

УДК 621.039.6 (100)

С.З. Жизнин, В.М. Тимохов¹

ПЕРСПЕКТИВЫ МЕЖДУНАРОДНОГО СОТРУДНИЧЕСТВА В РАЗВИТИИ ТЕРМОЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с исследованиями управляемого термоядерного синтеза. Это – особенности реакций получения термоядерной энергии, создания ядерного и термоядерного оружия; технические проблемы и сложности, возникающие при изучении термоядерного синтеза; экономические и экологические аспекты термоядерной энергетики. Показана важная роль международного сотрудничества, как ключевого фактора при создании термоядерных реакторов и дальнейшего развития энергетики.

Ключевые слова: уран, плутоний, термояд, критерий Лоусона, термоядерный реактор, ядерный синтез, плазма, мюонный катализ, инерциальное удержание, гибридный реактор, «Токамак».

Введение

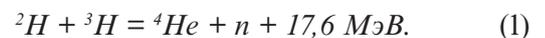
Ядерный синтез лежит в основе существования Солнца, звезд и является потенциальным и не истощаемым источником энергии во Вселенной. Мощные взрывы водородных бомб в пятидесятых годах XX в. показали, что термоядерная энергия содержит практически неограниченные запасы энергии. Казалось, что для ее использования в мирных целях требуется немного времени, ведь с момента применения атомной бомбы до создания ядерного реактора, вырабатывающего электрическую энергию, прошло менее 10 лет. Однако задача осуществления термоядерного синтеза оказалась необычайно сложной. Прошли десятилетия, а доступ к термоядерной энергии получить не удалось. За это время тяжелые ядерные аварии в Чернобыле и на Фукусиме-1 дискредитировали атомную энергетику, в мире были сожжены значительные объемы органического топлива, атмосфера оказалась загрязнена выбросами продуктов горения этого топлива, возникла проблема парникового эффекта и, как следствие, проблема изменения климата на Земле, что представляет уже глобальную катастрофу.

Исследования по мирному использованию термоядерного синтеза начались примерно в одно и то же время, что и эксперименты в ядер-

ной физике деления. Теоретические и экспериментальные результаты показали, что *энергию ядерного синтеза можно получить реально, и основная задача заключается в создании надежных и экономически эффективных термоядерных установок.* Поэтапное изучение основных проблем, стоящих перед термоядерной энергетикой рассмотрено в данной статье.

Основы термоядерного синтеза

Основной реакцией ядерного синтеза считается сегодня реакция между двумя изотопами распространенного на Земле водорода. Это – дейтерий (D , 2H) и тритий (T , 3H). В результате реакции образуется гелий (4He) и выделяется нейтрон (n). Эта реакция может быть инициирована легче других аналогичных реакций легких ядер и обладает наибольшим потенциалом в плане практической реализации. Она имеет следующий вид:



Возникающая при этом из-за очень сильных ядерных связей гелия-4 выделенная энергия переходит в обычную кинетическую энергию, которая распределяется между нейтроном (14,1 МэВ) и ядром гелия-4 (3,5 МэВ) [1, с. 7].

¹ Станислав Захарович Жизнин – профессор Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО МИД РФ, президент Центра энергетической дипломатии и геополитики, д.э.н., e-mail: s.zhiznin@rambler.ru;
Владимир Михайлович Тимохов – генеральный директор Центра энергетической дипломатии и геополитики. к.ф-м.н., e-mail: vl.timokhov@gmail.com.

ТЭЖ XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

Сравнение с реакциями деления ядер $^{92}_{235}\text{U}$ показывает, что при синтезе дейтерия и трития выделится в 4 раза больше энергии, приходящаяся на один нуклон [2].

Расчеты и эксперименты показали, что реакция синтеза D-T начинает протекать только при температурах, превышающих 100 млн градусов Кельвина (10^7 °К), что примерно в 10 раз выше температуры Солнца.

Отметим, что уже при температурах порядка нескольких тысяч градусов при столкновениях между атомами происходит выбивание электронов из атомов, в результате чего формируется смесь из положительно заряженных атомов и отрицательно заряженных электронов. Эта смесь называется плазма. В ней положительно заряженные и имеющие высокие скорости ядра дейтерия (дейтроны) и трития (триконы) испытывают очень сильное взаимное отталкивание. Но высокая температура и связанная с ней высокая скорость ядер заставляют их сталкиваться друг с другом. При температурах порядка 10^7 °К и выше наиболее высокоскоростные дейтроны и триконы сближаются при столкновениях на столь малые расстояния, что между ними начинают действовать очень мощные силы ядерного притяжения. Они заставляют их сливаться в единое целое.

Количественная оценка условий возникновения термоядерной реакции определяется критерием Лоусона:

$$n * \tau \geq 10^{14} \text{ см}^{-3} \text{ с} \quad [2, \text{ с. } 6],$$

где n – плотность ее частиц, τ – время удержания высокотемпературной плазмы в системе.

При выполнении критерия Лоусона энергия, которая выделяется согласно условию (1), превышает энергию, вводимую в систему. Стоит отметить, что критерий Лоусона является весьма приближенной оценкой.

