

ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА КАК ВОЗМОЖНОГО ВАРИАНТА ЭНЕРГИИ БУДУЩЕГО

Булин М.Н.

Научный руководитель - Маркова Л.В., д.т.н., профессор.

На современном этапе развития человечества наблюдается тенденция по замене привычных энергоносителей на альтернативные либо возобновляемые источники энергии. Одним из возможных вариантов энергии будущего является термоядерный синтез, однако разработка управляемого термоядерного синтеза (УТС), несмотря на все свои достоинства, сталкивается с рядом трудностей как с физической, так и с технической стороны.

Наиболее исследованной установкой для проведения управляемой термоядерной реакции (УТР) является «токамак», для надёжной работы которого необходимо одновременное выполнение трёх главных условий:

- скорость ударов ядер друг с другом в плазме должна равняться её температуре T_p внутри термоядерного реактора (ТЯР) (для D – T $T_p > 10^8$ К);
- выполнение критерия Лоусона, имеющего для термоядерной реакции D – T следующий вид: $n_p \tau_p > 10^{20}$ см⁻³·с, где n_p , τ_p – плотность и время удержания высокотемпературной плазмы в активной зоне ТЯР;
- критерий «зажигания» смеси легких ядер [1].

При реализации на практике УТР исследователи и конструкторы столкнулись с рядом проблем, затруднивших создание полноценного «токамака».

Изначально основной проблемой ТЯР была нестабильность горячей плазмы, то есть плазменный шнур в тороидальной камере имел переменную толщину или же вообще прерывался с остановкой протекания кольцевого тока. Проблема была решена при помощи увеличения размеров вакуумной камеры и применения полоидального магнитного поля.

В токамаке набор катушек, расположенных вокруг плазменной камеры в форме «бублика», создает основное тороидальное магнитное поле, где проводящее плазменное кольцо служит единственной вторичной обмоткой огромного трансформатора. Импульс тока в первичной обмотке (индукторе) индуцирует большой ток во вторичной обмотке, то есть в самом плазменном кольце. Этот индуцированный плазменный ток сопровождается полоидальным магнитным полем. Сочетание полоидального поля с основным тороидальным приводит к спиральному магнитному полю. Полученная таким образом магнитная структура состоит из бесконечного множества вложенных тороидальных магнитных поверхностей. Такая доработка позволила уменьшить утечку частиц и тепла из плазмы.

Впоследствии повышению стабильности сопутствовало введение в эксплуатацию принципиально новых ТЯР типа «стелларатор», в которых магнитное поле наводится внешними катушками. В своей базовой конфигурации дополнительные спиральные катушки (геликоидальные) вокруг тороидальной плазмы обеспечивают необходимую дополнительную закрутку тороидального магнитного поля, создаваемого основными катушками поля (рис. 1).



Рисунок 1 - Схемы термоядерных реакторов «токамак» (а) и «стелларатор» (б).

Ещё одной проблемой стала высокая стоимость трития ${}^3_1\text{H}$ – сверхтяжелого изотопа водорода ${}^1_1\text{H}$ с периодом полураспада 12,3 года (По состоянию на 2019 год 1 кг трития стоил около 30 млн. \$ США). На 2015 год мировой запас трития составлял приблизительно 20 кг [2]. К примеру, для загрузки всех тритиевых подсистем токамака ITER понадобится около 3 кг трития, а также около 1 кг трития на каждый год его работы [3].

По предположениям физиков использование изотопа лития значительно упростит процесс создания топлива для ТЯР. Предполагается, что нейтроны, образующиеся в реакциях слияния $\text{D} - \text{T}$, будут использоваться для получения трития путем бомбардировки «бланкета» с находящимся внутри изотопом лития ${}^6_3\text{Li}$. Такой вариант в перспективе сможет решить проблему с нехваткой природного трития для осуществления УТС. Однако это лишь теория, недоказанная опытом, поскольку работающих промышленных термоядерных реакторов пока нет.

Также для ТЯР характерно сильное нейтронное излучение, пагубно влияющее на его рабочий ресурс, т.е. атомы материалов, из которых сделана конструкция стенок реактора, могут поглощать нейтроны, превращаясь в радиоактивные изотопы, в результате чего в конструкции реактора будет накапливаться радиоактивность (нейтронный поток в ТЯР почти в 10 раз мощнее подобного в ядерном реакторе).

С целью минимизации этого негативного явления ставится задача разработать такие материалы, которые были бы устойчивы к нейтронному облучению. Одну из таких исследовательских работ проводит нидерландский ядерный центр NRG совместно со шведской компанией Studsvik, которые

разработали легированную сталь Eurofer97. Данная сталь обладает всеми необходимыми качествами как по прочности, так и по радиоактивной безопасности [4].

Для поиска, тестирования и исследования подобного рода материалов в 2018 г. была открыта IFMIF (Международная установка по облучению термоядерных материалов). Установка IFMIF представляет из себя два небольших сильноточных ускорителя дейтронов (ионов дейтерия) до энергии примерно 40 МэВ и литиевой мишени (льющегося потока жидкого лития, толщиной 25 мм). В настоящее время прототип устройства успешно построен в Роккашо, Япония [5].

Главной проблемой токамаков в настоящее время является возникновение непредсказуемых неустойчивостей, приводящих к нестабильному режиму работы ТЯР при повышении давления в горячей плазме. Для существенного улучшения параметров работы ТЯР необходимо увеличить мощность, что потребует повышения давления в плазме, так как скорость слияния ядер при заданной температуре пропорциональна квадрату давления.

Таким образом, на сегодняшнем этапе нельзя говорить о создании полноценного промышленного ТЯР, поскольку до сих пор остаётся большое количество нерешённых задач, которые предстоит исследовать учёным-физикам и инженерам. Ведутся работы над созданием экспериментального ТЯР ITER, который в последствии должен стать базой для тестирования существующих задач и решения новых, что стало значительным шагом на пути к исследованию УТС.

Литература

1. М. И. Баранов. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 46: Термоядерная энергетика. Термоядерные реакторы и электростанции: ретроспектива исследований управляемого термоядерного синтеза, их современное состояние и будущее // Электротехника и электромеханика. – 2018. №6. - С. 3-17.
2. А. Семёнов. Дейтерий и тритий: водород, да не тот //Наука и жизнь. - 2018. - №8. С. 45 – 51.
3. Fusion as a sustainable energy source // ITER–URL: https://www.iter.org/FAQ#collapsible_2. – Date of access: 02.04.2020.
4. Rieth, M.; Schirra, M.; Falkenstein, A.; Graf, P.; Heger, S.; Kempe, H.; Lindau, R.; Zimmermann, H. (2003). EUROFER 97, Tensile, Charpy, Creep and Structural tests // Institut für Materialforschung, Forschungszentrum Karlsruhe. Scientific Report (FZKA-6911.) – URL: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/270055720/3814432>.
5. What is IFMIF // IFMIF / Eveda – URL: https://www.ifmif.org/?page_id=6 – Date of access: 13.04.2020.