

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**НОБЕЛЕВСКИЕ ЛЕКЦИИ ПО ФИЗИКЕ 1978 ГОДА**

533.9

ПЛАЗМА И УПРАВЛЯЕМАЯ ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ(*)*П. Л. Капица*

Выбор темы для Нобелевской лекции представляет для меня некоторую трудность. Обычно эта лекция связана с работами, за которые присуждена премия. В моем случае эта премия связана с моими исследованиями в области низких температур, вблизи температур ожижения гелия, т. е. несколько градусов выше абсолютного нуля. По воле судеб случилось так, что от этих работ я отошел уже более тридцати лет назад, и, хотя в руководимом мною институте продолжают заниматься низкими температурами, я сам занялся изучением явлений, происходящих в плазме при тех исключительно высоких температурах, которые необходимы для осуществления термоядерной реакции. Эти работы привели нас к интересным результатам, открывающим новые перспективы, и я думаю, что лекция на эту тему представляет больший интерес, чем уже забытые мною работы в области низких температур. К тому же, как говорят французы, — *les extrêmes se touchent* (крайности сходятся).

Хорошо известно, что в данное время управляемая термоядерная реакция представляет большой практический интерес, так как этот процесс мог бы наиболее эффективно решить проблему надвигающегося глобального энергетического кризиса, связанного с истощением запасов сырья, используемого теперь как источник энергии.

Работы над управляемым термоядерным синтезом широко ведутся в ряде стран, и они связаны с научным изучением процессов, происходящих в высокотемпературной плазме. Сама возможность существования термоядерного синтеза не вызывает сомнения, поскольку он происходит при взрывах термоядерной бомбы. Процесс ядерного синтеза теоретически хорошо изучен, и расчеты надежны: они хорошо согласуются с экспериментом. Но, несмотря на большие усилия и затраченные средства, до сих пор не удается осуществить процесс ядерного синтеза так, чтобы он мог служить полезным источником энергии. Несомненно, это вызывает некоторое недоумение.

Уже в продолжение нескольких десятков лет плазменные процессы, при которых происходит термоядерный синтез, изучаются как теоретически, так и экспериментально, и сейчас достаточно глубоко поняты. Поэтому сейчас, казалось бы, можно было бы выявить все основные причины,

*) Нобелевская лекция, прочитанная П. Л. Капицей в Шведской Академии наук. Стокгольм, 8 декабря 1978 г.

мешающие осуществлению управляемой термоядерной реакции. В данном сообщении я как раз и постараюсь выяснить, что, с моей точки зрения, мешает ее осуществлению, и насколько вероятно, что удастся преодолеть эти препятствия. Я также постараюсь объяснить, откуда возникают противоречия между взглядами ученых на практическую осуществимость получения полезной термоядерной энергии.

Но предварительно я хочу охарактеризовать практическую значимость получения полезной энергии от ядерных процессов.

Реальность надвигающегося глобального кризиса в энергоснабжении связана с неизбежным истощением запасов сырья: газа, нефти, угля, и это сейчас всеми признано. Также известно, что так называемый валовой национальный продукт, который определяет благосостояние людей, пропорционален энергетическому оснащению страны. Истощение энергетических ресурсов, несомненно, вызовет общее обеднение.

Сейчас обсуждаются два выхода из надвигающегося кризиса. Первый, наиболее привлекательный, — более широкое использование неистощающихся источников энергии: гидроэнергии, энергии ветра, геотермальной энергии, солнечной энергии и др. Второй путь — использование ядерной энергии, о существовании которой человек узнал менее ста лет назад. Уже сейчас энергия, получаемая в реакторах в процессе распада ядер тяжелых элементов, оказывается более дешевой, чем получаемая от ряда неистощаемых источников энергии.

Как известно, основным горючим сырьем в ядерных реакторах является уран. Если использовать его так, как он используется сейчас, урана хватит только лет на сто. При более полном его использовании в бридерах этот срок удлинится раз в 50, т. е. запасов урана хватит на несколько тысяч лет. Кроме того, многие считают, что уран, растворенный в морской воде, тоже можно эффективно использовать для получения дешевой энергии. Таким образом, казалось бы, что уже осуществленные процессы в современных атомных электростанциях могут предотвратить надвигающийся энергетический кризис. Но существуют весьма веские доводы против использования урана как энергетического сырья. В основном они связаны с вопросами обеспечения безопасности.

Во-первых, использование урана связано с накоплением долгоживущих радиоактивных шлаков и с необходимостью безопасного захоронения все нарастающих количеств этих шлаков. Эти проблемы пока еще надежно не решены.

Во-вторых, в крупной энергетической атомной станции сосредоточено такое большое количество радиоактивного вещества, что если оно, в случае аварии, прорвется на свободу, может произойти катастрофа, по масштабам сравнимая с той, что произошла при взрыве атомной бомбы над Хиросимой.

