

УДК 621.039

## ПРОГРАММЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЕВРОПЕЙСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ ПО ПРОБЛЕМЕ УТС

Обзор

*М.Л. Субботин, Д.К. Курбатов, Е.А. Филимонова (Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты», Москва, Россия)*

Обзор содержит краткий анализ европейских организаций, которые ведут исследования и разработки в области термоядерного синтеза и соответствующих европейских программ.

**Ключевые слова:** Европейская программа работ по управляемому термоядерному синтезу, Европейское сообщество по атомной энергии (Евратом), Европейское соглашение по развитию термоядерного синтеза, токамак, стелларатор, лазерная система.

EUROPEAN ORGANIZATIONS AND THEIR PROGRAMMES OF FUSION STUDIES. M.L. SUBBOTIN, D.K. KURBATOV, E.A. FILIMONOVA. The review contains concise analysis of European organizations connected with fusion studies and developments and corresponding European research programmes.

**Key words:** the European fusion programme, European Atomic Energy Community (Euratom), European Fusion Development Agreement (EFDA), tokamak, stellarator, laser system.

### ВВЕДЕНИЕ

Анализ Европейской программы исследований по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС) потребовал поиска, систематизации и обобщения доступных научно-технических данных о её содержании, прогнозах развития и результатах реализации.

В обзоре приводятся структура, основные цели и соподчиненность Европейского Союза (ЕС), Европейского совета, Евратома и EFDA. Описываются рамочные программы ЕС, их идеология, состав и роль. Рассматриваются программы работ по управляемому термоядерному синтезу (УТС) с магнитным и инерционным удержанием, в частности, по технологическим, материаловедческим и социально-экономическим проблемам. В работе подробно описывается совместная программа исследований по вопросам экологии, безопасности и социально-экономическим аспектам термоядерной энергетики.

### ЕВРОПЕЙСКИЙ СОЮЗ, ЕВРОПЕЙСКИЙ СОВЕТ, ЕВРАТОМ, EFDA

**Европейский Союз (Евросоюз, ЕС).** ЕС — объединение 27 европейских государств, подписавших договор о создании Европейского Союза (Маастрихтский договор). ЕС — уникальное международное образование: он сочетает признаки международной организации и государства, однако формально не является ни тем, ни другим. Союз не является субъектом международного публичного права, однако имеет полномочия на участие в международных отношениях и играет в них немалую роль.

Первый шаг в сторону создания современного Евросоюза был сделан в 1951 г.: ФРГ, Бельгия, Нидерланды, Люксембург, Франция, Италия подписали договор об учреждении Европейского объединения угля и стали (ЕОУС, ECSC — European Coal and Steel Community), целью которого стало объединение европейских ресурсов по производству стали и угля, в силу данный договор вступил с июля 1952 г.

С целью углубления экономической интеграции те же шесть государств в 1957 г. учредили Европейское экономическое сообщество (ЕЭС, Общий рынок) и Европейское сообщество по атомной энергии (Евратом).

Самым важным и широким по сфере компетенции из этих трёх европейских сообществ являлось ЕЭС, так что в 1993 г. оно было официально переименовано в Европейское сообщество (ЕС — European Community), а позже — в Евросоюз.

**Европейский совет.** Высший политический орган ЕС, состоящий из глав государств и правительств стран-членов и их заместителей — министров иностранных дел. Членом Европейского совета является также председатель Еврокомиссии. Совет определяет основные стратегические направления развития ЕС. Выработка генеральной линии политической интеграции — основная миссия Европейского совета.

Наряду с Советом Министров Европейский совет наделён политической функцией, заключающейся в изменении основополагающих договоров европейской интеграции. Решения совета обязательны для поддержавших его государств. В рамках Совета осуществляется так называемое «церемониальное» руководство, когда присутствие политиков самого высокого уровня придаёт принятому решению одновременно и значимость, и высокую легитимность.

*Европейский парламент* — законодательный орган Евросоюза, состоит из 786 депутатов, избираемых гражданами стран — членов ЕС сроком на пять лет. Основная роль Европарламента — утверждение бюджета ЕС.

*Европейская комиссия* (ЕК) играет роль правительства Европейского Союза. ЕК состоит из 27 членов, по одному от каждого государства-члена. При исполнении своих полномочий они независимы, действуют только в интересах ЕС, не вправе заниматься какой-либо другой деятельностью. Государства-члены не вправе влиять на членов Еврокомиссии. Каждый комиссар, как и министр национального правительства, отвечает за определённое направление работы. Каждого кандидата в Еврокомиссию рекомендует правительство его страны, затем он проходит собеседование с председателем Еврокомиссии и утверждается Европарламентом. В структуру ЕК входят генеральные директораты — это аналоги министерств. Генеральные директораты являются профильными и отвечают за реализацию политики в различных сферах компетенции ЕС.

Задачи ЕК — координация работы органов исполнительной власти стран ЕС, выработка рекомендаций для деятельности Европарламента, внесение законодательных инициатив с целью приведения в соответствие с общеевропейскими стандартами национального законодательства стран — членов ЕС, наблюдение за соблюдением всеми 27 странами единых европейских стандартов, а также прав и свобод человека, проведение систематических консультаций со всеми национальными правительствами для выработки единой экономической (промышленной, сельскохозяйственной, налогово-бюджетной, социальной, таможенной, валютной, денежно-кредитной и т.д.), военной, внешней, культурной политики.

**Евратом.** В настоящее время членство в Евросоюзе и Евратоме единое, все государства, вступающие в Союз, становятся и членами Евратома. Перед Евратомом стоят следующие задачи:

I. Развивать научные исследования и обеспечивать распространение технической информации (ст. 4—29 договора о Евратоме). Функции Евратома в этой области:

— координирование научно-исследовательских и учебных программ в области ядерной энергетики, осуществляемых на территории отдельных государств-членов. Евратом получает от государств-членов, предприятий и отдельных лиц сведения о планируемых и осуществлённых программах исследований. Он оценивает эти программы и даёт рекомендации проводить данные исследования или же прекратить их, чтобы избежать дублирования. Евратом созывает представителей государственных и частных исследовательских организаций, а также любых экспертов, осуществляющих исследования в одних и тех же или смежных областях, с целью проведения взаимных консультаций и обмена информацией;

— оказание помощи государствам-членам, отдельным лицам и предприятиям в проведении их исследовательских программ путем предоставления финансовой помощи в рамках соглашений о проведении исследований, передачи ядерных материалов, установок, оборудования или направления экспертов, организации совместного финансирования исследований;

— выполнение собственных научно-исследовательских и учебных программ. Такие программы устанавливаются единогласным решением совета Евратома по предложению ЕК после консультации с научно-техническим комитетом. Осуществляются эти программы в Объединённом центре ядерных исследований (ОИЦ). ОИЦ — один из генеральных директоратов ЕК, задачей которого является обеспечение научно-технических основ для выработки, развития, претворения в жизнь и контроля выполнения политики ЕС, отвечающей интересам его жителей. ОИЦ состоит из семи научных институтов, расположенных в Бельгии, Германии, Испании, Италии и Нидерландах: Энергетический институт, Институт трансурановых элементов, Институт эталонных материалов и измерений, Институт исследований перспективных технологий, Институт защиты и безопасности населения, Институт сохранения окружающей среды, Институт здравоохранения и защиты потребителей, а также Исследовательский центр в Испре (Италия).

II. Разрабатывать меры безопасности для защиты здоровья людей, работающих в области атомной энергии, и населения, обеспечивать их применение.

III. Привлекать капиталовложения и обеспечивать, особенно путем поощрения частного предпринимательства, строительство установок, необходимых для развития в сообществе работ в области термоядерной энергетики.

IV. Обеспечивать регулярность и равноправие в поставках руды и ядерного топлива всем, кто использует их в рамках сообщества.

V. Обеспечивать путем соответствующего надзора использование ядерных материалов только в тех целях, для которых они предназначены.

VI. Осуществлять право собственности в отношении специальных делящихся материалов.

VII. Обеспечивать полезную отдачу технических объектов и доступ к лучшим из них путем создания общего рынка для специальных материалов и оборудования и их свободного перемещения.

