

ЕНЕРГИЯ ЗА БЪДЕЩЕТО

Ядрената алтернатива

Подробен доклад на Европейското Физическо Дружество, в който се излага становището му и се предлагат мерки по този въпрос



Европейско Физическо Дружество

повече от идеи

ПРЕДГОВОР

Спирането на малките четири енергоблока на АЕЦ Козлодуй и поетите пред Европейския съюз ангажименти относно редуциране на количествата вредни емисии в атмосферата до 2013г. – всичко това поставя с особена сериозност и актуалност въпроса за реализацията на предприятия на базата на нови енергийни източници и ролята на ядрената енергетика в цялостния енергиен баланс на България.

В тази връзка предлагам на вниманието на заинтересованата общественост материала „Енергия за бъдещето – ядрената алтернатива”, публикуван през м. декември 2007г. и отразяващ официалното становище на Европейското физическо дружество. В него се анализира проблемът „Енергетика и околна среда”, а така също и всичко, свързано с производството на ядрената електроенергия сега и в близко бъдеще.

Ползвам се от случая публично да благодаря на моите колеги, отговорни автори на този доклад:

проф. Х. Фрайслебен (председател), проф. Р. Джонсън, проф. О. Шолтен, проф. А. Тюрлер и д-р Р. Вис – членове на Съвета по ядрена физика на Европейското физическо дружество, с които имах възможността да работя през целия си четири годишен мандат като член на този орган.

Искрено съм благодарен на моите сътрудници от ИЯИЯЕ БАН: д-р Цвета Апостолова (превод), ст.н.с. д-р М. Гайдаров и ст.н.с. д-р Мария Манолова (коректори) и д-р Нина Николова (технически дизайн), които реализираха издаването на доклада на български език.

Искрено се надявам, че тази книжка ще бъде един скромнен, но необходим и полезен принос към Науката при обсъждането и решаването на актуалните проблеми на българската ядрена енергетика.

чл.-кор. д-рн Йордан Стаменов
Директор на ИЯИЯЕ-БАН

ЕНЕРГИЯ ЗА БЪДЕЩЕТО - Ядрената алтернатива

Становище на Европейското Физическо Дружество

Европейското Физическо Дружество (ЕФД) е независима организация, която се финансира чрез приноса на националните физически дружества, други организации и отделни членове. То е представител на повече от 100 000 физици и може да поиска експертиза във всички области на физиката.

Подробният доклад се състои от две части: становище на Европейското Физическо Дружество, обобщаващо препоръките и научна/техническа част. Научната/техническа част е крайно необходима за доклада, тъй като съдържа всички факти и доказателства, на които се базира становището на ЕФД.

(i) Цел на доклада (Увод)

Използването на ядрена енергия за производство на електроенергия е предмет на световна дискусия: някои страни увеличават съществено нейната експлоатация, други постепенно я изваждат от употреба, а трети забраняват използването ѝ със закони. Този доклад се стреми към балансирано представяне на предимствата и недостатъците на ядрената енергия и информиране на управляващите и обществото с достоверни факти. Неговата цел е да допринесе за демократична дискусия, която признава както научните и технически факти, така и опасенията на населението.

(ii) Бъдещите енергийни разходи и производството на електроенергия (Част 1)

Нарастването на населението в света от 6,5 милиарда в днешно време до приблизително 8,7 милиарда през 2050 година ще бъде съпътствано от нарастване на търсенето на енергия годишно с 1,7%. Нито един източник няма да е в състояние да удовлетвори енергийните нужди на бъдещите поколения. В Европа една трета от произведената енергия е електроенергия, от която 31% са произведени от ядрени електроцентрали и 14,7% от възобновяеми енергийни източници. Въпреки, че приносът от възобновяеми енергийни източници нарасна съществено от 1990 година, необходимостта от електричество не може да бъде удовлетворена без приноса на ядрената енергетика.

(iii) Необходимост от енергиен цикъл без CO₂ (Част 1)

Отделянето на газове, причиняващи парников ефект, сред които въглеродният двуокис има основен принос, засили естествения парников ефект и доведе до глобално затопляне. Основният принос идва от горенето на изкопаеми/фосилни горива. Понататъшното нарастване ще има решаващо въздействие върху живота на земята. Ето защо, за да се надвие промяната в климата трябва да се използва енергиен цикъл с възможно най-ниско отделяне на CO₂. Такива са ядрените електроцентрали – те произвеждат електричество без отделяне на CO₂.

(iv) Производство на ядрена електроенергия днес (Част 2)

В света понастоящем работят 435 ядрени електроцентрали и произвеждат 16% от световната електроенергия. Те надеждно доставят електричество при основно и пиково натоварване. Последниците от аварията в Чернобил бяха широко дискутирани по отношение на безопасността на ядрените електроцентрали и бяха изразени сериозни опасения. Ядреният капацитет в Европа вероятно няма да нарастне много в близко бъдеще, докато в Китай, Индия, Япония и Република Корея се предвижда той съществено да се увеличи.

(v) Опасения (Части 3 и 4)

Както всеки източник на енергия и производството на ядрена енергия е свързано с рискове. Въпросите за безопасността на ядрените електроцентрали, погребването на радиоактивните отпадъци, възможното разпространение на ядрени материали, годни за производство на ядрени оръжия и заплахите на терористите поражда сериозни опасения. До колко съпътстващите рискове може да се считат за приемливи е въпрос на преценка, която трябва да отчете специфичните рискове на алтернативните източници на енергия. Тази преценка трябва да бъде направена на базата на технически аргументи, научни изводи, открити дискусии на данни и факти, както и чрез сравняване с рисковете на други енергийни източници.

(vi) Производство на ядрена енергия в бъдеще (Част 5)

В отговор на опасенията за безопасност беше разработено ново поколение реактори (III-то поколение), което се отличава с напреднала технология за безопасност и подобрена аварийна защита с цел в случай на изключително малко вероятното събитие на разтапяне на реакторната активна зона цялото количество радиоактивен материал да бъде задържано в защитната обвивка на реакторната система.

