

рации топлива с выдержкой после выгрузки 3—6 мес. [7].

Опытная установка для исследования и отработки регенерации топлива создана в НИИАР, где проведена первая регенерация облученного уранового топлива из ТВС реактора БОР-60 с удельной радиоактивностью, близкой к радиоактивности топлива промышленных быстрых реакторов (среднее выгорание  $\sim 10\%$ , выдержка 3 и 6 мес). Была продемонстрирована возможность регенерации таким методом уранового топлива высокой активности (примерно до  $10^6$  Ки/кг). При этом достигается суммарный коэффициент очистки от  $\gamma$ -активности более  $10^6$ , безвозвратные потери составляют 0,1—0,5%.

Работы в области внешнего топливного цикла включают в себя разработку надежных и удобных в эксплуатации контейнеров для транспортировки облученного топлива на заводы регенерации, методов разделки твэлов перед регенерацией, а также исследования по удалению радиоактивных отходов. Программа работ по быстрым реакторам в СССР охватывает широкую область исследований, проектно-конструкторских разработок, сооружения и эксплуатации

быстрых реакторов, что необходимо для решения задач создания крупномасштабной ядерной энергетики с быстрыми реакторами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Orlov V. e.a. In.: Fast Reactor Power Stations. London, BNES, 1974. p. 225.
2. Будов В. М. и др. Ядерный реактор на быстрых нейтронах БН-600 — установка для энергетики близкого будущего. Докл. на техн. конф. по атомной промышленности «Нуклекс-75». Базель, 6—11 сент. 1975.
3. Ринейский А. А. и др. В кн.: Техника быстрых реакторов, охлаждаемых натрием. Вена, изд. МАГАТЭ, 1970, с. 299.
4. Титов В. Ф. и др. Основные проблемы и пути развития парогенераторов натрий — вода. Докл. на II Симп. СЭВ по быстрым реакторам. Обнинск, 1973.
5. Давыдов Е. Ф. и др. «Атомная энергия», 1975, т. 39, вып. 1, с. 33.
6. Шевченко В. Б. и др. О проблемах в использовании пурекс-процесса в регенерации топлива реакторов на быстрых нейтронах. Докл. на Совещ. экспертов МАГАТЭ по проблемам регенерации топлива быстрых реакторов. Л., 17—21 мая 1976.
7. Кикоин И. К. и др. Опытная регенерация облученного уранового топлива реактора БОР-60 фторидным способом. Там же.

## Современное состояние исследований по управляемому термоядерному синтезу

ЧУЯНОВ В. А.

Исследования по управляемому термоядерному синтезу начались в Советском Союзе в 1950 г. сразу же за первыми успехами в овладении энергией деления урана. Рассматриваемые как возможный источник получения делящихся материалов и трития, они начались в обстановке секретности, но уже в 1956 г. по инициативе советских ученых работы по управляемым термоядерным реакциям были рассекречены и И. В. Курчатов в том же году в Харуэлле (Великобритания) сделал первое открытое сообщение об этом. С тех пор исследования по управляемому синтезу являются одной из областей плодотворного международного научного сотрудничества.

Работы по термоядерным реакциям начались весьма многообещающе. В 1952 г. в экспериментах с сильнооточными разрядами в дейтерии было обнаружено нейтронное излучение — первый признак реакции синтеза. Однако более тщательное исследование, проведенное под ру-

ководством Л. А. Арцимовича, привело к выводу об ускорительном происхождении наблюдаемых нейтронов: не вся плазма разогревалась в разрядах до высокой температуры, а лишь малая доля частиц ускорялась в сильных электрических полях, возникающих в результате развивающихся неустойчивостей. При повышении энерговыклада неустойчивые колебания быстро выносили тепло на стенки разрядных камер, тем самым предотвращая нагрев плазмы до желательной температуры. Неустойчивости заставили исследователей отказаться от надежд на скорое овладение энергией термоядерного синтеза и на 15 лет углубиться в создание новой науки — физики высокотемпературной плазмы.

Отличительной особенностью первого десятилетия работ по физике высокотемпературной плазмы была слабая корреляция между теорией и экспериментом. Плазма не желала существовать в теоретически равновесных configura-

циях самого разного типа и всегда выбрасывала свою энергию на стенки за время на много порядков меньшее, чем вычисленное теоретиками время диффузии и теплопроводности. Лишь глубокий анализ устойчивости плазмы, выполненный теоретиками школы М. А. Леонтовича, и экспериментальное овладение методами стабилизации позволили согласовать теорию с экспериментом и добиться длительного времени удержания плазмы. Впервые стабилизацию одной из неустойчивостей — желобковой — удалось осуществить М. С. Иоффе с сотрудниками с помощью магнитного поля, напряженность которого нарастает во всех направлениях от границы плазмы. Сообщение об этих экспериментах, сделанное в 1961 г. на Международной конференции в Зальцбурге, стало важной вехой на пути развития термоядерных исследований. С тех пор во всем мире специальные проводники с током, создающие в магнитных ловушках поля с «магнитной ямой», называют «палками Иоффе».