VIII. Устанавливать с другими странами и международными организациями любые связи, которые могут рассматриваться как полезные с точки зрения ускорения прогресса в области мирного использования атомной энергии.

Основной особенностью Евратома, как и других европейских сообществ, является его наднациональность. Сообщества действуют непосредственно в государствах-членах без вмешательства национальных властей.

Основным инструментом Европейского Союза по проведению и финансированию научно-исследовательской деятельности являются так называемые **рамочные программы (РП)**.

**Организация, выполняющая Европейское соглашение о разработках в области термоядерной энергии (EFDA).** Она была создана в 1999 г. для обеспечения общей структуры, координации и взаимодействия Европейских национальных участников термоядерных исследований в рамках ЕС. EFDA является соглашением между Евратомом, Еврокомиссией и всеми европейскими термоядерными ассоциациями (Euratom Fusion Associations). EFDA учреждена как связующий элемент между Евратомом и термоядерными ассоциациями [1].

Задача EFDA состоит в том, чтобы развить необходимую научную, техническую и промышленную базу для создания термоядерного реактора ИТЭР, прототипа термоядерной энергетической станции и возможностей для участия Европы в международном сотрудничестве. Чтобы решить эту задачу, EFDA координирует технологические работы, проводимые европейскими термоядерными лабораториями и промышленностью, а также координирует европейский вклад в международное сотрудничество.

EFDA является частью более долгосрочной программы (Long-Term programme) сотрудничества, охватывающей все виды деятельности в области термоядерных исследований с магнитным удержанием в Европейском Союзе и в Швейцарской конфедерации.

Основной деятельностью EFDA является эксплуатация установки JET (Joint European Torus) — крупнейшей в мире термоядерной установки, которая расположена близ Оксфорда (Великобритания).

Вторым направлением деятельности EFDA является координация и поддержка термоядерных исследований и разработок, осуществляемых в европейских термоядерных ассоциациях и европейской промышленности.

Третья деятельность EFDA заключается в том, чтобы координировать европейский вклад в крупномасштабное международное сотрудничество.

Рабочий план EFDA включает в себя мероприятия и программы исследований, которые направлены на демонстрацию возможности достижения параметров плазмы в ИТЭР, характерных для термоядерных электростанций, а также на решение ряда задач передовых технологий, таких, как создание сверхпроводящих катушек, компонентов конструкции, выдерживающих высокие тепловые потоки, систем дистанционного управления, систем обращения с отходами.

В планах EFDA представлены два ключевых вопроса, относящихся к будущему демонстрационному реактору (ДЕМО), а именно достижение самообеспечения реактора тритиевым топливом и разработка радиационно-стойких конструкционных материалов с низкой остаточной активацией.

Все эти мероприятия дополняются и направляются системными исследованиями термоядерных энергетических электростанций, в которых основное внимание уделяется безопасности и охране окружающей природной среды и социально-экономическим аспектам термоядерного синтеза. Эти вопросы были уже частично затронуты в ряде исследований, таких, как социально-экономические исследования по проблемам управляемого термоядерного синтеза (Socio-Economic Research on Fusion-SERF1, 1997—1998 [2, 3]; SERF2, 1998—2000 [2, 4]; SERF3, 2001—2003 [2]; SERF4, 2003—2004 [5]), исследования проблем безопасности и охраны окружающей среды (Safety and Environmental Assessment of Fusion Power-SEAFP [6, 7, 8]) и концептуальные исследования требований и возможностей будущих коммерческих термоядерных электростанций (A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants — PPCS [9]).

Несколько термоядерных устройств в ЕС уже внесли свой вклад и все ещё вносят в базу знаний, необходимых для создания ИТЭР. Уникальную роль в этом процессе играет JET, поскольку полученные параметры плазмы в этой установке наиболее близки к прогнозируемым параметрам плазмы в ИТЭР. Совместное использование оборудования JET уже обеспечило определённые знания по физике плазмы и плазменной технологии и внесло свой вклад в демонстрацию высокоэффективных режимов работы, имеющих значение для ИТЭР. Исследования на JET помогают также в решении ряда технических вопросов ИТЭР, например, изучаются вопросы дистанционного обслуживания установки, тритиевой технологии, а также вопросы создания материалов и компонентов, обращённых к плазме.

Все научные и технические задачи, которые решаются в европейских институтах термоядерного синтеза, осуществляются в рамках специальных (рамочных) соглашений между Евратомом и его партнерами.

### **РАМОЧНЫЕ ПРОГРАММЫ ЕС (РП). Идеология и состав РП**

Рамочные программы — основной финансовый инструмент ЕС для поддержки и развития научных исследований и разработок в интересах ЕС в целом или значительной части стран — членов ЕС. Реализуются с 1984 г. пятилетними циклами, а с 2007 г. — 7 лет (РП 1—6 реализованы). Решение об утверждении РП принимается совместно Европарламентом и Европейским советом при участии Еврокомиссии. За разработку РП и их администрирование отвечает Главный директорат по научным исследованиям и другие директораты ЕК. Источник финансирования — бюджет Евросоюза, формат — в рамках бюджетного цикла ЕС. Финансируются совместные научные исследования стран Евросоюза и ассоциированных стран.

РП предлагаются Еврокомиссией и принимаются Европейским советом и Европейским парламентом после согласования. РП выполняются с 1984 г. и рассчитаны на пятилетний период, причём последний год предыдущей программы и первый год следующей совпадают. Шестая РП закончилась в конце 2006 г.

Рамочные программы ЕС состоят из двух частей:

- технологические разработки, исследовательская и демонстрационная деятельность;
- обучение в области ядерной энергии.

**Роль рамочных программ ЕС в глобализации научных исследований [10]. Цели европейских рамочных программ:**

1. Повышение конкурентоспособности:
  - выход Европы на передовые позиции в науке;
  - промышленное внедрение результатов исследований;
2. Создание единого научного пространства:
  - в рамках Европы;
  - вместе с другими странами;
3. Повышение уровня занятости в науке:
  - привлечение молодёжи;
  - снижение «утечки мозгов».

**Достижения:**

1. Создание масштабной инфраструктуры:
  - сети IPv6, вычислительные сети;

- успешные проекты, организации и учёные (Network of Excellence);
- 2. Объединение учёных:
  - из индустрии и академических организаций;
  - европейских и неевропейских;
- 3. Поддержка небольших коллективов и отдельных исследователей.

*Ограничения:*

1. Проблемы запуска проектов:
  - высокая трудоёмкость подготовки заявки;
  - высокий риск неудачи;
2. Проблемы организации проектов:
  - небольшой объём финансирования на участника;
  - конфликты интересов в консорциуме;
3. Слабый обмен информацией между проектами;
4. Ориентация на близкую перспективу;
5. Чрезмерная бюрократизация.

*Участие России в рамочных программах ЕС.* Россия — самый активный участник РП6 из стран, не состоящих в ЕС:

- 300 организаций приняли участие в РП6;
- 200 проектов, общий бюджет €2 млрд;
- доля выигравших проектов с российским участием — 11% (сравнимо с США и КНР).

## КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ШЕСТОЙ И СЕДЬМОЙ РАМОЧНЫХ ПРОГРАММ ЕС

**Шестая РП [11].** Европейская комиссия опубликовала материалы, всесторонне представляющие Шестую рамочную программу.

Общий бюджетный фонд программы составил €17,5 млрд и включал две основные статьи: расходы на реализацию программ Европейского Сообщества (€16,27 млрд) и программ Евратома (€1,23 млрд).

Программы Европейского Сообщества осуществлялись в рамках трёх групп:

- концентрация и интеграция научных исследований стран ЕС (€13,285 млрд);
- создание структуры европейского научного пространства (ЕНП — €2,655 млрд);
- укрепление ЕНП (€0,33 млрд).

*Концентрация и интеграция научных исследований стран ЕС.*

1. Геномика и биотехнологии для здравоохранения — €2,2 млрд. Новейшие разработки в области геномики и их применение для здравоохранения (€1,15 млрд). Борьба с основными серьёзными заболеваниями (€1,05 млрд).