Я думаю, что с этими двумя опасностями современная техника может справиться. Но существует еще третья опасность, гораздо более серьезная. Она заключается в том, что строительство большого количества атомных электростанций приведет к тому, что суммарное количество радиоактивного вещества во всех реакторах достигнет такой величины, что невозможно станет осуществлять контроль над его правильным использованием. В конечном итоге это приведет к тому, что не только небольшим странам, но достаточно богатому человеку или промышленному предприятию откроется возможность сделать свою атомную бомбу. Секрета, как она делается, больше не существует, а необходимого для этого плутония, особенно при предстоящем широком использовании бридеров, будет вполне достаточно. Недавно в Индии уже была таким путем осуществлена и взорвана небольшая атомная бомба. В современной систе-

ме международных организаций нет такой авторитетной организации, которая могла бы достаточно надежно контролировать мирное использование урана как энергетического сырья, и неясно, как такая организация может быть создана.

Это — основная причина, которая делает крайне желательным получение энергии третьим путем, а именно, путем термоядерного синтеза. Как известно, этот процесс не только не будет создавать значительное количество радиоактивных шлаков и опасное накопление радиоактивного вещества, но главное, не открывает никаких возможностей осуществления взрывной термоядерной реакции. Поэтому решение проблемы управляемого термоядерного синтеза для физиков надо рассматривать как «проблему № 1».

Условия, при которых происходит термоядерная реакция для получения полезной энергии, хорошо известны и надежно изучены. Таких реакций две. Их называют $D + D$ - и $D + T$ -реакциями. Первая из них происходит при столкновениях ядер дейтерия, вторая — при столкновении ядра дейтерия с ядром трития. В обоих случаях происходит выделение быстрых нейтронов, энергия которых может быть полезно использована. Поскольку дейтерий всегда в небольшом количестве присутствует в воде и его нетрудно извлекать, то его как горючего вполне достаточно. Свободный тритий в природе практически отсутствует, его нужно получать, как обычно это и делается, путем синтеза при взаимодействии нейтронов с ядром лития.

Термоядерная реакция происходит в высокотемпературной плазме. Чтобы полученная от нейтронов энергия могла быть полезно использована, она должна быть больше той энергии, которая затрачивается для поддержания температуры плазмы. Обычно это приводит к тому, что энергия, полученная от нейтронов, должна быть значительно больше тормозного излучения электронного газа плазмы. Расчеты показывают, что для получения полезной энергии $D + D$ -реакция должна происходить при температуре ионов плазмы, которая раз в 10 выше, чем для реакции $D + T$. Однако реакция $D + T$, хотя и осуществляется при более низкой температуре, но имеет весьма крупный недостаток: при этом происходит стгорание лития, количество которого в природе ограничено. К тому же оказывается, что участие в реакции лития значительно осложняет конструкцию реактора. Расчеты показывают, что для получения полезной энергии температура ионов в плазме для $D + D$ -реакции должна лежать в области выше 10^9 К и соответственно для $D + T$ -реакции — в области выше 10^8 К.

Таким образом, для получения энергии в масштабах, нужных для практики, техническая задача осуществления управляемой термоядерной реакции сводится к получению плазмы при температуре ионов, близкой к 10^8 К, и плотности плазмы в пределах 10^{13} — 10^{14} см⁻³. Очевидно, что удержание плазмы при таких условиях обычным способом в каких-либо сосудах нельзя осуществить, так как нет материала, который может выдержать необходимые высокие температуры.

Предложено несколько способов решить проблему удержания плазмы и ее теплоизоляции.

Наиболее остроумным и многообещающим способом был так называемый «Токамак», предложенный в СССР, который разрабатывается уже более десятилетия (1, с. 15). Принцип, на основе которого он работает, виден на схеме его конструкции, изображенной на рис. 1. Плазму удерживает магнитное поле, которое создается тороидальным соленоидом. Плазма имеет форму тора с радиусом R и сечением радиуса a и заключена внутри соленоида, в котором создается магнитное поле. Плазма находится

под давлением в несколько атмосфер. При расширении в магнитном поле в ней возникают токи, которые задерживают это расширение. В итоге получается, что плазма окружена вакуумной изоляцией. Это необходимо для поддержания ее при высоких температурах, при которых происходит термоядерная реакция. Очевидно, что такой способ удержания плазмы будет ограничен временем. Расчеты показывают, что благодаря малой теплоемкости плазмы энергия, идущая на ее первоначальный нагрев, даже если плазма существует доли секунды, будет мала по сравнению с получаемой термоядерной энергией. Поэтому такой реактор может эффективно работать в импульсном режиме.