В настоящее время ясно, что казавшееся когда-то безбрежным море неустойчивостей оказалось, по образному выражению Б. Б. Кадомцева, всего лишь озером, границы и даже глубины которого уже достаточно изучены. В ряде случаев были получены столь полные и точные физические модели неустойчивостей, что для стабилизации последних оказалось возможным использовать методы автоматического регулирования. Первые успешные эксперименты такого рода были выполнены в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 1967 г.

Взросшее понимание физики плазмы позволило к началу второго десятилетия исследований создать магнитные конфигурации, в которых неустойчивости, вызывающие быстрое движение плазмы как целого, были подавлены и время удержания определялось более медленными процессами — диффузией и теплопроводностью. Последние, однако, тоже могут приводить к недопустимо быстрой утечке тепла, если развиваются мелкомасштабные неустойчивости, приводящие к турбулентности и усиленному перемешиванию.

В США в течение длительного времени проводились эксперименты на крупнейшей термоядерной установке стелларатор-С. В них регулярно наблюдалась усиленная диффузия плазмы в магнитном поле, которая впервые была обнаружена в исследованиях дуговых разрядов и описана американским физиком Д. Бомом еще в 1949 г. С тех пор она называется бомовской. Бомовская диффузия столь велика, что

делает невозможной разработку стационарного термоядерного реактора разумных размеров.

Исходя из своих работ на стеллараторе-С, американские физики сделали вывод об универсальности бомовской диффузии. Исследования, проведенные в СССР под руководством Л. А. Арцимовича на токамаках, развеяли миф об универсальности бомовской диффузии.

В работах, представленных в 1968 г. на конференции в Новосибирске, сообщалось об удержании в токамаке Т-3 плазмы температурой в сотни электронвольт в течение 10 мс, т. е. в 30 раз дольше, чем предсказывала формула Бома. Этот результат первоначально вызвал некоторое недоверие за рубежом, но совместные исследования советских и английских физиков в 1969 г., использовавших для определения температуры плазмы томсоновское рассеяние излучения рубинового лазера, устранили все сомнения. Эффект успеха, достигнутого на токамаках, был столь велик, что в США полностью прекратили исследования на стеллараторах и переклонились на разработку советской идеи — токамаков. Однако, как показали дальнейшие исследования на стеллараторах, проведенные уже в СССР и странах Европы, такая поспешность была не совсем оправданной: причины бомовской диффузии на американских стеллараторах заключались не в порочности самой идеи стелларатора, а в низкой точности создания магнитных полей в американских установках. На стеллараторах, исследуемых в настоящее время в ФИАНе и Харьковском ФТИ, бомовский предел превзойден и результаты не уступают получаемым на токамаках аналогичных размеров.

Таким образом, к 1968 г. стали ясно видны контуры новой науки — физики высокотемпературной плазмы. Не все проблемы были решены, но растущее согласие теории с экспериментом, прогресс в достигаемых параметрах показали, что исследования идут по верному пути. Все это позволило вновь вернуться к истокам термоядерной проблемы, к той цели, ради которой начались исследования горячей плазмы.

Выступая в 1968 г. с заключительным словом на конференции в Новосибирске, Г. И. Будкер

Первый советский промышленный быстрый реактор БН-350. Используется для обеспечения г. Шевченко и п-ва Мангышлак электроэнергией и опресненной водой. Номинальные параметры: тепловая мощность 1 млн. кВт, электрическая — 150 тыс. кВт, выработка пресной воды — 120 тыс. м<sup>3</sup> в сутки.

Фото В. Гусева

призвал физиков, не прекращая исследований плазмы, вернуться к проблеме термоядерного реактора — неисчерпаемого источника энергии для человечества. Прошедшие с той поры 9 лет показывают, что этот призыв действительно был услышан и произошла значительная концентрация исследований на направлениях, наиболее перспективных с точки зрения создания термоядерного реактора.

Чтобы оценить современное состояние работ, вспомним те требования, которые предъявляют к параметрам термоядерной плазмы свойства элементарных сечений синтеза. Как хорошо известно, чтобы энергия, выделяющаяся в плазме при самой легко осуществимой реакции слияния ядер дейтерия и трития, была больше затрачиваемой на ее создание, необходимо выполнение критерия Лоусона:

$$n\tau > 10^{14} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с при } T > 10 \text{ кэВ},$$

где  $n$  — плотность, част./см<sup>3</sup>;  $\tau$  — время удержания энергии, с. Как видно из критерия Лоусона, термоядерные условия можно выполнить при различном сочетании плотности и времени удержания: чем меньше плотность, тем больше должно быть время удержания. Различные подходы к решению проблемы управляемого синтеза предполагают использование разной плотности. Отличительной особенностью прогресса, наблюдаемого в настоящее время, является успешное приближение к критерию Лоусона почти по всем направлениям. Рассмотрим их последовательно. Начнем с малой плотности.