През 2002 международна работна група представи концепции за IV-то поколение реактори с вътрешно присъща безопасност. Тези реактори се характеризират и с усъвършенствана икономика за производството на електричество, отделят намалени количества радиоактивни отпадъци, които трябва да се погребват и са по-неподатливи на разпространение на ядрени материали за ядрено оръжие. Въпреки че е необходима по-нататъшна научно-изследователска работа, някои от тези системи се очаква да заработят през 2030 година.

Системите, управлявани от ускорители предлагат възможност за трансмутация на плутония и минорните актиниди, които представляват основният дългосрочен радиоактивен риск на днешните ядрени реактори. Тези системи могат съществено да допринесат за широкомащабно производство на енергия след 2020 година.

Термоядрените реактори произвеждат енергия без отделяне на CO₂ чрез синтез на деутерий и тритий. За разлика от ядрените реактори при тях няма дългоживущи радиоактивни отпадъци. Тази обещаваща възможност може да е на разположение през втората половина на това столетие.

(vii) Становище на ЕФД (Част 6)

Имайки предвид проблемите на околната среда, пред които понастоящем е изправена планетата ни, днешното поколение дължи както на себе си, така и на бъдещите поколения запазването и развитието на технология, която има доказаната способност да доставя надежно и безопасно електроенергия без отделяне на CO₂. Ядрената енергетика може и трябва да има важен принос в съвкупността от източници с ниско отделяне на CO₂. Това ще бъде възможно само ако тя получи обществена подкрепа чрез отворен демократичен дебат, в който да се уважат опасенията на населението и се вземат под внимание достоверни научни и технически факти.

Тъй като производството на електричество чрез ядрена енергетика среща съпротива в някои европейски страни и научните изследвания в областта на ядреното делене се подкрепят само в няколко европейски страни, броят на студентите в тази специалност намалява, и по същия начин намалява и броят на експертите в ядрената наука. Има явна необходимост от образование в областта на ядрената наука и запазване на знанията в тази област, от дългосрочна научно-изследователска работа както в областта на ядреното делене и синтез, така и в областта на методите за изгаряне, трансмутация и съхранение на радиоактивните отпадъци.

Европа не трябва да изостава от развитието на проекти за ядрени реактори независимо от решенията за изграждане на реактори на континента. Това е важна, допълнителна причина за инвестиране в научно-изследователската дейност в областта на ядрените реактори. От съществено значение е Европа да следва програмите в бързоразвиващите се страни като Китай и Индия, които са поели задължението за изграждане на ядрени електроцентрали, както и да помогне за осигуряване на тяхната безопасност, например чрез активно участие в Международната Агенция за Атомна Енергия (МААЕ).

Изпълнителен комитет на ЕФД

Ноември 2007

ЕНЕРГИЯ ЗА БЪДЕЩЕТО

Ядрената алтернатива

Научна/Техническа част

Увод

Европейското физическо дружество има отговорността да заяви своята позиция по въпроси, за които физиката играе важна роля и които са от особена важност за обществото. Следващото изявление за *Ядрената алтернатива* и нейната роля в бъдещето, широкомащабно, устойчиво производство на електричество без отделяне на CO₂ е мотивирано от обстоятелството, че много силно развити европейски държави пренебрегват ядрената алтернатива в своята дългосрочна енергийна политика.

Промяната на климата, нарастването на населението в света, ограничените ресурси на нашата планета, силният икономически ръст на азиатските и латиноамерикански държави, и справедливите стремежи на развиващите се страни към разумни стандарти на живот - всички те сочат неминуемо към необходимостта от устойчиви енергийни източници.

Авторите на този доклад са членове на Съвета по ядрена физика (СЯФ) на ЕФД, чиято дейност е в областта на фундаменталните ядрени изследвания, без да бъдат обвързани с ядрената енергетика. Докладът излага нашите виждания за предимствата и недостатъците на ядрената енергия като устойчив източник за задоволяване на дългосрочните ни енергийни потребности. Ние призоваваме за преразглеждане на извеждането от експлоатация на ядрените електроцентрали, които функционират безопасно и ефективно, и подчертаваме необходимостта от по-нататъшна научно-изследователска работа за ядрената алтернатива, по-специално за IV-то поколение ядрени реактори, които обещават значима крачка напред по отношение на безопасността, преработването на ядреното гориво, изгарянето и погребването на радиоактивните отпадъци. Ние подчертаваме необходимостта от запазване на ядрените знания чрез образование и научно-изследователска работа в европейските институти и университети.

Хартвиг Фрейслебен (Председател на СЯФ)

Технически Университет Дрезден, Германия

Роналд С. Джонсън

Университет Съри, Гилдфорд, Обединено кралство

Олаф Шолтен

Кернфизисх Вернснелер Институт, Гронинген, Холандия

Андреас Тюрлер

Технически Университет, Мюнхен, Германия

Рамон Вис

Кралски Институт по Технология, Стокхолм, Швеция

Ноември 2007

Европейско Физическо Дружество 6 rue des Freres Lumiere
68060 Mulhouse cedex, France

1. Необходимост от устойчиво енергийно снабдяване чрез енергиен цикъл без отделяне на CO₂

Наличността на енергия за всеки е необходима предпоставка за благосъстоянието на човечеството, за световен мир, за социална справедливост и икономически просперитет. Човечеството обаче има на разположение само един свят и трябва да остави на следващото поколение жизнеспособен свят. Това се изразява в термина "устойчиво", чиято дефиниция е дадена в доклада на Брънтланд [1] от 1987: "Устойчивото развитие удовлетворява нуждите на сегашното поколение без да изложи на риск шанса на бъдещите поколения да задоволяват техните." Този етичен императив изисква всяка дискусия за бъдещата енергия да включва краткосрочни и дългосрочни аспекти на даден енергиен източник като наличност, безопасност и влияние върху околната среда. За последния аспект най-обезпокоителна е заплахата от отделянето на

отпадъци, например CO₂ от изгарянето на твърди горива или радиоактивните отпадъци от използването на ядрено гориво. Следващите параграфи очертават състоянието на първичните енергийни източници и произвеждането на електроенергия в Европа понастоящем, и засягат проблема с отделянето на CO₂. Обсъдени са също така световните разходи на енергия в бъдеще.