Таким образом, для осуществления термоядерного синтеза необходимы три ключевых параметра. Это – температура, плотность плазмы и время ее удержания. Но только один из них, температура, составляющая $\sim 10^7$ °К, определяется реакцией. Значения двух остальных параметров можно менять.

Соответственно есть два варианта: 1) выбрать максимально высокую плотность n и очень ко-

роткий период длительности реакции τ , либо: 2) наоборот, – очень низкую плотность плазмы и максимально длительное время ее удержания.

Первый вариант реализован в термоядерной бомбе. В ней плотность плазмы соответствует плотности твердого тела, а способ ее удержания основан исключительно на силах инерции, возникающих при стремительном расширении вещества в случае срабатывания запала, в качестве которого используется атомная бомба.

Рассмотрим более подробно второй вариант осуществления термоядерных реакций.

Управляемые термоядерные реакции

Реактор «Токамак». Как было отмечено, в соответствии с критерием Лоусона, управляемый термоядерный синтез энергетически выгоден при относительно низкой плотности топлива и продолжительном время удержания плазмы.

Исследования и разработки в этом направлении проводились и проводятся в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова. В этом институте были созданы установки типа «Токамак» – Тороидальная КАмера с МАгнитными Катушками. Они были предложены И.Е. Таммом и А.Д. Сахаровым, разработаны Л.А. Арцимовичем, созданы Е.П. Велиховым.

В установке «Токамак» нагрев плазмы до температур $\sim 10^7$ °К производится электрическим током большой величины (сотни тысяч ампер и выше), который возбуждается внешним индуктором и протекает через плазму. Плазма, имеющая электрическое сопротивление, образует «джоулево тепло», которое ее нагревает.

Более сложной задачей является удержание тепла, так как в мире нет материалов, способных выдерживать такие высокие температуры. В случае соприкосновения стенки камеры с плазмой любой материал просто испарится. Поэтому удержание плазмы в «Токамаках» осуществляется с помощью магнитных полей. Это связано с тем, что плазма состоит из частиц, имеющих электрические заряды (ядра атомов – положительный, а электроны – отрицательный), которые подвергаются воздействию магнитного поля.

Магнитная система расположена вне тора, она создает сильное магнитное поле, возраста-

ющее по интенсивности от оси тора. Под действием магнитного поля плазма сжимается, при этом сжатие сильнее в направлении от края к оси тора, поэтому плазма не соприкасается со стенками камеры.

В результате реакции синтеза внутри тора возникают ядра гелия (${}^4\text{He}$) с положительным электрическим зарядом, которые сталкиваются с другими аналогичными частицами, тормозятся и, таким образом, выделяют энергию, которая, в свою очередь, поддерживает высокую температуру плазмы.

Образуемые в реакции, согласно (1), нейтроны, уходят из тора, а свою энергию в виде тепла передают стенкам. Отбираемое тепло от стенок можно использовать в качестве источника электрической энергии.

Кроме этого, нейтроны внутри тора сталкиваются с ядрами лития, и в результате ядерной реакции происходит образование и наработка трития, соотношение (2). Протекают также другие конкурирующие ядерные реакции как без образования трития, так и реакции с получением дополнительных нейтронов, которые образуют тритий. Удержание высокотемпературной плазмы магнитным полем с помощью «Токамака» – наиболее разработанный, но не единственный способ. Рассмотрим другие методы.

Инерциальный управляемый термоядерный синтез. Теоретические расчеты, выполненные еще в 50-х годах прошлого столетия, показали, что термоядерный синтез может быть реализован и без применения магнитных ловушек. Идея заключается в очень быстром и равномерном нагреве термоядерного топлива таким образом, чтобы образовавшаяся плазма успела прореагировать и не разлететься.

С этой целью специально приготовленная мишень, состоящая из замороженного шарика дейтерия с тритием, радиусом ~ 1 мм, облучается равномерно со всех сторон сверхмощными лазерными импульсами от нескольких (до почти 200) лазерных пучков одновременно. В процессе такого облучения шарик подвергается действию больших сжимающих сил, температура и плотность внутри его повышаются и достигают уровня, при котором происходит термоядерная реакция.

В этих условиях почти вся термоядерная энергия высвобождается в виде небольшого

микровзрыва в течение промежутка времени $\sim 10^{-9}$ секунды. Осуществление микровзрывов в определенной последовательности импульсов позволяет практически непрерывно получать полезную энергию. Полученная энергия должна быть выше затраченной. На частоту повторения микровзрывов и выделяющуюся в каждом из них энергию накладываются определенные ограничения [3].

Термоядерные лазерные установки, работающие на этом принципе, существуют в лабораториях США, России, Западной Европы, Японии. Преимущество инерциального метода получения термоядерной энергии – нет необходимости магнитной изоляции плазмы.

Недостатки: большие проблемы одновременной кратковременной синхронизации воздействия на мишень лазерных или электронных лучей, а также использование источника энергии огромной мощности, работающего в наносекундном диапазоне, что является достаточно сложными инженерно-техническими задачами.