2. Развитие информационных технологий в интересах общества — €3,6 млрд.

3. Нанотехнологии и нанонауки, многофункциональные материалы, новые устройства и производственные процессы — €1,3 млрд.

4. Аэронавтика и космос — €1,075 млрд.

5. Безопасность и качество продуктов питания — €0,685 млрд.

6. Устойчивое развитие, глобальное изменение климата и экосистемы — €2,12 млрд:

- устойчивые энергосистемы (€0,81 млрд);
- надёжный наземный транспорт (€0,61 млрд);
- глобальное изменение климата и экосистемы (€0,7 млрд).

7. Демографические проблемы и вопросы управления в обществе, основанном на знаниях, — €0,225 млрд.

8. Специальные направления, включающие расширенный спектр научных исследований, — €1,32 млрд.

Итого — €13,285 млрд, включая направления неядерных исследований Центра совместных научных исследований — Joint Research Centre, на которые запланировано выделить €0,76 млрд.

В Программе отмечено, что использование безопасных, надёжных и эффективных источников энергии является существенным фактором экономического роста и повышения уровня жизни как в экономически развитых, так и в развивающихся странах. Вместе с тем экономический прогресс приводит к значительному увеличению потребления энергии, что влечёт за собой негативные последствия: рост цен на топливо, загрязнение окружающей среды и ухудшение здоровья населения. Только с помощью согласованных действий международного масштаба, направленных на разработку перспективных технологий, включая использование уже существующих и поиск новых источников энергии, можно решить ряд проблем в области энергетики. Ядерная энергия, способствующая снижению выбросов в атмосферу углекислого газа, стала одним из таких источников.

Цель программы — более полное использование потенциала ядерной энергетики как на основе ядерного деления, так и ядерного синтеза, исследование надёжных, безопасных и экономически выгодных режимов благодаря совершенствованию современных и внедрению новых перспективных технологий.

Управляемый термоядерный синтез представлен в программе следующими разделами.

1.1. Физика синтеза (теория, моделирование и эксперимент), физика производства ядерного топлива, нагрева и удержания термоядерной плазмы, выделения энергии.

1.2. Физика и технология высокоомощных плазменных нагревательных систем (использование волн высокой частоты или быстрых атомов, методы управления неиндуктивным плазменным потоком, плазменное топливо и системы откачки).

1.3. Передовая плазменная диагностика, получение данных, их использование и интерпретация.

1.4. Технологии для будущего экспериментального реактора (в том числе сверхпроводники, дистанционное управление).

1.5. Долгосрочные технологические исследования и разработки (в том числе разработка низкорadioактивных материалов, воспроизводство трития, безопасность и охрана окружающей среды, изучение принципов проектирования термоядерного реактора).

1.6. Изучение социально-экономических аспектов термоядерного синтеза.

1.7. Безопасность эксплуатации термоядерных установок.

1.8. Безопасность топливного цикла.

1.9. Безопасность и эффективность будущих термоядерных систем.

1.10. Радиационная защита.

**Седьмая рамочная программа (7РП)** [12]. В настоящее время осуществляется Седьмая рамочная программа, которая вступила в силу 1 января 2007 г. и будет завершена в 2013 г. Программа разработана на основе предшествующих достижений и направлена на развитие европейского научного пространства, а также образование в области ядерной энергетики в Европе.

*Бюджет 7РП.* Общий бюджет 7РП, не считая программы Евратома, составляет €50,521 млрд на период 2007—2013 гг. Основная часть выделяемых средств пойдёт на финансирование программы «Сотрудничество» — €32,413 млрд. На выполнение исследований и образовательную деятельность в сфере ядерной энергетики в соответствии с договором Евратомом предусмотрено выделение €3,092 млрд на период 2007—2013 гг.

В ноябре 2003 г. в отчёте Комитета Европейского парламента по промышленности, внешней торговле, исследованиям и энергетике было предложено увеличить бюджет 7РП до €30 млрд на период 2007—2010 гг.

При подготовке текущих предложений ЕК приняла во внимание мнения, высказанные в ходе широких консультаций с другими институтами ЕС, в частности с Европейским парламентом, и странами — членами ЕС, а также высказанные научным сообществом, представителями промышленности и всеми заинтересованными лицами в сфере европейской исследовательской деятельности.

*Структура 7РП.* 7РП состоит из четырёх программ, соответствующих четырём основным компонентам европейских исследований:

— *Сотрудничество (Cooperation).* Поддержка будет оказана ряду направлений научно-исследовательской деятельности, выполняемых в рамках транснационального сотрудничества, от совместных проектов и сетей до координации национальных исследовательских программ. Между-

народное сотрудничество между ЕС и третьими странами является неотъемлемой частью этой деятельности. Данный компонент программы тесно связан с производственной сферой и состоит из четырёх подпрограмм:

совместные исследования будут представлять собой большую часть и основу финансирования исследований со стороны ЕС;

совместные технологические инициативы будут в основном создаваться на основе работы европейских технологических платформ;

координация исследовательских программ за пределами Сообщества;

международное сотрудничество;

— Идеи (Ideas). Программа усилит динамичность, творческую составляющую и преимущества европейской научно-исследовательской деятельности на передовых рубежах знаний во всех научных и технологических сферах, включая инженерные, социально-экономические и гуманитарные науки. Контроль над этим компонентом будет осуществлять Европейский совет по исследовательской деятельности;

— Люди (People). Количественное и качественное совершенствование людских ресурсов в сфере исследований и технологий в Европе посредством выполнения согласованных действий в рамках Программы, посвященные Марии Кюри (Marie Curie actions);

— Ресурсы (Capacities). Цель компонента — поддержать исследовательскую инфраструктуру, исследовательскую деятельность для развития малого и среднего бизнеса и исследовательский потенциал европейских регионов, а также стимулировать реализацию всего исследовательского потенциала Европейского Союза в его расширенном составе и способствовать построению эффективной и демократичной системы европейского образования.

Каждая из этих программ станет темой отдельной программы центра совместных исследований (деятельность, не связанная с ядерной энергетикой) и программы в рамках ядерных исследований и образовательной деятельности Евратома.

*Направления, определённые для 7РП.* 7РП демонстрирует прочную связь с предшествующей программой. Направления этой программы соответствуют основным сферам развития знания и технологий, в которых необходимы поддержка и стимулирование исследовательской деятельности с целью решения социальных, экономических, экологических и промышленных проблем Европы.

Предложено девять направлений в рамках бюджета ЕС:

— здравоохранение;

— продукты питания, сельское хозяйство, биотехнологии;

— информационные и коммуникационные технологии;

— нанонауки, нанотехнологии, материалы и новые производственные технологии;

— энергетика;

— окружающая среда и климатические изменения;

— транспорт и авионавтика;

— общественные, экономические и гуманитарные науки;

— космическая отрасль и исследования в области безопасности;

Кроме того, принята отдельная программа, финансируемая Евратомом в области ядерных исследований, которая будет действовать в период с 2007 по 2011 г. Она включает в себя два направления — «Термоядерная энергия» и «Ядерное деление и защита от радиации». Все программы предусматривают участие научно-исследовательских центров и учёных из третьих стран, включая Россию.

В случае отдельных промышленно значимых вопросов были определены темы, опирающиеся на различные европейские технологические разработки.

Новые элементы 7РП включают:

— акцент на исследовательские темы, а не на «инструменты»;

— существенное упрощение функционирования программы;

— акцент на развитие исследований, отвечающих требованиям европейской промышленности, посредством реализации технологических программ и новых совместных технологических инициатив;

- создание Европейского совета по исследовательской деятельности, финансирование лучшего, что есть в европейской науке;
- объединение компонента международного сотрудничества всех четырёх программ;
- развитие региональных научно-исследовательских центров;
- возможность разделения финансовых рисков, направленного на стимулирование частных инвестиций в исследовательскую деятельность.

18 декабря 2006 г. завершилась процедура принятия 7РП Евросоюзом, нацеленной на содействие ускорению экономического роста и повышение конкурентоспособности европейских экономик через инвестирование в знания, инновации и человеческий капитал. Программа, рассчитанная на семилетний период с 2007 по 2013 г., официально действует с 1 января 2007 г.

