

УДК 621.039

**ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ – ЭНЕРГЕТИКА ЗАВТРАШНЕГО ДНЯ**

Бруцкий-Стемпковский Н.А.

Научный руководитель – д.т.н., профессор Фурсанов М.И.

«Синтез, ядерная реакция, которая приводит в действие Солнце и звезды, является потенциальным источником безопасной, не излучающей углерода и практически безграничной энергии. Использование мощности термоядерного синтеза – цель ИТЭР, который был разработан как ключевой экспериментальный шаг между современными исследовательскими машинами для термоядерного синтеза и термоядерными электростанциями завтрашнего дня» – Заявление на официальной странице международного проекта ИТЭР.

ИТЭР (англ. ITER – International Thermonuclear Experimental Reactor) – проект международного экспериментального термоядерного реактора. Проект ставит перед собой задачу демонстрации возможности коммерческого использования термоядерного реактора и решения физических и технологических проблем, которые могут встретиться на этом пути. В проекте задействовано более 30 государств мира, на территории которых проживает почти 4 миллиарда человек.

Этот проект начал разрабатываться в середине 1980-х годов. В 1992 году было подписано четырёхстороннее (ЕС, Россия, США, Япония) межправительственное соглашение о разработке инженерного проекта ITER, который был завершён в 2001 году. Место строительства, исследовательский центр Кадараш на юге Франции, было выбрано в 2005 году. В 2010 году началось строительство. 28 июля 2020 года началась сборка реактора из компонентов.

Первоначально проект ИТЭР оценивался в 5 млрд евро, а окончание строительства было запланировано на 2016 год. Сроки неоднократно переносились, и сейчас проект планируется завершить к 2025 году, а стоимость возросла до 19 млрд евро.

Прежде, чем начать разбираться в сути проекта, ответим на вопрос, где в Солнечной системе находится самое горячее место? – Нет, не на Солнце... и не в Солнце. Самая высокая температура в Солнечной системе была получена в лаборатории Калхэмского центра термоядерной энергии (рисунок 1). Здесь ежедневно производится топливо для термоядерной реакции, протекающей при температуре 150 млн градусов по Цельсию, что в 10 раз превышает температуру Солнечного ядра.[1]

По существу, Солнце предоставляет нам всю энергию, которую мы используем в повседневной жизни. Солнечный свет, тепло, нагрев поверхности планеты, образование течений в мировом океане, выпадение и испарение осадков, течение рек и даже образование залежей полезных ископаемых – нефти и природного газа – всем мы обязаны именно Солнцу.

Реакция, протекающая на Солнце, – это реакция термоядерного синтеза. Реакция слияния изотопов водорода дейтерия и трития с образованием гелия и свободного нейтрона и высвобождением большого количества энергии (около 17 МэВ)[2].



Рисунок 1 – Лаборатория по производству дейтерий-тритиевого топлива для реакций термоядерного синтеза. Калхэмский центр термоядерной энергии (CCFN)

Однако данная реакция протекает лишь при высоких значениях температуры и давления, так необходимых для преодоления Кулоновского барьера. Кулоновский барьер препятствует сближению ядер атомов для их слияния. Преодоление данного барьера возможно лишь при температурах от 1 млн градусов. Энергетический эквивалент данной температуры – около 0,1 МэВ. Но если реакция произошла – выход энергии будет больше на два порядка – в 170 раз.

Как уже было сказано, в качестве топлива выступают изотопы водорода дейтерий и тритий. С получением дейтерия на Земле проблем нет. Его относительная концентрация по отношению к водороду в морской воде составляет  $(1,55 \div 1,56) \cdot 10^{-4}$ . Но с тритием ситуация иная. Период его полураспада чуть больше 12 лет, поэтому в свободном виде этого изотопа на нашей планете чрезвычайно мало. В промышленных количествах тритий получают искусственно на энергетических атомных реакторах деления в реакции взаимодействия лития с образующимися при делении ядер урана нейтронами.

Как получить температуру, достаточную для реакции? Как удержать настолько разогретое вещество? Как извлечь из него энергию?

Создание условий для стабильной, управляемой и контролируемой реакции синтеза – очень сложная техническая задача, над которой бьются уже не одно десятилетие.

Плодом этого амбициозного проекта стал ТОКАМАК – ТОроидальная КАмера с МАгнитными КАтушками. Проще говоря, реакцию, происходящую на Солнце, хотят посадить в «магнитную бутылку» и поставить на службу человечеству.

Упрощённо данная «магнитная бутылка» выглядит следующим образом (рисунок 2).



Рисунок 2 – Упрощённая схема ТОКАМАК

ТОКАМАК является комплексным внутренним модулем термоядерного реактора и состоит из катушек, создающих магнитное поле разной конфигурации, и предназначенных для удержания, разогретого до состояния плазмы, дейтерий-тритиевого топлива (DT-топлива).

Катушки тороидального магнитного поля (toroidal field – TF) состоят из 18 идентичных элементов (D-образные катушки), расположенных вокруг торообразной вакуумной камеры. Они создают магнитное поле вокруг плазменного тора. Катушки полоидального поля (poloidal field – PF) состоят из 6 элементов, расположенных горизонтально, и создают полоидальное поле. Назначение этого поля – отдалить плазменный шнур от стенок камеры и сжать его. Центральный соленоид (central solenoid – CS) расположен в «дырке от бублика» – вдоль оси вакуумной камеры. По сути, он представляет собой трансформатор, возбуждающий индуктивный ток в плазме. Благодаря форме камеры плазменный шнур образует кольцо. Это кольцо является вторичной обмоткой трансформатора, замкнутой в короткий виток. Ток, наведенный в плазменном шнуре, дополнительно обжимает и нагревает его [3].



