



Софийски Университет „Св. Климент Охридски”

Физически факултет

Перспективи за използване на термоядрен синтез. Основни насоки.

Милена Кристианова Стоянова

IV курс специалност Ядрена техника и енергетика Ф№ 30321

София 2015

Съдържание

Съдържание	1 стр.
1. Увод.....	2 стр.
2. Физични основи.....	2 стр.
2.1 Основни изисквания.....	2 стр.
2.2 Възможни термоядрени реакции.....	4 стр.
3. Предимства и недостатъци.....	5 стр.
3.1 Предимства.....	5 стр.
3.2 Недостатъци и технолигични проблеми.....	5 стр.
4. Важни параметри на плазмата.....	6 стр.
5. Термоядрен реактор.....	7 стр.
6. Удържане на плазмата.....	7 стр.
6.1 Магнитно улавяне.....	7 стр.
6.2 Инерционно улавяне.....	9 стр.
7. Взривна деутериева енергетика.....	9 стр.
8. Проекта ITER.....	10 стр.
9. Литература.....	11 стр.

I. Увод

Идеята за използване на управлявана от човека синтезна реакция на практика се появява за пръв път с военни цели в ядрените оръжия. Във водородната бомба, енергията освободена от атомната бомба е използвана да компресира и загрее горивото за синтеза. Започнал, процесът на сливане освобождава голямо количество неутрони, което засилва реакцията на разпад. Първите оръжия, базирани на „разпад-синтез-разпад”, са освободили 500 пъти по-голяма енергия от първите атомни бомби. За да се използва за мирни цели, реакциите трябва да протичат бавно и контролируемо, за да могат да се управляват.

Основните източници на енергия, които човечеството ползва се делят на 2 групи :
невъзобновяеми – традиционни и възобновяеми(алтернативни)

Невъзобновяеми	- традиционни горива	Каменни въглища, петрол, природен газ
	-уран, торий	Ядрена енергия
Възобновяеми (алтернативни)	-геотермална енергия	
	-енергия на биомаси	Дървесина, торф, органични отпадъци
	-слънчева енергия	
	-вятърна енергия	
	-хидроенергия	Крупни/малки водни потоци
	-енергия на океани	Течения, вълни, приливи, температурен градиент
	-термоядрен синтез	Ядрена енергия

Изкопаемите източници дават 79% от използваната енергия, като 67% от тях се внасят. Основен проблем на ядрената индустрия е огромното количество радиоактивен отпадък, който се отделя. Всичко това, както и изчерпването на изкопаемите горива, налага търсенето на нови „екологично чисти“ източници на енергия, които да са достатъчно ефективни.

II. Физически основи

ТЯС е процесът, който осигурява енергията на слънцето и други звезди. Като същност представлява процес на сливане на „леки“ атомни ядра в по-тежки, което е съпроводено с отделяне на енергия.

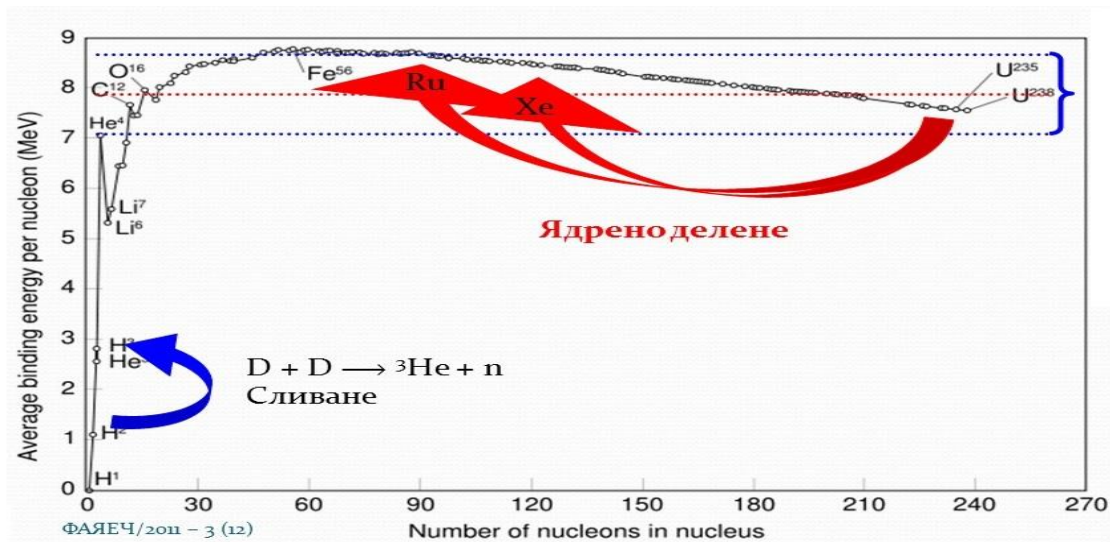
1) Основни изисквания :