Научные организации из стран, не являющихся членами ЕС, но заключивших с ЕС соглашения о сотрудничестве в научно-технической области (в число таких стран входит и Россия), имеют значительные возможности участия в проектах 7РП, включая во многих случаях равноправное финансирование из бюджета программы.

**Постоянное обновление интернет-страницы CORDIS, посвящённой 7РП.** Интернет-страница CORDIS (Community Research & Development Information Service) представляет постоянно обновляемую информацию о научных проектах ЕС. Идёт работа по улучшению информационного обслуживания 7РП ЕС. В частности, создан раздел «Участие» (Participation), в котором освещаются требования и процедуры получения финансирования в рамках 7РП.

На сайте CORDIS также размещена информация о других инициативах для реализации так называемой Лиссабонской стратегии, направленной на превращение Европы в наиболее конкурентоспособную наукоёмкую экономику. Новый раздел сайта посвящён обзору новых инициатив ЕС, в частности, программе «Конкуренция и инновации» (Competitiveness and Innovation Framework Programme), Европейскому институту технологии, программам 2010 г. и региональным разработкам и исследованиям. Новая библиотека 7РП предлагает поисковые системы, помогающие пользователям получить консультации и познакомиться с официальными документами 7РП и других связанных с ней инициатив. Интернет-страница CORDIS также включает раздел «Что дальше» (What is Next), где размещена информация о дальнейших шагах в реализации программы, а в разделе «Сегодня — это завтра» (Today is the Future) освещаются текущие события, происходящие в Брюсселе.

Раздел новостей и событий сайта CORDIS обновляется ежедневно.

**Программа «Термоядерные исследования» в 7РП.** В Седьмой рамочной программе Евратома, которая выполняется с 2007 по 2013 г., заявлены долгосрочные цели термоядерных исследований. Долгосрочной целью является создание прототипа термоядерного реактора ДЕМО для термоядерных электростанций, которые должны быть безопасными, экологически чистыми и экономически конкурентоспособными. Конкретными целями 7РП являются разработка базы знаний для долгосрочной цели, а также реализация ИТЭР как следующего крупного шага в термоядерных исследованиях.

Программа, предложенная в 7РП, включает:

- строительство ИТЭР;
- исследовательские и опытно-конструкторские работы при подготовке работ на ИТЭР;
- разработку технологий для ДЕМО;
- исследовательские и опытно-конструкторские работы на долгосрочную перспективу.

Работы по ИТЭР включают подготовку площадки для сооружения реакторного комплекса и создание Международной организации ИТЭР, которая осуществляет руководство всеми текущими работами по подготовке сооружения реактора, набор персонала, общую техническую и административную поддержку работ, контролирует изготовление оборудования и строительство неядерных сооружений. Кроме того, в 2003 г. в Барселоне (Испания) была создана общеевропейская организация Термоядерный синтез для производства энергии (Fusion for Energy, F4E), задачами которой является выполнение европейских обязательств по сооружению ИТЭР, выполнение ЕС договора с Японией о «расширенном подходе» к развитию термоядерной энергетики и разработка термоядерного реактора ДЕМО.

В физической и технологической программах подготовки к эксплуатации ИТЭР будут использоваться возможности и ресурсы национальных термоядерных программ стран — участниц создания ИТЭР, в том числе JET.

Подготовка строительства ДЕМО предполагает активное развитие работ в области материаловедения для термоядерного синтеза, ключевых термоядерных технологий, а также создание специальной проектной группы по сооружению международной установки для исследования термоядерных материалов под воздействием облучения (International Fusion Materials Irradiation Facility — IFMIF). Она будет заниматься тестированием и моделированием материалов, предполагаемых для использования в реакторе ДЕМО. Кроме того, создаётся японо-европейская группа для концептуального проектирования, а также исследований по вопросам безопасности, охраны окружающей среды и социально-экономическим аспектам термоядерной энергетики.

Мероприятия, диктуемые требованиями долгосрочной программы, включают разработку более эффективных концепций для устройств с магнитным удержанием, схем с потенциальными преимуществами для термоядерных электростанций (например, завершение строительства стелларатора W7-X), теории и моделирования поведения термоядерной плазмы.

С учётом краткосрочных и среднесрочных потребностей ИТЭР, а также для дальнейшего развития термоядерного синтеза в программе учтены инициативы, направленные на обеспечение достаточных людских ресурсов, высокого уровня профессиональной подготовки и т.д.

### ЕВРОПЕЙСКАЯ ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА [13]

Десятилетия исследований по термоядерному синтезу, громадная база физических и технологических данных, продвинутое понимание физики термоядерной плазмы дают основание делать выводы о достоинствах и недостатках будущей термоядерной энергетики, направлениях и темпах её развития и областях применения. К числу несомненных достоинств термоядерной энергетики можно отнести следующие:

- практическую неограниченность ресурсов топлива (дейтерий, литий) и материалов для сооружения реактора, что снижает опасность межгосударственных политических конфликтов в борьбе за энергообеспечение своих стран;
- отсутствие эмиссии парниковых газов;
- полную внутреннюю безопасность, связанную с невозможностью разгона реактора в запредельные режимы из-за потери равновесия и выброса плазмы на стенку реактора, сопровождающегося поступлением охлаждающих паров материала стенки;
- возможность размещения термоядерной электрической станции в непосредственной близости от густонаселённых районов, поскольку, как показывают расчёты, даже при раскрытии корпуса реактора в атмосферу поступит не более 50 г трития, что не потребует эвакуации населения, которое живёт на расстоянии более 1 км от станции, имеющей электрическую мощность 1,5 ГВт;
- малую остаточную радиоактивность конструкционных материалов и отсутствие опасности их расплавления в случае потери теплоносителя;
- до 60—80% предполагаемых конструкционных материалов (ферритно-мартенситные стали, ванадиевые сплавы, SiC-композиты) могут быть подвергнуты ручной переработке менее чем через 100 лет выдержки, остальная часть может быть переработана дистанционно;
- непривлекательность термоядерного реактора как объекта атак террористов.

Европейская термоядерная программа состоит из Программы следующего шага (the Next Step Programme) и Долгосрочной программы (Long-Term Programme), которые осуществляются под ответственностью EFDA.

**Программа следующего шага.** Программа направлена на развитие технологий, которые позволят Европе и её международным партнёрам создать установку ближайшего будущего. Эта установка должна продемонстрировать овладение физикой, связанной с производством термоядерной энергии,

в эксперименте, который будет включать некоторые из важнейших технологий, необходимых для создания термоядерных электростанций. Такой установкой будет сооружаемый в Кадараше на юге Франции ИТЭР, который должен генерировать и поддерживать горение плазмы в течение продолжительного периода времени, вырабатывая значительное количество термоядерной энергии. Работа по этой программе направлена на полную проверку проекта ИТЭР и на то, чтобы сделать методы создания термоядерного реактора более рентабельными.

**Долгосрочная программа.** Её целью является удовлетворение в будущем потребностей человечества в энергии. Долгосрочная программа направлена на создание ядерных компонентов реактора, а также на разработку конструкционных материалов с низким уровнем активации, необходимых для демонстрационного реактора ДЕМО. Это позволит европейской промышленности в не столь отдаленном будущем создать экономически конкурентоспособные коммерческие термоядерные электростанции, безопасные и экологически чистые. EFDA также проводит изучение характеристик термоядерных демонстрационных реакторов в рамках программы PPCS и оценку их в рамках Программы социально-экономических исследований.

**Общая Европейская термоядерная программа** состоит из нескольких программ:

- Европейская программа исследований по физике УТС и техническим проблемам, связанным с плазмой [14];
- Европейская технологическая программа работ по УТС [15, 16, 17];
- Европейская материаловедческая программа работ по УТС [18];
- Программа работ по изучению экологии, безопасности и социально-экономическим аспектам термоядерной энергетики [19, 20].

**Европейская исследовательская программа работ по УТС с магнитным удержанием.** Работы по программе сосредоточены на подготовке физических исследований на ИТЭР, изучении и оценке тороидальных установок (в частности, стелларатора Wendelstein 7-X) и на работе существующих установок. В табл. 1 перечислены основные установки, работающие по Европейской термоядерной программе, и показан их основной вклад в программу.

