает с острым пиком уходящих из плазмы частиц (б) и сопровождается всплеском излучения в радиочастотном диапазоне (в). Эти результаты взяты из работы Ю. Т. Вайбородова, Ю. В. Готта, М. С. Иоффе и Е. Е. Юшмамова — сотрудников Института атомной энергии имени И. В. Курчатова.

отношение числа частиц, движущихся почти перпендикулярно к силовым магнитным линиям, к числу частиц, движущихся почти параллельно этим же линиям. Таким образом, имеется преимущественное направление движения, т. е. существует поток частиц. В системах со слабыми пробками, т. е. в системах, в которых движение частиц недостаточно хаотизировано,

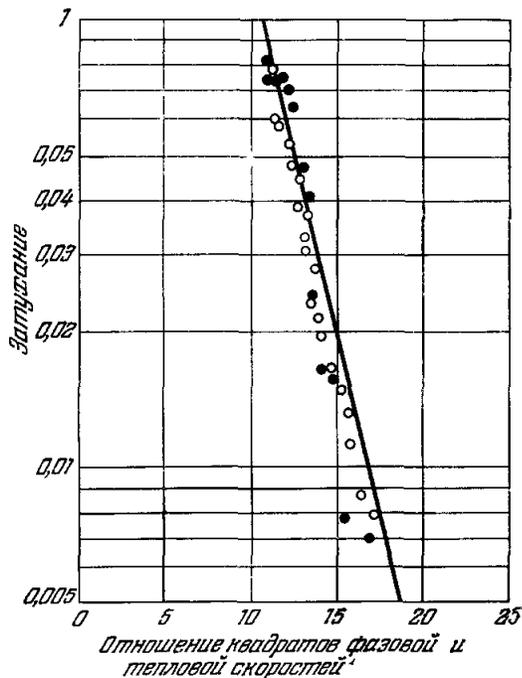


Рис. 14. Эксперимент по проверке теории затухания Ландау подтверждает концепцию о взаимодействии волн и частиц в горячей плазме. Черная линия — теоретическая кривая — показывает быстрое изменение величины затухания с ростом скорости волны. Черные и белые точки — результат эксперимента при двух различных температурах в районе 10^5 градусов (Дон Х. Малмберга, Г. Вартона из лаборатории «Дженерал Динамикс корпорейшн»).

указанный выше эффект ярко выражен и приводит к возбуждению сильной неустойчивости.

Поглощение волн на краях плазмы препятствует неустойчивости в прямых магнитных ловушках. Один из эффектов, приводящих к поглощению волн, называется затуханием Ландау. Этот эффект является обращением механизма усиления волн при неустойчивости взаимодействия частиц и волны. Он возникает, когда волны распространяются в плазме со скоростью, несколько большей, чем средняя скорость частиц. Частицы захватываются волной, ускоряются за счет энергии волны, уменьшая таким образом ее интенсивность. В одном из интереснейших экспериментов для современной физики плазмы теория затухания Ландау была недавно очень точно подтверждена. Этот эксперимент явился решающей проверкой основ представлений о резонансе между частицами и волнами, которые лежат в основе теории неустойчивости взаимодействия волн и частиц (рис. 14).

После того как мы дали набросок теоретических проблем УТС и рассказали, как эти проблемы исследуются, можно перейти к некоторым из технических задач УТС, т. е. к описанию установок для проверки предсказаний теории. Развитие исследований по УТС в наши дни определяется чрезвычайно сложной и быстро развивающейся техникой. Еще несколько лет назад нельзя было и думать об экспериментах, которые сегодня являются наиболее важными. Без сомнения, эти же эксперименты вскоре покажутся примитивными по сравнению с теми, которые будут вскоре сделаны.

Для того чтобы проводить эксперименты с высокотемпературной плазмой, в первую очередь надо уметь ее создавать. Были использованы три основных метода, а чрезвычайно интересный четвертый метод в настоящее время проходит проверку. Усилия по созданию термоядерной плазмы начались с относительно простых попыток получения плазмы *in situ* (на месте). Камера заполнялась холодным газом, включалось удерживающее магнитное поле. Процесс ионизации и нагрева плазмы начинался с элек-

трического газового разряда. Проходящий через плазму большой ток продолжал ионизацию и нагрев плазмы. Несколько позже сильный дополнительный нагрев осуществлялся мощными электромагнитными волнами с резонансными частотами собственных колебаний частиц плазмы (например, с циклотронной частотой).

Второй метод — это использование плазменных инжекторов, в которых плазма ускорялась до больших скоростей, а затем инжектировалась в вакуумное магнитное поле. Для того чтобы поток плазмы мог попасть в ловушку и остаться в ней, на некоторое время ослаблялась напряженность магнитного поля в пробке. Подобно первому методу здесь была применена техника однократного импульсного создания сгустка удерживаемой плазмы. В обоих методах дополнительный мощный нагрев мог быть осуществлен увеличивающимся импульсным магнитным полем, сжимающим плазму.

