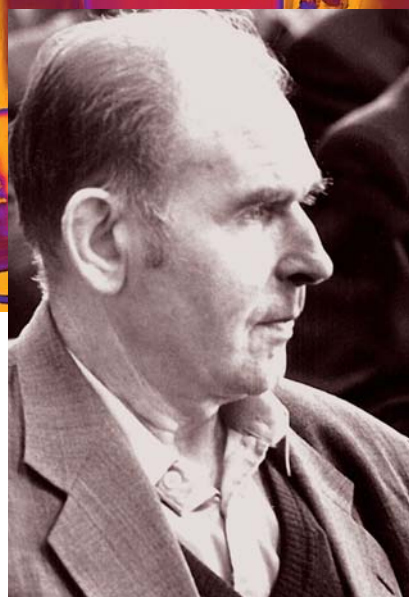


Э. П. КРУГЛЯКОВ

ЗВЕЗДНЫЕ РЕАКТОРЫ

на пути к термоядерной энергетике



КРУГЛЯКОВ Эдуард Павлович — действительный член Российской академии наук, доктор физико-математических наук, профессор, советник РАН. Заместитель директора Института ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (Новосибирск) (1988—2005). Специалист в области физики плазмы, конденсированных сред, лазеров. Лауреат Государственной премии СССР (1986), Премии им. Л. А. Арцимовича (2001)

Что бывает солнечной, ветровой, топливной, атомной? Правильно — энергетика. А вот термоядерной энергетике не существует — сегодня. Хотя термояд является поистине неисчерпаемым и достаточно безопасным источником энергии. Однако до сих пор он нашел себе единственное «практическое» применение — в водородной бомбе...

По мнению академика Л. А. Арцимовича, внесшего крупнейший вклад в развитие термоядерных исследований, за всю историю естествознания физики еще ни разу не сталкивались с проблемой, сопоставимой по сложности с управляемым термоядерным синтезом. А ведь решение этой проблемы обещает окончательно избавить человечество от энергетического голода.

Термоядерная (как, впрочем, и ядерная) энергетика базируется на эйнштейновском дефекте масс*. При слиянии легких ядер в более тяжелые эта «потерянная» масса превращается в энергию, которую несут выделяющиеся при синтезе нейтроны, протоны, альфа-частицы и т. п. Именно таким термоядерным реакциям обязаны своим существованием звезды, в том числе и ближайший к нам *желтый карлик* класса G-2 — наше Солнце. И соблазн для человечества «припасть» к этому вселенскому энергетическому источнику крайне велик.

*Так называется разность между суммой масс взаимодействующих тел до (в свободном состоянии) и после взаимодействия. *Прим. ред.*

Историческая справка

Первое упоминание о «звездном» термояде относится к 1928 году. Родоначальниками идеи были Р. Аткинсон, Ф. Хоутерманс и Г. Бете, впоследствии Нобелевский лауреат. Свою лепту в формирование представлений о термоядерных реакциях внес и известный физик Г. А. Гамов. В 1932 году после его доклада в Президиуме Академии наук ему сделал фантастическое предложение член советского правительства Н. И. Бухарин. «Я получал в свое распоряжение на несколько минут один раз в неделю в ночное время полную электрическую мощность Московского индустриального района, чтобы выделить ее в толстом медном проводнике, насыщенном маленькими пузырьками литий-водородной смеси. Я отклонил это предложение и рад, что принял такое решение, поскольку в то время из этого определенно ничего бы не вышло».