Т а б л и ц а 1. Основные плазменные установки, работающие по Европейской термоядерной программе

Установка	Тип	Организации	Основной вклад в термоядерную программу	$R_0$ , м	$I_p$ , МА	$B_{\text{тор}}$ , Тл	Ввод в строй (реконструкция), год
ASDEX (Реконструкция)	Токамак	IPP	Дивертор для ИТЭР, Н-мода, взаимодействие с первой стенкой, продвинутые сценарии	1,62	2,0	3,9	1991
CASTOR	Токамак	IPP.CR	Исследования нижнего гибрида, флуктуации, развитие диагностик, поляризация плазмы на границе	0,4	0,03	1,5	1977
EXTRAP-T2	Пинч с обращённым полем	NFR	Стабилизация, изучение работы новой резистивной оболочки, флуктуации, сценарии	1,25	0,26	—	1994
FTU	Токамак	ENEA	Удержание при высокой плотности и высоком токе, изучение «магнитного шира», электронно-циклотронный нагрев	0,93	1,6	8,0	1990
ISTTOK	Токамак	IST	Изучение МГД-эффектов, диагностика с помощью пучка тяжёлых ионов	0,46	0,01	0,5	1992
JET	Токамак	EFDA & UKAEA	Работа с высокими интегрированными параметрами, развитие дивертора; рабочие сценарии, важные для ИТЭР; обращение с тритиевым и дистанционным оборудованием, работа на DT-плазме	2,96	5-7	3,8	1983 (1992)
MAST	Сферический токамак	UKAEA	Скейлинги токамаков с малым аспектовым отношением, физика сферического токамака при высокой температуре	0,7	>1	0,6	1999
RFX	Пинч с обращённым полем	ENEA	Физика пинчей с обращенным полем, тороидальное удержание и перенос, перспективы	2,0	<2,0	1,4	1992

TCV	Токамак	CRPP	Физика плазмы с строго ограниченной формой поперечного сечения, электронно-циклотронное поддержание тока	0,88	<1,2	1,4	1992
TEXTOR-94	Токамак	FZJ/FOM	Взаимодействие со стенкой, граница плазмы, динамический эргодический дивертор, удержание с дополнительным нагревом	1,75	0,8	2,8	1981 (1994)
TJ-II	Стелларатор	CIEMAT	Изучение удержания и высокого $\beta$ в установках с круглым магнитным полем	1,5	—	1,0	1997
TORE SUPRA	Токамак	CEA	Работа с длинным импульсом для условий «следующего шага» по тепловым нагрузкам на первую стенку. Подпитка топливом и поддержание тока	2,4	1,7	4,5	1998 (2000)
Wendelstein 7-X (W7-X)	Стелларатор	IPP	Изучение физики плазмы в продвинутых круглых стеллараторах. Демонстрация значимости стеллараторов	5,5	—	3,0	Запланировано до 2006 г.

Примечание. Организации и их расположение приведены на языке той страны, где расположена организация, чтобы при переводе не исказить правильность названия:

IPP — Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Гархинг, Германия;

IPP CR — Institute of Plasma Physics, Association. Прага, Чехословакия;

NFR — Swedish Natural Science Research Council. Programme for Visiting Scientists (программа для учёных, работающих за рубежом). Стокгольм, Швеция;

ENEA — Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente. Фраскати, Италия;

IST — Instituto Superior Tecnico. Лиссабон, Португалия;

EFDA — European Fusion Development Agreement. UKAEA — The United Kingdom Atomic Energy Authority. Абингдон (Abingdon), Великобритания;

UKAEA — the United Kingdom Atomic Energy Authority. Калэм (Culham), Великобритания;

ENEA — Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente. Падуя (Padova), Италия.

CRPP — Centre de Recherches en Physique des Plasmas, Plasma Physics Research Center. Лозанна, Швейцария;

FZJ/FOM/Etat Belge — Fachhochschule für Oekonomie. Юлих, Германия;

CIEMAT — Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. Мадрид, Испания;

CEA — Commissariat à l'Energie Atomique. Кадараш, Франция;

IPP — Max-Planck-Institut für Plasmaphysik. Грайфсвальд, Германия.

Дальнейшее накопление научной базы для успешной работы ИТЭР включает демонстрацию устойчивости, удержания, откачки и контроля плазмы при стационарных условиях работы. В программе отмечен интерес к исследованию работы плазмы на «продвинутых» режимах, например, на режимах с внутренними транспортными барьерами, и контролю мод на рекордных режимах.

В программу включено изучение пинчей с обращённым полем, таких, как RFX и EXTRAP-T2, самоорганизации и поддержания обращённой конфигурации, синхронизации мод, вопросы следующего этапа и реакторные перспективы.

Стеллараторы представлены в программе установками TJ-II и W7-X, на которых будут изучаться достоинства стеллараторов и сравниваться скейлинги для токамаков и стеллараторов. Одновременно будут проектироваться стеллараторы следующего поколения и изучаться перспективы стеллараторной программы.

**Системы с инерционным удержанием плазмы.** В этих системах выполнение критерия Лоусона достигается за счёт увеличения плотности плазмы в результате сжатия смеси. Основная физическая задача в этом направлении УТС — получение высоких степеней сжатия в таком малом количестве топлива, которое позволит использовать выделившуюся термоядерную энергию без разрушения камеры. Одними из первых таких систем были быстрые Z-пинчи, в которых требуемое сжатие предполагалось получить, пропуская большой электрический ток через разреженный газ, состоящий из смеси дейтерия и трития. Другими мощными драйверами могли бы быть ионные и электронные пучки. Наибольшего успеха в этом направлении предполагается достичь при использовании мощных лазеров.

*Лазерный термоядерный синтез (ЛТС) в Европе* [21]. В этой программе имеются следующие разделы:

- основные идеи ЛТС;
- параметры лазерной плазмы;
- существующие и строящиеся экспериментальные установки;
- схемы с прямым обжатием мишени;
- профилирование мощности нагрева;
- неустойчивости оболочки и методы борьбы с неустойчивостями;
- схемы с непрямым обжатием мишеней. Мишени для ЛТС;
- установки следующего поколения;
- реакторные перспективы лазерного термоядерного синтеза;
- концепция «быстрого зажигания» (Fast Ignition).

Основными являются программы HiPER (High Power Laser Energy Research) [22] и LMJ (Laser Megajoule) [23, 24], в которых используется идея быстрого зажигания (разделения процессов сжатия и нагрева мишени). Для этих целей создаются лазеры наносекундной длительности импульса с энергией 200—500 кДж, дополненные лазерами пикосекундной длительности импульса с энергией 50—100 кДж (для зажигания).

*Программа HiPER.* HiPER является европейским высокомоощным исследовательским лазерным оборудованием, предназначенным для демонстрации возможностей лазерного термоядерного синтеза в качестве будущего источника энергии. HiPER проектируется таким образом, чтобы проводить на нём исследование в широкой области новых наук, в том числе изучение экстремальных материалов, проблем астрофизики в лабораторных условиях, компактных ускорителей частиц и ряда фундаментальных физических проблем.

Демонстрация научного доказательства возможности реализации ЛТС ожидается в 2010—2012 гг. в рамках текущей международной программы. После этого необходимо переходить от научных доказательств к реакторным разработкам. HiPER обеспечивает следующий шаг в этом направлении.

В 2005 г. программа HiPER завершила предварительное исследование с изложением возможных подходов и аргументов для его строительства. Эти исследования получили положительный отзыв от ЕС в июле 2007 г., и программа перешла на подготовительную стадию разработки проекта в начале 2008 г. Проработка технического проекта ожидается с 2011 или 2012 г. Построят HiPER не раньше, чем через 10 лет (2020 г.).

PETAL-лазер (PETawatt Aquitaine Laser), сооружаемый в Аквитании (Франция), будет использоваться после определённых доработок на первых этапах работы HiPER для решения физико-технических проблем, имеющих стратегическое значение для HiPER. PETAL-лазер представляет собой прекрасный инструмент для научных исследований. Он позволит испытывать технологии, которые будут использоваться на оборудовании HiPER. PETAL-лазер генерирует импульсы мощностью от 0,5 до 3,5 кДж в течение 5 пс [25].