Плотность плазмы много ниже  $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$  вряд ли будет когда-либо представлять технический интерес из-за слишком малой (меньше  $1 \text{ Вт/см}^3$ ) плотности энерговыделения. При плотности  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  тепловая энергия плазмы значительно меньше, чем энергия внешнего магнитного поля при технически реальных полях в десятки килогаусс, поэтому движения плазмы не могут сильно возмущать магнитные поля и она удерживается полем практически фиксированной конфигурации. Удержание заряженных частиц, движущихся вдоль силовых линий магнитного поля, может быть осуществлено, если силовые линии не уходят из

объема, т. е. образуют тороидальную конфигурацию. Идея магнитной термоизоляции плазмы была выдвинута в Советском Союзе в 1950 г. Основными установками, где велись и ведутся исследования тороидального удержания, являются токамаки. Токамак — это тороидальная камера с сильным продольным магнитным полем, плазма в которой создается безэлектродным разрядом и удерживается комбинацией внешнего тороидального поля и поля собственного тока, причем, как показали теоретические исследования В. Д. Шафранова, для обеспечения магнитогидродинамической устойчивости магнитное поле тока должно быть значительно меньше тороидального. Исследование систем типа токамак было начато в ИАЭ им. И. В. Курчатова в 1954 г. И. Н. Головиным и Н. А. Явлинским, а после трагической гибели Н. А. Явлинского продолжено Л. А. Арцимовичем и его учениками. Идеи, заложенные в токамаках, оказались столь глубокими и жизнеспособными, что до самого последнего времени происходили практически лишь технологические усовершенствования: улучшение вакуумных условий путем перехода к цельнометаллическим прогретым системам, уменьшение рассеянных полей, увеличение размеров установок и напряженности магнитного поля. Одновременно, что самое главное, проводились тщательные экспериментальные и теоретические исследования равновесия, устойчивости и процессов переноса в токамаках. Большим вкладом в исследование явилась развитая А. А. Галеевым и Р. З. Сагдеевым так называемая неоклассическая теория переноса в тороидальных системах, принявшая во внимание особенности заряженных частиц в таких системах и те отклонения функции распределения от равновесной, которые возникают при малых частотах столкновений. Сравнение результатов исследований на токамаках с теорией Галеева — Сагдеева показало, что при достигнутой (еще не очень большой) температуре ионная компонента плазмы ведет себя классическим (т. е. наилучшим возможным) образом, а утечка тепла от электронов происходит примерно на порядок быстрее, чем следует из классических формул, и, следовательно, связана с какой-то мелко-масштабной турбулентностью, не учитываемой классической теорией. (Под классическими понимаются теории, учитывающие лишь парные взаимодействия между частицами.) Однако и потери тепла по электронному каналу носят диффузионный характер, и, таким образом,

Токамак Т-10 — одна из крупнейших термоядерных установок мира, в которой наблюдалась интенсивная устойчивая термоядерная реакция. Температура плазмы достигала ~1 кэВ, энергетическое время жизни плазмы — 0,06 с, максимальная плотность  $8 \cdot 10^{13}$  част./см<sup>3</sup>.  
Фото В. Ободзинского

время удержания должно возрастать с увеличением размеров установок как квадрат радиуса плазмы. Этот вывод, полученный в 1968 г., был проверен на крупнейшем советском токамаке Т-10, где малый радиус плазменного тора увеличен до 37 см и время удержания энергии достигло рекордного значения 0,06 с.