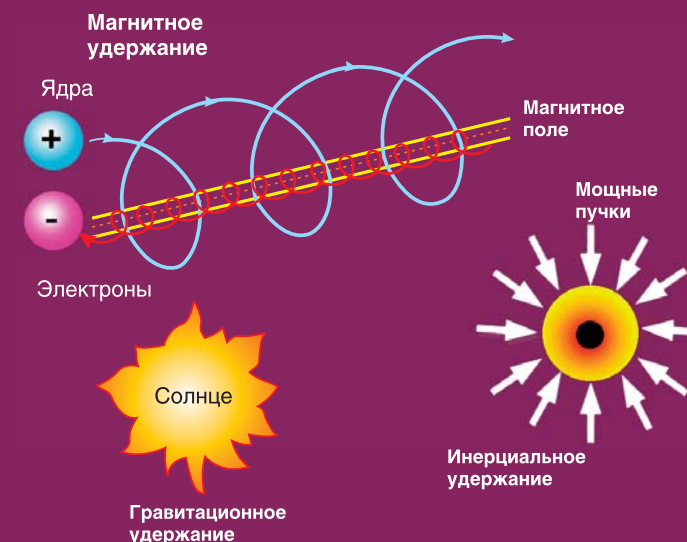
Систематические же работы по *управляемому термоядерному синтезу* (УТС) начались в 50-х годах прошлого столетия сразу в трех странах: Англии, США и Советском Союзе. И, как нетрудно догадаться, поначалу далеко не в мирных целях. Естественно, все исследования были совершенно секретными — вплоть до поездки в 1956 году главы государства Н. С. Хрущева и академика И. В. Курчатова в Англию, где последний сделал научный доклад об экспериментальных термоядерных исследованиях в СССР.

На конференции по мирному использованию атомной энергии в 1958 году все три страны «раскрылись», и выяснилось, что большинство подходов к разработке управляемого ядерного синтеза во всех странах оказались абсолютно схожими.



Г. И. Будкер (в центре) и И. В. Курчатов (справа)

Удержать высокотемпературную плазму, необходимую для термоядерного синтеза, можно разными способами. На Солнце и других звездах плазму удерживают силы тяготения. Для земных условий ученые предлагают разные способы: использовать «инерциальное» удержание, при котором мишень с термоядерным горючим быстро обжимается тем или иным способом; использовать магнитное поле. Других возможностей нет



О ловушках для плазмы и термоядерном топливе

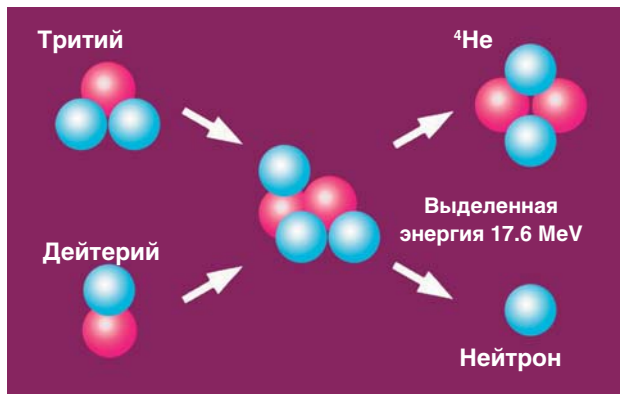
Что нужно для запуска управляемого ядерного синтеза? Процесс самоподдерживающихся термоядерных реакций может происходить лишь в *плазме* — ионизованном газе, состоящем из положительно заряженных ядер и электронов. Это состояние характерно для подавляющей части вещества Вселенной, включая звезды.

Основная проблема состоит в том, что для УТС необходимо какое-то время удерживать высокотемпературную плазму от разлетания, изолировав ее от стенок реактора. Как это сделать? На Солнце и звездах плазму надежно удерживает гравитация. Поэтому хотя максимальная температура на том же Солнце «всего» 16 млн градусов, реакции там тем не менее идут. Увы, в земных условиях плазму для этого требуется нагреть до 100–200 млн градусов.

Хотя физиками было предложено довольно много систем удержания горячей плазмы, но все их можно подразделить на два класса. В первом применяется так называемое *инерциальное удержание* (которое и использовалось для создания водородного оружия). При этом специально подготовленная мишень, содержащая термоядерное горючее высокой плотности, быстро обжимается тем или иным способом. Например, ионными или лазерными пучками, рентгеновским излучением. Во втором случае термоизоляция плазмы достигается с помощью магнитного поля.

В 1950 году советские физики А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм выдвинули идею *замкнутого магнитного термоядерного реактора*. Годом позже американец Л. Спитцер предложил идею *стелларатора*. Вообще-то Сахаров рассматривал обе эти концепции. Вот как он рассуждал: поместим плазму в *тороид* (полый внутри бублик) и создадим тороидальное магнитное поле. В этом случае термоизоляция поперек поля будет обеспечена, однако плазма начнет вытесняться в область слабого магнитного поля. Положение можно исправить, создав с помощью системы внешних проводников винтовое магнитное поле в самой плазме. Собственно, это и есть стелларатор.