Современный этап работ по инерционному термоядерному синтезу остается пока на уровне исследований и представляет значительный интерес в физике и технике высоких плотностей энергии. Сейчас эти два направления (инерционный термоядерный и магнитный с помощью токамаков) являются конкурирующими. Инерционный термоядерный метод в значительной мере поддерживается задачами военного характера, потому что в нем имитируются процессы, которые происходят в водородной бомбе.

Мюонный катализ. Это направление получения термоядерной энергии было предложено в 1957 г. А.Д. Сахаровым и Я.Б. Зельдовичем. Получение термоядерной энергии этим методом осуществляется с помощью отрицательно заряженного мюона – нестабильной элементарной частицы, масса которой в 200 раз превышает массу электрона [5].

Атомы дейтерия и трития, в которых вместо электрона находится мюон, могут объединиться в молекулы, образовав так называемые «мезомолекулы». В них ядра дейтерия и трития находятся на расстоянии примерно в 200 раз ближе, чем в обычном атоме и, таким образом, могут как бы «почувствовать» друг друга, и с высокой долей вероятности, осуществив «туннельный переход», вступить в D-T-реакцию.

В результате реакции образуется ядро гелия (He), вылетает нейтрон, выделяется энергия синтеза, а освободившийся мюон может попасть на орбиту другого атома, вытеснив в нем электрон. Далее происходит аналогичное сближение ядер и осуществляется новая реакция синтеза. За время своей жизни (~2 мкс) мюон осуществляет до 100 D-T-реакций.

Преимущества метода очевидны: нет необходимости в сверхвысоких температурах, не нужна «проблемная» плазма, не требуются сильные магнитные поля, мощные лазеры, пучки частиц. Но необходимы очень сильные потоки мюонов, которые могут быть получены на протонных ускорителях высоких энергий. Также необходимо получить положительный выход энергии по сравнению с затратами на ее производство.

В настоящее время осуществляются исследования по оценке стоимости получения одного мюона. В случае если суммарный выход энергии реакции синтеза окажется выше стоимости получаемых мюонов, метод мюонного катализа станет конкурирующим направлением управляемого термоядерного синтеза.

Гибридный термоядерный реактор. Основным идеологом его развития в нашей стране и мире является академик Е.П. Велихов. Гибридный термоядерный реактор – это разрабатываемый реактор, в котором выработка энергии осуществляется с помощью реакции синтеза легких ядер (дейтерия и трития) и реакции деления тяжелых ядер.

Метод основан на том, что энергия, которая образуется в результате термоядерной реакции, согласно соотношению (1), состоит примерно на 80% из энергии образующихся в процессе реакции нейтронов и на ~20% – энергии ядер атомов гелия (α-частиц). Поскольку нейтроны не имеют электрического заряда, они не подвергаются воздействию электромагнитных полей, свободно выходят из плазмы и попадают оболочку, называемую бланкетом.

Бланкет гибридного реактора состоит из двух зон. В первой зоне находятся делящиеся вещества (уран-238 или торий-232), а во второй зоне – литийсодержащие материалы для воспроизводства трития, сгоревшего в плазме [3, 5]. Под действием нейтронов в бланкете выделяется энергия, состоящая из: 1) реакции синтеза (17,6 МэВ в литий-дейтериевой зоне плюс нейтрон);

2) последующей реакции деления в урановой/ториевой зоне бланкета ~200 МэВ. То есть относительно простая добавка уранового бланкета позволяет увеличить производство энергии в гибридном термоядерном реакторе больше чем в 11 раз.

Таким образом, гибридный термоядерный реактор использует D+T-реакцию в качестве источника нейтронов с высокой активностью. Сам реактор выполняет функции реактора на быстрых нейтронах (бридера). Гибридный термоядерный реактор может быть использован для производства электроэнергии и наработки ^{239}Pu или ^{233}U . Важно отметить, что поскольку термоядерные нейтронные потоки существенно превышают нейтронные потоки реакторов деления, то получение ^{239}Pu будет осуществляться значительно быстрее, а полученный таким образом ^{239}Pu является «оружейным» и очень высокого качества.

Расчеты показали также, что условия протекания термоядерной реакции в гибридном реакторе будут удовлетворять более низким требованиям. Возможно также, что и величина критерия Лоусона будет меньше, что облегчает работу термоядерного реактора. По мнению экспертов, создание гибридного термоядерного реактора является хотя и непростой, но все же более легкой задачей, чем проект чистого термоядерного реактора.

К недостаткам гибридного ядерно-термоядерного реактора следует отнести проблемы, связанные с реакторами деления на быстрых нейтронах, и особенно риски распространения плутония.