Установка Т-10, запущенная в 1975 г., еще не достигла предела в своих результатах — исследования продолжаются, но то, что сегодня получено, полностью подтверждает развитые ранее теоретические представления. К сожалению, эта установка не может дать исчерпывающих сведений о поведении плазмы в реакторных условиях. Неоклассическая теория предсказывает значительное уменьшение коэффициентов переноса с ростом температуры плазмы, а температура плазмы в Т-10 (1 кэВ) еще недостаточно велика для обнаружения этого эффекта. В Т-10, как и во всех предшествующих токамаках, плазма нагревается протекающим по ней током. С ростом температуры сопротивление падает и вместе с ним снижается мощность омического нагрева. Возникает необходимость в дополнении схемы токамаков новыми элементами — устройствами для дополнительного нагрева. Хотя физически возможны и исследуются разные способы, реальные успехи достигнуты с использованием двух методов: инъекции быстрых атомов и нагрева миллиметровыми волнами. В настоящее время созданы инжекторы быстрых атомов, дающие потоки атомов интенсивностью в десятки эквивалентных ампер, энергией в десятки килоэлектронвольт и длительностью импульса инъекции в десятки миллисекунд. Представляется вполне реальной разработка в ближайшее время инжекторов током в сотни ампер, энергией в сотни килоэлектронвольт, работающих в стационарном режиме. Эксперименты с уже созданными инжекторами на токамаках средних размеров показали перспективность данного метода и позволили получить рекордную температуру ионов 2 кэВ. Применение мощной нейтральной инъекции планируется на всех крупных токамаках, сооружаемых в различных лабораториях мира, и должно обеспечить возможность исследования процессов при термоядерной температуре.

Нагрев плазмы микроволнами на частоте электронного циклотронного резонанса стал возможен благодаря созданию в Советском Союзе мощных генераторов миллиметрового диапазона — мазеров на циклотронном резонансе. Первые эксперименты на малом тока-

маке ТМ-3 показали большую эффективность (не менее 50%) введения дополнительной энергии таким методом.

Приближение к термоядерным параметрам заставило внести еще ряд дополнений в классическую схему токамака. При длительном времени существования плазмы, достигающем в крупнейших токамаках 0,5 с, оказалось необходимым ввести специальные автоматические системы, центрирующие положение шнура в разрядной камере. Подобная система управления равновесным положением плазменного шнура была создана в ИАЭ им. И. В. Курчатова совместно с киевским Институтом кибернетики и впервые успешно использована на токамаке ТО-1. Возросшая температура плазмы и увеличившаяся длительность ее взаимодействия со стенками разрядной камеры заставили обратить особое внимание на взаимодействие плазмы со стенкой и исследование процессов накопления тяжелых примесей. По классическим представлениям тяжелые многозарядные ионы должны особенно хорошо удерживаться в плазменном шнуре, накапливаться в нем и, следовательно, через некоторое время гасить термоядерную реакцию. Предложено много методов борьбы с накоплением примесей, среди них выбор материалов первой стенки с малым коэффициентом распыления и малым атомным номером, создание специальных магнитных устройств — диверторов, отводящих внешний слой плазмы из тороидальной камеры, организация искусственного выноса примесей из плазменного столба. Эти методы в настоящее время интенсивно исследуются.

Сравним теперь параметры, полученные на токамаках, с критерием Лоусона. Максимальный параметр удержания  $n\tau$ , достигнутый в экспериментах при высокой плотности плазмы на токамаке «Алкатор» в США, составляет  $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$  при температуре плазмы около 0,5 кэВ. Максимальная температура ионов  $\sim 2 \text{ кэВ}$  была достигнута в экспериментах с дополнительным нагревом инъекцией быстрых атомов при  $n\tau \leq 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$ . Объединения в одной установке высокой температуры и высоких параметров удержания можно ожидать после введения мощных методов дополнительного нагрева на крупнейших современных токамаках. Таким образом, видно, что от критерия Лоусона нас отделяет в настоящее время множитель 5 в значении температуры. В течение последних 15 лет параметр удержания увеличился на порядок каждые 5 лет, а температура ионов возрастала за то же время примерно

в 2 раза. В настоящее время нет причин ожидать снижения темпов этого роста. Напротив, имеющийся физический и технический задел позволяет надеяться на их ускорение. Поэтому с известной уверенностью можно ожидать, что где-то к 1985 г. критерий Лоусона может быть достигнут и на токамаке будет проведен так называемый демонстрационный эксперимент, когда выделение термоядерной энергии в плазме превысит затраты на ее создание и поддержание.

Токамаки являются наиболее продвинутой и перспективной, но далеко не единственным направлением исследований по магнитному удержанию.

Одновременно с токамаками началось развитие другого типа тороидальных систем — стеллараторов. Удержание плазмы в них осуществляется комбинированным полем внешней тороидальной обмотки и внешних же винтовых проводников, поле которых заменяет поле тока, протекающего через плазму токамаков. Так как поле внешних проводников в отличие от поля плазменного тока стабильно и однозначно задано, стеллараторы удобнее для физических исследований. Однако они сложнее, и потому при равных затратах радиус плазменного шнура в них меньше, чем в токамаках, а потому меньше и максимальное время удержания. Техническая простота является важным достоинством инженерной системы, но существенное усложнение классической схемы токамаков постепенно приближает их к стеллараторам, так что вполне возможно частичное объединение обоих принципов на стадии создания термоядерного реактора.