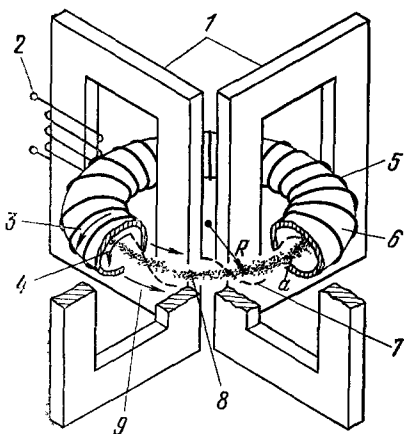


Рис. 1. Основные элементы конструкции «Токамака».

— ядро трансформатора, 2 — первичная обмотка трансформатора, 3 — ток, создающий продольное магнитное поле, 4 — магнитное поле плазменного витка, 5 — катушка продольного магнитного поля, 6 — металлическая проводящая стенка, 7 — результирующее поле, 8 — ток в плазме, 9 — продольное поле.

Но основная трудность появляется от причины, которую вначале недостаточно оценили. Она заключается в следующем: для получения термоядерной реакции нужен нагрев самих ионов дейтерия или трития, и главная трудность в передаче им тепла связана с тем, что нагрев плазмы производится воздействием на нее электрического поля; при этом практически всю энергию воспринимают электроны, которые благодаря их малой массе при соударении с ионами плохо передают им энергию. Кроме того, чем выше температура электронов, тем менее эффективен процесс теплопередачи. В «Токамаке» нагрев плазмы происходит электронным током. Таким образом, вся энергия, идущая на нагрев плазмы, сосредотачивается в электронах и потом уже передается ионам путем соударения. Оказывается, что для того, чтобы нагреть таким путем ионы до необходимой температуры, требуется время Δt , значительно большее, чем время, в продолжении которого может происходить нагрев плазмы электрическим током. Расчеты, которые обычно делаются, очень сложны, так как их стремятся делать точно, и потому они оказываются мало наглядными. Но можно просто подсчитать нижний предел промежутка времени, при котором нагрев ионов еще может быть осуществлен. Он дается следующим простым выражением (², формула (14)):

$$\Delta t > -2,5 \cdot 10^2 \frac{f}{\Lambda} \frac{T_e^{3/2}}{n} \ln \left(1 - \frac{T_i}{T_e} \right).$$

Запускается «Токамак», как это видно на рис. 1, как бетатрон: разрядом конденсаторов через обмотку окружающего ядра трансформатора. Осуществление на практике удержания плазмы таким способом оказалось все же не простой задачей. Во-первых, существуют трудности стабилизации в магнитном поле формы плазменного кольца, когда растет радиус a сечения кольца, но главное, растет радиус R самого тороида, и при этом кольцо становится неустойчивым и теряет свою правильную форму. Эти трудности удалось преодолеть путем выбора отношения R к a и распределения магнитных полей, хотя при этом время существования плазменного шнура обычно ограничивается долями секунды. Считается, что с увеличением масштабов «Токамака» это время будет расти, как квадрат размера установки.

Расчет ведется при условии, что во время нагрева плотность плазмы n равна

$$n = \frac{7,3 \cdot 10^{21} p}{T_e},$$

и остается постоянной, так же как давление p , выраженное в атмосферах, и температура электронов T_e .

Коэффициент f равен отношению массы иона к массе протона, Λ — известный логарифмический множитель (², формула (4)), T_i — температура ионов. Согласно этому выражению для современного проекта «Токамака», работающего на реакции $D + T$ с плазмой при температуре ионов $T_i = 5 \cdot 10^8$ и при плотности $n = 3 \cdot 10^{13}$ см⁻³ (при этом начальный нагрев электронов $T_e = 10^9$ К), промежуток времени Δt , необходимый, чтобы начался ядерный процесс в плазме, должен быть больше, чем 22 с, т. е. по крайней мере на два порядка длиннее, чем имеет место в современной установке «Токамак». Увеличить время удержания плазмы можно только увеличением самой установки, и, по-видимому, это время растет с квадратом размеров установки. Из приведенной формулы получаем, что для реакции $D + D$ время нагрева увеличивается еще на два порядка, и тогда $\Delta t > 2 \cdot 10^3$ с.

Трудности со временем нагрева ионов плазмы теперь полностью осознаны, но не видно, как можно сократить это время и как может работать «Токамак», если до нагрева ионов плазмы вся бетатронная энергия от рядов конденсаторов будет излучаться электронами. Поэтому теперешний проект «Токамака» предусматривает дополнительный подвод энергии, которая превосходит энергию от бетатронного процесса, служащую только для начального зажигания.

Подвод дополнительной энергии к ионам плазмы должен осуществляться более эффективным образом, чем процессом кулоновых столкновений электронов и ионов. Для этого существуют два возможных процесса. Первый (¹, с. 20), уже осуществленный, заключается в том, что в плазменное кольцо вводят атомы дейтерия или трития, предварительно ускоренные до температуры, необходимой для поддержания термоядерного процесса. Второй процесс нагрева ионов основан на том, что в плазменном кольце циркулярным током можно возбуждать радиальные магнитоакустические колебания, или, как обычно их называют, альвеновские волны. Известно (³, с. 1417), что диссипируемая ими энергия идет в значительной мере на нагрев ионов и подводимая мощность может быть достаточно велика, чтобы быстро нагреть ионы и поддерживать их температуру достаточное время. Таким образом, проблема нагрева ионов может быть решена, хотя механизм работы «Токамаков» будет отличаться от первоначально задуманного. При этом конструкция «Токамаков» становится значительно сложнее и эффективность уменьшается.