*Программа LMJ.* Французский комиссариат по атомной энергии (CEA) начал строительство мегаджоульной лазерной системы (LMJ) в лаборатории CESTA близ Бордо. LMJ будет краеугольным камнем программы CEA по моделированию систем для лазерного термоядерного синтеза. Лазерная система состоит из 240 лазерных линий из неодимового стекла, предназначенных для доставки импульса с энергией 2 МДж и длиной волны 0,35 мкм к мишени для экспериментов с высокой плотностью энергии и в конечном итоге получить зажигание и горение D—T-плазмы в лабораторных условиях. Длительность импульса может быть настроена между 0,2 и 25 нс.

Разработка концепции и проекта системы была завершена в 1999 г. Затем в 2003 г. в лаборатории CESTA была продемонстрирована работа одного пучка из лазера LIL (Ligne d'Integration Laser) с энергией 9,5 кДж ультрафиолетового света (0,35 мкм) при длине импульса 9 нс в качестве инженерного прототипа лазера LMJ.

Строительство LMJ было начато в 2003 г. и в настоящее время завершено. Ожидалось, что демонстрация эффективности работы 240 пучков произойдёт в 2009 г. В соответствии с графиком создания LMJ первые эксперименты должны начаться в 2012 г.

**Европейская технологическая программа работ по управляемому термоядерному синтезу (The European Fusion Technology Programme)** [15, 16, 17]. Программа имеет два направления развития: программу следующего шага и долгосрочную. Ответственность за выполнение этих программ возложена на EFDA. EFDA обеспечивает состав, структуру и выполнение программ. Широкий спектр деятельности по Технологической программе делится на несколько областей, а также на ряд проектов, исследований и других мероприятий. В их числе Программа концептуальных исследований реактора ДЕМО и энергетического реактора (PPCS), а также мероприятия по коллективному использованию термоядерной установки JET. Технологическую программу EFDA можно условно разделить на следующие области деятельности:

- Физика:  
физика процессов в плазме токамаков;  
системы нагрева и поддержания тока;  
диагностика;  
дистанционное управление;
- Вакуумная камера/Внутрикамерное оборудование:  
вакуумная камера, бланкет, конструкционные и иные материалы;  
компоненты реактора, обращённые к плазме;  
сборка, обслуживание, в том числе дистанционное обслуживание;
- Конструкция сверхпроводящих магнитов;
- Производство трития и материалы, с ним связанные:  
бридинговый бланкет;  
разработка материалов для производства трития;
- Нейтронный источник IFMIF;
- Безопасность и окружающая среда;
- Системные исследования:  
реактор ДЕМО и энергетическая термоядерная электростанция (программа PPCS);
- Подготовка площадки ИТЭР;
- Технология JET;
- Исследования по нейтронной физике и ядерной технологии;
- Технологический проект систем по дополнительному нагреву и поддержанию тока.

**Европейская материаловедческая программа работ по управляемому термоядерному синтезу (The European Fusion Materials Research Programme)** [18]. **Последние результаты и перспективы.** Европейская долгосрочная материаловедческая программа направлена на исследование и разработку материалов и основных технологий, необходимых для создания реактора ДЕМО и, в частности, конструкционных материалов для бланкета и дивертора. Стратегия программы основывается на предположении об «ускоренном ходе событий»: эксплуатация ИТЭР начнётся после 2018 г., установка IFMIF с половинной мощностью войдёт в строй в 2017 г., проект ДЕМО стартует примерно в 2022 г.

В Европе при концептуальном изучении термоядерных энергетических установок (PPCS) было исследовано и обосновано несколько типов воспроизводящих тритий бланкетов и диверторов (табл. 2).

В процессе исследований и обоснований были использованы как умеренные, так и передовые экстраполяции как по физике, так и по технологии. Такое планирование определяет временную программу разработки конструкционных материалов. В ЕС считают, что важные для ДЕМО исследовательские модули бланкета должны устанавливаться в ИТЭР с первого дня его работы. Таким образом, полностью разработанные и проверенные вплоть до 3 сна материалы должны быть готовы к 2018 г. Для начальных стадий работы ДЕМО рассматриваются две различные концепции охлаждаемого гелием воспроизводящего тритий бланкета: в одном из них эвтектика Pb—17Li используется в качестве бриддерного материала и размножителя нейтронов, во втором — используется засыпка литиевых керамических шариков как бриддер и бериллий как нейтронный размножитель (модели АВ и В). Параллельно с моделями АВ и В рассматривались и другие модели бланкетов, представленные в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Характеристики бланкетов промышленных термоядерных реакторов, разработанных по программе PPCS

Характеристики	Модель				
	A	AB	B	C	D
	<b>Бланкет</b>				
Конструкционный материал	Eurofer*	Eurofer*	Eurofer*	Eurofer*	SiC/SiC
Теплоноситель	Вода	Гелий	Гелий	LiPb/He	LiPb
$T$ теплоносителя, Вх./вых., °C	285/325	300/500	300/500	480/700 300/480	700/1100
Бридер	LiPb	LiPb	Li <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	LiPb	LiPb
Размножитель нейтронов	Pb из LiPb	Pb из LiPb	Be	Pb из LiPb	Pb из LiPb
$K$ трития	1,06	1,13	1,12	1,15	1,12
	<b>Дивертор</b>				
Конструкционный материал	CuCrZr	Сплав вольфрама	Сплав вольфрама	Сплав вольфрама	SiCf/SiC
Армирующий материал	W	W	W	W	W
Теплоноситель	Вода	Гелий	Гелий	Гелий	LiPb
$T$ теплоносителя, вх./вых., °C	140/170	540/720	540/720	540/720	600/990

\* Eurofer — низкоактивируемая ферритно-мартенситная сталь.

В процессе исследований и обоснований были использованы как умеренные, так и передовые экстраполяции как по физике, так и по технологии. Такое планирование определяет временную программу разработки конструкционных материалов. В ЕС считают, что важные для ДЕМО исследовательские модули бланкета должны устанавливаться в ИТЭР с первого дня его работы. Таким образом, полностью разработанные и проверенные вплоть до 3 сна материалы должны быть готовы к 2018 г. Для начальных стадий работы ДЕМО рассматриваются две различные концепции охлаждаемого гелием воспроизводящего тритий бланкета: в одном из них эвтектика Pb—17Li используется в качестве бридерного материала и размножителя нейтронов, во втором — используется засыпка литиевых керамических шариков как бридер и бериллий как нейтронный размножитель (модели AB и B). Параллельно с моделями AB и B рассматривались и другие модели бланкетов, представленные в табл. 2.

Соответственно стратегия материаловедческой программы фокусируется на:

— низкоактивируемой ферритно-мартенситной стали 9CrWVTa, получившей название Eurofer, которая рекомендуется в качестве конструкционного материала для различных моделей бланкетов ДЕМО. Сталь Eurofer будет использоваться в экспериментальных модулях бланкета, которые будут исследоваться на ИТЭР. Рабочая область температур Eurofer от 250/300 °C до 550 °C. Рабочая температура Eurofer ограничивается гелиевой охрупчиваемостью и снижением пластичности под облучением при температуре выше 500 °C;

— жаростойкой стали, дисперсионно упрочненной оксидом, которая рассматривается в качестве основного кандидатного материала для перспективных концепций бланкета и материала опорных конструкций газоохлаждаемого дивертора. Основная цель — улучшить сопротивление ползучести металла при высокой температуре и соответственно увеличить рабочую температуру для будущих термоядерных энергетических реакторов вплоть до 650 °C (использующих материалы Eurofer ODS) и даже на 50—100 °C выше для разрабатываемых наноконпозиционных ферритных сталей (NFS steel);

— керамических композитах SiCf/SiC для долгосрочной перспективы;

— вольфрамовых сплавах для охлаждения газом диверторов. Разработка вольфрамовых сплавов для температуры 600—1200/1300 °C является реальной проблемой и потребует совместных международных усилий.