Успешное удержание плазмы в токамаках и стеллараторах осуществляется благодаря жесткости магнитных конфигураций, которая возможна, однако, лишь при малых отношениях давления плазмы к давлению удерживающего магнитного поля. Это отношение в физике плазмы принято обозначать  $\beta$ . В современных токамаках  $\beta$  меньше 1%. Так как магнитное поле является одним из основных дорогостоящих компонентов будущего реактора, малые значения  $\beta$  означают необходимость в сильных полях и невыгодны с инженерной точки зрения. Внутри самой схемы токамака имеются возможности некоторого повышения  $\beta$ , и они изучаются. Однако в течение длительного времени делались попытки найти более радикальные решения и получить устойчивое удержание при  $\beta \approx 1$ . Исследовались, главным образом, различные типы Z- и  $\theta$ -пинчей, т. е. систем

с быстрым сжатием плазмы внешним магнитным полем, но до сих пор результаты работ не вызывают особого энтузиазма. Быстрое сжатие хорошо нагревает плазму, но удержание является крайне низким. На основании этих данных не следует тем не менее делать вывода о невозможности хорошего удержания в системах с большим  $\beta$ . Новые данные, полученные с помощью совсем других систем — ловушек с магнитными пробками, показывают, что имеются хорошие перспективы создания систем удержания с высоким  $\beta$ .

Ловушки с магнитными пробками были предложены Г. И. Будкером в 1953 г. В таких системах силовые линии не замыкаются в торе, а для предотвращения утечки плазмы вдоль силовых линий на концах прямолинейной ловушки создаются области усиленного поля — магнитные пробки. Не все частицы отражаются от пробок, а лишь те, которые имеют достаточно большую скорость в направлении, перпендикулярном силовым линиям. Столкновения между частицами — кулоновское рассеяние — приводят к их уходу через пробки, однако при высокой температуре столкновения редки и удержание возможно, причем чем выше температура ионов, тем дольше они удерживаются в ловушке. Так как функция распределения частиц в ловушках с пробками далека от равновесной — в ней нет частиц с малой поперечной скоростью, — плазма в открытых ловушках более неустойчива и в ней могут развиваться специфические неустойчивости. М. С. Иоффе с сотрудниками экспериментально доказали возможность стабилизации путем «исправления» функции распределения добавлением неудерживаемой холодной плазмы. Одновременно в США были разработаны мощные инжекторы быстрых атомов, позволяющие заполнить ловушки горячей плазмой. При использовании этих инжекторов и упомянутого метода стабилизации в Ливерморской лаборатории им. Лоуренса в ловушке с магнитными пробками удалось получить плазму плотностью  $10^{14}$  см<sup>-3</sup>, температурой ионов около 10 кэВ и параметром  $n\tau$ , равным  $10^{11}$  см<sup>-3</sup>·с. И что особенно важно, значение  $\beta$  приближалось к 1. Хотя удержание в ловушках с пробками пока еще хуже, чем в токамаках, результаты уже достаточно интересны и предложены ясные пути их улучшения.

Следует заметить, что из-за быстрого ухода ионов через пробки в результате парных столкновений перспективы создания реактора на основе ловушек с магнитными пробками не выглядят особенно радужными и при полном

подавлении всех возможных неустойчивостей, а даже небольшие дополнительные потери из-за неустойчивостей полностью нарушают энергетический баланс такого реактора. Необходимо найти методы, улучшающие удержание плазмы пробками. Поиск таких методов ведется давно, но лишь около 2 лет назад Г. И. Димовым было предложено действительно многообещающее решение — использовать комбинацию из трех ловушек, в которой две крайние малых размеров служат для улучшения удержания плазмы в центральной части, являющейся источником термоядерной энергии. При этом уход плазмы из центральной ловушки вдоль силовых линий магнитного поля предотвращается не магнитными пробками, а электрическими полями, автоматически возникающими в такой конфигурации, если плотность в крайних ловушках превышает ее значение в центральной части. Теоретически данная идея выглядит достаточно привлекательно, и ее экспериментальная проверка планируется на самое ближайшее время.

Другой интересной модификацией ловушки с пробками является использование собственных диамагнитных токов в плазме высокого давления для изменения магнитной конфигурации и превращения открытой ловушки в тороидальную. В малых масштабах возможность создания таких конфигураций была уже продемонстрирована с помощью инъекции в ловушку импульсных пучков релятивистских электронов. Использование техники нейтральной инъекции открывает тут новые возможности.

Таким образом, совокупность экспериментальных результатов с мощным развитием техники инжекторов и новыми идеями по улучшению классического удержания вывело направление открытых ловушек — признанное ранее аутсайдером в термоядерной гонке — в одно из самых перспективных (по крайней мере в долгосрочном плане).