Тяжелый изотоп водорода — дейтерий, в ядре которого кроме протона дополнительно содержится нейтрон, — присутствует в обычной воде. Концентрация его в воде невелика: на 6 тысяч атомов обычного водорода приходится всего 1 атом дейтерия. Если дейтерий, содержащийся в литре воды, извлечь, ионизировать и нагреть до температур, при которых удастся преодолеть кулоновское расталкивание, при слиянии его ядер выделится столько энергии, сколько ее содержится в 300 л бензина!



Энергию для термоядерного реактора можно получать в разных реакциях. Одна из наиболее значимых и энергетически выгодных — реакция T-D (сверхтяжелого изотопа водорода трития и тяжелого изотопа водорода дейтерия). Она дает нейтрон и альфа-частицу, выделяя при этом довольно большое количество энергии, 80% которой (14 МэВ) приходится на долю нейтрона

Но Сахаров отказался от этой идеи, посчитав ее чересчур сложной. Он предложил другой вариант: одновременно с созданием тороидального магнитного поля пропустить ток по плазме вдоль тороида. В этом случае в плазме также образуется винтовое магнитное поле. Последнее предложение и было реализовано в СССР, а подобные системы стали называться в дальнейшем *токамаками*. Стелларатор же Спитцера действительно строился на основе более сложных магнитных обмоток.

Но вернемся к концепции Сахарова. При обосновании первого термоядерного реактора он поначалу исходил из возможности использования D-D реакции (D — стабильный тяжелый изотоп водорода).

Вскоре, однако, стало понятно, что по крайней мере первые термоядерные реакторы должны работать на основе синтеза с участием ядер стабильного тяжелого (D) и радиоактивного сверхтяжелого (T) изотопов водорода. Дело в том, что D-D реакция с выделением избыточной энергии возможна при температуре порядка миллиарда градусов. А вот D-T реакция происходит в существенно более «холодной» плазме, при температурах 100–200 млн градусов.

Почти одновременно с упомянутыми стали развиваться и альтернативные концепции. Наиболее популярной оказалась концепция так называемой *открытой магнитной ловушки*, предложенная в 1953 году независимо двумя учеными — Г. И. Будкером (СССР) и Р. Постом (США). Через шесть лет справедливость этой идеи была подтверждена в эксперименте, проведенном С. Н. Родионовым, сотрудником только что созданного в Новосибирске Института ядерной физики СО АН СССР.

От пессимизма — к надеждам

Но вернемся к токамакам. Одна из основных проблем, стоявших перед термоядом в первые годы, относилась к характеру диффузии плазмы поперек магнитного поля. Если диффузия является *классической*, то термоядерный реактор может иметь вполне разумные размеры. Однако еще в 1948 году, анализируя эксперименты с дугowymi разрядами в разряженных газах в сильных магнитных полях, американец Д. Бом постулировал существование усиленной турбулентной диффузии поперек магнитного поля. В случае *бомовской* диффузии надежд на успешную реализацию термояда в установках с технически осуществимыми размерами практически нет. Как обстоит дело на самом деле, в то время никто не знал.

Запуск в 1955 году первого токамака весьма скромных размеров сопровождался и первой неудачей — быстрым охлаждением плазмы из-за примесей. В 1958 году пессимистичные выводы из экспериментов на стеллараторе сделал Спитцер: потери плазмы из ловушки, по его мнению, соответствовали бомовской диффузии, что закрывало данное направление. Однако через три года сотрудник Института атомной энергии, будущий академик Б. Б. Кадомцев, анализируя результаты советского эксперимента на открытой магнитной ловушке, показал, что бомовской диффузии не существует. Затем А. А. Галеев и Р. З. Сагдеев (тоже будущие академики) из Института ядерной физики примирили две точки зрения, создав неоклассическую теорию диффузии плазмы для замкнутых магнитных конфигураций — основу всех термоядерных исследований вплоть до настоящего времени.

Сверхтяжелого изотопа водорода трития на Земле нет совсем, поскольку период его полураспада всего 12 лет. Это значит, что его надо каким-то способом наработать.