Поскольку практически во всех ядерных реакторах генерируемая мощность пропорциональна объему активной зоны и потери увеличиваются только с увеличением ее поверхности, то эффективность ядерных реакторов растет с ростом их размеров. Поэтому у реакторов существует критический размер, только больше которого он может генерировать полезную энергию. Величина этого критического размера и определяет осуществимость реактора на практике. Этот критический размер определяют в основном не ученые, а инженеры-конструкторы, так как он тесно связан с конструктивным оформлением всей установки в целом и с выбором технологических процессов при ее производстве. Успех этой работы в значительной степени определяется талантом и изобретательностью инженеров-конструкторов. Поэтому определить критический размер

«Токамака» можно только основываясь на тех конструкторских решениях, которые сейчас предлагаются. Я думаю, что существующие решения приводят к критическим размерам «Токамаков», которые делают их сейчас нереальными. Но, конечно, жизнь показывает, что изобретательские способности людей не имеют предела, и поэтому нельзя утверждать, что критические размеры «Токамака» не могут со временем стать осуществимыми.

Следует отметить, что хотя главной принципиальной трудностью управляемого термоядерного процесса в «Токамаках» является проблема нагрева ионов дейтерия и трития, кроме того, существуют еще трудности другого характера, которые пока не имеют четкого решения. Например, оказалось, что в «Токамаке» в плазму втягиваются, выделяясь из стенок контейнера, загрязнения, которые резко уменьшают интенсивность реакции. Кроме того, из плазмы вылетают нейтральные атомы и, ударяясь о стенки контейнеров, их разрушают. Оказалось, что отбор полезной энергии от нейтронов значительно усложняет конструкцию «Токамака». Хотя все эти факторы и можно преодолеть, но они усложняют конструкцию «Токамака» и увеличивают его критические размеры. Удастся ли со временем довести критические размеры «Токамака» до осуществимой величины? Если это и удастся, то точно определить, когда,— конечно, нельзя. Поэтому сейчас можно только констатировать, что нет принципиальной теоретической причины, почему управляемый термоядерный синтез неосуществим, но с выходом полезной энергии в практических масштабах это пока неосуществимо.

Из других методов осуществления управляемого термоядерного синтеза серьезному рассмотрению подлежит тоже импульсный метод, но без использования магнитного удержания плазмы (1, с. 33). Идея метода заключается в том, что происходит импульсный нагрев $D + T$ -сгустка примерно миллиметрового диаметра в очень короткий промежуток времени, за который сгусток не успевает разлететься. При этом возникает очень высокое давление, которое обеспечивает интенсивный теплообмен между ионами и электронами. Считается, что таким путем термоядерная реакция $D + T$ в сгустке может быть практически полностью завершена. Для этого необходимо хорошо сфокусированное мощное лазерное излучение, которое должно нагревать сгусток одновременно и со всех сторон за время порядка наносекунды. Это сложный процесс, но он может быть просчитан современным компьютером, и если действительно плазменный сгусток осветить со всех сторон хорошо сфокусированным лазерным излучением, это может дать избыток полезной термоядерной энергии. Но при реальной разработке такого устройства не видно, как возможно решить возникающие технические и конструкторские трудности, например, как осуществить всестороннее и одновременное облучение, а также как полезно использовать полученную энергию нейтронов.

Тут также можно только констатировать правильность теоретического обоснования, но реального конструкторского решения его осуществления пока, с имеющимися техническими возможностями, не видно. Но, конечно, полностью отрицать возможность решения таким путем этой проблемы нельзя, хотя осуществление рассмотренной лазерной установки мне рисуется менее вероятным, чем импульсных установок с магнитным удержанием плазмы.

Наконец, третий тип термоядерного реактора основан на непрерывном нагреве плазмы и пока разрабатывается только в нашем институте. Эти работы были описаны девять лет назад ⁴, и с тех пор этот тип реакции более подробно изучался, и выявились те основные трудности, которые лежат на пути решения этим путем термоядерной проблемы. Я расскажу

в общих чертах, какие имеются тут проблемы, требующие научного решения.