Одновременно с успехами в магнитном удержании плазмы за последние годы большой прогресс был достигнут в другом направлении: в создании термоядерного микровзрыва. Как следует из критерия Лоусона, если плотность плазмы превышает плотность твердого тела, то отпадает нужда в удержании: время свободного разлета превышает необходимое время удержания. Задача сводится, таким образом, к концентрации большой энергии за малое время в небольшом объеме вещества. За последнее десятилетие созданы исключительно мощные концентраторы энергии: лазеры и релятивист-

ские электронные пучки. Применение этой техники позволило вплотную приблизиться к осуществлению термоядерного микровзрыва.

Возможность создания с помощью лазера плазмы термоядерной температуры была впервые теоретически показана в 1962 г. Н. Г. Басовым и О. Н. Крохиным. Эксперименты, проводимые под их руководством в ФИАНе, привели в 1968 г. к обнаружению нейтронного излучения из лазерной мишени.

В 1972 г. Э. Теллер объявил о работах ливерморской группы во главе с Дж. Наккольсом, где теоретически показывалась возможность сильного сжатия мишени под действием лазерного импульса специального профиля. Сообщение вызвало повышенный интерес мирового научного общественного мнения к лазерному термоядерному синтезу. Так как при сжатии время разлета сокращается лишь как радиус, т. е. при сферическом сжатии как кубический корень из плотности, сильное сжатие позволяет выполнить критерий Лоусона при меньших размерах термоядерной плазмы и, следовательно, при меньшей вкладываемой в нее энергии лазера. Тысячекратное сжатие понижает требуемую энергию лазерного импульса в миллион раз и позволяет достичь критерий Лоусона при энергии в импульсе несколько десятков килоджоулей. Осуществить сжатие можно за счет давления, которое возникает при испарении под действием лазерного излучения внешнего слоя мишени. Сильное сжатие можно получить, однако, лишь в случае, если сжимаемый центр мишени будет оставаться холодным до самого последнего момента. Для этого следует подобрать такую зависимость мощности лазера от времени, чтобы все возбуждаемые внешним излучением ударные волны одновременно сошлись в центре мишени. Основная энергия вкладывается в самый последний момент, для чего требуется лазер очень большой мощности. Требования к мощности можно уменьшить, если использовать мишень не сплошную, а состоящую из различных оболочек. Если, например, заключить D — T-мишень в тяжелую полую оболочку, то можно лазером меньшей мощности, но с большей длительностью импульсов разогнать оболочку, а затем использовать ее кинетическую энергию для обжатия и нагрева D — T-мишени. Эксперименты в настоящее время развиваются именно в этом направлении: изучается сферическое обжатие стеклянных микросфер, заполненных дейтериевым или D — T-газом под давлением в десятки атмосфер. Основные исследуемые здесь процессы —

физика поглощения лазерного излучения, динамика, симметрия и устойчивость сжатия, генерация быстрых частиц и нейтронов. В экспериментах с лазерами, позволявшими достичь в наносекундных и более коротких импульсах энергию до 1 кДж, удалось осуществить объемное сжатие таких стеклянных сфер в 1000 раз и нагреть ионы в центре мишени до 2,5 кэВ, наблюдая одновременно термоядерное нейтронное излучение, которое соответствует указанной температуре ионов. В настоящее время начинаются эксперименты с новым поколением лазеров с энергией в коротком импульсе около 10 кДж. Можно надеяться, что с данными системами удастся вплотную приблизиться к критерию Лоусона.

Следует помнить, однако, что при нагреве плазмы лазерами используется не электрическая энергия, а энергия света, которая в современных сверхмощных лазерах получается из электричества с низким КПД (меньше 1%). Поэтому если для стационарных систем выполнение критерия Лоусона означает канун промышленного применения, то для лазерных — лишь этап физических исследований. Для их промышленного применения нужно или превышение критерия Лоусона примерно в 100 раз, или существенное улучшение КПД. Наилучший КПД имеют газовые лазеры на углекислом газе. Но они генерируют свет со значительно большей длиной волны, чем наиболее широко используемые в экспериментах лазеры на неодимовом стекле. Следовательно, их излучение должно поглощаться в более разреженных внешних слоях плазменного облака вокруг мишени, что невыгодно.

Однако при достаточно большой мощности лазерного излучения под действием давления света радиальный профиль плотности плазмы должен исказиться: на нем должна образоваться высокая ступенька, где градиент плотности будет велик. В таком случае точка поглощения лазерного света слабо зависела бы от длины волны и газовые лазеры имели бы явное преимущество перед твердотельными благодаря более высокому КПД. Дальнейшие исследования должны показать, действительно ли при большой мощности реализуется указанное обстоятельство.

С точки зрения КПД преобразования энергии значительное преимущество перед лазерами имеют релятивистские электронные пучки. Их недостатками являются более трудная транспортировка и фокусировка энергии и проблема вклада энергии в малый объем.