а) Реакцията на сливане трябва да бъде екзотермична. Това ограничава реагентите. Те трябва да са с малък атомен номер Z (брой протони). Това прави ${}^4\text{He}$ най-получавания продукт на реакциите, поради голямата си енергия на връзка. ${}^3\text{He}$ и T също се появяват.

б) 2 реагента с 2 или повече продукта. Това позволява едновременно изпълнение на ЗЗЕ и ЗЗМИ без да се разчита на електромагнитна сила

в) Запазване на броя протони и неутрони : сеченията за слабите взаимодействия са твърде ниски.

г) Не е лесно 2 леки ядра да се слоят в едно по-тежко. Между тях действат Кулонови сили на отблъскване, които пречат на синтеза. За да се осъществи сливане, ядрата трябва да се приближат на много малки разстояния ($10^{-14}/10^{-15}$ m). На такива разстояния действат ядрените сили на привлечение, които са много по-големи от Кулоновите. [Ако силата на действие на силното ядрено взаимодействие е 1, то силата на електромагнитното е = 1/137] Ядрата на D и T трябва да преодолеят Кулоновата бариера = 0.1MeV. Температурният еквивалент на тази енергия е 10^9 K. ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,16 \cdot 10^4 \text{ K}$) Освен това, за да се получи сливане, ядрата трябва да имат голяма кинетична енергия. При тези условия, веществото е във вид на плазма – напълно йонизиран газ, в който ядра и заредени частици се движат хаотично с големи дрейфови скорости. Причините за отделената енергия: При сливане на две ядра в едно по-тежко ядро, общата маса на получените след ядрения синтез ядра и частици е по-малка от общата маса на изходните ядра $\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{я}}$. На лице е масов дефект Δm . На него съответства разлика в енергиите, която се отнася във вид на кванти съгласно познатата формула на Айнщайн : $\Delta E = \Delta mc^2$.



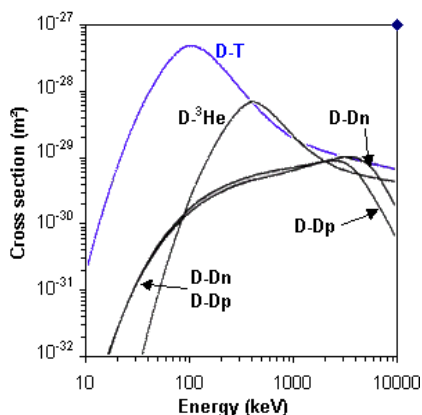
Ядреният синтез в звездите протича при висока температура и налягане в звездната плазма. $H + H \rightarrow D + e^+ + \nu + 0,4 \text{ MeV}$. Изисква астрономически размери на реактора. А и средното време за реакция е $\sim 1,4 \cdot 10^{10}$ години. Както е известно, възрастта на Вселената се оценява на около $1,37 \cdot 10^{10}$ години. Физически, отделянето на енергия на Слънцето става в резултат на много бавни процеси. Безсмислено е да се търси осъществяване на тези

реакции на Земята. Циклите на „горене“ са сложни и разнообразни, като най-значимата практически реакция е сливането на водородни ядра за получаване на хелий, затова и търсенето на начин за извършване на контролируем термоядрен синтез е съсредоточено около следните възможни реакции:

2) Възможни термоядрени реакции :

1. $D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$	
2. $D + D \rightarrow T (1,01 \text{ MeV}) + p (3,02 \text{ MeV})$	50%
3. $D + D \rightarrow {}^3\text{He} (0,82 \text{ MeV}) + n (2,45 \text{ MeV})$	50%
4. $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} (3,6 \text{ MeV}) + p (14,7 \text{ MeV})$	
5. $T + T \rightarrow {}^4\text{He} + 2n + 11,3 \text{ MeV}$	
6. ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p + 12,9 \text{ MeV}$	
7. ${}^3\text{He} + T \rightarrow {}^4\text{He} + p + n + 12,1 \text{ MeV}$	51%
8. ${}^3\text{He} + T \rightarrow {}^4\text{He} (4,8 \text{ MeV}) + D (9,5 \text{ MeV})$	43%
9. ${}^3\text{He} + T \rightarrow {}^4\text{He} (0,5 \text{ MeV}) + n (1,9 \text{ MeV}) + p (11,9 \text{ MeV})$	6%
10. $D + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + 22,4 \text{ MeV}$	
11. $p + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} (1,7 \text{ MeV}) + {}^3\text{He} (2,3 \text{ MeV})$	
12. ${}^3\text{He} + {}^6\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He} + p + 16,9 \text{ MeV}$	
13. $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$	
14. ${}^6\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + T + 4,8 \text{ MeV}$	
15. ${}^7\text{Li} + n \rightarrow {}^4\text{He} + T + n - 2,47 \text{ MeV}$	
16. ${}^9\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + 2 n$	

Основните реакции, които се използват са първите три. Предпочитани са, поради



високото им сечение за реакция (max при 100 кЕв за първата реакция). Сечението е мярка за вероятността за реализиране на съответната реакция. Първата протича при оптимално най-ниска температура и кинетична енергия на деутериевите частици.

Деутерия и трития са естествените изотопи на водорода. Първия се съдържа в обикновенната вода. Запасите му на Земята ще стигнат за около 20 милиарда години. Добива се чрез електролиза на вода – 1 l вода – 33 mg D. Трития, от своя страна е радиоактивен, не се съдържа в естествен вид в природата, поради малкия му период на полуразпад $T_{1/2} = 12,32 \text{ г}$. Труден за произвеждане, съхранение и е скъп. Добива се от

течен литий, по реакции 14 и 15. Li е широко разпространен в риродата в изотопно съотношение ${}^6\text{Li} / {}^7\text{Li}$ 7,5%/92,5%. Съдържа се и в морската вода, като общото количество е 1000 пъти по-голямо от рудните запаси.

III. Предимства и недостатъци

A) Предимства

Неизчерпаемо, евтино гориво.

Работят с малки количества работно вещество и това отстранява опасността от взривно протичане на реакцията. За реактор с мощност 1GW, годишното му потребление ще бъде 100 кг деутерий и 300 кг литий.

Не се отделят парникови газове и замърсители. За сравнение един ТЕЦ изхвърля годишно 10^6 t CO₂, един АЕЦ 1000 пъти по-малко, ТЯЕЦ се предполага , че няма да изхвърля нищо.

Лесно се контролира работата на реактора. ТЯР прилича на газова горелка.Инжектираното в системата гориво се изгаря. В камерата на реактора се вкарва много малко количество гориво (1g D-T в обем от 1000 м³) Ако притокът на гориво се прекъсне, реакцията на синтез трае само няколко секунди.

Основно предимство е получаването на много по-малко дългоживущи РАО. Счита се, че след извеждане на ТЯР от експлоатация, ще са необходими само около 100 години, така че реактора да стане безопасен и материалите да могат да бъдат рециклирани.

Получаване на водород за водородната икономика.

$D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$ реакцията е изучена в ускорителите. Служи за получаване на интензивни неутронни потоци в неутронните генератори.