В отличие от «Токамака» и лазерного метода получения горячей плазмы для осуществления термоядерного процесса, наш метод не был специально изобретен; мы случайно нашли явление, при котором получалась горячая плазма. Нами разрабатывался мощный высокочастотный генератор непрерывного действия. В результате был осуществлен прибор, генерирующий высокую частоту при длине волны 20 см с высоким к. п. д. и мощностью в несколько сотен киловатт. Принцип, на котором он работает, теперь описан ⁵, и также полностью описана ⁶ его конструкция и дана его рабочая характеристика. Этот генератор был нами назван «Ниготрон». В процессе разработки этого генератора, начиная с 1950 г., при испытании одной из его моделей мы пропускали его излучение через кварцевый шар, наполненный гелием при давлении 10 см рт. ст. При этом в нем вспыхнуло свечение, которое имело четкие границы. Все явление наблюдалось несколько секунд, так как в одном месте шар проплавился.

Эти наблюдения привели к мысли, что шаровая молния — тоже явление, создаваемое высокочастотными колебаниями, возникающими в грозовых облаках после обычной молнии. Таким образом подводилась энергия,

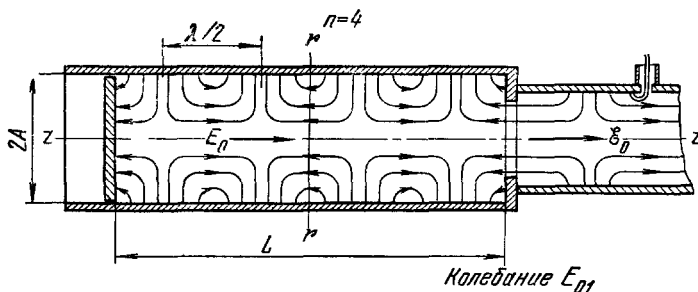


Рис. 2. Схема структуры ВЧ поля со шнуровым разрядом в резонаторе с колебаниями E_{01} .

необходимая для поддержания продолжительного свечения шаровой молнии. Эта гипотеза была опубликована ⁷ в 1955 г. Через несколько лет у нас появилась возможность возобновить эти опыты. В марте 1958 г., уже в шаровом резонаторе, наполненном гелием при атмосферном давлении, в резонансном режиме при интенсивных непрерывных колебаниях типа H_{01} возникал свободно парящий газовый разряд овальной формы. Этот разряд образовывался в области максимума электрического поля и медленно двигался по кругу, совпадающему с силовой линией.

Мы стали изучать более подробно такой тип разрядов, исходя из того, что плазма в этих разрядах непосредственно не соприкасалась со стенками резонатора, и мы предположили, что при этом плазма могла бы иметь высокую температуру. В продолжение нескольких лет мы изучали это интересное явление в различных газах при давлениях, достигавших десятков атмосфер, и при различных мощностях, достигающих десятков киловатт, и, конечно, также изучалось влияние на разряд магнитного поля, достигающего в наших опытах 25 кЭ. Эти исследования подробно описаны ⁴. Схема установки, которая нами применялась, изображена на рис. 2.

Плазменный разряд имеет форму шнура около 10 см длиной, равной полудлине волны ВЧ колебаний. Интенсивные ВЧ колебания вида E_{01} генерировались в цилиндрическом резонаторе. Шнуровой разряд находился в одном из максимумов электрического поля E_{01} . Его устойчивость

по продольной оси создавалась электрическим полем ВЧ колебаний. В радиальном направлении устойчивость плазменного шнура обеспечивалась вращением газа.

Наибольший интерес представляет изучение плазменного разряда в водороде или в дейтерии. При малых мощностях разряд не имел четко очерченных границ, и его свечение было диффузного характера. При увеличении подводимой ВЧ мощности свечение становилось ярче, увеличивался диаметр разряда и внутри появлялось четко очерченное ядро шнуровой формы, сечение которого росло с подводимой мощностью. В первоначальных опытах мощность, подаваемая в разряд, доходила до 15 кВт, а давление мы доводили до 25 атм. При этом, чем выше было давление, тем устойчивее был разряд и тем лучше очерчивались формы ядра. Фотография такого разряда дана на рис. 3. Изучая проводимость плазмы, а также



Рис. 3. Фотография шнурового разряда в дейтерии с примесью 5% аргона при большой мощности $P_a = 14,7$ кВт и повышенном давлении $p = 3,32$ атм (1969 г.).

Длина разряда ~ 10 см. Левый край разряда затенен окном. Колебания типа E_{01} .

с помощью активной и пассивной спектральной диагностики можно было надежно установить, что центральная часть разряда имеет очень высокую температуру электронов — выше миллиона градусов. Таким образом, на границе плазменного шнура, на расстоянии нескольких миллиметров, имелся скачок температуры более миллиона градусов. Это значило, что плазма на поверхности имела слой с высокой теплоизоляцией.