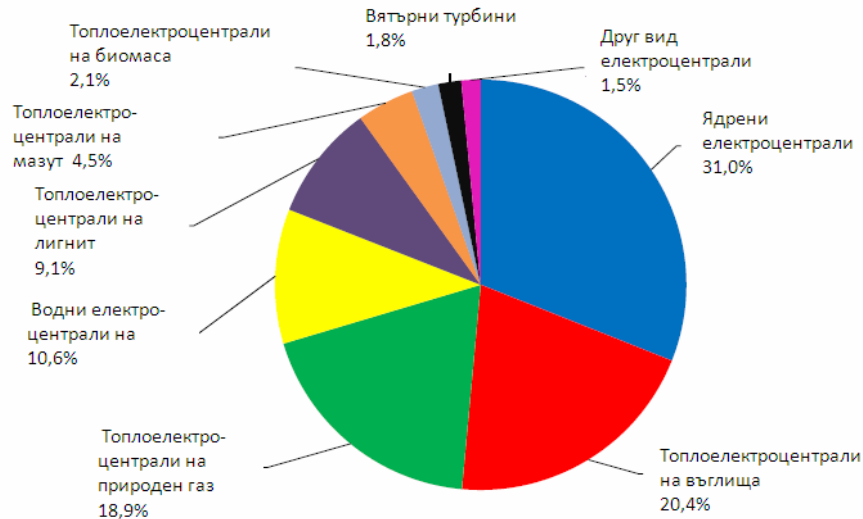
Първични енергийни източници от голям мащаб

През 2004 година общата продукция на първична енергия на двадесет и петте страни от Европейския съюз беше 0,88 милиарда тона петролен еквивалент или 10,2 Пвт/ч (1 Пвт/ч =1 петават час=1 милиард Мвт/ч) [2]. Тази енергия беше доставена от редица първични енергийни източници от голям мащаб (ядрени: 28,9%; природен газ: 21,8%; каменни въглища и лигнит: 21,6%, необработен нефт: 15,3% и неговите деривати (кокс, течен нефт, петрол) и в по-малък мащаб от възобновяеми енергийни източници (биомаса и отпадъци: 8,2%, хидроенергия: 3%, геотермична: 0,6%, вятър: 0,6%; общо 12,4%). Първичните източници задоволяват необходимостта от енергия за индустрията, селското стопанство, частните домакинства и транспорта. Нефтът и природния газ могат също да се използват като източници и са гъвкави при малко мащабно производство на енергия, както се изисква например в транспортния сектор. От цитираните по-горе цифри е очевидно, че ядрената енергия осигурява понастоящем значителна част от енергийните доставки .

Около 58,7% от общата енергийна продукция идва от изгарянето на твърди горива (каменни въглища, лигнит, нерафиниран нефт, природен газ) и се съпровожда с отделянето на CO₂, което образува 75% от парниковия ефект, предизвикан от хората. Други важни приносители са метан (CH₄, 13%), азотен окис (N₂O, 6%) и хлорофлуоровъглероди (5%) [2]. За да се пребори парниковият ефект, използването на твърди горива трябва да бъде минимизирано или тяхното нетно производство на въглероден двуокис трябва да бъде драстично намалено, където е възможно. Най-големият потенциал за намаляване на отделянето на CO₂ е при производството на електроенергия, в транспортния сектор и в икономичното използване, например чрез спестяване на енергия.

Производство на електроенергия и отделяне на CO₂

Производството на електроенергия от 25-те страни в Европейския съюз, възлизащо на 3,2 Пвт/ч, съответства на 32,3% от общата енергия, произведена от 25-те страни в Европейския съюз през 2004 година. Различните източници са посочени на **фигура 1**. Около 31% от тази електроенергия идва от ядрени електроцентрали, 10,6% - от водоелектрически централи, 2,1% - от централи изгарящи биомаса, 1,8% - от вятърни турбини, 1,5% - от други източници, сред които геотермичните, които допринасят 0,2%, докато приносят на фотоелектрическите източници е пренебрежим [2]. Нито един от тези източници не отделя CO₂ при работа. За разлика от тях централите, използващи като гориво природен газ, нефт и въглища отделят CO₂; общо те допринасят 52,9% към производството на електроенергия.



Фиг. 1: Производство на електроенергия с гориво използвано в електроцентрали, ЕС-25, 2004, [2]

От приведените цифри е очевидно, че ядрените електроцентрали осигуряват базата на европейското електроснабдяване. Те доставят в широки мащаби стабилно основно производство, а при нужда и пиково производство. Намалването на техния принос в електроснабдяването ще причини сериозен недостиг на електроенергия в Европа.

Всички източници на електроенергия изискват построяването на централи и снабдяването с гориво. Тези дейности включват добиване, обработване, конверсия и транспортиране, като самите те допринасят за отделянето на CO_2 . Заедно те формират възходящия горивен цикъл. Има и низходящ горивен цикъл. В случая с ядрените електроцентрали това включва манипулирането и съхранението на отработеното гориво, а при използването на електроцентрали, които изгарят въглища или нефт, задържането на серен двуокис (SO_2), неизгорени въглища и в идеалния случай съхранение на CO_2 [3], за да се избегне отделянето му в атмосферата. Тази техника обаче изисква значителни научни изследвания тъй като ефектите от дълготрайно съхранение на CO_2 понастоящем не са известни. Извеждането от експлоатация на електроцентрала е също част от низходящия горивен цикъл. Възходящият и низходящият горивен цикъл неизбежно включват отделянето на CO_2 . Предимствата и недостатъците на даден процес на производство на електроенергия могат да бъдат реалистично обсъдени само ако бъде оценен целия жизнен цикъл на системата.