Также дополнительно в конструкции ТОКАМАК имеются корректирующие катушки, расположенные внутри вакуумной камеры и предназначенные для сглаживания вспучиваний плазменного шнура.

Снаружи эта магнитная камера укрыта бланкетом. Это весьма напряжённая в тепловом и радиационном плане система токамака. Назначение бланкета – улавливать высокоэнергичные нейтроны, образующиеся при термоядерной реакции. В бланкете нейтроны замедляются, выделяя тепло, которое отводится системой охлаждения. Для удобства технического обслуживания бланкет разделён на 440 кассет. 3 кассеты бланкета модифицированы. Эти кассеты называют Test Blanket Modules (TBM). TBM покрыты изотопом лития. При столкновении нейтронов с литием происходит реакция образования дейтерия и трития – изотопов, участвующих в реакции синтеза. То есть сам реактор будет размножать для себя топливо и даже по ожиданиям разработчиков будет покрывать свои потребности. Стоит отметить, что тритий – очень дорогое вещество. По состоянию на 2010 производство одного килограмма трития обходилось в 30 миллионов долларов. А по состоянию на 2003 год общемировые запасы трития составляли всего 18 кг.

Также в ТОКАМАК будет достаточно иных подсистем:

- Вакуумная система (создание рабочей среды для реакции);
- Криогенная система (для охлаждения проводников до сверхпроводящего состояния);
- Система водяного охлаждения (трехконтурная, готова для интеграции в неё оборудования для выработки электроэнергии);
- Топливная система (подача смеси изотопов в активную зону);
- Дивертор (адсорбент для очистки плазмы от примесей).

Общая схема ТОКАМАКА будет иметь вид (рисунок 3).

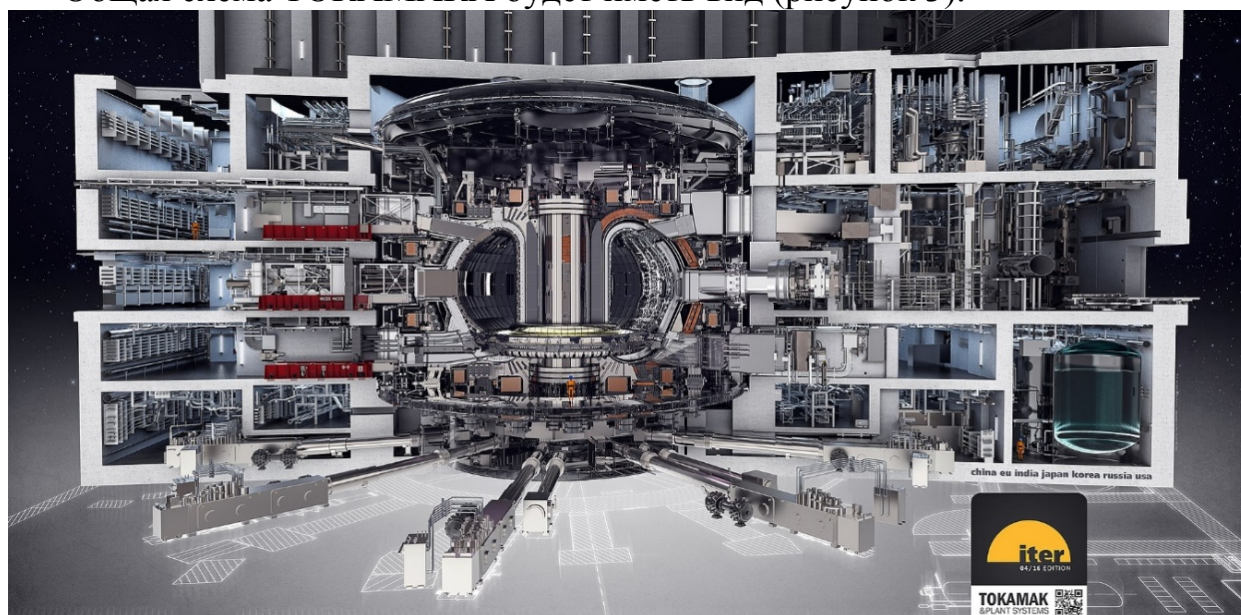


Рисунок 3 – Общий вид ТОКАМАК

Так как ТОКАМАК пока что лишь экспериментальный проект, он не будет производить электрическую энергию, хотя его собственное потребление

составит около 110 МВт. Не зря было сказано, что система охлаждения готова к интеграции в неё оборудования для выработки электроэнергии, и разработчики утверждают, что ожидаемая мощность составит около 500 МВт. Но сейчас вся она будет рассеяна в атмосферу.

### **Выводы**

1. Термоядерный синтез безопасен в радиационном плане, он не оставляет долго распадающихся радиоактивных изотопов, не выделяет углекислый газ.

10. Его можно приравнять к возобновляемому источнику энергии, но при этом его действие непрерывно.

11. Отличается низкими затратами на землепользование, характерными для традиционной энергетики.

Артур Стэнли Эддингтон еще столетие назад сказал: «Мы иногда мечтаем, чтобы человек научился добывать и использовать энергию для своих нужд». Эта мечта существует и сегодня. Мы очень стараемся реализовать её, нам просто нужно довести работу до конца.

### **Литература**

1. PhDIan Chapman, The Royal Institution, public lecture «Fusion: How to Put the Sun in a Magnetic Bottle». / Ian Chapman/ public lecture. 2016. Mode of access: <https://www.youtube.com/user/TheRoyalInstitution>. - Date of access: 08.06.2016.

2. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. – М.: Физматлит, 1961. – 467 с.

3. ITER Organization – International Thermonuclear Fusion Project. Official resource. Mode of access: <https://www.iter.org>. – Date of access: 2005.