Возможность существования такого большого скачка температуры вначале вызывала сомнения, поэтому были испробованы всевозможные методы диагностики плазмы, но все они неизменно приводили к той же высокой температуре — выше миллиона градусов. Но в дальнейшем выяснилось, что физическая природа существования такого скачка температуры вполне объяснима. Нетрудно показать, что если бы при наблюдаемых высоких температурах ударявшиеся о границу шнура электроны свободно диффундировали в окружающий газ, то они уносили бы с собой мощность в сотни киловатт. Отсутствие такого мощного теплового потока может быть объяснено тем, что на границе горячей плазмы существует двойной электрический слой, от которого без существенных потерь электроны отражаются. Существование аналогичного явления давно известно. Оно имеет место в случаях, когда горячая плазма ограничена стенками из диэлектрика, например, стеклом или фарфором.

Известно, что при таких условиях, даже если плазма находится под значительным давлением, электроны могут иметь температуру в десятки тысяч градусов и при этом не нагревать значительно стенки сосуда. Это явление уже давно объяснено существованием на поверхности диэлектрика двойного электрического слоя. Механизм возникновения двойного слоя прост. Он заключается в том, что при ударе о поверхность электроны, благодаря их большой подвижности, глубже проникают в диэлектрик, чем менее подвижные ионы. Объемный заряд электрона и диэлектрике находится на большей глубине, чем объемный заряд иона, и создает электрическое поле двойного слоя, направленное так, что от него упруго отражается горячий электрон. Такая плохая электронная теплопроводность на границе плазмы теперь широко используется в газосветящихся источ-

никах. Описанный метод плазменной теплоизоляции был впервые предложен Лэнгмюром. Мы считаем, что при достаточно высоком давлении аналогичный механизм теплоизоляции может иметь место в нашей горячей плазме. Существование двойного слоя в плазме на границе шнуrowого разряда нам теперь удастся наблюдать экспериментально как резкий скачок плотности плазмы. Описанный механизм температурного скачка, очевидно, может иметь место, только если температура ионов значительно ниже температуры электронов и мало отличается от той, при которой в плазме возникает заметная ионизация, но это условия для существования двойного слоя необходимо только на границах шнура. В центральной части шнура температура ионов может быть сколь угодно высока. Как мы увидим из дальнейшего, разница между температурой ионов внутри шнура и на поверхности определяется величиной теплового потока и теплопроводности ионного газа. Обычно теплопроводность плазмы велика, но в сильном магнитном поле поперечная теплопроводность может стать весьма малой. Поэтому можно ожидать, что в сильных магнитных полях температура ионов внутри шнура будет мало отличаться от температуры электронов и может быть сделана достаточно высокой, чтобы осуществить в плазме из дейтерия или трития термоядерную реакцию. На этом основании можно пытаться осуществить проект термоядерного реактора для получения полезной энергии, что и было нами сделано⁸. Схема и его описание даны на рис. 4.

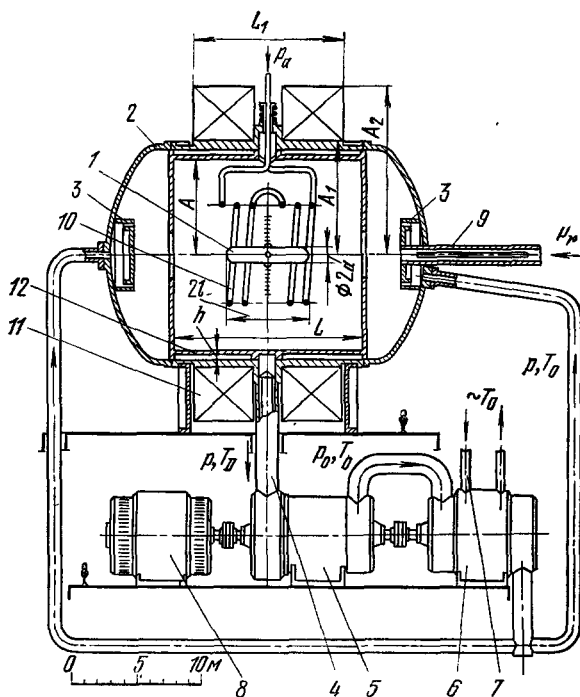


Рис. 4. Чертеж конструкции термоядерного реактора, работающего в замкнутом цикле.

1 — шнуровой разряд, 2 — цилиндрический контейнер реактора, 3 — наклонные сопла, 4 — труба, соединяющая контейнер реактора с газовой турбиной, 5 — газовая турбина, 6 — изотермический компрессор, 7 — охлаждающая вода, 8 — генератор, 9 — коаксиальный волновод, 10 — катушка переменного магнитного поля, 11 — соленоид, 12 — медный кожух резонатора. L — длина резонатора, L_1 — длина соленоида, P_3 — высокочастотная мощность, A — радиус резонатора, A_1 — внутренний радиус обмотки, A_2 — наружный радиус обмотки, $2l$ — длина шнуrowого разряда, $2a$ — диаметр шнуrowого разряда, h — расстояние между стенкой контейнера и резонатором.