Количеството CO_2 , отделено на 1кВтч произведена електроенергия, понякога наричано въглероден отпечатък, може се пресметне като субпродукт на анализа на жизнения цикъл [4]. Получените резултати зависят от разглежданата електроцентрала и са показани на **фигура 2** като двойки стълбове за всяко гориво.

Емисия на парникови газове от производството на електроенергия



Фиг. 2: Резултати от анализа на жизнения цикъл за емисия на CO₂ при производство на електроенергия чрез различни методи [5]

Други проучвания използват различни тегловни коефициенти и достигат до малко по-различни стойности. Глобалният Модел на Емисиите за Цялостни Системи, разработен от немския Æко-институт [6], дава следните стойности за CO₂ в грама, отделени на един кВтч: въглища (приблизително 1000), газов комбиниран цикъл (приблизително 400), ядрен (35), хидро (33) и вятърен (20) (цитирано от [7]). Тези стойности вероятно отразяват ситуацията в Германия, която може и да не е типична за другите страни [8]. Например Франция произвежда 79% от електроенергията си от ядрена енергия (Германия 31%) и затова има по-ниско отделяне на CO₂ от Германия. Дори да приемем стойностите от справка [4], една електроцентрала, която изгаря въглища пак изпуска 29 до 37 пъти повече CO₂ отколкото ядрена електроцентрала. Това означава, че производството на електроенергия от ядрени електроцентрали (31% от 3,2 Пвт/ч) предотвратява отделянето на 990 до 1270 милиона тона CO₂, които се отделят от всички коли в Европа всяка година (4.4 Ткм/годишно [2], 1 Ткм=1теракилометър=1 милион милион км; 160 г/км [9]). Замяната на ядреното производство на електроенергия с производство на базата на твърди горива в Европа ще бъде еквивалентно на повече от удвояване на емисиите от съвкупността от всички коли в Европа. Световното отделяне на CO₂, възлизащо на 28 милиарда тона [3], ще нарастне между 2,6 и 3,5 милиарда тона на година, ако ядреното гориво бъде заменено с твърдо гориво.

Тези примери на анализ на жизнения цикъл показват недвусмислено, че ядрената енергия дава незначителен принос в емисиите, водещи до парниковия ефект и този резултат не зависи от отношението към ядрената енергия на институцията, извършила анализа.

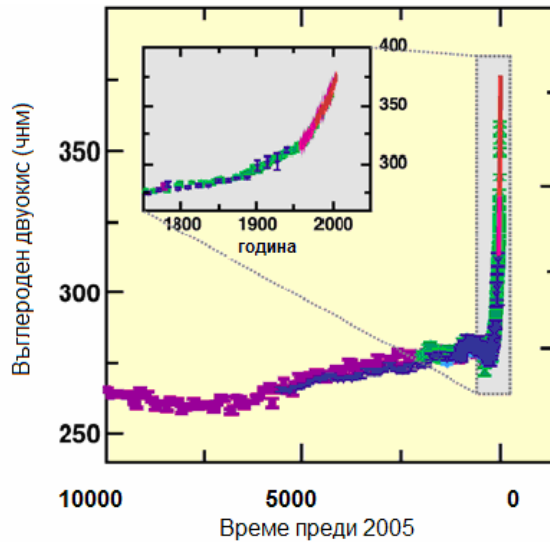
Промяна в климата

От началото на индустриализацията светът е преживял повишаване на средната температура, което почти със сигурност се дължи на предизвиканото от човека усилване а естествения парников ефект чрез увеличено отделяне на парникови газове [10]. Доказателства за това температурно повишение е ускореното топене на ледниците (Фиг.3),на вечно замръзналите райони и на арктическата ледена покривка.



Фиг.3 Пастерце-Гласиертонг с Глосглокнер (3798м), [11]

В същия период концентрацията на парникови газове в атмосферата, сред които основен принос има въглеродният двуокис (CO_2) се е увеличила до ниво, което не е наблюдавано от няколко стотин хиляди години. **Фигура 4** показва нарастването на концентрацията на CO_2 през последните 10 000 години. Съществува консенсус сред учените, че по-нататъшното повишаване на концентрацията на CO_2 в атмосферата ще има пагубен ефект върху живота на Земята [10, 12]. Така повишените емисии на парникови газове, произтичащи главно от изгарянето на твърди горива, трябва да бъдат контролирани съгласно Протокола от Киото [13].

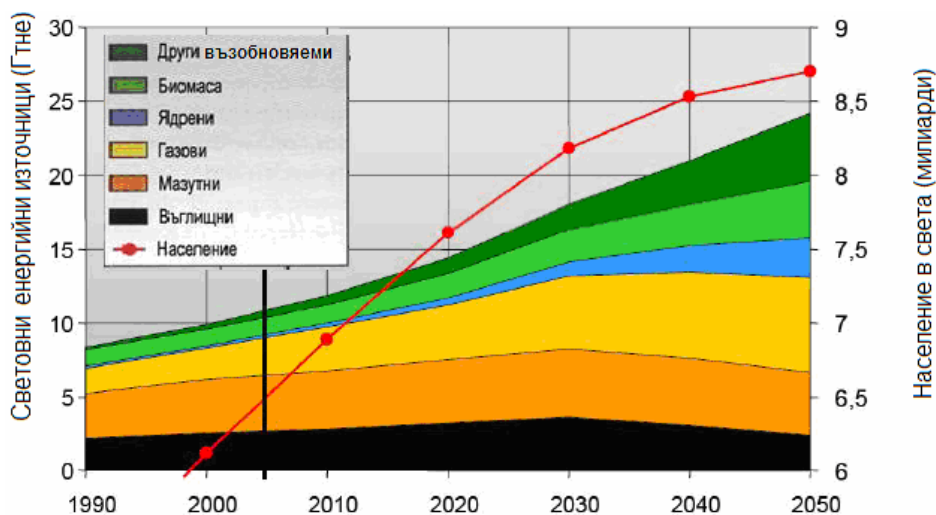


Фиг.4 Концентрация на CO₂ (части на милион чм) в атмосферата през последните 10000 години, малката графика показва резултатите от 1750г. [10]