Б) Недостатъци и технологични проблеми

Основен недостатък е радиационното замърсяване на стените на реактора (т.нар. неутронна активация на материалите). Неутронния поток е 100 пъти по-голям от този при съвременните ядрени реактори. Също и топлинно натоварване на стените на камерата. Това предполага използването на специфични материали, способни да издържат на суровите условия на експлоатация – бомбандиране с неутрони с $\sim 25 \text{ MW/m}^2$ и енергия колко 14 MeV. Това води до дефекти в кристалната решетка на атомите и разрушаване на материала- нарастване на крехкостта и намаляване на механичната устойчивост – SiC.

Замърсяване на плазмата с примеси от вакуумната система и стените на камерата.

Друг недостатък е радиоактивния тритий, който подобно на водорода, е труден за удържане и създава риск от изтичане на газа извън реактора. Но дори и да настъпи разгерметизация, той е с малка плътност и в атмосферата ще попаднат незначителни количества тритий.

При магнитно удържане на плазмата се получават сериозни загуби на частици – т.нар. плазмени неустойчивости.

Несъвършенство на удържащото поле от електромагнити – може да разреши с използването на свръхпроводящи намотки. Плазмата не трябва да се допуска до стените на реактора. При всеки контакт със стените на съда, в който е затворена, тя бързо се охлажда и реакциите на синтез стават невъзможни.

Проблеми с хелия : т.нар. дивертори – устройства, предназначени за почистване на хелия от примеси, са подложени на допълнително въздействие от потоци частици и електромагнитни лъчения.

Повишаването на налягането води до опасни неустойчивости и се получават нестабилни работни режими. $p = nkT$, $p \uparrow$ (реактивността на плазмата), $T \uparrow$, нараства и кинетичната енергия, от там трябва по-голямо удържащо магнитно поле B .

При $\tau \uparrow$ (време за удържане) $\Rightarrow I \uparrow$, R (съпротивление) \downarrow .

IV. Важни параметри на плазмата

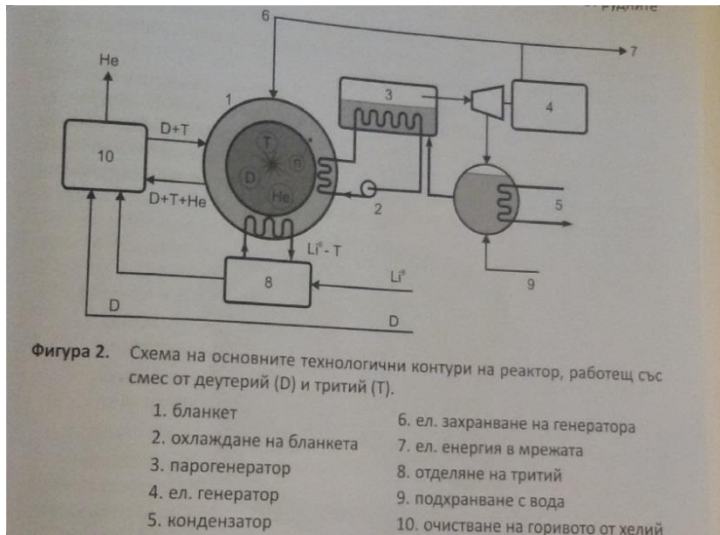
ТЯС е проблем за реализиране на синтез на леки ядра с цел производство на енергия. Това може да стане със спазване на критерия на Лоусен : $n\tau T \geq 5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV}$. Той дава минималното изискване за положителен баланс – получената енергия да надвишава вложената.

- 1) **Температура на плазмата** - 10^8 K (10 keV) – при тази температура, плазмата е напълно йонизирана. Още при температура няколко хиляди градуса, взаимодействието между атомите довежда до избиване на електрони от атомите.
- 2) **Време за удържане** – $\tau = (1 - 2) \text{ s}$. Достатъчно дълго, за да могат повече ядра да се слеят преди да се разлетят.
- 3) **Плътност** – брой частици в единица обем – $(2 - 3) \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$. Достатъчно голяма, за да може да протекат повече реакции на сливане. При ниска плътност е ниска и мощността на реактора. При висока плътност, има мощен неутронен поток, който води до прегряване и радиационно задушаване на реактора.
- 4) **Множител за усилване на мощността** - Q = мощност, генерирана чрез реакция на синтез/ вложена мощност = $5 \cdot (\text{мощност на загуби} / \text{мощност за нагриване})$.

