

УПРАВЛЯЕМИЯТ ТЕРМОЯДРЕН СИНТЕЗ ПРЕД ВАЖНИ РЕШЕНИЯ

Динко Динев^{*}

1. УВОД

През 2004 г. трябва да се вземат две важни решения, които до голяма степен ще определят развитието на физическите изследвания през следващите 10-20 г.

Първото решение е свързано с избора на технология и място за бъдещия международен линеен колайдър. В този колайдър два снопа от електрони и от позитрони движейки се по права линия ще се ускоряват до енергия 500 GeV – 1 TeV и ще се сблъскват насрещно. При удара ще се освобождава гигантска за мащабите на микросвета енергия, необходима за раждането на нови частици и за навлизане още по-дълбоко в тайните на материята.

Второто решение, което трябва да се вземе, е относно избора на място за международния термоядрен реактор ITER.

За място, в което ще се построи ITER, се състезават две предложения. Едното е на Европейският съюз (ЕС) и е за Cadarache, Франция, а второто е на Япония - за Rokkasho.

Тъй като строителството и експлуатацията на термоядрения реактор ще отвори хиляди нови работни места и ще привлече големи инвестиции, изборът на място за ITER силно се политизира.

През миналата година американският министър на енергетиката S. Abraham публично се изказа срещу френското предложение, което е лесно обяснимо предвид на позицията на Франция по войната в Ирак. Въпреки това ЕС се обедини около френското предложение за Cadarache. То се подкрепя още от Русия и Китай. Зад яповското предложение за Rokkasho застават САЩ и Южна Корея.

Трябва да се отбележи, че Франция има значителен опит в термоядрените изследвания. В Cadarache е разположен най-големият свръхпроводящ токамак в света Tore Supra. Япония от своя страна предлага строителство “на зелена поляна” в отдалечената северна част на страната. Поради отсъствието на собствени енергийни ресурси Япония е силно заинтересована в успеха на програмата за управляем

^{*} ст. н. с. д-р, ИЯИЯЕ - БАН

термоядрен синтез и е готова да окаже всестранна подкрепа на проекта. Япония също има разгърната програма за изследвания по термоядрен синтез.

Всъщност освен построяването на самия термоядрен реактор проекта ITER предвижда и изграждането на голям международен център за изследване на поведението на материалите при облъчването им с много силни неутронни потоци – виж Светът на физиката, кн. 3, 2001. Предвижда се построяването и на център за дистанционно управление. Всичко това улеснява намерането на компромис между участващите в проекта ITER страни.

В тази статия се прави кратък обзор на физическите основи на управляемия термоядрен синтез и на термоядрените реактори от типа токамак и се дават сведения за някои съществуващи реактори.

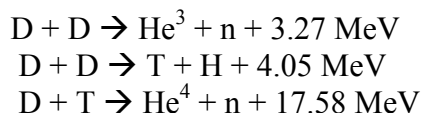
2. УПРАВЛЯЕМ ТЕРМОЯДРЕН СИНТЕЗ (УТС)

Известно е, че енергията запасена в ядрата на атомите може частично да се освобождава при два типа ядрени реакции – реакция на делене на тежки ядра на по-леки и реакция на синтез (сливане) на леки ядра в едно по-тежко ядро.

Неконтролируема (взривообразна) верижна реакция на ядрено делене се реализира в атомната бомба, а неконтролируема реакция на ядрен синтез – във водородната бомба. Що се касае до контролираното (управляемото) протичане на тези реакции, то управляема верижна реакция на ядрено деление се реализира в ядрените реактори, а управляема реакция на ядрен синтез – в усилено разработваните през последните десетилетия термоядрени реактори.

И двата вида реакции не водят до изхвърлянето в атмосферата на CO_2 и на серни и азотни окиси, което е типично за топлоелектрическите централи и което е причина за значителното замърсяване на околната среда и за т. н. парников ефект. Но дакато ядрените реактори са източник на големи количества дългоживущи радионуклиди, чието безопасно съхраняване или преработка продължава да бъде сериозен проблем, то реакцията на ядрен синтез въобще не води до производството на опасни странични продукти.