Световни енергийни източници

Сценариите за бъдещи световни енергийни източници (отличаващи се от източниците на електроенергия) са предмет на много подробни изследвания. Сценарият за устойчиво развитие на Международната Енергийна Агенция (МЕА)(IAE/OECD)_ [14] предсказва прогресията, показана на **фигура 5** в Гтне (1 Гтне =1 гигатон нефтен еквивалент=11,63 Мвт/ч) при прираст на световното население от 6,5 милиарда в днешно време до приблизително 8,7 милиарда през 2050 година. За да посрещнем повишеното търсене на енергия, всички енергийни източници, които имаме на разположение днес, трябва да увеличат приноса си. След 2030 година, когато приносът на твърдите горива за първична енергия намалее, както показва фигура 5, ядрените, използващите биомаса и други възобновяеми енергийни източници (хидроелектрични, вятърни, геотермични) ще трябва да бъдат използвани все повече. Според Прогнозата за Световната енергия на МЕА през 2004 г.[16] до 2030 година търсенето на енергия и свързаните с енергията емисии на CO₂ ще нарастват с 1,7% годишно.

Трябва да се има предвид, че основният възобновяем източник на електроенергия е водната енергия (вж. Фигура 1), чиито принос не може съществено да бъде увеличен в Европа в предвидимо бъдеще [17]. Същото важи за електроенергията от геотермични източници [17]. Голям брой ферми с вятърни мелници за производство на електроенергия се строят в Европа от 1990 година. Трудно е да се предвиди обаче как в близко бъдеще производството на електроенергия с вятър ще замени електроенергията, произведена с газ, нефт или въглища (52,9% общо) или ядрената енергия (31%). Годишният прираст не е достатъчно голям, каквото заключение може да се направи от фигура 5. По тази причина трябва да се използват всички възможни източници, за да се справим с нарастващото търсене на енергия.



Фиг. 5 Сценарий на световните енергийни източници за устойчиво бъдеще [14, 15].
Забележете пропуснатата нулева точка на оста на населението

Последният амбициозен план на Европейския Съюз до 2020 година да намали емисиите на CO_2 с 20% под нивото на емисиите от 1990 се базира на значително намаляване на емисиите на CO_2 в транспортния сектор, но също и на бързото нарастване на фотоелектрическите и вятърните ферми в сравнение с миналото. Например, производството на електроенергия от вятърни мелници трябва да нарастне с около 17 пъти, за да се изравни с производство на електроенергия от ядрени централи. Трудно е да се предскаже как това нарастване ще бъде осъществено до 2020 година. Това изчисление дори не включва очакваното допълнително нарастване на търсенето на енергия от 1,7% годишно. В допълнение са необходими съоръжения за съхранение на енергия, за да се осигури енергия, независима от времето (природните условия); такива съоръжения все още няма. Следователно напълното заместване на ядрената енергия с възобновяеми източници е спорно, ако не и нереалистично (виж също [12]). По тази причина осъществяването на плана на Европейския Съюз за намаляване на CO_2 зависи до голяма степен от наличието на електроенергия от ядрени електроцентрали.

Заместването на ядрените електроцентрали с централи, които изгарят въглища не е възможност, защото това значително ще увеличи общата световна емисия на CO_2 . Възобновяемите източници няма да се развият достатъчно бързо, за да заместят ядрените в близко бъдеще. За да бъде задоволено нарастващото търсене на електроенергия, съвременната цел на Европейския Съюз за намаляване на CO_2 , и за да бъдат избегнати потенциално пагубни промени в климата, изборът не са ядрени или възобновяеми източници, а ядрени и възобновяеми източници.

2. Производството на ядрена енергия днес

Ядрената енергия вече се използва за широкомащабно производство на електроенергия и понастоящем се базира на деленето на уран-235 (U-235) и плутоний-239 (Pu-239) в ядрени електроцентрали. Тя съответства на около 5% от световното общо енергийно производство, доставя около 16% (2,67 Пвт/ч) от световната електроенергия [19] и спестява между 2,6-3,5 милиарда тона от CO₂ емисии на година. Използвайки новите решения, споменати по-нататък, ядрената енергия притежава възможността да продължи като главен енергиен източник в дългосрочен план със съоръжения, които изгарят ядрените отпадъци и едновременно произвеждат енергия и включват концепции за вътрешно присъща безопасност. Понастоящем (31 май 2007) по света работят 435 ядрени електроцентрали, 169 от тях са в Европа [19], **Табл. 1**. Използват се различни видове реактори: 264 реактора с вода под налягане, 94 реактора с кипяща вода, 43 реактора с тежка вода под налягане, 18 реактора с газово охлаждане; допълнително 11 графитови реактора с обикновена вода работят в Русия и един в Литва; четири реактора с бързи неутрони - в Япония. Изграждат се 37 нови блока, повечето от които в Източно-европейските и Азиатските държави, които ще доставят мощност от 32 Гвт.

Таблица 1: Ядрени електроцентрали в Европа [19].

	Производство на ядрена електроенергия 2006		Работещи реактори май 2007		Реактори в строеж май 2007		Планирани реактори май 2007	
	Твт/ч	% е	Брой	Мвте	Брой	Мвте	Брой	Мвте
Белгия	44,3	54	7	5728	0	0	0	0
България	18,1	44	2	1906	0	0	2	1900
Чешка република	24,5	31	6	3472	0	0	0	0
Финландия	22	28	4	2696	1	1600	0	0
Франция	428,7	78	59	63473	0	0	1	1630
Германия	158,7	32	17	20303	0	0	0	0
Унгария	12,5	38	4	1773	0	0	0	0
Литва	8	69	1	1185	0	0	0	0
Холандия	3,3	3,5	1	485	0	0	0	0
Румъния	5,2	9,0	1	655	1	655	0	0
Русия	144,3	16	31	21743	3	2650	8	9600
Словакия	16,6	57	5	2064	0	0	2	840
Словения	5,3	40	1	696	0	0	0	0
Испания	57,4	20	8	7442	0	0	0	0
Швеция	65,1	48	10	8975	0	0	0	0
Швейцария	26,4	37	5	3220	0	0	0	0
Украйна	84,8	48	15	13168	0	0	2	1900
Обединено кралство	69,2	18	19	10982	0	0	0	0
Европа	1194,4	35,4	196	169966	5	4905	15	15870

Реакторите в Европа, които доставят електрически ток в мрежата и тези в процес на изграждане или които се планират са изброени в таблица 1 (буквата “е” означава електроенергия).