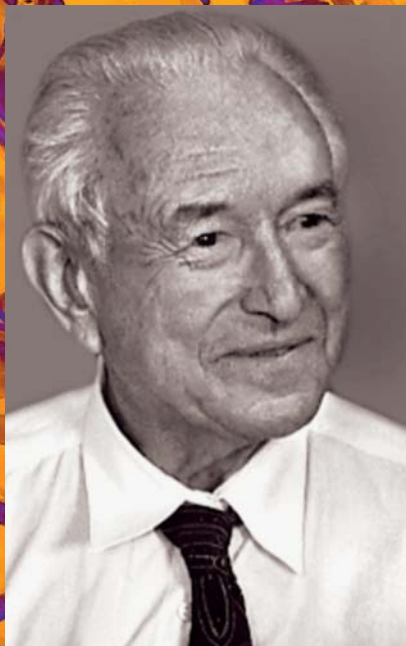
Если термоядерный реактор окружить «одеялом» из лития, то каждый нейтрон, вылетевший из плазмы, при взаимодействии с литием отдаст большую часть энергии на его нагрев.

Еще при этом образуется полтора атома трития. Таким образом, после начала работы реактора воспроизводство трития будет обеспечено

После гибели создателя первой тороидальной системы Н. А. Явлинского исследования на токамаках возглавил академик Л. А. Арцимович. Прогресс на токамаках был ошутим: в 1963 году электронная температура достигла 150 эВ (1,75 млн градусов), а всего три года спустя выросла в четыре раза, достигнув 600 эВ! Однако научный мир воспринимал эти результаты с большим недоверием, поскольку результаты других направлений были существенно скромнее. Чтобы покончить с сомнениями, Арцимович заключил пари с американскими физиками из Принстона, пригласив англичан для измерения электронной температуры самым надежным методом *томсоновского рассеяния*.

И вот в 1968 году на Международной конференции МАГАТЭ по физике плазмы и управляемым термоядерным реакциям, состоявшейся в Новосибирске, в совместном докладе английских и советских физиков было показано, что на токамаке Т-3 впервые в мире электронная температура достигла 1000 эВ. Пари американцы проиграли.





Р. Пост (слева) и Г. И. Будкер (справа) предложили идею открытой магнитной ловушки для плазмы — альтернативы токамакам

Академик АН СССР Г. И. Будкер в 1957 г. стал первым директором ИЯФ (фото 1968 г.)



В 1975 году в СССР состоялся запуск установки Т-10 — крупнейшего токамака того времени. На нем ионная температура достигла уровня в 1 кэВ, а электронная — 3 кэВ. Непосвященным может показаться, что электроны греют и не нужно, ведь реакции термоядерного синтеза идут при слиянии положительно заряженных ядер. Однако если электроны будут холодными, ядра не смогут долго оставаться горячими, они будут остывать на электронах. В этом случае энергетическое время жизни плазмы станет относительно коротким, и режим самоподдерживающегося термоядерного горения достичь не удастся.

К концу 1970-х годов на токамаке PLT (США) была получена ионная температура 7 кэВ, а несколько позднее на токамаке Т-10 электронная температура достигла 10 кэВ. Это были абсолютные мировые рекорды. Путь вперед был открыт...

Больше и мощнее

Подведем итоги первого 30-летнего этапа термоядерных исследований. Во-первых, была показана несостоятельность идеи существования бомовской диффузии. Во-вторых — продемонстрирована принципиальная возможность удержания плазмы с высокими термоядерными параметрами.