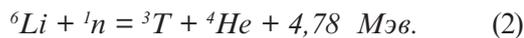
Ресурсная база термоядерной энергетики

Первый компонент в D-T-реакции – дейтерий – является устойчивым изотопом водорода. Его запасы для осуществления D-T-реакции практически неограниченны. В обычной воде его содержание составляет ~ 0,01-0,03%. Производство тяжелой воды (D₂O) осуществляется путем электролиза. Содержание дейтерия в гидросфере Земли составляет порядка 4·10¹³ т, его также можно использовать в качестве термоядерного горючего. Потенциал ядерной энергии, имеющийся в дейтерии, позволяет удовлетворить потребности человечества на миллионы лет и на-

всегда решить ресурсную проблему получения энергии на Земле.

Второй компонент термоядерной D-T-реакции – тритий – в природе почти не встречается. Это – нестабильный β -радиоактивный изотоп с периодом полураспада 12,3 лет, поэтому его содержание в природе ничтожно.

Тритий образуется в термоядерном реакторе при протекании реакции:



Тритий также нарабатывается в обычном ядерном реакторе деления при облучении лития-7 нейтронами из реакции: ${}^7\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3\text{T} + {}^4\text{He} + {}^1_0\text{n}$.

Литий – металл щелочной группы, широко используется в бытовых приборах, электронике, металлургии и т.д. По своей распространенности в земной коре близок к урану. Содержание лития-6 в природном литии составляет 7,5%, а ${}^7\text{Li}$ – 92,5%.

Существующие запасы легко добываемого лития смогут обеспечить потребности промышленности (энергетика и другие отрасли) в течение ~200 лет. Но если запасы лития иссякнут, его можно добывать из морской воды. В ней содержатся миллиарды тонн лития.

Таким образом, дейтерий и литий являются основными материалами, которые могут быть использованы в качестве топлива в термоядерной установке. Их распространенность в природе высокая, поэтому можно сделать вывод о том, что ядерная энергия, получаемая в результате синтеза D+T, обладает практически неисчерпаемыми запасами на Земле.

Результаты освоения термоядерной энергетики

Установки типа «Токамак» были созданы советскими учеными впервые в мире в 1969 году. Тогда на установке «Токамак ТЗ» была получена температура, равная 3 млн °С в плазме с объемом около 1 м³. Конструкция термоядерной установки для магнитного удержания плазмы в виде «Токамака» была признана мировым научным сообществом наиболее перспективной.

Спустя несколько лет в Европе была создана установка JET (Joint European Torus), которая имеет значительно больший (~100 м³) объем плазмы. JET начала работать в 1983 г. и до настоящего времени остается самым крупным и самым успешным токамаком в мире [10]. Он позволяет нагревать плазму до температур порядка 150 млн °С, имеет большой радиус плазменного тора – 2,96 метров. Мощность термоядерной реакции достигает более 20 МВт при времени удержания до 10 секунд. Реактор возвращает около 40% от вложенной в плазму энергии.

Сегодня в мире построено более 200 экспериментальных токамаков [3]. В наиболее передовых из них достигнуты температуры, близкие к температурам, требуемым для работы термоядерных реакторов, но во всех этих установках энергетического выигрыша нет.

Следующий основной шаг по изучению управляемого термоядерного синтеза – это проект ITER. Он предназначен для демонстрации самой возможности поджигания плазмы и удержания ее в течение более длительного времени в сравнении с другими токамаками, а также получения как минимум десятикратного превышения энергии по отношению к энергии, затраченной на разогрев плазмы.

Цель проекта ITER – продемонстрировать получение термоядерной мощности на уровне 500 МВт при затрате энергии на входе системы около 50 МВт в течение ~ 400-3000 с и более [3, 4].

ITER планируется как исследовательская термоядерная установка, оснащенная современным экспериментальным и диагностическим оборудованием. Она является прообразом промышленного реактора и фактически заключительным экспериментом по физике термоядерной плазмы. Поэтому в ней не будет турбин для производства электроэнергии [3, 4].

ITER рассматривается как *последняя ступень перед строительством демонстрационной термоядерной электростанции (DEMO)*. Ее целью является изучение условий работы энергетических установок данного вида и создание на этой базе настоящих, экономически выгодных термоядерных электростанций, которые по своим габаритным размерам, возможно, будут превосходить ITER, примерно, на 30% по каждому

ТЭЖ XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

измерению [4]. По предварительным оценкам, сооружение ITER должно занять около 10 лет, а его стоимость составит порядка 8 млрд долл. [8, с. 90-93]. Более подробно о реакторах JET, ITER, сопоставлении их параметров, размеров изложено в работе [4, 10].

Экология термоядерной энергетики

Проблема улучшения экологии от традиционной энергетики, использующей в качестве топлива органические ресурсы, является важнейшей проблемой человечества, связанной с потеплением климата.

Так, при работе наиболее экологически чистой атомной электростанции (АЭС) образуются большие объемы радиоактивных отходов и отработанного ядерного топлива, существуют проблемы нераспространения, безопасной работы. В совокупности это наносит огромный вред окружающей среде и от решения этих проблем зависит дальнейшее развитие всей атомной энергетики, то есть проблема улучшения экологии всех стран мира является общемировой.