Този капацитет вероятно ще остане непроменен в близко бъдеще с някои подобрения и удължения на живота (предимно в Източно-европейските страни). Някои страни (Белгия, Германия, Холандия, Швеция) планират постепенно изваждане от употреба на ядрената енергия, докато в други (Австрия, Дания, Гърция, Ирландия, Италия и Норвегия) използването на ядрена енергия е забранено по закон. Положението в Далечния Изток, Южна Азия и Средния изток е доста различно: има 90 работещи реактора и се предвижда значително увеличение, особено в Китай, Индия, Япония и Корейската република [19].

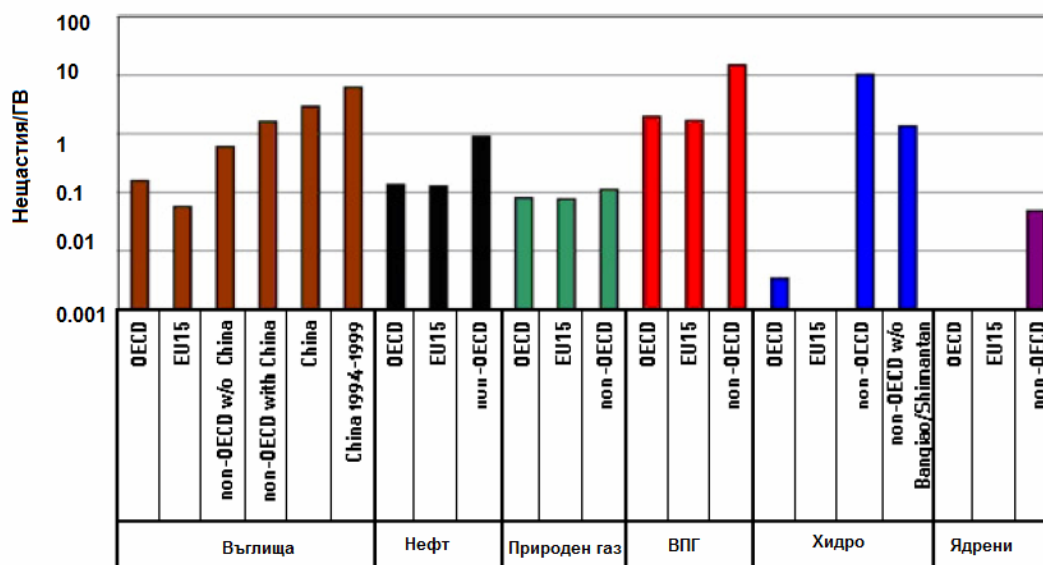
Ядрените електроцентрали осигуряват 16% от световната електроенергия; те са опора на европейското производство на електроенергия и доставят 31% от нейното електричество. Няколко нови електроцентрали се строят в Европа, докато значително нарастване на ядреното производство на електроенергия се предвижда в Южна Азия и Далечния Изток.

3. Опасения

Рискове и безопасност

Животът ни включва опасности, които са свързани с определени рискове. Това е вярно и за произвеждането на енергия. Тъй като човечеството е зависимо от енергията, трябва да бъдат оценени рисковете, които са свързани с различните енергийни източници, за да се преценят техните предимства. Учените са разработили средства за определяне на нивото на рисковете.

Например, сравнителен анализ на риска беше проведен от Института Пол-Шерер, Вилиген, Швейцария [20]. Бяха анализирани тежки аварии при производството на енергия през периода 1969-2000 година. Част от получените резултати са показани на **фигура 6**, където е даден броят на преките нещастни случаи на гигават (електр.) година (забележете нелинейния мащаб по вертикала).



Фиг. 6 Сравнение на сумарните нещастия свързани с енергията, основаващо се на историческия опит от тежки аварии, които са произтекли в страните принадлежащи на организацията за икономическо сътрудничество и развитие (ОИСР), в страните които не принадлежат на тази организация и в ЕС през годините 1969-2000, с изключение на данните от Годишника на китайската въглищна индустрия, които са от годините 1994-1999г. За хидро-веригата за непринадлежащите към ОИСР страни са дадени с и без включването на най-голямата авария в Китай, при която жертвите са 26 000. В този случай не е използвано преразпределение на щетите между страните принадлежащи и непринадлежащи на ОИСР. Отбележете, че са взети под внимание само непосредствените нещастия [20]. ВПГ: втечен природен газ

Вижда се, че в ядрените електроцентрали има най-малко нещастни случаи. В случая на аварията в Чернобил обаче трябва да се вземат под внимание дългосрочните последствия. Те бяха проучени от изследователската група на Световната Здравна Организация (СЗО) през 2005 година [21], която се състоеше от 8 специализирани агенции на Обединените нации, както и от правителствата на Беларус, Руската Федерация и Украйна. Докладът изброи 50 непосредствени жертви между които служители, участвали в спасителните операции, които са починали от остър радиационен синдром и девет деца, починали от рак на щитовидната жлеза. Въпросът за общия брой смъртни случаи в бъдеще, които са неофициално свързани с отделянето на значителни количества радиоактивен материал в околната среда е сложен и е обсъден в подробности в доклада на СЗО [21].

Възможно е да се изследват отминали аварии, но е трудно да се прецени въздействието на аварии, които могат да се случат в бъдеще. Такава оценка на риска беше направена от Б. Л. Коен, който за да изрази риска количествено въведе величина, наречена от него “очаквана загуба на живот” [22]. Този научно обоснован анализ показва, че риска от производството на електроенергия от ядрени електроцентрали е далеч по-малък от другите рискове в ежедневието [22].