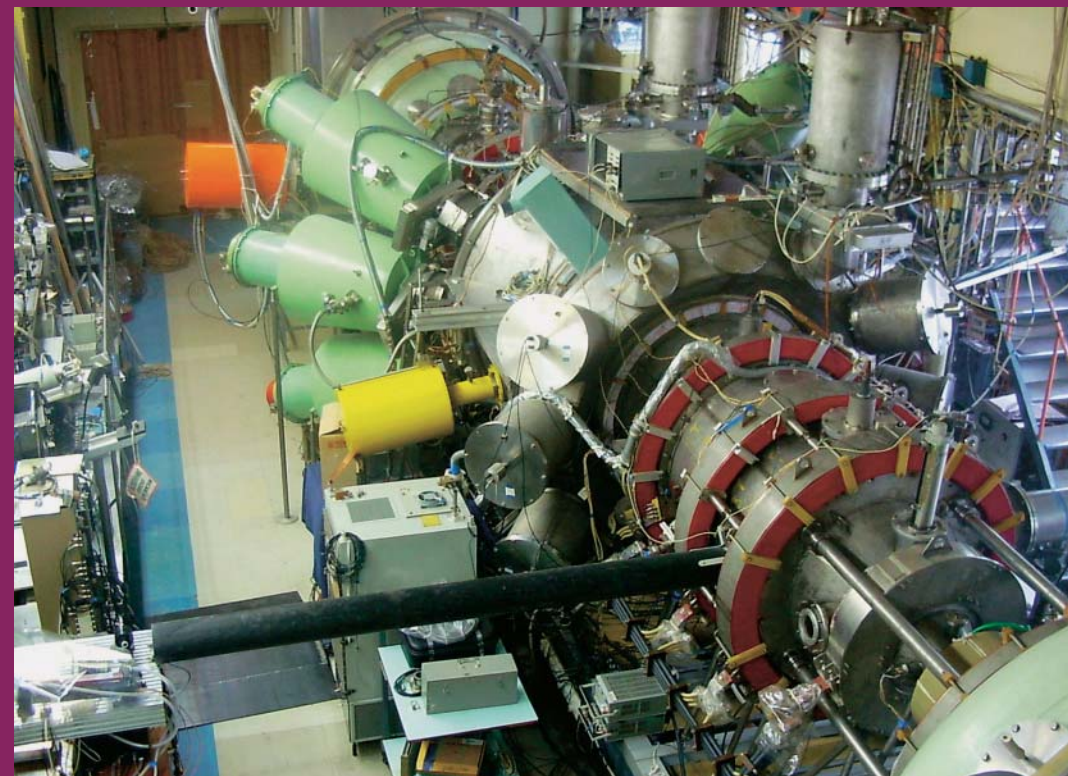
Наибольший успех был достигнут на замкнутых ловушках типа токамака. В результате большинство развитых стран мира прекратило эксперименты с альтернативными системами, что сейчас представляется большой ошибкой. Стеллараторы сохранились лишь

в Германии, СССР и Японии, открытые ловушки — в СССР и Японии. В США фактически были закрыты все направления исследований, кроме токамаков.

Однако в новосибирском Институте ядерной физики исследования на открытых ловушках не прекращались. Здесь были предложены и разработаны все современные концепции открытых магнитных систем, нашедшие свое место в мировых термоядерных исследованиях.

После успехов, достигнутых на токамаках, в разных странах начали проектироваться все более крупномас-

Само слово «токамак» принадлежит ученику академика Курчатова И. Н. Головину, использовавшему аббревиатуру от словосочетания «тороидальная камера магнитная». Н. А. Явлинский, создавший первую тороидальную систему, предложил для благозвучия заменить букву «Г» на «К». В таком виде это слово и вошло во все языки мира



Газодинамическая ловушка Института ядерной физики СО РАН (Новосибирск)

штабные установки, поскольку с ростом их размеров растет энергетическое время жизни плазмы и становится проще подойти к режиму самоподдерживающейся термоядерной реакции. Целью следующего этапа стало создание систем с «неотрицательным балансом» — с величиной параметра Q (отношения энергии, выделяемой в термоядерных реакциях, к энергии, потребляемой на поддержание плазмы) порядка единицы.

Согласно критерию Лоусона, энерговыделение термоядерных реакций превосходит энергозатраты на поддержание высокотемпературной плазмы при определенных условиях, которые определяются плотностью и энергетическим временем жизни плазмы. Важную роль при этом играет также величина ее ионной температуры. Поэтому близость к условиям самоподдерживающегося режима термоядерного горения наиболее целесообразно характеризовать величиной тройного произведения упомянутых параметров. И эта величина практически удваивается каждые два года, что сопоставимо с темпом роста памяти компьютеров.

Современный термояд

Каковы наиболее значимые результаты последнего времени? На европейском токамаке JET получена рекордная ионная температура (400 млн градусов). Там же в нейтронах реакции дейтерия с тритием выделена мощность, превышающая 16 МВт.

На единственном работающем сегодня крупномасштабном сверхпроводящем токамаке TORE SUPRA

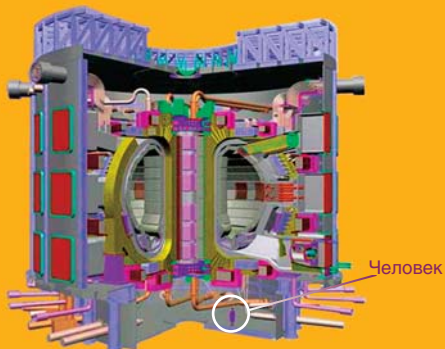
высокотемпературная плазма удерживалась в течение 4,5 минут. Этот эксперимент доказал, что стационарное поддержание постоянного тороидального тока в токамаке возможно.