Шнуровой разряд 1 находится в контейнере — резонаторе 2. Давление дейтерия в контейнере 30 атм, магнитное поле, созданное обычным соленоидом, 10 кЭ. На чертеже показана схема, по которой полезно используется энергия нейтронов. Нагретый нейтронами газ поступает в газовую турбину 5, где адиабатически расширяется, и потом в турбокомпрессоре 6 изотермически опять сжимается. Полученная избыточная мощность поступает в генератор 8. Нагрев шнуrowого разряда производится высокочастотным полем так же, как в цилиндрических резонаторах, изображенных на рис. 2. Разница только в том, что в реакторе шнуrowой

разряд окружен еще катушкой 10, которая служит для возбуждения в разряде магнитоакустических колебаний; это делается для того, чтобы повышать в плазме ионную температуру (⁴, с. 1856). Эта схема и ее расчеты были опубликованы еще в 1970 г. ⁸. Это было сделано для того, чтобы выявить реальную картину, какую может принять термоядерный реактор, работающий с нашим плазменным шнуром.

За прошедшее время мы значительно продвинулись в понимании происходящих в плазме процессов. В основном за это время был улучшен метод микроволновой диагностики, и в плазме стало возможным мерить с точностью до 5% распределение плотности по радиусу шнура и ее зависимость от магнитного поля, от давления и от подводимой мощности. Выяснены условия, необходимые для продольной стабилизации шнура. Все это дало возможность увеличить в несколько раз подводимую к шнуру мощность и поднять температуру электронов до 50 млн. градусов.

Таким образом, если бы удалось обеспечить температурное равновесие между ионным газом и электронным, то даже без дополнительного нагрева плазмы магнитоакустическими колебаниями можно было бы осуществить $D + T$ -реакцию. При этом конструкция термоядерного реактора становится проще и габариты ее уменьшаются. Это приводит к тому, что такой термоядерный реактор не только просто осуществляем, но и получаемую от нейтронов энергию можно легко превращать в механическую. Таким образом, отпадают те основные трудности, которые стоят на пути осуществления импульсных методов ядерного синтеза.

Но все же на нашем пути лежит еще нерешенная трудность, к которой следует отнестись очень серьезно, потому что она может сделать проблему вообще неразрешимой. Эта трудность заключается в следующем. Сейчас мы умеем в нашем устройстве в высокочастотном поле создавать плазменный шнур при давлении в несколько десятков атмосфер и поддерживать в нем непрерывную температуру электронов не меньше 50 млн. градусов и, по-видимому, с увеличением масштабов, значительно более высокую. Размер сечения нашего шнура ограничен только той мощностью, которую к нему подводили. Таким образом, мы располагаем электронным газом при рекордно высокой температуре, более высокой, чем температура электронного газа на Солнце. Вся задача теперь заключается в том, чтобы суметь нагреть до этой температуры ионы. Хотя ионный газ и находится в смеси с электронным, но, оказывается, выровнять их температуру не просто. Процесс выравнивания температур происходит в две стадии.

Первая — это передача тепла от электронов к ионам. Она просто заключается в энергетическом обмене, происходящем при столкновениях ионов с электронами. При этом очевидно, что количество передаваемого тепла пропорционально объему плазменного шнура. Вторая стадия заключается в отводе этого тепла от ионов, передаче тепла от ионного газа в окружающую шнур среду. Этот отвод пропорционален поверхности плазменного шнура. Таким образом, при заданной теплопроводности ионного газа температура ионов будет расти с увеличением радиуса шнура. Это приводит к тому, что при определенной теплопроводности ионного газа будет существовать критическое сечение плазменного шнура, при котором температура ионов достигнет значений, близких к температуре электронов, и станет происходить либо реакция $D + D$, либо реакция $D + T$. Если известна теплопроводность плазмы, то расчет критического размера шнура не представляет трудности. Если, например, провести этот расчет для обычной ионной плазмы в отсутствие магнитного поля, в которой теплопроводность определяется длиной свободного пробега иона, то окажется, что шнур будет иметь неосуществимо большое сечение с диаметром во много километров. Уменьшить это сечение можно, уменьшая

теплопроводность ионного газа, что может быть достигнуто помещением шнура в магнитное поле так, как это сделано в реакторе на рис. 4. Теплопроводность ионного газа в магнитном поле становится значительно меньше, так как она теперь определяется не длиной свободного пробега иона, но диаметром его ларморовской орбиты, которая обратно пропорциональна величине магнитного поля. Вычисление теплопроводности ионного газа в магнитном поле не представляет труда, и она достоверно известна.

Оказывается, что критическое сечение диаметра шнура обратно пропорционально величине магнитного поля, и при поле в несколько десятков килоэрстед критический диаметр шнура равен всего 5—10 см. Получить такую величину вполне осуществимо. Но для этого нужна установка значительно больше той, на которой мы сейчас изучаем в плазме природу электронного газа. В наших лабораторных условиях такая установка вполне осуществима и теперь находится в процессе изготовления.

