

УДК 564.062.2

**Перспективы развития термоядерного синтеза**

Бохон Е.А., Соловьев С.С.

Научный руководитель – к.т.н. ГОРНОСТАЙ А.В.

За последние 100 лет человечество совершило большой прорыв в промышленности. Этому способствовала «безграничная» добыча ресурсов. В эпоху индустриальной революции люди не сильно задумывались о возможности истощения полезных ископаемых и добывали их в непомерном количестве. На сегодняшний день проблема истощения полезных ископаемых является одной из важнейших мировых проблем. Человечество всегда будет зависеть от энергии, большинство которой на данный момент вырабатывается за счёт сжигания полезных ископаемых. Эти потребности могут привести к энергетическому кризису.

Многие страны, почти исчерпавшие свои ресурсы, начали задумываться о развитии альтернативных источников энергии. Данное направление является перспективным, однако не очень эффективным по сравнению с традиционными источниками. На 2010 год на долю альтернативной энергии, за исключением гидроэнергетики, приходилось всего 4,9% от всей потребляемой энергии. В 2017 году этот показатель достиг 9,6%, но уже в 2018 году он упал до 8,4% [1].

World gross electricity production, by source, 2017

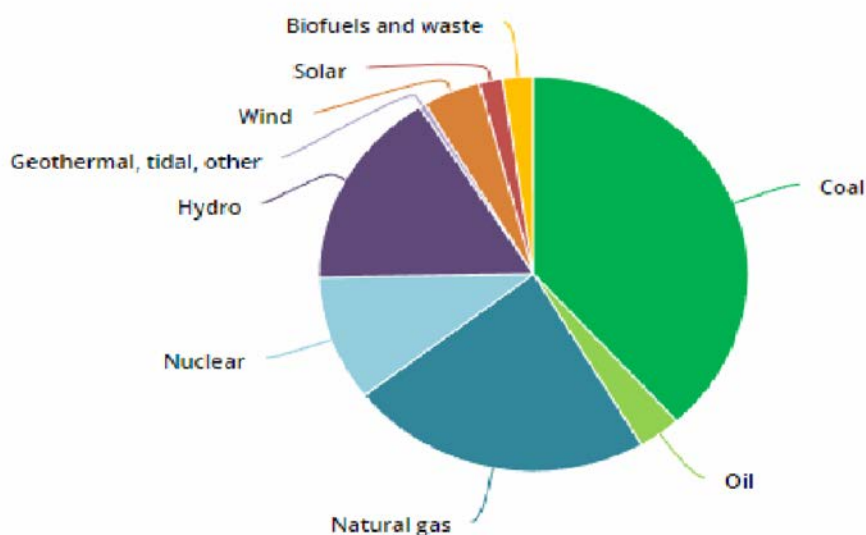


Рисунок 1 – Мировая выработка электроэнергии из различных источников

Другим альтернативным решением стало развития атомной энергетики. Эта отрасль имеет ряд преимуществ перед традиционными ТЭС, однако оценки выработки энергии находятся в пределах 10-15%. Среди «нетрадиционных» станций лидируют гидроэлектростанции, на долю которых приходится порядка 15-20 % выработки мировой энергии. Оставшаяся выработка, около 60%, приходится на тепловые станции, работающие на угле и природном газе (рис.1).

А теперь посмотрим на оставшиеся запасы ископаемых:

В Великобритании нефть закончится через 5,2 года, газ - через 3 года, уголь - через 4,5 года. Во Франции и того хуже – эти ресурсы истощатся меньше чем через год. Германия, напротив, может прожить еще 250 лет на угле, но только два года на газе и меньше года на нефти. В Италии нефти хватит на год, газа - меньше, чем на год. В Болгарии уголь закончится только через 43 года, в Польше - через 34 года.

Как видно из статистики, некоторые страны вынуждены будут в скором времени или увеличивать импорт ресурсов, или развивать другие способы выработки энергии.

Одним из перспективных направлений является ноу-хау энергетики – термоядерный синтез. Идея выработки энергии из реакции синтеза, используя водород в качестве топлива появилась ещё в 1951 году. Первый экспериментальный ядерный реактор был построен в Великобритании уже в 1983 году (*JET*) [2]. Однако первый опыт получения 16 Мегаватт из термоядерной реакции мало кого обнадежил. Соотношение затраченной энергии к полученной – так называемый коэффициент энергоэффективности, составлял всего 0.7, в то время как для поддержания длительной термоядерной реакции этот показатель должен равняться 20, а то и больше.