Третий метод — это инжекция в магнитное поле постоянного потока частиц большой энергии для непрерывной работы установки. Так как нейтральные частицы свободно проникают в магнитное поле, самым простым способом создания плазмы кажется инжекция пучка атомов с высокой энергией. Но сначала создается и ускоряется до энергии значительно большей, чем 1 кэВ , пучок ионов. Затем этот пучок проходит через камеру, содержащую газ при низком давлении, захватывает электроны атомов газа, теряя при этом некоторое количество энергии. Пучок образовавшихся быстрых атомов направляется в магнитную ловушку, в которой часть из этих атомов вновь превращается в ионы и электроны из-за соударения с частицами, уже захваченными в ловушку. Таким образом, новые частицы оказываются захваченными, и при благоприятных условиях плотность плазмы может таким процессом самозахвата увеличиться до больших значений.

Все изложенные выше методы были настолько разработаны, что обеспечивали получение плазмы при термоядерных температурах. Создание плазмы *in situ* было использовано как в прямолинейных, так и в тороидальных установках. Методы внешней инжекции наиболее часто используются в прямых системах, хотя они пригодны и для тороидальных установок.

Метод, который в настоящее время проходит проверку, совершенно новый, так как основан на использовании лазеров. Пучок лазера фокусируется в некоторой точке, находящейся глубоко внутри пустой вакуумной камеры. При включении магнитного поля крупинка LiD или замороженного водорода падала из верхней части камеры. В точно рассчитанный момент она попадала в фокус лазера, испарялась и образовывала расширяющееся облако быстрых электронов и ионов, другими словами, плотную горячую плазму.

Другая неприятная задача получения жизнеспособной плазмы связана с освобождением от примесей, которые могли бы ее охладить. Поэтому, прежде чем создавать плазму, камера должна быть откачана в некоторых экспериментах до давления меньше, чем 10^{-12} часть атмосферы. Для получения антисептической чистоты внутренние стенки камеры покрываются мономолекулярным слоем стойкого металла, такого как молибден или титан, и поддерживаются при криогенных температурах, чтобы не допустить испарения любых газов с поверхности. Эта техника, впервые разработанная для работ УТС, в настоящее время используется в других исследованиях, например, в физике космоса, для воспроизведения вакуумных условий космического пространства в лабораторных условиях.

Рабочей лошадью всех исследований по УТС является магнитное поле, поэтому в этой области технический прогресс был наиболее эффективен.

Удержание горячей плазмы требует магнитных полей с очень большой напряженностью, в некоторых случаях в миллионы раз большей, чем напряженность магнитного поля Земли. В отдельных экспериментальных установках магнитные поля должны быть приложены за несколько микросекунд, чтобы захватить, сжать и нагреть плазму. Создание таких полей потребовало разработки прочных катушек с током в миллионы ампер, колоссальных конденсаторных батарей и специальных передающих низкоиндуктивных линий, через которые можно было бы пропустить необходимый ток за время порядка микросекунд. В устройствах с постоянными магнитными полями, например в тех, в которых используется поток нейтральных атомов, необходимая мощность питания катушек чрезвычайно

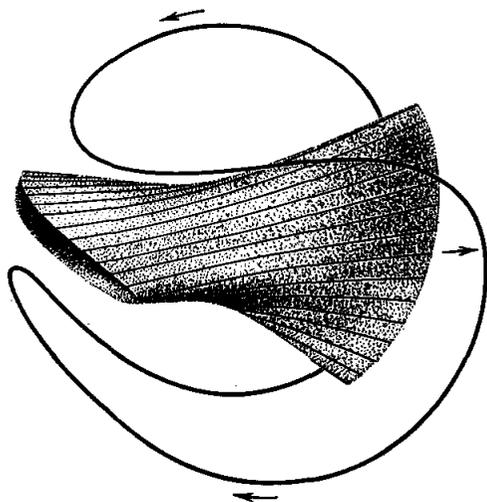


Рис. 15. «Бейсбольная обмотка» испытывается в настоящее время в Радиационной лаборатории. Обмотка, похожая на полосы на бейсбольном мяче, должна создать глубокую «магнитную яму».

велика. В качестве примера рассмотрим «бейсбольную обмотку» (полосы на бейсбольном мяче похожи на форму обмотки), сконструированную для создания глубокой магнитной ямы (рис. 15). Если бы эта обмотка использовалась при обычной температуре, потребовалось бы питание мощностью 50 Мвт. Чтобы уменьшить необходимую мощность питания, обмотка охлаждается до температуры жидкого азота (-195°C). Это позволяет снизить мощность в 10 раз. Но даже в этом случае катушка должна питаться импульсами тока из-за очень большого расхода жидкого азота.