Термоядерные электростанции могут сыграть важнейшую роль для ее решения. Такие электростанции характеризуются высокой установленной мощностью (~1,5 ГВт), а их работа связана с полным отсутствием выбросов в атмосферу двуокиси углерода CO_2 , отсутствием радиоактивных выбросов, нет проблем нераспространения и т.д., то есть даже в сравнении с АЭС они имеют значительные преимущества, о которых более подробно указано в [3, 4].

Экономика термоядерной энергетики

В настоящее время термоядерная энергетика опирается на очень сложную, материалоемкую технологию. Именно поэтому вопрос о стоимости электроэнергии и капитальных затратах на сооружение термоядерных станций является предметом постоянных дискуссий как среди ее сторонников, так и противников. Следует учитывать также, что промышленные термоядерные электростанции в лучшем случае появятся только к середине нынешнего века [4]. К этому времени изменится стоимость электроэнергии, производимой всеми видами электростанций, а

также их топливная, материальная и экологическая составляющие.

В тоже время истощаемость невозобновляемых энергетических ресурсов (в том числе урана для тепловых АЭС), экологические проблемы, связанные с выбросами парниковых газов при использовании на электростанциях минерального топлива, а также проблемы утилизации отработанного ядерного топлива заставят обратиться к безопасным и экологичным термоядерным электростанциям. Важно отметить, что термоядерные энергетические установки можно строить в тех местах, где в силу географических или климатических условий строительство АЭС не представляется возможным.

Доступность топлива для нужд термоядерной энергетики и его равномерное распределение во всем мире являются ее очень важным преимуществом, особенно для стран, не обладающих природными запасами нефти, газа, угля. Это позволит устранить множество мировых конфликтов, которые возникают из-за крайне неравномерного расположения ископаемых запасов. Анализ, проведенный в ЕС, показал, что для возврата мирового сообщества к выбросам двуокиси углерода CO_2 на уровень 50-х годов XX века, необходима значительная доля мирового производства электроэнергии от термоядерных электростанций – около 20%.

Детальный анализ стоимости будущей термоядерной электроэнергии осуществлялся во всех странах, участвующих в проекте ITER. Наиболее подробно он изучен ЕС в рамках программы исследований социально-экономических аспектов термоядерной энергетики, действующей с 90-х годов прошлого столетия.

В оценке ЕС были использованы такие же показатели и параметры, что и в существующих установках. Так как на стоимость электроэнергии термоядерной электростанции существенно влияют физические параметры при горении D+T-топлива, то для учета их вклада были использованы базы данных и параметры реактора ITER. Дополнительно проводились расчеты с более высокими (на 30%), чем в ITER физическими параметрами. Также принималось во внимание ожидаемое развитие термоядерных технологий. Чтобы снизить цены на электроэнергию, базовая мощность энергоблока была

ТЭК XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

принята равной 1,5 ГВт, вместо 1 ГВт, рекомендованной промышленностью.

Оценки показали, что стоимость электроэнергии термоядерных электростанций находится в интервале 3-5 евроцентов/кВтч в оптимистическом варианте расчетов и повышается до 5-7 евроцентов/кВтч в вариантах расчетов, параметры которых близки к физическим параметрам ITER [6].

Похожие результаты были получены также в США и Японии. Низкая стоимость термоядерной электроэнергии в определенной степени является неожиданной, но вполне объяснимой. Она связана в первую очередь с малыми эксплуатационными расходами, включая топливную составляющую. Эти расходы компенсируют высокие капитальные затраты.

Дальнейшее снижение стоимости термоядерной электрической энергии лежит в уменьшении расходов на изготовление оборудования и увеличении ресурсов заменяемых элементов реактора. Необходима также дальнейшая оптимизация режимов работы «Токамака» путем продолжения целенаправленных физических исследований.

Аналогичные исследования, выполненные в работе [9], показали, что стоимость электрической энергии, получаемой в термоядерных реакциях, уменьшается при увеличении генерируемой мощности. Она изменяется от максимальной 9 евроцентов/кВт (при 1 ГВт) до 5 евроцентов/кВт (1,5 ГВт). Оптимальная мощность термоядерной электростанции составляет 1,5 ГВт. Предполагается также, что цены будут уменьшаться с развитием технологий.

Самая высокая цена 9 евроцентов/кВт является также вполне конкурентной, особенно при учете налога на сжигание угля, который был введен для ограничения промышленных выбросов в атмосферу [9]. Потребность в крупных термоядерных электростанциях с мощностью более 1,5 ГВт позволит обеспечить дальнейшее снижение стоимости генерируемой электроэнергии.

Важно отметить, что сравнение цен на электроэнергию от различных электростанций необходимо проводить в равных условиях, что не всегда представляется возможным. Это означает, что, например, в стоимость электроэнергии, производимой на АЭС, не включаются затраты

на переработку и хранение долгоживущих радиоактивных отходов, вывод станции из эксплуатации и другие расходы. Кроме этого, следует учитывать также затраты на обеспечение безопасности АЭС и нераспространение ядерного оружия в странах, где практически невозможно решать эти вопросы на национальном уровне. Все эти задачи и расходы отложены и не учитываются сегодня, но их придется решать и оплачивать в будущем. В термоядерных электростанциях этих проблем не существует, что обязательно следует учитывать при сравнении стоимостей электроэнергии, генерируемой различными источниками.