Низкая энергоэффективность – далеко не единственная проблема на пути учёных. Основной проблемой является поддержание требуемой температуры для успешного проведения синтеза – порядка  $10^8$  К. Современные технологии позволяют достичь такой температуры, однако поддерживать её возможно менее двух минут, что делает пока что невозможным длительную работу термоядерных реакторов.

Но почему же несмотря на все эти сложности, учёные всего мира заинтересованы в развитии данного направления? Ответ кроется в сравнении с противоположным явлением, с делением ядер. В отличие от атомной энергетики, в реакциях термоядерного синтеза происходит синтез ядер.

Реакция синтеза заключается в следующем: два или более относительно лёгких атомных ядра в результате теплового движения сближаются настолько, что короткодействующее сильное взаимодействие, проявляющееся на таких расстояниях, начинает преобладать над силами кулоновского отталкивания между одинаково заряженными ядрами, в результате чего образуются ядра других, более тяжёлых элементов. Примером является реакция дейтерий-тритиевой смеси с образованием ядра гелия-4 и испусканием нейтрона (рис.2). Именно эту реакцию планируется использовать в дальнейшей перспективе получения электроэнергии.

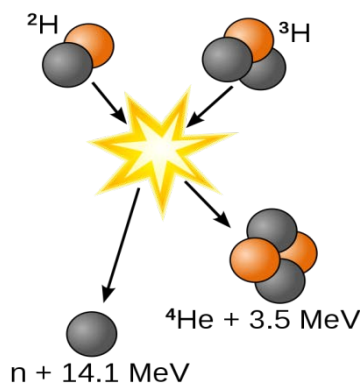


Рисунок 2 – Термоядерный синтез

На данный момент уже строится Международный Экспериментальный Термоядерный Реактор (ITER), расположенный в Кадараше (Франция) [3].

ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) станет уникальным экспериментальным инструментом, способным к увеличению длительности плазмы и улучшению удержания. С помощью такого реактора специалисты собираются преодолеть разрыв между нынешними небольшими экспериментальными установками и термоядерными электростанциями будущего. Для этого перед ITER ставятся следующие задачи:

1. Выработки 500 МВт мощности термоядерного синтеза импульсами длительностью 400 с. При 50 МВт мощности впрыскиваемого тепла он будет производить 500 МВт мощности термоядерного синтеза для длинных импульсов от 400 до 600 секунд.

2. Продемонстрировать интегрированную работу технологий для термоядерной электростанции. Ученые смогут изучать плазму в условиях, аналогичных тем, которые ожидаются на будущей электростанции, и тестировать такие технологии, как отопление, управление, диагностика, криогеника и дистанционное обслуживание в интегрированном виде.

3. Получение дейтерий-тритиевой плазмы, в которой реакция поддерживается за счет внутреннего нагревания. В горячей плазме энергия ядер гелия, образующихся, когда изотопы водорода сливаются, становится достаточно большой (из-за большого числа реакций) для того, чтобы превышать нагрев плазмы, который впрыскивается от внешних источников. Будучи первым в мире подобным горящим плазменным устройством, ITER предоставит ученым уникальную возможность нанести на карту новую территорию в управляемом ядерном синтезе.

4. Одной из задач на более поздних этапах работы ITER является демонстрация возможности производства трития в вакуумном сосуде. Мировых поставок трития (который используется с дейтерием для подпитки реакции синтеза) недостаточно для удовлетворения потребностей будущих электростанций. ITER предоставит уникальную возможность испытать макет внутрисадочных тритиевых blankets в реальных условиях термоядерного синтеза (рис.3).

5. Продемонстрировать характеристики безопасности термоядерного устройства. В 2012 году, когда организация ITER получила лицензию в качестве ядерного оператора во Франции, термоядерное устройство ITER стало первым в мире, успешно прошедшим тщательную проверку своего обоснования безопасности. Одной из основных целей работы ITER является демонстрация контроля реакций плазмы и термоядерного синтеза с незначительными последствиями для окружающей среды.