$Q > 1$ за ефективен ТЯС. Постигнато до момента $Q = 1,25$. Цел на ITER $Q = 10$.

V. Термоядрен реактор

Горивото е смес от деутерий и тритий. Реакторът е представен схематично на



картинката. Енергията на реакцията в плазмата се получава главно от неутроните. Те се поглъщат в т.нар. бланкет. Той представлява специална обвивка, обкръжаваща плазмата, в която протича ТЯ реакция. Системата за охлаждане на бланкета, която образува пара в парогенератора, а тя задвижва турбина. Има система за охлаждане на парата и подхранване на парогенератора. Има две системи : една за отделяне на трития и една за почистване на горивото от хелий.

Енергията от реакцията се отделя от първични неутрони и йони на хелия. Енергията се поглъща от бланкета, и като при АЕЦ се сменя от топлоносителя на първи контур – вода или хелий, литий. Реакторът непрестанно трябва да се захранва с деутерий и тритий.

Тритият се получава в процеса на работа на самия реактор от литий. В бланкета има смес от берилий и литий, които ще се използват за размножаване на неутрони по реакцията ${}^9\text{Be} + n \rightarrow {}^4\text{He} + 2n$. Възможни са различни схеми за използване на лития в бланкета.

Възможно е използване на литиев оксид. Трития се извлича от бланкета посредством нагриване с поток горещ хелий и след това се извлича от хелия в приспособления за почистване на горивото. Друга възможност е да се прилага течен хелий. В този случай литият може да се използва и като топлоносител в първи контур. И в двата случая се получава коефициент на възпроизводство на трития 1.1, което е достатъчно за снабдяването на реактора.

VI. Удържане на плазмата

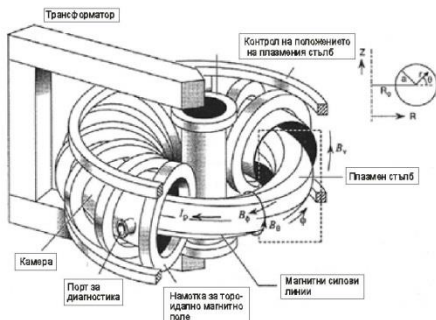
За достигане на температурата за започване на реакцията е необходим компромис между концентрацията на частиците (плътност) и времето за удържане в обем, който осигурява тази плътност. Може да се започне синтеза при по-малка концентрация на частиците за сметка на по-продължителното удържане на плазмата, а може и обратното. Това определя и два различни подхода за реализиране на УТЯС.

1) Магнитно улавяне

Плазмата се удържа от свръхмощно магнитно поле. То изолира горещата плазма от първата стена на реактора. Заедно с плазмата, магнитното поле ще удържа и продуктите

на реакцията – алфа частици. Те предават своята енергия посредством сблъсък и се получава режим на самоподдържаща се термоядрена реакция, при която загубата на енергия се компенсира от енергията, получена от алфа частиците. Плазмата не се налага да бъде допълнително нагрявана. При нарастване на температурата силовите линии на полето се сгъстяват и горещата плазма се концентрира от стените към центъра на камерата. Синтеза започва в момента, в който се достигне критерият на Лоусен.

а) За изобретател се смята руският физик А. Сахаров. През 1950 той изобретява магнитното



удържане. **ТОКАМАК** –тороидална камера в магнитни намотки. Особено при него е магнитното поле и начина по който то се получава. Основното поле се създава от тороидални магнитни бобини. С помощта на индуктора(централен соленоид), в камерата се създава вихрово електрично поле. Той представлява първична намотка на голям трансформатор, в който камерата е

вторична намотка. Електричното поле предизвиква протичане на ток в тороидално направление и запалване в камерата. Токът, протичащ в плазмата изпълнява две задачи :

- нагрява плазмата, както би нагрявал всеки проводник

-създава около себе си магнитно поле. Магнитното поле свива протичащия през плазмата ток и като резултат се получава конфигурация, която винтовите магнитни силови линии обвиват плазмения шнур. Полоидалното магнитно поле е необходимо за стабилно удържане на плазмата в тази система. Тъй като това се създава за сметка на увеличаване на тока в индуктора, а той не може да стане безкрайно голям, стабилното съществуване на плазмата в класическия токамак е ограничено. Изискват се допълнителни методи за поддържане на тока. Освен тороидалните бобини, за управление на плазмения шнур са необходими и допълнителни намотки за полоидално поле. Те представляват пръстеновидни намотки около вертикалната ос на токамак-а.