На трех крупнейших токамаках мира — TFTR, JET и JT-60U — была достигнута поставленная цель: Q ~ 1 получено. Системы именно такого типа сегодня наиболее готовы к достижению режима самоподдерживающегося термоядерного горения.

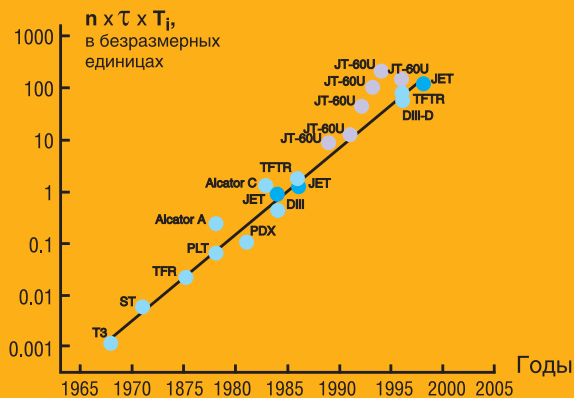
Что касается альтернативных систем, то на японском сверхпроводящем стеллараторе LHС получена высокотемпературная плазма, по своим параметрам лишь немного уступающая плазме крупнейших токамаков. Мало того, существование высокотемпературной плазмы на этой системе удалось непрерывно поддерживать в течение 3,5 часов!

Своя ниша есть и у открытых магнитных ловушек. В будущем они могут быть эффективно использованы там, где токамаки бессильны: когда энергия термоядерных реакций выделяется не в нейтронах, а в заряженных частицах. Однако ясно, что первые термоядерные реакторы будут использовать реакции с высоким уровнем плотности потока термоядерных нейтронов — реакции дейтерия с тритием. Поэтому уже в ближайшее время должны быть начаты исследования свойств конструкционных материалов для реакторов на радиационную стойкость.

Для испытаний уже существующих и еще только разрабатываемых материалов необходим надежный, экономичный и мощный источник термоядерных нейтронов. Решить эту проблему проще всего позво-



Эскиз экспериментального термоядерного токамака-реактора «ИТЭР». Основные параметры: объем вакуумной камеры — 850 м³, тороидальный ток в плазме — 15 Ма, тороидальное магнитное поле — 5,3 Тл, выделяемая термоядерная мощность в разных режимах — от 500 до 900 МВт



ляет устройство на основе газодинамической ловушки, схема которого была предложена в Институте ядерной физики СО РАН и уже получила признание мирового термоядерного сообщества.

На многопробочной открытой магнитной ловушке в ИЯФ недавно получена электронная температура порядка 2 кэВ, что намного больше, чем было получено на подобных системах до сего времени. И такого же уровня достигла ионная температура при плотности плазмы, превосходящей обычную для токамаков почти на два порядка.

Последний шаг

Сегодня к термоядерной энергетике относятся по-разному. Некоторые считают, что термоядом вообще уже не стоит заниматься — ведь за 50 с лишним лет добиться успеха так и не удалось. И точно неизвестно, когда удастся. Но есть те, кто оценивает состояние дел иначе. Так, академик В.Л. Гинзбург, расставляя приоритеты науки

Согласно критерию Лоусона, энерговыделение термоядерных реакций превосходит энергозатраты на поддержание высокотемпературной плазмы при $nT > 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}$, где n — плотность плазмы (число частиц в кубическом метре), а T — энергетическое время жизни плазмы (характерное время ее остывания в секундах). Важную роль играет также величина ионной температуры плазмы T_i . Поэтому близость к условиям самоподдерживающегося режима термоядерного горения целесообразно характеризовать величиной тройного произведения $nT_i T_i$. И величина эта за последние годы неуклонно растет

на XXI век, проблему УТС поставил на первое место: «Это огромной важности, но все еще нерешенная проблема. Поэтому я бы убрал ее из списка [приоритетов] только после того, как первый термоядерный реактор начнет работать».