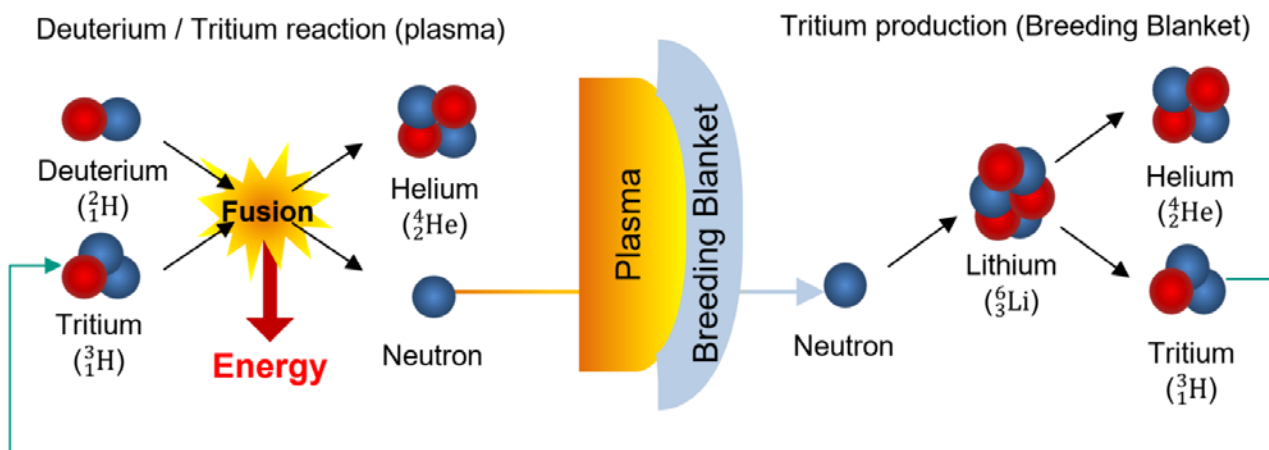


Рисунок 3 – Схема получения трития во внутрисадочных blankets

После окончания строительства здания реактора начнется сборка и установка машины ITER. За этапом сборки ITER, который включает сборку основного оборудования, а также установку всех систем установки, последует этап ввода в эксплуатацию, чтобы обеспечить совместную работу всех систем. Ввод в эксплуатацию закончится достижением первой плазмы.

Предполагается, что эксплуатационная фаза ITER продлится 20 лет: во-первых, запланирован многолетний период «откачки» в чистом водороде, в течение которого машина будет оставаться доступной для ремонта, и будут проверены наиболее перспективные физические режимы. За этой фазой последует работа в дейтерии с небольшим количеством трития для проверки защитных свойств стен. Наконец, ученые начнут третью фазу с более частой работой с равной смесью дейтерия и трития при полной мощности термоядерного синтеза.

Важнейшей частью ITER является токамак - вакуумная камера в форме пончика. Термин «токамак» происходит от русской аббревиатуры, которая означает «тороидальная камера с магнитными катушками». Именно в этой камере будут происходить термоядерные реакции.

Для начала процесса воздух и примеси удаляются из вакуумной камеры. Затем магнитные системы, которые помогут ограничить и контролировать плазму, заряжаются и вводятся

газообразное топливо. Когда через сосуд проходит мощный электрический ток, газ электрически распадается, ионизируется (электроны отрываются от ядер) и образует плазму.

Впервые разработанный советскими исследователями в конце 1960-х годов, токамак был принят во всем мире как наиболее перспективная конфигурация устройства для магнитного синтеза. ITER станет крупнейшим в мире токамаком - в два раза больше самого большого в настоящее время оборудования, а объем плазменной камеры будет в десять раз больше. Сам реактор состоит из следующих элементов:

1. Магнитная система. Десять тысяч тонн сверхпроводящих магнитов создадут магнитные поля, чтобы инициировать, ограничивать, формировать и контролировать плазму ITER.

2. Вакуумная камера. Вакуумный сосуд из нержавеющей стали содержит реакции синтеза и выступает в качестве первого защитного барьера.

3. Бланкет. Защищает стальной вакуумный сосуд и внешние компоненты машины от нейтронов высокой энергии, образующихся в ходе реакции синтеза.

4. Дивертор. Расположенный в нижней части вакуумной камеры, дивертор контролирует выбросы отработавших газов и примесей из реактора и выдерживает самые высокие поверхностные тепловые нагрузки машины ITER.

5. Криостат. Криостат из нержавеющей стали (29 x 29 м) окружает вакуумный сосуд и сверхпроводящие магниты и обеспечивает ультра-холодную вакуумную среду.

Поскольку этот проект является самым масштабным в своём роде, в его разработке и финансировании участвует несколько стран (рис. 4). Стоимость проекта первоначально оценивалась в 12 млрд \$ [4].