Предложение использовать релятивистские электронные пучки для термоядерного микровзрыва было сделано впервые в 1968 г. Е. К. Завойским. За последнее пятилетие в ИАЭ им. И. В. Курчатова под руководством Л. И. Рудакова разработаны эффективные методы конверсии энергии релятивистских электронов в кинетическую энергию оболочки, сжимающей термоядерную мишень. На установке «Тритон» с использованием двухоболочечной мишени удалось осуществить эффективный вклад энергии пучка в мишень, ускорить сегмент полиэтиленовой оболочки до скорости, близкой к необходимой для осуществления термоядерного микровзрыва, и получить термоядерные нейтроны. Сжатие плазмы при этом достигло  $10^3$ , температура ионов 1 кэВ. Обнаружен эффект аномального энерговклада энергии в мишень, позволяющий существенно снизить энергию пучка, требуемую для поджига термоядерной мишени. В экспериментах была достигнута фокусировка пучков, достаточная для поджига термоядерной мишени. Таким образом, за последние годы в модельных экспериментах удалось исследовать физику микровзрыва с поджигом релятивистскими электронными пучками практически при требуемых термоядерных параметрах, что позволяет достаточно надежно экстраполировать результаты к условиям реактора. Микровзрыв с коэффициентом усиления по энергии  $\sim 20$  может быть получен с применением уже имеющейся технологии при полной энергии в пучке около 5 МДж. Для осуществления этого режима в настоящее время проектируется ускорительный комплекс «Ангара-5», состоящий из 48 одинаковых ускорительных модулей, которые обеспечивают суммарный ток 50 МА с полной энергией 5 МДж при длительности 60—80 нс. По-видимому, системы, основанные на релятивистских электронных пучках, и в частности «Ангара-5», наиболее близки к выполнению критерия Лоусона.

Таким образом, наибольшее продвижение к осуществлению условий управляемого синтеза имело место при малой и сверхвысокой плотности. При плотности среднего диапазона  $10^{17}$  см<sup>-3</sup> и выше эксперименты не вышли еще за рамки физической стадии, но уже достаточно многообещающие. Весьма перспективен, например, предложенный Е. П. Велиховым способ сжатия плазмы предварительно разогнанным металлическим лайнером. Такой метод сжатия позволяет наилучшим образом использовать энергию источника питания и удобен для прямого преобразования термоядерной энергии

в электрическую. В подобных экспериментах уже удалось достичь устойчивого 100-кратного сжатия в цилиндрической геометрии. При трехмерном сжатии кумулирующим лайнером коэффициент сжатия составляет 1000. Другой метод удержания плотной плазмы, предложенный Д. Д. Рютовым, изучается в настоящее время в ИЯФ СО АН СССР в Новосибирске. В этом случае плазма удерживается в длинной металлической трубе с относительно слабым магнитным полем. Поперечное давление удерживается стенками трубы, поперечная теплопроводность уменьшена благодаря продольному магнитному полю, а разлет плазмы вдоль трубы подавляется гофрировкой трубы и магнитного поля, в результате которой образуются магнитные пробки. Они непосредственно удерживают часть частиц, имеющих благоприятное направление вектора скорости, и замедляют разлет остальных благодаря их трению об удерживаемые. Эффект продольного удержания проверен на модельных экспериментах. В настоящее время работа ведется на малой, но позволяющей исследовать все явления в комплексе модели.

Из приведенного выше обзора исследований видно, что существует, по-видимому, несколько путей решения термоядерной проблемы, но нет простого пути. При любом подходе есть критические параметры (размеры, мощность), достижение которых возможно лишь в весьма дорогих установках. Применение нового физического принципа, как правило, лишь переносит центр проблемы на новое место, но не уменьшает затрат, необходимых для достижения цели. Чем ближе мы подходим к цели, тем более сложными и дорогими становятся экспериментальные установки, тем большую роль начинают играть чисто инженерные и технологические аспекты. Задача приобретает все более прикладной характер. В этих условиях представляется естественным вновь вернуться к цели термоядерных исследований и посмотреть: нужны ли термоядерные реакторы, какое место они могли бы занять в энергетике завтрашнего дня, оправданы ли те расходы, которые потребуются для решения инженерных и технологических задач создания термоядерного реактора?