Таким образом, термоядерная электростанция является вполне конкурентоспособной в сравнении с другими электростанциями. Конечно, приведенные оценки экономической эффективности термоядерных установок весьма приблизительны, так как таких электростанций пока нет, и их появление ожидается только в среднесрочной перспективе.

Экономические затраты на создание, освоение и доведение до промышленного использования термоядерной энергии могут оказаться очень высокими и длительными по времени, оценить их в настоящее время, когда не построен работающий ITER-реактор, не представляется возможным. Так, например, объемы финансирования только на новые научные проекты, которые могут приблизить время запуска в промышленную эксплуатацию термоядерной электростанции, могут составить не один десяток миллиардов долларов. В то же время, порядок величины цены на электроэнергию, получаемую такими установками, является вполне разумным и приемлемым.

Важно также отметить, что в последние годы развитие новых энергосистем все в большей степени определяется не экономическими факторами, а их приемлемостью для общества. Примером могут служить ветровые и солнечные установки, экономика и постоянство генерации мощности которых очень далеки от идеальных. С учетом достоинств термоядерной энергетики и конкурентоспособной стоимости электроэнергии имеются все основания полагать, что она должна занять важное место в мировой энергетической системе.

ТЭЖ XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

Международное сотрудничество

Идея международного разделения научного труда в рамках общей скоординированной программы при условии полного и свободного обмена информацией была предложена академиком Л.А. Арцимовичем и принята научным сообществом стран, ведущими исследования термоядерной энергии, еще в 1968 году. В 1971 г. был организован Международный совет по термоядерным исследованиям (МСТИ). В мае 1978 г. советские ученые на очередном заседании МСТИ выступили с предложением об организации международного сотрудничества по проектированию установки интернационального токамак-реактора – ИНТОР. В дальнейшем ИНТОР стал основным прототипом международного реактора следующего поколения – ITER.

После чернобыльской аварии, также по инициативе СССР, начался новый этап сотрудничества. Весной 1987 г. состоялась первая встреча представителей США, СССР, Японии и Европейского союза, посвященная созданию первого термоядерного реактора на международной основе. Название Интернациональный термоядерный экспериментальный реактор – ИТЭР (International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)) также было предложено советской стороной при активной поддержке представителей Японии и ЕС. Председателем проекта ITER избран академик Е.П. Велихов.

Международное сотрудничество по строительству термоядерного реактора ITER является необходимым и важным условием реализации данного проекта. Необходимо не только совместное финансирование проекта, но и организация управления, научно-техническое и промышленное взаимодействие многих стран. Реактор ITER проектирует и строит консорциум, в который входят: США, Китай, Япония, Европейский союз, Россия, Индия и Южная Корея. Основные агрегаты, узлы и некоторые другие компоненты этого реактора изготовлены и испытаны, начато строительство в окрестностях города Кадараш во Франции.

Проект имеет очень высокий международный статус и российские ученые принимают в нем активное участие. Главные задачи России в

этом проекте – это разработка и изготовление основного технологического оборудования, его поставка на строящийся реактор и внесение денежного вноса, который составляет порядка 10% от суммарной стоимости реактора. Примерно такие же доли вносят США, Китай, Индия, Южная Корея и Япония.

Строительство ITER началось в 2007 г., план работ следующий:

- 2007-2019 гг. – строительство реактора;
- 2019 г. – начало выполнения экспериментальных работ;
- 2026 г. – получение и исследование первых реакций термоядерного синтеза;
- 2037 г. – завершение экспериментальных исследований;
- 2040 г. – начало производства электроэнергии, в случае успешных экспериментов.

Длительный срок между запуском реактора (2019 г.) и получением плазмы (2026 г.) связан с проведением длительных и трудных испытаний плазмы и компонентов реактора.

Как можно видеть из поставленных задач, международное сотрудничество при создании реактора ITER носит многоплановый характер, и России в этом проекте отведена значительная роль.

Это обстоятельство представляется очень важным для нашей страны, прежде всего с точки зрения развития ее интеллектуальных ресурсов, способности владеть и развивать высокотехнологичные области промышленности и выступать с ними на мировом рынке. Это станет инновационным технологическим прорывом России, так как в случае успеха будет создана большая номенклатура новых материалов, оборудования, услуг, дополнительных рабочих мест и других инновационных технологий в энергетике, что позволит нашей стране укрепить как экономические, так и геополитические позиции в мире. Важно отметить также, что на работы в рамках проекта ITER на Россию не налагаются санкции, введенные западными странами во главе с США в связи с событиями на Украине.

По нашему мнению, выполнение поставленных задач в значительной степени будет зависеть от геополитической обстановки в мире, взаимодействия и доверия между странами-

ТЭК XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

участниками проекта, доминирования экономических интересов над политическими, улучшением взаимоотношений между Россией и США.