От практически интерес са следните реакции на ядрен синтез:



$$(1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J})$$

Първите две реакции са равновероятни.

Деутерият се съдържа в обикновената вода в съотношение 1 : 7000 спрямо водорода и може лесно да се извлича от нея. Така имаме един на практика неизчерпаем източник на енергия.

При “изгарянето” на една чаша с вода в термоядрен реактор ще се отдели толкова енергия, колкото при изгарянето на един тон нефт. Изчислено е, че един килограм гориво на ден ще е достатъчно, за да се обезпечи работата на термоядрен реактор с електрическа мощност 1000 MW.

За да се осъществи реакцията на ядрен синтез двете сливащи се ядра трябва да се доближат толкова близка едно до друго (на разстояние $\sim 10^{-15} \text{ m}$), че да започнат да действуват ядрените сили между нуклоните. На това сближаване се противопоставят силите на електростатично отблъскване между положително заредените ядра. Необходимо е да се преодолее т. н. Кулонова потенциална бариера, а за това сливащите се ядра трябва да притежават достатъчно голяма кинетична енергия. Голяма кинетична енергия на ядрата означава висока температура. Следователно ако успеем по някакъв начин да затворим сливащите се ядра в един ограничен обем и да ги нагреем до достатъчно висока температура, при своето хаотично топлинно движение ядрата ще изпитват многобройни удари помежду си и с голяма вероятност ще влизат в реакция на ядрен синтез. Този тип ядрен синтез се нарича термоядрен синтез.

Височината на Кулоновата бариера за деутериеви ядра (деутрони) е $\sim 360 \text{ KeV}$. Ако искаме средната кинетична енергия на топлинното движение на сливащите се деутрони да е равна или по-голяма от тази енергия ще трябва да нагреем деутерия до $T = 4 \cdot 10^9 \text{ K}$. При толкова висока температура деутерият се превръща в плазма – равнокомпонентна и като цяло неутрална смес от бързи деутрони и бързи електрони.

Всъщност са достатъчни по-ниски, макар и все още достатъчно високи температури $\sim 40 \text{ KeV}$ ($1 \text{ eV} = 11600 \text{ K}$). Частиците в плазмата

имат непрекъснато разпределение по скорости, което в равновесно състояние е разпределение на Максвел. За да работи термоядрения реактор е достатъчно само малка част от сливащите се ядра да притежават енергия, достатъчна за преодоляване на Кулоновата бариера – това са ядра попадащи в дясната част на разпределението по скорости. Енергията, която се отделя при всеки елементарен акт на сливане е толкова голяма, че е достатъчно само малка част от всички ядра да встъпват в реакция на синтез.

И така, термоядрения синтез протича в деутериева или в деутериево – тритиева плазма. Но плазмата притежава висока топлопроводност. При всеки контакт със стените на съда, в който е затворена плазмата, тя бързо ще се охлажда до толкова ниски температури, че протичането на реакцията на синтез ще стане невъзможно. Освен това конструкционните материали, от които е направен реактора издържат без да се разтопят до температури ~ 4000 К.

Трябва да се намери средство, достатъчно ефективно удържащо плазмата в един ограничен обем, като не и позволява да попадне в съприкосновение със стените на реактора. Това средство е силно магнитно поле с подходяща конфигурация на силовите линии – т. н. термоядрен реактор с магнитно удържане на плазмата. Известно е, че заредените частици се движат в магнитно поле по винтови линии около силовите линии на полето т. е. магнитното поле ограничава (удържа) движението на частиците в напречно на полето направление. Движението на частиците може да се ограничи и в надлъжно направление ако се създадат области с много по-силно от средното магнитно поле т. н. магнитни огледала. Най-общо казано удържащото плазмата магнитно поле трябва да има такава сила B , че магнитното налягане B^2/μ_0 да уравни кинетичното налягане на плазмата $2nkT$, където n е плътността на плазмата, а T е плазмената температура.