В последние годы научное сообщество работает над проектом международного экспериментального термоядерного токамака-реактора «ИТЭР». В нем участвуют Европейский Союз, Россия, США, Япония, Китай, Корея. Присоединиться к проекту выражают желание Индия и Бразилия.

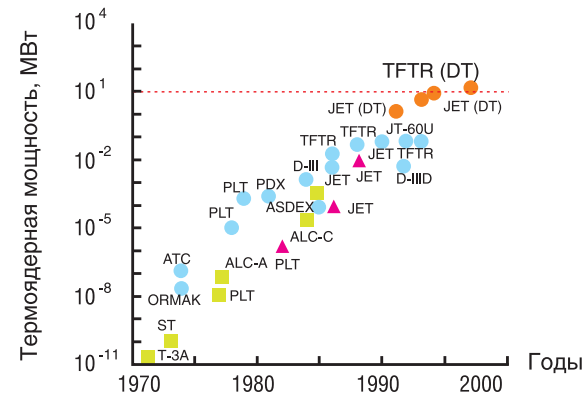
Рассчитан проект на 20 лет: 8 лет отводится на строительство, 5 лет — на работу с водородной плазмой, 7 лет — на работу с тритием. Только после завершения этой кампании, основной целью которой является доказательство возможности существования самоподдерживающейся термоядерной реакции, начнется строительство экспериментальной термоядерной электростанции ДЕМО.

Трудно загадывать, на каких принципах будет строиться ДЕМО. Будет ли это токамак, или стелларатор, или открытая ловушка, или другая система удержания плазмы. Но одно можно обещать твердо: проект «ИТЭР» обязательно завершится успешно и во второй половине нынешнего столетия вклад термоядерной энергетике в общемировую станет весьма ощутимым.

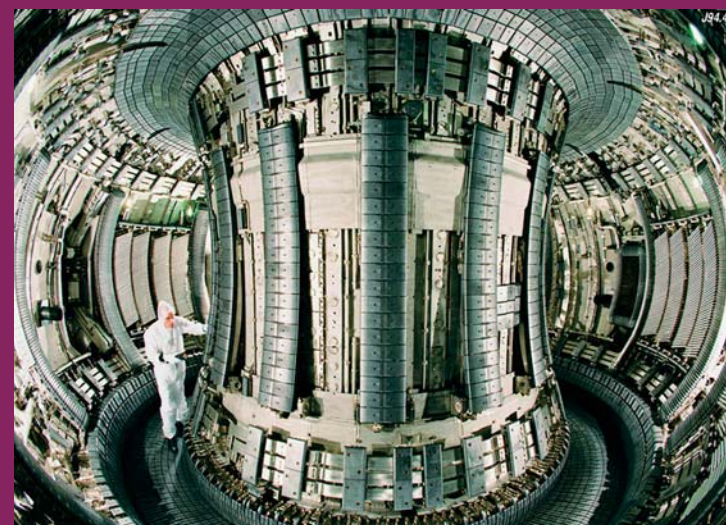
Уже достигнутые успехи позволяют надеяться, что этот долгожданный момент действительно наступит: на нашей планете зажгутся первые рукотворные термоядерные «звездочки», которые облегчат энергетическое бремя человечества. К этой цели фундаментальной науке осталось сделать последний шаг.

В ходе выполнения программы термоядерных исследований физика плазмы дала человечеству множество современных технологий, нашедших широкое применение в микроэлектронике, телевидении, металлургии, производстве огнеупоров, космических исследованиях, экологии и многих других областях человеческой деятельности

Р.С. Пока готовилась эта статья, произошло долгожданное событие: 28 июня с.г. после долгих переговоров министры иностранных дел стран-участниц проекта «ИТЭР» подписали соглашение о начале строительства в Кадараше (Франция) первого в мире экспериментального термоядерного реактора. Лед тронулся!



На открытой магнитной системе — многопробочной ловушке ГОЛ-3 в Институте ядерной физики СО РАН — недавно была получена электронная температура 2 кэВ. Для сравнения: на установке 2XIIВ (США) максимальная электронная температура достигала всего 280 эВ



Рост мощности, выделяемой в термоядерных реакциях, на различных токамаках. Начиная с 1970 г. уровень термоядерной мощности вырос на 12 порядков и достиг 16 МВт на установке JET в D-T реакциях

Самый крупный токамак в мире JET был построен в Англии в 1983 г.