Заключение

В настоящее время использование в энергетике минерального топлива является преобладающим, но его запасы истощаются. Солнечная, ветровая, приливная энергетика и использование возобновляемых биоресурсов могут стать важными составляющими будущей энергосистемы мира. Но они способны удовлетворить только локальные потребности.

Следует отметить, что стоимость производимой энергии, по крайней мере – ветровой, намного превосходит стоимость энергии тепловых и атомных станций. Таким образом, для массового потребителя в мегаполисах, густонаселенных и промышленных районах единственным источником энергоснабжения останутся крупномасштабные энергетические блоки, требования к которым по обеспеченности ресурсами, безопасности и экологической совместимости постоянно растут.

В этом отношении термоядерная энергетика имеет уникальные возможности для решения этих проблем. Она обладает практически неограниченными ресурсами топлива, высоким уровнем безопасности и в наименьшей степени, по сравнению с другими источниками, воздействует на окружающую среду.

Исследования по управляемому термоядерному синтезу вступили в заключительную фазу и в среднесрочной перспективе должен быть получен ответ на вопрос о возможности практического использования синтеза в энергетике. Пока существуют значительные физические, материаловедческие и технологические проблемы термоядерного синтеза, но сегодня есть понимание путей их решения. Кроме этого, конкурентоспособность экономики термоядерных электростанций, преимущества их экологической безопасности стимулируют дальнейшее изучение процессов термоядерного синтеза.

Результаты исследований термоядерного синтеза уже привели и, несомненно, приведут в дальнейшем к появлению многих новых технологий в разных областях промышленности, науки и медицины.

Отметим также, что многие затраты России по разработке исследований термоядерного синтеза уже окупились. Так, в трудные для нашей страны 90-е годы прошлого столетия российские предприятия выполняли работы по проектированию и моделированию систем ИТЕР, которые финансировались западными странами-членами проекта, что позволило сохранить их и преобразовать в высокоинтеллектуальные и высокотехнологичные структуры.

Будущее стран лежит в области инновационного развития, а не в поставке энергоресурсов на мировой рынок. Работы в области термоядерной энергетике – одна из компонент инновационного развития, а достигнутые успехи следует понимать как освобождение от ресурсной топливной зависимости и переход к принципиально другому топливному циклу.

Основой для овладения инновационными технологиями является сейчас и будет в дальнейшем – интеллектуальный ресурс и способность государства владеть и развивать высокотехнологичные области промышленности, выступать с ними на мировом рынке.

Несомненно, что успешные результаты, полученные на токамаке-реакторе, откроют, как и в атомной энергетике, путь к развитию и других видов получения термоядерной энергии, в частности – инерционному удержанию плазмы.

Планы «Росатома» по ускоренному развитию атомной энергетике (довести долю АЭС в производстве электроэнергии до 25% к 2030 г.) стимулируют проведение исследований гибридных ядерно-термоядерных реакторов уже на новом уровне знаний, которые были накоплены как в ядерной энергетике деления, так и в термоядерных исследованиях после начала работ над проектом ИТЕР. Если будет показана перспективность создания термоядерных нейтронных источников для наработки топлива и переработки ядерных отходов, практическое использование термоядерной энергетике найдет очень широкое применение.

Выводы

1. Ядерный синтез лежит в основе существования Солнца, звезд и является потенциальным и не истощаемым источником энергии во Вселенной. В реакции ядерного синтеза выделя-

ТЭЖ XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

ется огромное количество энергии, в десятки миллионов раз превышающее тепловыделение в обычных химических реакциях при сжигании ископаемого топлива. Теоретические и экспериментальные результаты показали, что энергию ядерного синтеза можно получить реально, и основная задача заключается в создании надежных и экономически эффективных термоядерных установок.

2. Первая термоядерная реакция была осуществлена при взрыве водородной бомбы. Она является неуправляемой. Управляемая реакция синтеза D-T начинает протекать только при температурах порядка 100 млн °К и выше. Это достигается: а) при относительно низкой плотности плазмы и продолжительном времени ее удержания (реакторы типа «Токамак»); б) инерциальным удержанием взаимодействующих частиц с помощью мощного лазерного излучения.

3. Реакторы «Токамак» впервые в мире были созданы советскими учеными в 1969 году. Они получили значительное международное признание, и сегодня в мире их построено более 200. Это изобретение положено в основу международного проекта экспериментального термоядерного реактора ITER, строящегося во Франции. ITER должен стать моделью будущих энергетических термоядерных реакторов и рассматривается как последняя ступень перед строительством демонстрационной термоядерной электростанции.

4. Инерциальный термоядерный синтез энергетически выгоден, но он остается пока на уровне НИР и представляет интерес для военных задач. Мюонный катализ пока не обеспечивает положительный выход энергии по сравнению с затратами на ее производство.

5. Гибридный термоядерный реактор использует D-T-реакцию в качестве источника нейтронов с высокой активностью и выполняет функции бридера. Он может быть использован для производства электроэнергии и наработки ^{239}Pu или ^{233}U . Создание гибридного термоядерного реактора – непростая, но более легкая задача, чем проект чистого термоядерного реактора. К недостаткам такого реактора следует отнести проблемы, связанные с реакторами деления на быстрых нейтронах, особенно риски распространения плутония.