**Совместная программа исследований по экологии, безопасности и социально-экономическим аспектам термоядерной энергетики** [19, 20]. В ходе выполнения программы работ по изучению социально-экономических аспектов термоядерной энергетики необходимо:

— разработать усовершенствованные вычислительные программы для оценки стоимости термоядерных энергетических установок, коммерческой стоимости производимой ими энергии и влияния затрат на конкурентоспособность;

- оценить побочные последствия (положительные или отрицательные) производства энергии реакторами синтеза;
- сделать экономическую оценку вклада реакторов синтеза в устойчивое развитие энергетики и пригодности реакторов синтеза как источника энергии;
- рассмотреть факторы, влияющие на социальное принятие термоядерных реакторов;
- ввести термоядерные реакторы в модели сценариев будущего обеспечения энергией и проанализировать соответствие требованиям этих сценариев, рассмотреть влияние на окружающую среду и определить соответствующие ограничения;
- оценить долю производства энергии термоядерными реакторами по сравнению с другими источниками энергии.

Эти задачи приведены в Программе работ, плане и основных этапах деятельности (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Программа работ, план и основные этапы деятельности

Шифр	Работы
A	Системный анализ термоядерных энергетических реакторов
A1	Определение эталонных моделей для сравнительных расчётов
A2	Системный анализ концепций термоядерных электростанций и экономика производства электроэнергии энергетическими системами
A3	Обеспечение трудовыми и материальными ресурсами термоядерной энергетики (люди, оборудование, сырьё и конструкционные материалы)
A4	Анализ возможности строительства многоблочных термоядерных станций
B	Прямые затраты на производство термоядерной энергии
C	Внешние затраты и выгода
C1	Изучение внешних затрат производства электроэнергии термоядерными электростанциями и сравнение их с существующими, в том числе с реакторами деления (обращение с отходами, захоронение радиоактивных отходов, зависимость от места расположения станции и т.д.)
C2	Важность разнообразия типов энергетических станций в системе производства энергии и термоядерный управляемый синтез как дополнительный источник энергии
C3	Экономический выигрыш от сопутствующих результатов выполнения термоядерной программы R&D
C4	Применение термоядерных установок не для производства электроэнергии (тепловые станции, опреснительные установки, установки для производства водорода и т.д.)
D	Социальная привлекательность
D1	Требования выгоды (полезности) для социального принятия
D2	Публичное отношение к энергетическим источникам
D3	Публичное отношение к новым технологиям, сложности, экспертизе
D4	Публичное отношение к безопасности, влиянию на окружающую среду и лицензированию
D5	Роль термоядерной энергетики в устойчивости глобальной энергетической стратегии
D6	Отношение к устойчивому развитию энергетики и разработке новых энергетических технологий
D7	Изучение регионального отношения
E	Сценарии производства энергии в будущем
E1	Изучение термоядерных установок по мировым моделям, разработанным в кооперации институтов заинтересованных стран
E2	Изучение термоядерных установок по национальным и региональным моделям
E3	Системный анализ энергетических систем, включающих в свой состав термоядерные энергетические станции (производство энергии, распределение энергии, передача энергии, резервные станции, оптимизация состава энергетической системы и т.д.)
F	Общие оценки и сравнение
F1	Системный анализ «важных» факторов, влияющих на экономику термоядерных реакторов
F2	Разработка социально-экономических целей для термоядерного управляемого синтеза: стоимость, безопасность, социальное принятие и т.д. по отношению к другим источникам энергии
F3	Формулирование оценок социально-экономических аспектов термоядерного управляемого синтеза и сравнение с другими источниками энергии

Изучение социально-экономических аспектов термоядерного синтеза проводилось в течение нескольких лет в пределах программ по термоядерному синтезу Европейского Союза, Соединённых Штатов Америки и Японии. Это изучение обеспечивает экологическое и социально-экономическое понимание, которое помогает вести научно-технические работы по программе термоядерного синтеза.

**Существующее положение.** Большинство работ, которые были выполнены в настоящее время участниками исследований, могут быть сгруппированы в четыре категории:

- исследования концепций термоядерных электростанций и стоимости генерируемой электроэнергии;
- внешние затраты производства электроэнергии термоядерной электростанцией и другими источниками электроэнергии;
- факторы, влияющие на социальное восприятие термоядерной технологии;
- место термоядерного синтеза в будущих сценариях энергетических технологий, в которых экологическое воздействие на окружающую среду играет ключевую роль.

**Системный анализ концепций термоядерных электростанций и экономика производства электроэнергии.** Анализ, основанный на современном понимании физики плазмы и конструкционных материалов, которые могут появиться в ближайшее время (мартенситные стали), показал, что прогнозируемая стоимость электричества, произведённого термоядерной станцией, будет примерно на 60% более дорогой, чем электричества, произведённого при сжигании ископаемых топлив или при использовании ядерной энергетики деления, и будет грубо сопоставима с технологиями, основанными на использовании возобновляемых источников энергии. Термоядерные станции будут обеспечивать базовую часть производства электроэнергии, в то время как это не может быть экономически выгодно с использованием технологии, основанной на возобновляемых источниках энергии. Использование перспективных конструкционных материалов и продвинутой физики плазмы привело бы стоимость электроэнергии, генерированной термоядерными электростанциями, к стоимости электроэнергии, производимой реакторами деления или технологиями, связанными с использованием ископаемых топлив. Различия между социально-экономическими исследованиями, проведёнными в Японии, ЕС и США, связаны с различиями в технических решениях и стратегических целях.

**Внешние затраты при производстве электроэнергии термоядерными электростанциями и другими источниками энергии.** Внешние затраты энергетических технологий связаны в основном с такими явлениями, как выбросы загрязняющих газов, включая парниковые газы, авариями и т.д.

Такие затраты удорожают производство электроэнергии, если «не парируются» налогами на выбросы и подобными механизмами. Термоядерный синтез будет иметь значительные преимущества в этой области. Однако существенная работа необходима, чтобы улучшить существующие вычислительные программы, использующиеся для оценок, выполненных до настоящего времени. Результаты показывают, что общее количество затрат при использовании ископаемого топлива и термоядерной энергии сопоставимо.

**Факторы, влияющие на социальную привлекательность термоядерной технологии.** Безопасность термоядерной технологии и её экологические преимущества были отмечены как ключевые факторы, влияющие на её социальную привлекательность. Совместные действия в этой области уже определены в пределах других существующих подзадач по исследованию экономики, безопасности и экологии термоядерных энергетических установок. Изучение социальной привлекательности новых технологий находится в очень ранней стадии и требует дальнейшего развития. Это включает доверие к термоядерной технологии, обеспечение финансирования со стороны правительства и желание стабильности.

**Место термоядерной технологии в будущих энергетических сценариях, в которых влияние энергетических технологий на экологию играет ключевую роль.** Вероятный вклад термоядерной технологии в генерацию энергии в будущем будет зависеть от затрат на все формы производства энергии вместе с ограничениями на их производство, возникающими из социальных приемлемых проблем, желанием избежать изменения климата и других экологических деградаций.

Эти проблемы можно рассмотреть экономически последовательным сценарием моделирования. В европейских исследованиях вариационные методы использовались, чтобы найти самый дешёвый с учётом дисконтирования способ получения электричества для Европы. Поскольку термоядерная энергетика не имеет значительного влияния на экологию, это может дать возможность легко приспособить её под диапазон ограничений. Результаты показали, что при таком сценарии термоядерная технология может освоить примерно 20—25% энергетического рынка к концу этого столетия. Термоядерная энергетика не может освоить большой рынок из-за присущих ей небольших скоростей развития. Было определено, что удовлетворение требований по обеспечению электроэнергией без использования термоядерной технологии было бы более дорогим. Те же результаты при подобных исследованиях были получены и в Японии.

**Новые совместные социально-экономические исследования.** Результаты предварительных исследований показывают, что разработка термоядерной технологии может принести существенные эко-

номические выгоды. Несколько вариантов могут быть рассмотрены в зависимости от потребности в термоядерной энергии и при приемлемом риске. В настоящее время предпочтительным вариантом является разработка экспериментального термоядерного реактора ИТЭР и источника термоядерных нейтронов IFMIF, чтобы исследовать конструкционные материалы для термоядерных реакторов.