Максималната големина на тороидалното магнитно поле $B_\phi \sim 12 \text{ T}$. За полоидалното магнитно поле B_p трябва да се достигне максимален ток $I_{\text{max}} = (20-30) \text{ MA}$.

В съвременните разработки има нововъведения като : допълнително нагряване на плазмата с инжекция на високоенергетични неутрални частици. Чрез удари с йоните предават своята енергия на йонизираната среда; ВЧ нагряване – елм вълни предават енергията си чрез резонансна абсорбция; системи за управление на плазмата;

Първият токамак Т3 е построен в Русия, 1956 г. Дълго време е имало само там такива установки. През 1968 в института по атомна енергия в Москва е построен Т6 и е постигната температура 10 милиона градуса. Което дава началото на мащабно строене на

Токамаци. По-известни проекти са JET(Великобритания), JT-60(Япония), KSTAR(Корея), TORE SUPRA(Франция)

б) **Стеларатор** – друг тип камера с магнитно улавяне, но полоидалното магнитно поле се създава от външни намотки, а не с ток, протичащ в плазмата. Това е единственото предимство с оглед на работа в „непрекъснат режим“. Не изисква сложни системи за поддържане на плазмения ток. Той е аксиално-симетрично устройство. Магнитната ос е триизмерна крива с променливо сечение на плазмата. Едни от най-известните проекти са Wendelstein 7-X, в Германия, Helically Symmetric Experiment (HSX) в САЩ и Large Helical Device в Япония. Първият е с магнитно поле 3Т и се очаква да бъде завършен 2015 г.

2) Инерционно улавяне

Критерият на Лоусен се постига в резултат на увеличаване на плазмената плътност и намаляване на времето на удържане, което се постига чрез свиване на сместа. Импулсните системи за реализиране на УТЯС се реализират след изобретяването на лазерите. Слъчение от такъв източник се облъчва неголяма сферична обвивка, запълнена с газообразно и твърдо гориво. Под действието на лазерното лъчение материалът на обвивката се изпарява и се създават реактивни сили, които свиват сместа. Капка дълбокоохладена смес от D и T се разполага в съответна капсула и след това от всички страни се обстрелва с мощни лазерни лъчи. Външният слой на капката мигновено се изпарява, в резултат на който върху вътрешния слой на капката въздействат сходящи се ударни вълни. Те се свиват и загряват водорода до необходимата температура за започване на синтеза. Възможност за бързо запалване е с помощта на свържмоощен допълнителен импулс. За запалване са нужни много високи плътности на мощността – до 10^{20} W/cm^2 с пълна енергия няколко десетки кJ. Подобни параметри са получени при експерименти с подземни ядрени взривове. Но както знаем, тези експерименти са забранени, защото могат да бъдат използвани за направата на ядрени оръжия. Предимство на лазерното лъчение е лесната фокусировка и това дава възможност да се получат много големи плътности на мощността. Недостатък е ниското КПД и високата им себестойност. Освен лазери се използват и йонни или електронни снопове, които да осигурят достатъчно мощност на повърхността на мишената. Също и такива, които използват мощни импулси рентгеново лъчение – установка Sandia в САЩ. Тук, за разлика от магнитния термоядрен реактор, не се изискват висок вакуум и чистота на плазмата. Трудности има при създаване на прецизни мишени и системи, контролиращи положението на мишената в камерата и динамичната фокусировка на потоците.

По-известни проекти са : с лазерни установки NOVA и OMEGA в САЩ, ИСКРА 5 – Русия, Phebus – Франция.

