

В настоящее время львиную долю энергии человечество получает при сжигании органических топлив – угля, нефти и газа. Но нет сомнения, что в недалеком будущем органические топлива придется заменить на другие источники энергии. Причина кроется в истощении природных ресурсов и загрязнении окружающей среды [1-4]. Одним из перспективных направлений может оказаться промышленное освоение термоядерной энергии [5]. Исследования по освоению управляемого термоядерного синтеза начались в 50-е годы XX века во многих странах, в том числе в СССР. Почему же до сих пор не построены термоядерные электростанции? Оказалось, что для создания управляемого термоядерного реактора ученым и инженерам необходимо решить массу проблем. К ним относятся создание глубокого вакуума в больших объемах, разработка больших сверхпроводящих магнитов, мощных лазеров и источников рентгеновского излучения, создание импульсных систем питания, генерирующих мощные потоки элементарных частиц, разработка способов высокочастотного нагрева, подбор подходящих конструкционных материалов и т.д. В процессе химической реакции перестраиваются электронные оболочки атомов. В результате ядерной реакции изменяется структура атомного ядра, которое намного прочнее атома. Поэтому при расщеплении или слиянии ядер выделяется огромная энергия. Например, при делении атомов урана U^{235} на АЭС выделяется 1 МэВ энергии на каждый нуклон. При слиянии изотопов водорода дейтерия и трития с образованием изотопа гелия He^4 выделяется 17.6 МэВ на один нуклон. Для осуществления термоядерного синтеза необходимо сблизить ядра атомов настолько, чтобы между ними начали действовать силы ядерного притяжения (сильное взаимодействие). Это расстояние на пять порядков меньше размера атома. Чтобы преодолеть кулоновские силы отталкивания надо создать очень высокое давление и температуру 100 млн $^{\circ}C$. При этой температуре смесь изотопов водорода превращается в плазму – смесь ионов и электронов. Освобождающаяся при термоядерном синтезе энергия должна быть больше энергии нагрева (зажигания) реакционной смеси, т.е. должен достигаться положительный баланс энергии. Для этого должен выполняться критерий Лоусона, т.е. произведение времени жизни плазмы τ на плотность реагирующих ионов n должно быть достаточно большое: $n\tau > 5 \cdot 10^{15} \text{ с/см}^3$. Главная физическая проблема, которую надо решить для освоения управляемого термоядерного синтеза – высокая неустойчивость сверхвысокотемпературной плазмы. Нет конструкционных материалов, способных выдержать температуру 100 млн $^{\circ}C$. Значит необходимо создать условия, при которых невозможен контакт плазмы со стенками термоядерного реактора. Предложено семь основных вариантов осуществления управляемого термоядерного синтеза: 1)Токамак (термоядерный синтез проходит в тороидальной камере с магнитными катушками); 2)стелларатор (плазма тоже удерживается магнитным полем, но тока в ней нет); 3)пробкотрон (в цилиндрическую вакуумную камеру,

запертую магнитными пробками, впрыскиваются атомы, которые тормозятся в водородном газе и превращают его в горячую плазму); 4) плазменный фокус (в вакуумной камере между двумя электродами образуется мощный импульс тока, быстро разогревающий плазму); 5) лазерный термояд (синтез происходит в шариках размером несколько мм, заполненных термоядерным топливом; шарики атакуют мощные лазерные лучи, и происходит термоядерный микровзрыв); 6) мюонный катализ (в дейтериево-тритиевый газ вводят мюоны (мю- мезоны), действующие как катализатор, т.е. ускоряющие термоядерный синтез); 7) галатей (магнитное поле образует «забор», который отбрасывает вылетающую частицу внутрь плазменного шнура; внутри плазменного пространства подвешивают сверхпроводящие кольца, в которых циркулирует электрический ток).

В настоящее время разрабатываются два способа термоядерного синтеза: 1) в инерционном термоядерном реакторе (импульсный способ с инерционным удержанием плазмы); 2) в магнитном термоядерном реакторе (с удержанием плазмы в магнитном поле).

В инерционном варианте мизерное количество (несколько миллиграммов) смеси дейтерия и трития сжимается оболочкой, которая ускоряется реактивными силами, появляющимися за счет испарения оболочки посредством мощного лазерного или рентгеновского излучения. При этом в течение короткого промежутка времени происходит термоядерное горение, т.е. наблюдается микровзрыв с выделением большого количества энергии. Чтобы реакционная смесь успела выгореть за время инерционного разлета, мишени с массой топлива 5 мг и радиусом 1-2 мм необходимо сообщить энергию 2 МДж за промежуток времени $(5-10) \cdot 10^{-9}$ с. При этом выделится энергия $5 \cdot 10^8$ Дж (соответствует энергии взрыва 100 кг тротила). Такое количество энергии способна удержать достаточно прочная камера. Вероятно, инерционный реактор будет функционировать в режиме последовательных микровзрывов с частотой несколько герц. Выделяющуюся в реакторе тепловую энергию можно снимать теплоносителем и преобразовать в электроэнергию.