За D – T плазма удържащото магнитно поле B трябва да е по-голямо от $7T$, а за D – D плазма - $B > 22T$.

Дори плазмата в един магнитен термоядрен реактор да се удържа достатъчно ефективно от съприкосновение със стените на реактора тя ще се охлажда понеже част от енергията на плазмата се излъчва под формата на електромагнитно лъчение. При своите стълкновения частиците на плазмата изпитват ускорения, а това води до т. н. спиращо лъчение. Излъчената мощност е пропорционална на квадрата на плътността на плазмата (n^2) и на квадратен корен от температурата ($T^{1/2}$). Това е меко рентгеново лъчение, което излиза

извън плазмата, отнасяйки енергия. Освен спирано лъчение плазмата излъчва и т. н. синхротронно лъчение, което е в инфрачервената и микровълновите части на спектъра.

Минималната температура на плазмата в един термоядрен реактор се определя така, че енергията отделена при реакцията на синтез да е по-голяма от радиационните загуби на енергия. За D – T плазма минималната температура на плазмата е $T_{\min} = 4 \text{ KeV}$, а за D – D плазма – $T_{\min} = 40 \text{ KeV}$.

Друг важен параметър на термоядрения реактор е плътността на плазмата в него. При ниска плътност на плазмата е ниска и плътността на мощността на реактора. Реакторът има много големи размери. Силно удържащо магнитно поле трябва да се създава в огромен обем, а това изисква колосална електрическа енергия. Обратно, ако плътността на плазмата е много висока ще имаме много висока плътност на мощността в реактора. Това означава много голям неутронен поток, водещ до прегряване и радиационно разрушаване на стените на реактора. Технически осъществим е реактор с плътност на мощността $\sim 40 \text{ MW/m}^3$, което означава плътност на плазмата в реактора $10^{20} - 10^{21} \text{ m}^{-3}$.

Балансът на енергията в плазмата на един термоядрен реактор е оценен за първи път от Лоусън (J. D. Lawson). Според неговата оценка, за да се постигне самоподдържаща се работа на реактора, при която реакторът ще произвежда повече енергия отколкото е необходима за загряването на плазмата и за покриване на загубите за излъчване е необходимо произведението от плътността на плазмата по времето, за което тя се удържа в реактора ($n\tau$) да бъде по-голямо от една критична стойност.

За D – T плазма тази критична стойност е $n\tau > 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$, а за D – D плазма - $n\tau > 10^{22} \text{ m}^{-3}\text{s}$.

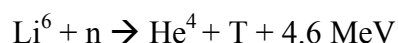
Условията необходими за осъществяването на управляема термоядрена реакция са дадени в Таблица 1.

Таблица 1. Условия за УТС

Параметър	D – T плазма	D – D плазма
$n, \text{ m}^{-3}$	$10^{20} - 10^{21}$	$10^{20} - 10^{21}$
$n\tau, \text{ m}^{-3}\text{s}$	$> 10^{20}$	$> 10^{22}$
$T, \text{ KeV}$	> 10	> 100
$B, \text{ T}$	> 7	> 22

От Таблица 1 се вижда ,че при D – T реакция на ядрен синтез времето на удържане на плазмата е с два порядъка по-малко от това за D – D реакция. Освен това D – T реакция на синтез има на порядък по ниска температура на запалване и изисква по-слабо удържащо магнитно поле. По тази причина в термоядрените реактори е избрана D – T реакция на синтез.

D – T реакцията на синтез има и сериозни недостатъци. Тритият е радиоактивен и не се среща в природата. За щастие достатъчни количества тритий могат да се получават в самия термоядрен реактор в резултат на реакцията:



За целта в реактора се поставя обвивка (blanket) от Li, която се облъчва със неутрони излъчвани от плазмата и предварително забавени до топлинни енергии.