VII. Взривна деутериева енергетика

Към края на 90-те години в един от руските центрове (гр. Снежинск – преди това Челябинск-70) се разработва метод за получаване на термоядрена енергия, основан на атомни взривове, чрез които се инициират D+D реакции. Инициатори са Уран или Плутоний. Достатъчно е да се конструира камера с голям обем, тя да се напълни с топлоносител, в нея периодично да се взривяват деутериеви смеси, а получената енергия, чрез топлообмен, да се преобразува в ел.енергия и топлина, както става в АЕЦ. Такава камера може да работи в затворен цикъл. Получената енергия отива за производството на ел.енергия, а неутроните регенерират ^{239}Pu от ^{238}U , както това става при реакторите на бързи неутрони. Възможен е и ториев цикъл – получаване на ^{233}U от ^{232}Th . Като гориво се използва само деутерий, като високата температура се получава при взрива на инициатора. Предполагаемата мощност на инициращите взривове е 10 kt TNT. Съдът в който протича взрива е с много големи размери – $r = 60\text{ m}$, $h = 250\text{ m}$, представлява камера от железобетон с дебелина на стените $d = 25\text{ m}$, напълнена с разреден аргон. За смекчаване на ударната вълна, пред стените се създава защитна завеса от течен натрий, който едновременно се използва и за топлоносител на първи контур и за акумулатор за образувалото се ядрено гориво. Всичко това се разполага под земята, в скалисти образувания. Подобна конструкция изглежда невъзможна и опасна в днешни времена. Всички атомни взривове са забранени от международни договори и споразумения.

VIII. Проекта ITER

В света са построени около 300 токамака. Като най-голям ТЯР (за сега) е JET – joint European Torus. Разположен във Великобритания и създаден от организацията Евратом. Единствения реактор с устройства за контролиране на радиацията, изпускана при синтеза на D и T. Достига добив на енергия 16 MW, което е 71% от вложената енергия. Критерият на Лоусен, който е достигнат е 5 пъти по-нисък от нивото на запалване. Достигнатата температура на плазмата е $150 \cdot 10^6$ градуса.

Основни усилия се полагат върху ITER – International Experimental Reaktor. Разположен в ядрения изследователски център в Cadarache, южна Франция, на 80 км от Марсилия. 1985 година Русия предлага започването на нов проект - създаване на токамак от ново поколение. 2007 започва строителството. Очаква се 2020 да произведе първата си плазма. Основни членки са Русия, Китай, ЕС, Индия, Япония, Корея и САЩ. Реактора ще бъде от магнитните . Проектиран е да произвежда около 500 MW (500 млн. вата) мощност от синтез, поддържана до 500 сек. (в сравнение с пиковата мощност на JET от 16 MW за по-малко от секунда) чрез изгаряне на 0,5 гр. смес на деутерий и тритий в реакторната камера с обем 873 m^3 , общ радиус 10,7 m и височина 30 m. Цената му се определя 10 млрд. Евро, което го прави един от най-мощните научно-инженерни проекти в света. Програмата ITER има за цел да утвърди ядрения синтез като енергиен източник. В частност, ITER ще демонстрира научните и технически възможности на термоядрената енергетика и по този начин ще бъде направен прехода от настоящите токамак-експерименти до първата демонстрация на термоядрена централа. Мощността на ITER ще представлява 30% от

тази на една бъща електроцентрала. Съвместно с ИТЕР се разработва съоръжение за разработка на високотехнологични материали. След това се очаква създаване на DEMO – токамак с по-голям капацитет. Изчислено е, че до 2050, ако всичко върви по план, ТЯС да се превърне в конкурентен източник на екологично чиста енергия.

IX. Литература

- [1] Каменов, П. – *Ядрена техника*
- [2] Василев, Г. – *Ядрената енергетика и устойчивото развитие на човешката цивилизация*
- [3] Паунска, Цв. – *лекции по физика на плазмата*
- [4] http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_power#Advantages
- [5] <http://bg.wikipedia.org/wiki/ITER>
- [6] <http://www.iter.org/>