Казалось бы, что описанный нами реактор непрерывного действия дает возможность осуществить простым способом не только реакцию $D + T$, но и $D + D$, но все же есть один фактор, который может этот процесс сделать неосуществимым.

Теплопроводность ионного газа мы вычисляем исходя из того, что она полностью определяется длиной свободного пробега иона, равного диаметру ларморовской орбиты, но при этом мы не учитываем влияния на теплопроводность конвекционных потоков тепла. Хорошо известно, что даже в обычном газе конвекционные потоки переносят тепла значительно больше, чем переносятся при молекулярных столкновениях. Известно, что вычисление влияния конвекционных потоков на теплопроводность даже в случае беспорядочного турбулентного состояния обычного газа представляет практически неразрешимую задачу. Поэтому тут обычно поступают так: находят методом размерностей теплоотдачу для близкой по характеру конвекции и обобщают ее для конкретного случая, при этом уже эмпирически определяя необходимый коэффициент. В случае плазмы процесс зависит от значительно большего числа параметров, и такой способ определения конвекционной теплопроводности становится еще более сложным, чем для обычного газа. Все же теоретически можно выявить, какие факторы больше всего влияют на интенсивность конвекции. Очевидно, что для того, чтобы поддержать конвекцию, необходимо затрачивать энергию. В газе эта энергия обычно берется из кинетической энергии при его течении за счет увеличения бернуллиевого перепада давления.

В покоящемся плазменном шнуре такой механизм создания конвекции отсутствует. Но в ионизированной плазме может существовать другой источник энергии, который может создавать конвекцию. Он связан с возможностью возникновения градиентов температуры. Это может вызвать появление в газовой среде внутренних напряжений, что приводит к возникновению конвекции.

Это явление впервые было изучено Максвеллом⁹. Он показал, что в газе при тепловом потоке могут возникать внутренние напряжения, которые пропорциональны квадрату вязкости и производным градиента температуры. В обычных условиях в газе они столь малы, что до сих пор их экспериментально не удается обнаружить. Дело в том, что вязкость пропорциональна длине свободного пробега, который в обычных газах при нормальном давлении очень мал, близок к 10^{-5} см, и поэтому внутреннее напряжение при небольших градиентах температур тоже мал.

В плазме длина свободного пробега как электронов, так и ионов достигает сантиметров, и градиент температуры велик. Поэтому внутреннее напряжение согласно формуле Максвелла порядков на 10 больше, чем

в газе, и может создавать в плазме конвекционные потоки и турбулентность. Присутствие магнитного поля, конечно, может влиять на характер этого явления, а участие в конвекции еще и электрического поля делает теоретический подход даже для самой грубой оценки мощности конвекции совсем ненадежным. Поэтому здесь есть только один путь — экспериментальное изучение этих процессов, что мы сейчас и делаем.

Несомненно, конвекционная теплопроводность будет уменьшать эффективность нагрева ионов и приведет к тому, что для получения термоядерного синтеза критическое сечение шнура будет увеличиваться и, соответственно, будут расти размеры реактора для полезного получения энергии. Если они станут недоступно большими, то, конечно, возникнет вопрос о способах борьбы с величиной конвекционной теплопроводности. Это можно сделать, создав на границе плазменного шнура слой с отсутствием турбулентности, как это имеет место в газе, где возникает так называемый прандтлевский слой. Такая возможность может быть теоретически обоснована (⁴, с. 1853).

Таким образом, мы приходим к тому, что импульсный метод, применяемый в «Токамаке», сейчас поддается полному теоретическому расчету, но постройка термоядерного реактора, основанного на этом методе, приводит к очень большой и сложной конструкции. В противоположность этому наш термоядерный реактор имеет простую конструкцию. Но ее практическое осуществление и размеры зависят от конвекционных теплообменных процессов, которые не поддаются теоретической количественной оценке.

Основная привлекательность научной работы как раз в том, что она приводит к проблемам, решение которых нельзя предвидеть, поэтому решение проблемы управляемой термоядерной реакции для ученого особенно привлекательно.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Ribe F. L.— Rev. Mod. Phys., 1975, v. 47, p. 7.
2. Капица П. Л.— Письма ЖЭТФ, 1975, т. 22, с. 20.
3. Капица П. Л., Пятаевский Л. П.— ЖЭТФ, 1974, т. 67, с. 1410.
4. Капица П. Л.— ЖЭТФ, 1969, т. 57, с. 1801.
5. Капица П. Л. Электроника больших мощностей.— М.: Наука, 1962.
6. Капица П. Л., Филимонов С. И., Капица С. П.— В кн. Электроника больших мощностей. № 6.— М.: Наука, 1969.
7. Капица П. Л.— ДАН СССР, 1955, т. 101, с. 254.
8. Капица П. Л.— ЖЭТФ, 1970, т. 58, с. 377.
9. Maxwell J. C.— Phil. Trans. Roy. Soc., 1879, v. 170, p. 231.