Това обективно оценяване на относителния риск трябва да се конкурира с факта, че често съществува съществена разлика между забелязания риск за едно събитие и истинската вероятност това събитие да се случи. Малък риск от голяма авария се възприема различно от голям риск от малка авария, дори общият брой на жертвите на година да бъде равен в двата случая. Това важи особено за общественото възприемане на ядрената енергия, където влиза в действие радиоактивността.

Радиоактивността - спонтанното разпадане или превръщане на едно атомно ядро в друго, придружено от отделянето на алфа, бета или гама лъчение, наричано общо йонизиращо лъчение, е природно явление, съществувало дълго преди образуването на нашата планета. Радиоактивни елементи като торий и уран се намират в различни райони на Земята. Тяхното разпространение в земната кора е около 7,2 мг торий на килограм [23] и 2,4 мг уран на килограм земна кора [24]. И двата елемента се разпадат и отделят радий и радон. Радонът е радиоактивен благороден газ, който се отделя от рудни залежи и представлява особено важен източник на естествена радиоактивност в близост до такива находища. Естествена радиоактивност се съдържа и във флората, и във фауната. Например, радиоактивният въглерод-14 (C-14), който се произвежда непрекъснато чрез ядрени реакции в земната атмосфера, предизвикани от интензивен поток от космическа радиация, присъстваща в слънчевата система, прониква в биосферата и хранителната верига на всички живи същества. Нещо повече, костите на хората и животните съдържат например елементът калий (K); радиоактивния му изотоп K-40 (с разпространение 0,0117%) има време на живот по-дълго от възрастта на Земята. Общо, в тялото на човек със средни размери, на възраст 25 години и с тегло 70 кг, за една секунда протичат около 900 радиоактивни разпада [25].

Често се твърди, че ядрените електроцентрали отделят радиоактивен материал в потенциално рискова степен. Много страни имат норми и стандарти, които определят горните граници на радиоактивния материал отделен в околната среда както чрез отходния въздух, така чрез отпадъчните води (например Германското Постановление за Федерален контрол върху емисиите [26]), като придържането към тези норми и стандарти се съблюдава строго. Също така експлоатацията на ядрените енергийни реактори и научно-изследователските реактори се подчинява на строги правила, спазването на които се наблюдава от независими държавни агенции, които са упълномощени да затворят дадена електроцентрала в случай на нарушения. Установено е че емисиите в близост до ядрени електроцентрали са в границите на пространствените флукутации на фоновата радиация [27]. Трябва да се отбележи, че електроцентралите с гориво въглища също отделят радиоактивен материал, тъй като въглищата съдържат 0,05 до 3 мг уран на килограм [28]. Самият уран и продуктите на радиоактивния му разпад не могат да бъдат задържани напълно от филтри и се изпускат в околната среда [29].

Друго широко разпространено твърдение е, че случаите на левкемия възникват по-често близо до ядрени инсталации. Въпреки това изследванията показват, че “локалното натрупване на левкемия възниква независимо от ядрените инсталации” [30],

виж също [31]. Броят на ракови заболявания в резултат на аварията в Чернобил е проучен от СЗО [21]. Резултатите са обсъдени по-горе.

Безопасността на ядрените електроцентрали е важен въпрос. Унищожителната авария в Чернобил беше свързана с графитов реактор с обикновена вода (РБМК), тип който още се използва в Русия и Литва; такава авария е невъзможна за всички други типове реактори по света поради използваната технология. По-нататъшното повишаване на безопасността е един от водещите фактори за разработването на следващото поколение реактори. Те са конструирани по такъв начин, че или разтопяването на реакторната активна зона е физически невъзможно или този възможно най-лош сценарий е съчетан с реакторния дизайн така, че последствията са ограничени в защитната обвивка на реакторната система и не влияят на околната среда. Освен това защитната обвивка е проектирана да издържи стълкновение със самолет.

Отпадъци

Годишно от ядрените реактори по света се изважда 10,500 тона отработено гориво [32]. Отработеното гориво трябва да бъде или преработено, или изолирано от околната среда за стотици хиляди години, за да не увреди биосферата. Всички радиоактивни ядра, съдържащи се в радиоактивните отпадъци, се разпадат след време в стабилни ядра. Различните изотопи в радиоактивните отпадъци представляват заплаха за живите същества при поглъщане или вдишване в зависимост от техните свойства на разпад, скорост на разпад и време на задържане. Тази заплаха се характеризира количествено като радиотоксичност, която е мярка за вредността на радиоактивния изотоп. Примери за изотопи с висока радиотоксичност са дългоживущите изотопи на плутония и минорните актиниди (МА), предимно нептуний, америций и кюриум. В същото време предимно краткоживущите продукти на делене са по-слабо радиотоксични и тяхната радиотоксичност намалява бързо с времето. Радиоактивните отпадъци се получават не само при експлоатация и извеждане от експлоатация на ядрените електроцентрали, но също така от ядрената медицина и научно-изследователските лаборатории. Съхранението на тези ниско и средно активни отпадъци в подходящи хранилища не е обезпокоително и се практикува понастоящем от няколко държави. Трябва да се отбележи, че всички европейски държави, в които работят ядрени електроцентрали (виж таблица 1) и тези, които използват радиоактивни материали или йонизираща радиация, са подписали "Съвместна спогодба за безопасността на управление на отработеното гориво и радиоактивните отпадъци" на МААЕ [33].

В същото време отработеното ядрено гориво в дългосрочен план представлява сериозен проблем. В краткосрочен план оперирането с отработеното гориво е извършвано безопасно още от първите дни на ядрените реактори. След извеждането му от реактора, отработеното гориво временно се съхранява на място под вода, за да се разпадат краткоживущите радиоактивни ядра. След това отработеното гориво или се преработва така, че уранът и плутоният да се отстранят химически и да се използват наново като ядрено гориво, или в отворен горивен цикъл се опаковат (главно чрез остъкляване) за бъдещо дългосрочно съхранение в дълбоки подземни хранилища. В отворения горивен цикъл отработеното гориво трябва да се съхранява поне 170000 години, за да достигне нивото на радиотоксичност на урана, от който е произлязло.