Последующие исследования социально-экономических проблем термоядерной технологии должны иметь целью:

- развивать лучшее понимание и усовершенствованные модели в следующих областях:
  - разработка системных вычислительных программ, анализирующих термоядерные энергетические станции, и исходных данных для такого анализа;
  - оценка коммерческой стоимости энергии, генерируемой термоядерной станцией;
  - оценка последствий, связанных с производством термоядерной энергии;
  - экономическая оценка вклада термоядерной технологии в устойчивое развитие и работоспособность термоядерных станций как источника энергии;
  - исследование факторов, влияющих на социальное восприятие термоядерной технологии;
  - учёт в моделях термоядерной технологии будущих сценариев обеспечения энергией, требований, стоимости и экологических ограничений;
- применять упомянутые методологии к оценкам термоядерных станций и осуществлять сравнение с другими источниками энергии.

## ВЫВОДЫ

С целью углубления экономической интеграции шесть государств Европы в 1957 г. учредили Европейское экономическое сообщество и Европейское сообщество по атомной энергии.

Для обеспечения общей структуры, координации и взаимодействия европейских национальных участников термоядерных исследований в рамках ЕС в 1999 г. была создана Организация для реализации общеевропейского соглашения о разработках в области термоядерной энергии.

Для обеспечения целенаправленных и скоординированных работ европейских термоядерных ассоциаций в рамках ЕС была разработана иерархически построенная структура научно-исследовательских, проектно-конструкторских и учебных программ в области управляемого термоядерного синтеза.

Основными инструментами ЕС по проведению и финансированию научно-исследовательской деятельности по программам в области термоядерного синтеза являются так называемые рамочные программы (РП).

Цели европейских рамочных программ:

- повышение конкурентоспособности европейских фирм;
- выход Европы на передовые позиции в науке;
- промышленное внедрение результатов исследований;
- создание единого научного пространства.

В настоящее время осуществляется Седьмая рамочная программа. Программа вступила в силу 1 января 2007 г. и будет завершена в 2013 г. Программа разработана на основе предшествующих достижений и направлена на создание европейского научного пространства (European Research Area), а также на развитие экономики и системы образования в Европе.

В Седьмой рамочной программе Евратома заявлены долгосрочные цели термоядерных исследований. Долгосрочной целью является создание прототипа термоядерного реактора (ДЕМО) для термоядерных электростанций, которые должны быть безопасными, устойчивыми, экологически чистыми и экономически конкурентоспособными. Конкретными целями 7РП являются рост базы знаний для долгосрочной цели, а также реализация ИТЭР как следующего крупного шага в термоядерных исследованиях.

Общая Европейская термоядерная программа состоит из нескольких программ:

- Европейской исследовательской программы работ по физике термоядерной плазмы и инженерным проблемам, связанным с плазмой;
- Европейская технологическая программа работ по УТС;
- Европейская материаловедческая программа работ по УТС;

— Программа работ по изучению экологии, безопасности и социально-экономическим аспектам термоядерной энергетики.

Работа выполнена в рамках государственного контракта с Росатомом № 1013, 2009 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **EFDA**: New Horizons for EFDA. OAW Association Day meeting, December 2007 Duarte Borba on Behalf of Jerom Pamela (EFDA Leader).
2. **Milochевич A., Charron S., Hardeman F., Fucks I., Bovy M.** The Pofficad project brought into perspective. Contract FU05-CT2001—00196, TW-TERE/FPOA, December 2003.
3. **EFDA, Borrelli G., Cook I. et al.** Socio-Economic Research on Fusion. Summary of EU Research 1997—2000. — EFDA-RE-RE-1, July 20, 2001.
4. **CIEMAT, Schneider T., Lepicard S. et al.** Socio-Economic Research on Fusion, SERF 2 (1999—2000). January 2001, Final Report.
5. **CIEMAT**, Energy Area: Energy Systems Analysis. Present Situation. Tuesday, February 20, 2007.
6. **Cabal H., Hallberg B. et al.** Environmental externalities of a future fusion plant. — In: 26th EPS Conf. on Control. Fusion and Plasma Physics. Maastricht, 14—18 June 1999, ECA, vol. 23J, p. 1453—1456.
7. **Cook I., Marbach G. et al.** Results, Conclusions and Implications of the SEAFP-2 Programme. Invited paper, ISFNT-5.
8. **EFDA**. Safety and Environmental Impact of Fusion. April 2001, EFDA — S- RE-1.
9. **EFDA**. A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants. In: Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS). April 13, 2005, EFDA-RP-RE-5,0.
10. **Кулямин В.В., Пакулин Н.В.** Роль рамочных программ ЕС в глобализации научных исследований. — М.: Институт системного программирования РАН.
11. **Шестая** рамочная программа ЕС 2002—2006 гг. (6ПП). The Sixth Framework Programme of the European Community for Research. Technological Development and Demonstration activities.
12. **Седьмая** рамочная программа начинается в 2007 году и завершается в 2013 году; [http://www.nnm.ru/imagez/gallery/doci/mos/mostmost-1149086322\\_i\\_3480\\_full.jpg](http://www.nnm.ru/imagez/gallery/doci/mos/mostmost-1149086322_i_3480_full.jpg).
13. **Energy** research. The Euratom Fusion Programme and Associations. [http://ec.europa.eu/research/energy/print.cfm?file=/comm/research/energy/fu/fu\\_rd/art...26.11.2008](http://ec.europa.eu/research/energy/print.cfm?file=/comm/research/energy/fu/fu_rd/art...26.11.2008).
14. **Antidormi R., Bartlett D., Bruhns H.** The European Fusion Programme. European Commission, DG Research, Directorate J, Fusion Association Agreements Ruede la Loi 200, 1049, Brussels, Belgium.
15. **Malein A.** The fusion technology programme of the European Community, Commission of the European Communities, D.G. Science, Research and Development (DG XII). — Thermonuclear Fusion, 200 rue de la Loi, B-1049, Bruxelles, Belgium.
16. **FUSION** — Fusion Technology Programme 2003—2006 Description. <http://akseli.tekes.fi/opencms/opencms/OhjelPortaali/ohjemat/FUSION/en/ohjelm...30.06.2009>.
17. **Fusion** Technology. Annual Report of the Association EURATOM-CEA 2006 (full report). Compiled by Salmon Th. and Vagueres F. Le, DRF/EUR-2007.001.
18. **Diegele E., Andreani R. et al.** European Fusion Materials Research Program—Recent Results and Future Strategy. — Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy N°16, Madison, Wisconsin, ETATS-UNIS (14/09/2004) 2005, vol. 47, № 4 (499 p.) [Document: 7 p.] (14 ref.), p. 829—835 [7 page(s) (article)]
19. **IEA** Cooperative Programme on Environmental, Safety and Socio-Economic Aspects of Fusion Power (IEA-ESE/FP). Work Plans, Status 8 December 2003.
20. **IEA-ESE** Task 7 (Annex III): Socio-Economic Aspects (International Energy Agency—Environmental, Safety and Economic). December 2003.
21. **Розанов В.В.** Лазерный термоядерный синтез: современные программы США, Европы и Японии. — М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.
22. **HiPER**. <http://en.wikipedia.org/wiki/HiPER>.
23. **Ebrardt J., Chaput JM.** **LMJ Project status**. The Fifth Intern. Conf. on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2007). IOP Publishing Journal of Physics: Conferens Series 112, 2008, 032005.
24. **Fleurot N., Claude C., Bourgade J.** The Laser Megajoule (LMJ) Project dedicated to inertial confinement fusion: Development and construction status. CEA/DAM Ile de France, BP12, 91680, Bruyeres le Chatel, France. 19 August 2005.
25. **Laubaune Ch.** Director of Institute Lasers and Plasmas. PETAL (Petawatt Aquitaine Laser). ISTC workshop. Moscow, 25/11/2008.

Обзор поступил в редакцию 15 декабря 2009 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2010, вып. 1, с. 50—67.