Магнитные поля очень важны для исследований по УТС, и нет сомнений, что они будут также важны для будущих термоядерных реакторов. Поэтому не удивительно, что ученые, работающие над проблемой УТС, с особым интересом относятся к работам по созданию «прочных» сверхпроводящих сплавов. Такие сплавы не только имеют бесконечную проводимость при температуре, близкой к температуре жидкого гелия ($4,2^{\circ}\text{K}$), но и не теряют своих сверхпроводящих свойств в сильных магнитных полях. При использовании сверхпроводников вместо медных обмоток можно будет создавать поля, для которых в противном случае потребовалась бы мощность питания в сотни миллионов ватт. Для сверхпроводящих обмоток нужна только энергия для создания необходимого магнитного поля. Однажды включенная сверхпроводящая обмотка, коротко замкнутая сама на себя, позволяла бы использовать постоянные магнитные поля в течение неограниченно долгого времени. Поддержание таких обмоток охлажденными до температуры жидкого гелия не представляется очень сложной задачей, поскольку для многих экспериментов стенки камеры все равно должны охлаждаться до криогенных температур, чтобы обеспечить условия для поддержания высокого вакуума. Уже была изготовлена и испытана небольшая «бейсбольная обмотка» с использованием описанной выше техники. Проводники в этой обмотке, по которой течет ток 500 а, имеют поперечное сечение даже меньшее, чем у обычных проводников, используемых для бытовых целей.

Одно из наиболее интересных технических достижений достигнуто в области диагностики плазмы. Для того чтобы измерить параметры и определить поведение горячей плазмы, требуются специальные ухищрения. Очень редко возможны непосредственные измерения. Всякое устройство, помещенное в плазму, либо быстро сгорит, либо будет мешать движению относительно большого числа частиц плазмы. Поэтому были разработаны остроумные методы косвенных измерений свойств плазмы. Температура и плотность могут быть измерены по рентгеновскому излучению плазмы или по потоку частиц, уходящих из плазмы. Оказалось

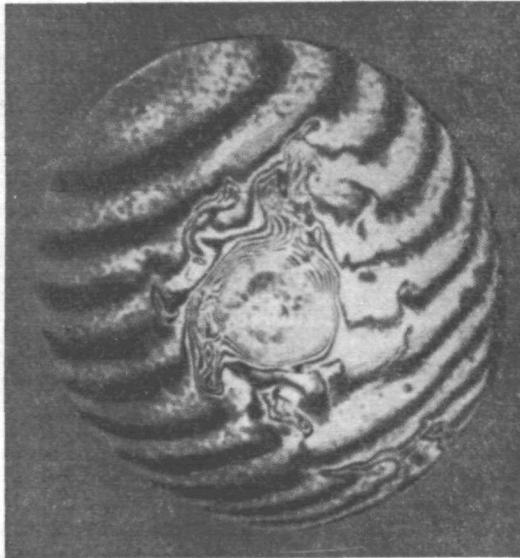


Рис. 16. Неустойчивость плазмы можно фотографировать с помощью луча лазера и интерферометра. Темные и светлые полосы возникают из-за интерференции света, прошедшего разным оптический путь в неоднородной плазме. На фотографии видна конвективная неустойчивость, которую также называют желобковой. Фотография сделана в азимутальном пинчевом разряде («этта пинч») в Лос-Аламосской лаборатории в группе Ф. Л. Райба.

также возможным сделать интерефототграммы плазмы с помощью лазерного пучка (рис. 16).

Мы попытались дать обзор успехов на пути решения проблемы УТС. Конечно, очень обнадеживающим является тот факт, что усилия ученых уже начали приносить свои плоды в разработке успешных методов стабилизации плазмы. Такие важнейшие идеи, как методы стабилизации широм и минимумом магнитного поля, а также общие выводы на основе термодинамики плазмы, дают ясное направление для исследователей. Следует указать еще на одно обстоятельство, не менее важное, чем изложенные выше успехи, но имеющее, может быть, еще большее значение, — это растущее понимание физики плазмы. Теория плазмы развилась от простой модели магнитной гидродинамики до детального анализа плазменных волн и инкрементов их нарастания. Мы уже отмечали прогрессивное усложнение экспериментов, направляемых теорией и проверяющих теорию.

Усилия в решении проблемы УТС имеют много общего с попытками слепого описать слона, исследуя его отдельные органы. У нас происходит

непрерывный прогресс понимания того, что представляет собой этот слон, но мы еще не можем утверждать, что способны нарисовать его портрет, т. е. дать рабочую схему УТС. Все же контур постепенно принимает определенную форму. У нас мало сомнений в существовании слона, а также в том, что мечта о получении неограниченного источника энергии из морской воды в один прекрасный день превратится в реальность.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Albert Simon, An Introduction to Termonuclear Research, Pergamon Press, N.Y., 1959.
 2. Л. Спитцер, Физика полностью ионизованного газа, М., ИЛ, 1962.
 3. Б. Б. Кадомцев, Турбулентность плазмы, в сб. «Вопросы теории плазмы», вып. 4, М., Атомиздат, 1964.
 4. Harold P. Furth, The Status of World Fusion, Nucleonics 23, 64—69, декабрь 1965.
-