Теоретически возможны различные топливные циклы термоядерного реактора. Однако, исходя из уровня достижений сегодняшнего дня, мы можем говорить лишь о реакции смеси дейтерия и трития. D — D и другие возможные реакции не представляются осуществимыми в ближайшем будущем. Попытаемся сравнить термоядерные D — T-реакторы с их практиче-

ски единственным конкурентом в большой энергетике — реакторами деления. На какой основе может быть проведено такое сравнение? В современных условиях, когда человечество осознало ограниченность земных ресурсов, одним из первых параметров сравнения является обеспеченность топливом. В D — T-реакторах необходим тритий, нестабильный изотоп водорода, отсутствующий в естественных условиях. Его можно сравнительно легко воспроизводить в самом термоядерном реакторе, облучая нейтронами литий. Таким образом, топливная база D — T-реакторов ограничена запасами лития. Оценка запасов показывает, что их достаточно для удовлетворения современных потребностей человечества в энергии в течение сотен тысяч лет, т. е. топливная база D — T-реакторов сравнима с топливной базой реакторов-размножителей, и в этой области термоядерные реакторы не имеют существенных преимуществ. Другим важным параметром является опасность радиоактивных загрязнений. К сожалению, D — T-реакторы не свободны от радиоактивных загрязнений. Радиоактивная опасность возникает по двум причинам: во-первых, из-за наличия трития и, во-вторых, из-за нейтронного облучения конструктивных материалов. Ввиду разного характера радиоактивных отходов в термоядерных и ядерных реакторах специалисты расходятся в оценке сравнительной опасности атомных и термоядерных станций. Оптимисты считают, что последние примерно в 1000 раз менее опасны, чем ядерные той же мощности.

На первом этапе развития надо рассматривать термоядерную энергетику не как конкурента, а как составную часть ядерной, которая не может состоять из одних быстрых реакторов-размножителей. Последние хороши при выработке электроэнергии в базовом режиме. Их использование для покрытия полупиковых нагрузок, производства высокотемпературного тепла, теплофикации нерационально. В этих областях с большим успехом могут применяться легководные реакторы. Снабжать их топливом могли бы D — T-термоядерные реакторы с оболочками из натурального или обедненного урана. Такие гибридные реакторы могли бы вырабатывать не только электроэнергию, но и плутоний — топливо для легководных реакторов, причем каждый гибридный реактор мог бы обеспечить топливом 4—6 легководных той же мощности. Экономические оценки показывают, что такой симбиоз термоядерных и легководных реакторов оказывается экономически

привлекательным, даже если стоимость гибридного реактора будет в 2 раза выше стоимости быстрого реактора-размножителя той же мощности. При использовании гибридных реакторов оказывается возможным наиболее рациональное разделение энергетического рынка между реакторами-размножителями, легководными и термоядерными.

Конечно, при использовании урана термоядерные реакторы теряют свою «чистоту», но потеря окупается важными технологическими преимуществами. Энерговыведение в урановом blanketе в 8—10 раз увеличивает полное энерговыведение в термоядерном реакторе, что соответственно во столько же раз снижает требования к параметру удержания. Для энергетического баланса в гибридном реакторе достаточно иметь  $n\tau > 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}$ . Это значение уже сегодня достигнуто на токамаках. Благодаря дополнительному энерговыведению в blanketе становятся возможными новые, более дешевые термоядерные схемы, энергетически нерентабельные в чистом D — T-реакторе. Наконец, дополнительное энерговыведение в blanketе дает возможность существенно снизить потоки 14-мегавольтных нейтронов через первую стенку термоядерного реактора, тем самым существенно облегчив решение проблемы радиационной стойкости материалов. Суммируя все сказанное, можно сделать вывод, что сооружение гибридных реакторов технически вполне реально к началу 90-х годов нашего столетия, так как уже в строящемся сейчас поколении термоядерных установок должны быть достигнуты

физические условия, требуемые для гибридных реакторов. Своевременное развитие гибридных реакторов позволило бы успешно решить проблему снабжения топливом быстро растущей в настоящее время энергетики на легководных реакторах. Вместе с тем создание гибридных реакторов ни в коей мере не мешает, а, напротив, является естественным этапом на пути к чистым термоядерным реакторам, если последние благодаря своей «чистоте» окажутся более привлекательными для человечества.

В результате почти 30 лет напряженной работы заложена научная основа термоядерных реакторов — создана физика высокотемпературной плазмы. В экспериментальных установках различных типов параметры плазмы вплотную приблизились к требуемым для технического использования. К реакторным требованиям и масштабам приближается техника больших сверхпроводящих магнитных систем, средств дополнительного нагрева плазмы — инжекторов нейтральных атомов и СВЧ-генераторов, техника сверхмощных лазеров и релятивистских электронных пучков. Накопленный научный и технический потенциал позволяет сегодня перейти к созданию демонстрационных, а затем и промышленных систем.

Проведение соответствующих разработок позволило бы к концу века существенно облегчить проблему снабжения топливом тепловых ядерных реакторов, а несколько позднее дать человечеству новый альтернативный источник энергии в лице чистых D — T-термоядерных реакторов.