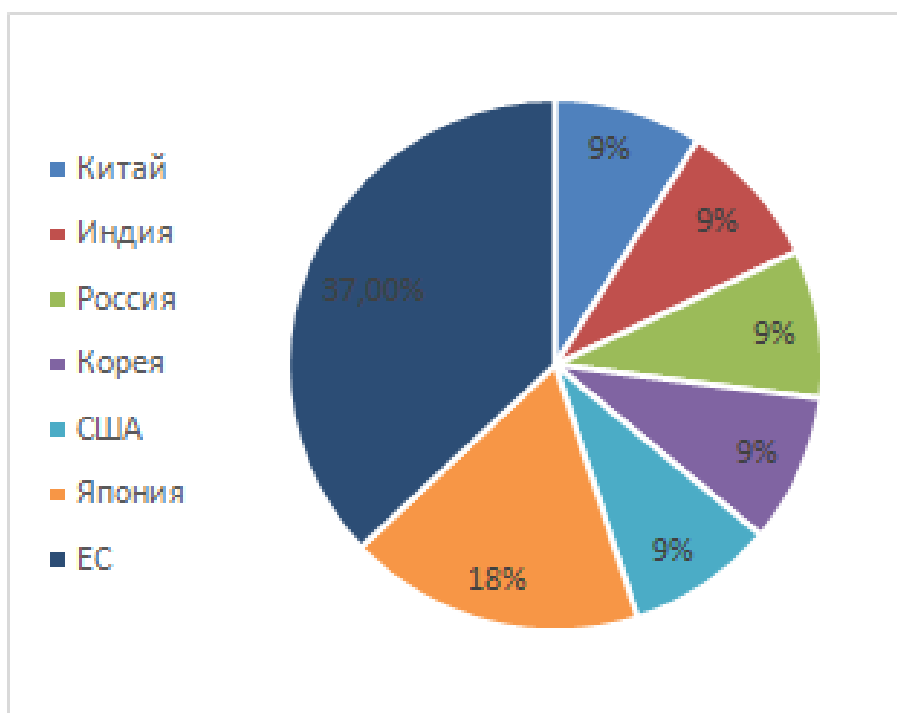


Рисунок 4 – Вклады стран участников

Разработка реактора ITER является лишь первым шагом на пути создания первой полномасштабной термоядерной электростанции. Существует проект электростанции DEMO на термоядерном синтезе, задача которой как раз и продемонстрировать привлекательность коммерческого использования технологии. Этот комплекс должен будет непрерывно (а не импульсно, как ITER) генерировать 2 ГВт энергии. Сроки реализации нового глобального проекта зависят от успехов ITER, но по плану 2012 года первый пуск DEMO произойдет не раньше 2044 года.

Реакции термоядерного синтеза обладают рядом очевидных преимуществ:

1. Единственными материальными «побочными» продуктами термоядерного синтеза являются гелий-4, безвредный инертный газ, и тритий, который используется в качестве дополнительного топлива.

2. Дейтерий легко добывается из воды. Лития более чем достаточно в земной коре. Тритий можно воспроизводить в реакторе. Для работы термоядерного реактора на основе D—T- синтеза необходимы только три этих вещества.

3. Электростанция с термоядерным реактором не производит выбросов так называемых парниковых газов, угарного газа или пылевых загрязнителей, как это делают электростанции на природном топливе.

4. Минимизация вероятности аварийного взрывного увеличения мощности.

В качестве недостатков термоядерного синтеза можно отметить следующие:

1. Несмотря на то, что непосредственно в процессе D—T-синтеза не образуется радиоактивных отходов, высвобождающиеся нейтроны со временем радиоактивно заражают защитную оболочку реактора. Эту проблему можно частично решить за счет использования малочувствительных к радиации материалов.

2. В процессе работы термоядерного реактора некоторое количество радиоактивного трития может быть выброшено в окружающую среду. Его период полураспада составляет 12 лет.

На основе вышеизложенного материала можно сделать вывод, что перспективы выработки энергии на основе термоядерного синтеза вполне могут считаться оправданными.

#### Литература

1. International Energy Agency [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <https://www.iea.org/statistics/electricity>. Дата доступа: 06.11.2019.

2. Новостной портал [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <https://hi-news.ru/technology/v-velikobritanii-uspeshno-zapustili-eksperimentalnyj-termoyadernyj-reaktor.html>. Дата доступа: 06.11.2019.

3. Unlimited Energy [Электронный ресурс]. –Режим доступа: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>. Дата доступа: 06.11.2019.

4. Самая грандиозная научная стройка современности [Электронный ресурс]. – Код доступа: <https://tech.onliner.by/2018/07/13/termoyadernyj-reaktor-iter>. Дата доступа: 06.11.2019.