

Термоядерный синтез: современное состояние и перспективы энергетики

Карась В.И., д.ф.-м.н., проф.

*ННЦ «Харьковский физико-технический институт» Национальной академии наук Украины, ул. Академическая, 1, г. Харьков, 61108, Украина,
+380577001146, karas@kipt.kharkov.ua*

Термоядерное сообщество сейчас готово сделать следующий шаг – провести совместный международный эксперимент на ITER (МТЭР). Цель МТЭР – показать, что термоядерный синтез может быть использован для производства электрической энергии, и получить необходимые данные для создания и функционирования первой производящей электрическую энергию станции.

В МТЭР ученые будут изучать плазму в условиях, подобных ожидаемым в генерирующей электроэнергию станции. Будет получено 500 МВт термоядерной мощности на временах, в десятки раз превосходящих времена ввода энергии, необходимой для удержания плазмы при необходимых температурах. Таким образом, это будет первый эксперимент по производству «чистой» энергии. А также тест для проверки многих технологий, включающий нагрев, управление, диагностику и стабильное функционирование, что будет необходимо для реальной термоядерной электростанции.

Стоимость конструкции МТЭР оценивается в 5 миллиардов евро за 10 лет и следующие 5 миллиардов евро предусматриваются на двадцатилетний период его функционирования. Вклад партнеров по МТЭР в большей части составляют расходы на компоненты машины.

Тор Объединенной Европы (ТОЕ)-JET является наибольшим, находящимся в рабочем состоянии токамаком, и только он способен функционировать, используя тритий и бериллий. Программа JET в основном сфокусирована на консолидации выбора проекта ITER и подготовке функционирования ITER. Программа «усиления» JET коснулась ионно-циклотронного нагрева, управляющей плазмой системы, уже протестированной в 2009, возможностей JET диагностики, также существенно обновленной.

JET продемонстрировал в 1997 производство энергии термоядерного синтеза на уровне условий, близких к стационарному термоядерному горению. Новая дейтерий-тритиевая кампания ожидается в 2015. В этой ситуации, JET будет способен функционировать в ITER –режимах работы в условиях, как можно более близких к ITER. Эксперименты на JETе имели своей целью в основном выработку рекомендаций по оптимизации рабочих сценариев ИТЭРа и принятию решений относительно конструкции его элементов.

Желание создать ИТЭР в короткие сроки, приводит к необходимости принимать решения по выбору материалов сейчас, даже в отсутствии данных, которые могут гарантировать правильный выбор. Однако ИТЭР, как экспериментальная установка, будет иметь достаточную гибкость в выборе материалов, по результатам их испытаний вне и внутри ИТЭР, и принятия решений по управлению физическими процессами в пристеночной плазме. По мере накоп-

ления данных во время работы ИТЭР возможны изменения в конструкции отдельных систем дивертора и первой стенки.

Хотя используемые технологические знания по стойкости материалов в больших потоках энергии дают уверенность в создании термоядерного реактора, есть некая степень неопределенности в физике, которая должна быть уменьшена сначала на стадии строительства, а затем во время работы ИТЭР. Решение ряда проблем ИТЭР, таких как оценка удельной энергии, выходящей на материалы, соприкасающиеся с плазмой, на стационарной стадии разряда, во время ЭЛМов и срывов, оценка «времени жизни» этих материалов, миграция распыленного материала по камере, поглощение трития в материалах и продуктах эрозии, создание методов очистки камеры от трития, образования пыли – находится за пределами возможностей и опыта современных токамаков. И основной вопрос – какие материалы могут использоваться в ДЕМО после ИТЭР. Выбор материалов имеет принципиальное значение для создания термоядерной энергетики и решить эту проблему можно только с помощью экспериментов на ИТЭР, совместно с программой облучения материалов потоками быстрых нейтронов.

Российская программа УТС прежде всего должна поддерживать стратегическое направление – «чистую» термоядерную энергетику. Вместе с этим, на основе прогресса в термоядерных исследованиях, признано необходимым развивать гибридные (синтез-деление) системы для решения задач ядерной энергетики 21 века. Наиболее актуальной задачей в этих предложениях было создание современного токамака Т-15МД мирового уровня в РНЦ КИ и модернизация токамака Глобус-М в ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Токамак Т-15МД должен быть базой не только для поддержки программы ИТЭР, но и водородным прототипом источника термоядерных нейтронов (ТИН). К 2020 году планируется не только проведение исследований в квазистационарном режиме плазмы с реакторными параметрами, но и создание демонстрационного ТИН с соответствующей стационарной технологией.

Современный этап развития исследований по инерционному удержанию характеризуется завершением строительства в США крупных установок по лазерному синтезу и Z-пинчам. Энергетика этих установок по ожиданиям достаточна для зажигания мишени с $Q > 10$ (NIF) или для проведения экспериментов вблизи зажигания (ZR). Именно поэтому исследования вступают в критическую фазу, когда переход на новый уровень мощности позволяет проверить физические и технические основы, заложенные в проекты. В Европе, России и Китае также строятся или подготавливаются проекты масштабных установок по лазерному и Z-пинчевому синтезу. В докладе будут рассмотрены основные результаты исследований, известные к настоящему времени, их направления и содержание национальных программ. Пока еще недостигнутый поджиг мишени уже не в состоянии обеспечить долговременную активность рассматриваемых направлений задачами физики высоких плотностей энергии и специальных применений. Необходима формулировка энергетических возможностей инерционного удержания с учетом практической реализуемости.

В течение последнего десятилетия в физике удержания плазмы в осесимметричных открытых ловушках был достигнут значительный прогресс. Решено создать ловушку в виде большого пробкотрона (типа ГДЛ) с многопробочными участками по краям для подавления продольных потерь. Нагрев плазмы будет осуществляться как атомарной инжекцией, так и двусторонней инжекцией электронных пучков из расширителей вдоль магнитного поля. Конструкция будет максимально использовать детали и инфраструктуру от недостроенного проекта «Водородный Прототип». Основные цели создания новой ловушки - достижение целей проекта ``Водородный прототип" - потока и плотности потока нейтронов (2 МВт/м^2 в пересчёте на DT); повышение эффективности генерации нейтронов $Q_{\text{DT}} > 0.03$, создание базы данных для проектирования ТЯ реактора с турбулентным продольным удержанием в многопробочных концевых секциях. Параметры: длина центрального пробкотрона – 10м, радиус плазмы – 10см, плотность $\sim 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, средняя энергия ионов – 20 кэВ, электронная температура $> 400 \text{ эВ}$, время разряда $\sim 1 \text{ с}$, мощность нагрева – по 10МВт в атомарных и электронных пучках.