При D – T реакция на синтез 80% от енергията се отнася във вид на кинетична енергия на получаваните в реакцията неутрони. Тази енергия се преобразува в топлинна, а след това и в електрическа енергия.

3. ТОКАМАК

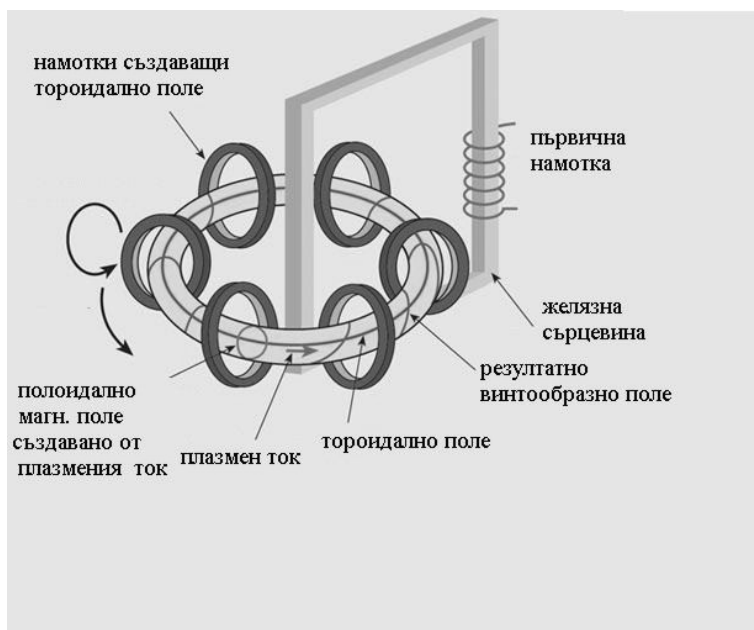
Токамак е термоядрен реактор с магнитно удържане на плазмата разработен в Русия в началото на 50-те години. Благодарение на простотата и естествеността на идеите заложи в този тип магнитен термоядрен реактор той е получил най-широко разпространение. За вече над 50 г. теоретични и експериментални изследвания и усъвършенствувания, провеждани в различни страни, токамакът се е доближил плътно до условията за работещ управляем термоядрен реактор.

Названието токамак е дадено от И. Н. Головин и Н. А. Явлинский и означава “тороидальная камера магнитная” (буквата “г” е заменена на “к”, за да се изключи всякакъв намек за нещо магическо).

Както личи от самото название в токамака се използва тороидална (пръстеновидна) камера, в която D – T плазма се загрева до необходимата висока температура и се реализира управляема реакция на ядрен синтез между ядрата на трития и на деутерия. Плазменият шнур се удържа от съприкосновение със стените на камерата от едно

винтообразно магнитно поле. Това магнитно поле се създава от суперпозицията на две магнитни полета:

- Тороидално магнитно поле. То се създава от намотки, които са надени върху тороидалната камера и по които се пропуска силен ток.
- Полоидално магнитно поле. Силовите линии на това поле са концентрични на малкото сечение на тороида. Това поле се създава от протичащ в самата плазма силен ток, насочен по остта на тора. За целта камерата се надява на едно от рамената на железен магнитопровод. Плазменият шнур играе ролята на вторична намотка на един трансформатор. Първичната намотка на трансформатора се надява на другото рамо на магнитопровода. Когато през нея се пропусне променлив ток във вторичната намотка, т. е. в плазмата протича индукционен ток. Този ток йонизира газа в камерата създавайки плазма, загрева тази плазма до висока температура и едновременно с това създава полоидалното магнитно поле.