6. Экономике будущей термоядерной энергетической станции сегодня оценить сложно, так как еще не реализован управляемый термоядерный синтез. Промышленные термоядерные электростанции могут появиться только в середине века. Оценки стоимости электроэнергии на таких станциях, выполненные учеными России, США, Европы, Японии показывают, что стоимость производимой ими электроэнергии будет конкурентоспособной с традиционными тепловыми станциями, особенно с введением ограничений на промышленные выбросы в атмосферу.

Экономику затрат на создание промышленных термоядерных электростанций оценить еще сложнее, так как расходы на фундаментальные и прикладные исследования, инженерные, технологические и другие виды работ могут быть очень высокими и продолжительными по времени. По оценкам некоторых экспертов, объемы финансирования только на научные проекты, которые могут приблизить время запуска в промышленную эксплуатацию термоядерной электростанции, могут составить не один десяток миллиардов долларов.

7. Международное сотрудничество при создании реактора ITER является исключительно важным. Оно носит многоплановый характер. Достижения СССР/России очень значительны. Сейчас Россия занимает в этом проекте одну из главных позиций, что очень важно для укрепления геополитических позиций нашей страны, а также экспорта технологий и интеллектуального ресурса.

Выполнение поставленных задач в значительной степени будет зависеть от геополитической обстановки в мире, взаимодействия и доверия между странами-участниками проекта, доминирования экономических интересов над политическими, улучшения взаимоотношений между Россией и США.

Страна или группа стран, которые освоят инновационные технологии термоядерной энергетики, получат большие экономические и геополитические преимущества в мировой энергетике и мировой политике.

России, как лидеру в исследованиях термоядерной энергии, необходимо более активно продвигать свои научные разработки в этой сфере, участвовать в различных международных проектах и тем самым закреплять свое преимущество.

ТЭК XXI ВЕКА: ТЕНДЕНЦИИ И ПРОГНОЗЫ

ЛИТЕРАТУРА

1. Арцимович Л.А. Управляемые термоядерные реакции. М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1961. С. 468. URL: <http://bookre.org/reader?file=655606&pg=468>.
2. Бекман И.Н. Ядерная физика. Лекция 21. Ядерные реакции в термоядерном синтезе. URL: <http://profbeckman.narod.ru/YadFiz.files/L21.pdf>.
3. Велихов Е.П., Гагаринский А.Ю., Субботин С.А., Цибульский В.Ф. Эволюция энергетики в XXI веке. М.: ИздАт, 2008, 160 с.
4. Ллуэллин-Смит К. На пути к термоядерной энергетике. Лекция в ФИАНе от 17.05.2009. URL: <http://elementy.ru/events/428728>.
5. Петров Ю.В. Гибридные ядерные реакторы и мюонный катализ. Сб. Ядерная и термоядерная энергетика будущего, М.: Энергоатомиздат, 1987. С. 172.
6. Смирнов В.П. Термоядерная энергетика – крупнейший международный инновационный проект // Российский химический журнал, 2008, т. LII, № 6.
7. Термоядерная бомба и дейтерид лития // ТрВ, № 42. С. 5, Наука и общество. 24.11.2009. URL: <http://trv-science.ru>.
8. Фортвов В.Е. Энергетика в современном мире. Долгопрудный: Интеллект, 2011. С. 168.
9. Cook I., Maisonnier D. et al. European fusion power plant studies. Fusion science and technology, v. 47, apr. 2005. URL: <https://ccfe.ac.uk/assets/Documents/FusionS&TVOL47P384.pdf>.
10. Patrick McCray W. Globalization with hardware: ITER's fusion of technology, policy and politics. History and Technology. Vol. 26, No. 4, December 2010, 283-312. URL: <http://www.tandfonline.com/loi/ghat20>.

Поступила в редакцию
10.05.2016 г.

S. Zhiznin, V. Timokhov²

PERSPECTIVES INTERNATIONAL COOPERATION IN THE DEVELOPMENT OF FUSION ENERGY. ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL ASPECTS

This paper discusses issues related to the research of a controlled-fusion. This is – especially thermonuclear reactions produce energy, the creation of nuclear and thermonuclear weapons; technical problems and difficulties arising in the study-guides fusion; economic and environmental aspects of the thermonuclear energy; the degree of elaboration of the question. The important role of inter-national cooperation, as a key factor in the creation of thermonuclear reactor sing and further development of energy.

Key words: uranium, plutonium, fusion, the Lawson criterion, the fusion reactor, nuclear fusion, plasma, muoncatalyzed, inertial confinement, hybrid reactor, «Tokamak».

² Stanislaw Z. Zhiznin – professor MIEP MGIMO (University) of the MFA of the Russian Federation, Doctor of Economics, e-mail: s.zhiznin@rambler.ru;

Vladimir M. Timokhov – General Director of the Center of Energy Diplomacy and Geopolitics, Ph.D, e-mail: vl.timokhov@gmail.com.