Многослойные мишени были испытаны посредством подземных ядерных взрывов, создающих необходимую мощность излучения. При этом удалось получить зажигание реакционной смеси и большой положительный баланс энергии. Основная техническая проблема в инерционном способе термоядерного синтеза – разработка эффективного импульсного драйвера для ускорения оболочки. КПД современных лазерных установок недостаточен для получения положительного выхода энергии. В магнитном термоядерном реакторе для удержания плазмы применяется сильное магнитное поле. Оно предотвращает контакт сверхвысокотемпературной плазмы со стенками реактора. Были предложены различные системы магнитного удержания плазмы, но лидером среди них является Токамак. Он разработан в институте атомной энергии им. Курчатова под руководством Льва Арцимовича. Токамак- тороидальная вакуумная камера, на которую намотаны катушки для создания тороидального

магнитного поля. В начале из тороидальной камеры откачивают воздух, затем заполняют ее дейтериево-тритиевой смесью. Далее индуктором (имеет общую с тором ось) в камере генерирует вихревое электрическое поле. Индуктор выполняет роль первичной обмотки трансформатора, в котором тор- вторичная обмотка. Электрическое поле зажигает плазму в камере за счет омического нагрева. Электрический ток в камере не только нагревает плазму, но и образует полоидальное магнитное поле. Его силовые линии проходят через полосы сферической системы координат. Магнитное поле сжимает электрический ток в плазме. Винтовые магнитные силовые линии, бесконечно большое число раз закручиваются вокруг тора, создавая «магнитные поверхности» тороидальной формы. Полоидальное магнитное поле способствует стабильному удержанию плазмы в камере. Для увеличения времени стабильного существования плазмы в камере применяют дополнительные катушки полоидального поля (кольцевые витки вокруг вертикальной оси камеры токамака. Нагрева плазмы только электрическим током недостаточно для термоядерного синтеза. Для дополнительного нагрева используют инъекцию быстрых нейтральных атомов дейтерия или трития или микроволновое излучение на резонансных частотах (совпадающих с циклотронной частотой электронов или ионов). Плотность плазмы в Токамаке 10^{15} частиц в 1 см^3 . Из-за неустойчивости плазмы приходится создавать магнитное поле в несколько раз более сильное, чем то, которое необходимо для равновесия плазмы. Энергетические затраты снижают за счет использования сверхпроводящих магнитов. В России построен один из крупнейших экспериментальных реакторов, Т-15, в котором магнитное поле создают сверхпроводящими магнитами. Токамак-реактор должен работать в режиме самоподдерживающегося термоядерного горения. Нагрев плазмы обеспечивается заряженными продуктами реакции – α -частицами, т. е. ионами гелия. Согласно критерию Лоусона энергия должна удерживаться в плазме не менее 5 с. Такое большое время жизни плазмы достигается за счет большого размера реактора. Самоподдерживающееся горение возможно только в том случае, если большой радиус плазменного тора не менее 7-9 м. Предполагаемая тепловая мощность Токамак - реактора 1 ГВт. Следующий шаг в развитии реактора – разработка эффективного способа зажигания смеси дейтерия и трития. В 2001 году совместными усилиями физиков и инженеров стран Европейского союза, России (СССР), Японии и США завершена разработка ИТЭР (интернациональный термоядерный энергетический реактор). Он обладает основными чертами Токамак- реактора. ИТЭР имеет полностью сверхпроводящую магнитную систему, охлаждаемый бланкет, защиту от нейтронного излучения и систему дистанционного управления. В магнитной системе ИТЭР для удержания плазмы служат 18 обмоток тороидального поля. Плазменным шнуром управляют 6 обмоток полоидального поля и корректирующие катушки. Ток в плазме индуцируется центральным соленоидом. Обмотки тороидального поля и

центрального соленоида изготовлены из сплава NbSn, полоидального поля и корректирующих катушек- из NbTi. Запасы термоядерного топлива на Земле огромны. Дейтерий широко распространен в природе (в воде на один атом дейтерия приходится 7 тыс атомов водорода). стакан воды может дать столько же энергии, сколько бочка бензина. Тритий можно производить в самом реакторе из лития, воздействуя на его атомы потоком электронов. Имеющихся запасов дейтерия и лития достаточно для производства термоядерной энергии в течение нескольких тысяч лет. При термоядерном синтезе не образуются газообразные и жидкие отходы, в то время как уран и продукты его распада радиоактивны. Материал стенок термоядерного реактора может стать радиоактивным от потока нейтронов. Однако для изготовления реактора можно подобрать низкоактивирующиеся конструкционные материалы. При распаде 1 кг урана выделяется $78.8 \cdot 10^9$ кДж тепловой энергии, т.е. атомные электростанции вносят существенный вклад в нагрев атмосферы. Не меньшее влияние на глобальное потепление окажут термоядерные электростанции. Таким образом, более чем полувековые исследования показали, что управляемый термоядерный синтез с положительным выходом энергии в принципе возможен. Главный итог исследований заключается в том, что были найдены два варианта решения такой сложной проблемы, как удержание сверхвысокотемпературной плазмы: 1) инерционный термоядерный реактор; 2) магнитный термоядерный реактор. Необходимо продолжить исследования по разработке эффективного способа зажигания реакционной смеси и подбору слабоактивирующихся конструкционных материалов для изготовления термоядерного реактора. Нерешенной остается проблема теплового воздействия термоядерного реактора на климат планеты. Освоение управляемого термоядерного синтеза в промышленном масштабе требует колоссальных финансовых затрат на проведение физических исследований, создание новых технологий и разработку специальных конструкционных материалов, но есть надежда, что оно будет осуществлено в ближайшие десятилетия