Фиг. 1. Принципно устройство на токамак

Това, че магнитните силови линии в токамака са винтообразни е от съществено значение за устойчивостта на празмата. Работата е в това, че чисто тороидалното (насочено по остта на тора) магнитно поле не е пространствено еднородно. То е по-силно в близост до вътрешната стена на тора и по-слабо в близост до външната му стена. Този радиален градиент на полето води до движение (дрейф) на електроните и на йоните на плазмата във вертикално направление и в крайна сметка до големи загуби на частици и до охлаждане на плазмата. Когато силовите линии са винтообразни обаче частиците периодично попадат в области със силно магнитно поле, когато са в близост до вътрешната стена на камерата и в области със слабо поле, когато са в близост до външната и стена. Сега средния вертикален дрейф на частиците е равен на нула и плазменият шнур се удържа ефективно далеч от стените на камерата.

За допълнително стабилизиране на плазмата около камерата се разполага дебел меден кожух и система от коректиращи намотки. С тяхна помощ се управлява формата и положението на плазмата в камерата.

За съжаление съпротивлението на плазмата е ниско и намалява с температурата. По тази причина индукционният ток протичащ в плазмата не може да я нагрее до температури достатъчно високи, че да започне самоподдържаща се реакция на синтез. Необходими са източници за допълнително подгряване на плазмата. За тази цел в токамаците се използват два подхода:

- Инжектиране в плазмата на високоенергетични (~ 120 KeV) неутрални деутериеви атоми
- Пропускане през плазмата на микровълново лъчение с честота ~ 140 GHz и мощност ~ 1 MW, т. н. RF нагряване на плазмата.

В един токамак трябва да се създава силно магнитно поле в голям обем ~ 10 m³. Енергията запасена в това поле е огромна – за токамака T- 15, Русия тя е равна на 600 MJ! Единственият начин да се намали значително консумираната от електромагнита на един токамак електрическа мощност е да се използват магнити със свръхпроводящи намотки. Първите токамаци със свръхпроводящи електромагнити са T- 7 в Русия и LHD в Япония.

Сериозен проблем пред магнитното удържане на плазмата е загубата на частици поради различни трептения на плазмата, т. н. плазмени неустойчивости. Плазмените неустойчивости могат да се

разделят на магнитохидродинамични (МНД) и микронеустойчивости. При МНД неустойчивости плазмата образно казано има поведението на течност. В нея възникват съвместни движения на големи групи електрони и йони, които могат да доведат до изхвърляне на плазма върху стените на камерата. При микронеустойчивостите имаме турбулентно относително движение на плазмените електрони и йони, при което в плазмата възникват силни локални електрични полета. Заредените частици се разсейват от тези силни локални полета и това води до възникването на дифузия на плазмата напреко на линиите на удържащото магнитно поле – т. н. аномална или бомовска дифузия. Докато класическата дифузия, дължаща се на стълкновенията между частиците на плазмата е обратно пропорционална на силата на удържащото поле ($\sim B^{-2}$) и може силно да се отслаби чрез увеличаване на това поле, аномалната дифузия практически не може да се намали по този начин.

Важен технически проблем на всеки термоядрен реактор е и значителното топлинно и радиационно натоварване на стените на камерата и на другите конструкционни елементи.

4. ИСТОРИЯ НА ТОКАМАКА

До 1956 г. изследванията по УТС са били строго засекретени, поради връзката им с разработването на термоядреното оръжие. По тази причина на своя първоначален етап те са се развивали до голяма степен независимо в отделните страни.

В Русия (бившия СССР) изследванията по УТС започват от едно писмо-предложение изпратено през 1950 г. направо до ЦК на ВКП (б) от сержанта в Червената армия О. Лаврентиев. Това писмо съдържа предложение за създаването на термоядрен реактор за промишлено производство на електроенергия с използването на електростатично удържане на деутериева плазма от две сферични метални мрежи, едната под отрицателен потенциал, а другата под положителен. Това писмо-предложение е изпратено за отзив на А. Д. Сахаров. Макар идеята на О. Лаврентиев да е технически неосъществима, тя става онзи начален импулс, който заставя Сахаров да се замисли над проблема за УТС. Сахаров достига до идеята високотемпературната плазма да се удържа от магнитното поле на един тороидален соленоид. Сахаров споделя своите идеи с И. Е. Там. И макар че двамата били много ангажирани с разработването на съветското термоядрено оръжие, те започват да работят и по

проблемите на магнитното удържане на плазмата. Тяна е идеята за индукционно възбуждане на ток в плазмата и за въвеждането на тороидален меден кожух с разрези за удържане на плазмения шнур в равновесие. Първият експеримент е направен през 1951 г. Използуван е стъклен тор с голям диаметър 40 cm и малък – 4 cm. Върху тора била намотана намотка, която създавала магнитно поле насочено по оста на тора със сила 0.13 T. За възбуждането на разряд в камерата се използвало вихровото електрично поле създавано при поставянето на тороидалната камера в едното рамо на магнитопровода на трансформатор.

В САЩ първоначалните изследвания по УТС са свързани с предложението на Л. Спитцер (L. Spitzer) от 1951 г. за създаването на затворена магнитна система за удържане на плазмата от тип “стеларатор”. Изследванията по УТС се концентрират в Принстънският университет – проект Матерхорн.

Във Великобритания първите експерименти по УТС датират от 1949 г. – П. Тонеман (P. Thoneman) и др.

При първоначалните експерименти се наблюдава значително разхождение между теория и експеримент. Всички опити да се повиши температурата и времето на удържане на плазмата се натъквали на неуспех. Това подтикнало ръководителите на съветската термоядрена програма на ефективна и с много важни последствия за науката стъпка – през 1956 г. те разсекретяват изследванията по УТС в Русия (СССР). Започва епохата на широко международно сътрудничество по УТС.

Постепенно става ясно, че част от причините за неуспехите са свързани със силното замърсяване на плазмата с примесни атоми от вакуумната система и от стените на камерата. Други причини са открити в несъвършенствата на удържащото магнитно поле.

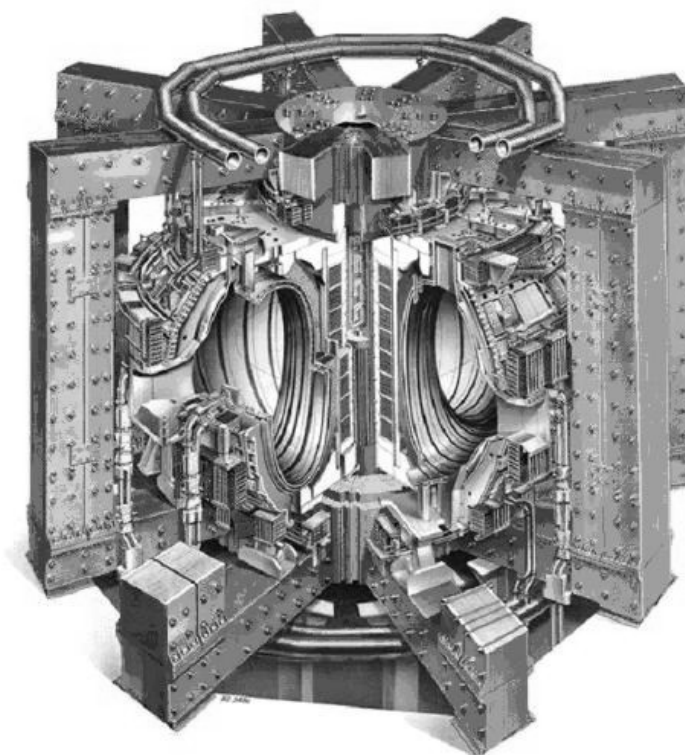
Осигуряването на чисти вакуумни условия и внимателната корекция на магнитното поле позволило в руския токамак Т – 3 температурата на плазмата да се повиши 40 пъти.

Поради простотата на своята конструкция, достигнатата висока температура на плазмата и голямо време на удържане термоядреният реактор от тип токамак фокусира вниманието и усилията на голям брой изследователски екипи в различни страни – Русия, САЩ, Япония, Франция, Великобритания, Германия и др.

Важни пробиви в доближаването на стойността на произведението от плазмената плътност (n), плазмената температура (T) и времето на удържане (τ_E) - $nT\tau_E$ до необходимата за

самоподдържаща се работа на реактора стойност $3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ KeVs}$ (критерий на Лоусън) са направени в токамаците TFTR и JET.

TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) в PPPL (Princeton Plasma Physics Laboratory) е първият токамак работещ с D – T плазма. През 1995 г. в него беше постигната температура на плазмата $510 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$. За да се постигне тази висока температура плазмата в TFTR се подгръва допълнително от сноп неутрални D атоми (39.5 MW) и RF подгръване на плазмата (11.4 MW).



Фиг. 2. Европейският токамак JET

JET е токамак построен в рамките на обединената европейска програма за изследвания по УТС и е разположен в Culham, Великобритания. Това е едно голямо съоръжение с диаметър 12 m и височина 15 m. Тороидалната камера има голям радиус $R = 2.96 \text{ m}$ и D – образно напречно сечение с размери $2.5 \times 4.2 \text{ m}^2$. Тороидалното магнитно поле удържащо плазмата има сила $B = 3.45 \text{ T}$. Постигнатият индукционен ток в плазмата е 4.8 MA. Той загръва плазмата до $50 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$. Допълнителното загръване на плазмата до над $300 \cdot 10^6 \text{ }^\circ\text{C}$ се постига

чрез инжектирането в плазмата на неутрални D атоми (21 MW) и радиочестотно загряване (20 MW).

5. ITER – ПЪРВИЯТ ТЕРМОЯДРЕН РЕАКТОР, КОЙТО ПРОИЗВЕЖДА ПОВЕЧЕ ЕНЕРГИЯ ОТКОЛКОТО “ИЗЯЖДА” ?

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) е международен проект за построяването на термоядрен реактор от типа на токамака, който за първи път ще произвежда повече енергия отколкото консумира. В проекта ITER участвуват ЕС, САЩ, Япония, Русия, Китай и Южна Корея. Ориентировъчната цена на проекта е 5 милиарда USD. Целта поставена пред ITER е в резултат на синтеза на деутериеви и тритиеви ядра да се получи десет пъти повече енергия, отколкото се потребява за нагряване и удържане на плазмата.

Техническият проект на ITER е завършен през 1998 г. Основните параметри на реактора са дадени в Таблица 2.

Таблица 2. Основни параметри на термоядрения реактор ITER

Параметър	Стойност
Голям радиус на тора R, m	6.2
Малък радиус на плазмата a, m	2.0
Обем на камерата, m ³	837
Тороидално магнитно поле B, T	5.3
Ток през плазмата I _p , MA	16.0
Тороидално бета β_t	0.025
Полоидално бета β_p	0.67
Средна електронна плътност $\langle n_e \rangle$, m ⁻³	$1 \cdot 10^{20}$
Средна електронна температура $\langle T_e \rangle$, keV	8.9
Средна йонна температура $\langle T_i \rangle$, keV	8.1
Енергийно време на удържане на плазмата τ_E , s	3.7
Външна загряваща мощност, MW	40
Излъчвана мощност, MW	48
Мощност отделяна при ядрения синтез, MW	410
ФАКТОР НА НАРАСТВАНЕ НА ЕНЕРГИЯТА Q	10

2004 е годината, през която ще се избере мястото където ще се разположи ITER и ще започне неговото строителство.

Литература

1. M. O. Hagler, M. Kristiansen. An Introduction to Controlled Thermonuclear Fusion, Lexington Books, 1977 (руски превод: М. Хаглер, М. Кристиансен. Введение в управляемый термоядерный синтез, М. Мир, 1980)
2. F. Chen. Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, Plenum Press, NY (руски превод: Ф. Чен. Введение в физику плазмы, М. Мир, 1987)
3. К истории исследований по управляемому термоядерному синтезу. Успехи Физических Наук, т. 171, № 81, 2001, стр. 877.