Отстраняването на 99,9% от плутония и урана намалява времето за съхранение до приблизително 16000 години и бъдещите усъвършенствани технологии за преработка, които отстраняват също и минорните актиниди (МА), ще намалят времето за безопасно съхранение на оставащите продукти на делене до малко повече от 300 години [34]. Получените по този начин МА трябва да бъдат преобразувани в по-кратко живущи продукти на делене или изгорени в специални съоръжения, които ще бъдат обсъдени по-нататък.

Дългосрочното отстраняване на водата е основният проблем при дълбоки подземни хранилища. Възможни площадки за такива хранилища са набелязани в няколко страни и тяхната дългосрочна геоложка безопасност е подробно проучена (вж. управление на отработено гориво на финландския реактор в процес на изграждане в Олкилуото [35]). Този вид хранилище решава проблема с отпадъците, поне временно, и в някои случаи не изключва връщането на този материал за бъдеща преработка [35], [36].

Разпространение на ядрен материал, годен за изработване на ядрено оръжие и терористични заплахи

Използването на дялящ се материал за военни цели е изключително обезпокоителен въпрос, виж [37]. Когато се дискутира тази тема, трябва да се прави разграничение между създаването на ядрени бойни глави на ракети от ядрените сили и създаването на несложни бомби от терористи. Ядрените бойни глави се създават от ядрените сили от високо обогатен уран (ВОУ) или от качествен плутоний, който не се произвежда в ядрени енергийни реактори, а в реактори със специално предназначение, които са приспособени да произвеждат предимно Pu-239 [38]. Ниско обогатеният уран (НОУ), който се използва като гориво в ядрените електроцентрали, не е подходящ за експлозивно устройство. Плутоният, извлечен от отработено ядрено гориво, няма подходящата изотопна структура за пригодно и ефективно производство на ядрени бойни глави. Затова трябва да се подчертае, че продукцията на плутоний от ядрените електроцентрали не е от полза за производството на ядрени бойни глави. Възможността на дадена държава да развие програма за ядрени оръжия не зависи просто от наличието на ядрени електроцентрали в тази страна, но също от наличността на преработващи и/или обогатяващи съоръжения.

Отделен въпрос е използването на дялящ се материал от терористи. Дискусия за тази заплаха може да бъде намерена например в [39]. Делящият се материал, извлечен по химически път от отработено гориво, може по принцип да бъде използван от терористи за построяване на ядрено устройство, което има нисък експлозивен резултат, може би колкото няколко килотона TNT еквивалент [40], но отделя изобилни количества от радиоактивни отломки в околната среда, виж [41]. Също така е възможно да бъде използвана конвенционална бомба да изпари прът от отработено гориво и да разпръсне неговата радиоактивност. За предотвратяването на такива действия местонахожденията на дялящ се материал се наблюдават отблизо от международни агенции като МААЕ, виж също [42]. Тъй като преработването на ядреното гориво изисква голяма промишлена инсталация, процесът може да бъде наистина плътно охраняван и отвеждането на материал да бъде ефективно възпрепятствано. В предвидимото бъдеще

някои реактори от IV поколение ще произвеждат далеч по-малко плутоний от сегашните реактори (виж раздел 5) [43].

Друга заплаха, която не може да бъде пренебрегната е възможността терористични групи да се сдобият с ядрени оръжия директно от демонтажа на арсеналите от ядрени оръжия. Ясно е, че в този случай терористичната заплаха няма връзка с мирното използване на ядрената технология.

Като всеки енергиен източник производството на ядрена енергия е рисковано. Безопасността на ядрените електроцентрали, погребването на радиоактивните отпадъци, възможното разпространение на ядрени материали за ядрено оръжие и терористичните заплахи са въпроси за сериозни опасения. Доколко съответният риск може да се счита за приемлив е въпрос на преценка, която трябва да вземе предвид специфичния риск на алтернативните източници на енергия. Тази преценка трябва да бъде направена рационално въз основа на научни данни и открита дискусия на доказателства и при сравняване с рисковете от други енергийни източници.

4. Горивни цикли

Повечето от съвременните реактори използват деленето на U-235, което произтича при бомбардирането с топлинни неутрони; оттам термина топлинни реактори. Същият процес протича при Pu-239 и U-233, които се образуват в топлинни реактори чрез съответно неутронно захващане на U-238 и торий-232 (Th-232). За разлика от това, ядрената верижна реакция в бързи реактори се поддържа с бързи неутрони. Други топлинни реактори включват реактор с разтопени соли (виж глава 5) и тези от тип КАНДУ. В последните тежката вода е охладител и забавител на неутрони и те могат да работят с естествен уран. И двата типа реактори могат да произвеждат достатъчно U-233, за да продължат да работят, въпреки че продуктите на делене трябва да се отстраняват на равномерни интервали. Бързите реактори дори могат да създадат повече гориво (плутоний), отколкото използват (бързи реактори-размножители). В допълнение на тази класификация, могат да се разграничат два вида реактори по отношение на горивния цикъл: реактори с отворен цикъл (предимно използвани в САЩ) и реактори със затворен цикъл (например във Франция). Тези два типа ще бъдат обсъдени отделно като всеки има своите специфични проблеми и преимущества. Първо обаче, трябва да бъдат обсъдени запасите от уранова руда.

Запаси от уранова руда

Конвенционалните уранови ресурси са оценени на 14,8 милиона тона. Сред тях около 4,7 милиона тона са установени находища. Те са леснодостижими и лесни за извличане, с цена по-ниска от 130 щатски долара на килограм уран [44,45]. Балансът от около 10 милиона тона е приблизителна оценка от подробно изследване и проучване, и геоложко познание, сочещо подходящите географски райони. Оценката е по-ниска от реалната, тъй като само 43 страни са дали сведения в тази категория.

Други ресурси включват неконвенционални уранови ресурси (много ниско качество уран) и други потенциални ядрени горива (например торий). Повечето неконвенционални ресурси са свързани с уран във фосфатите (около 22 милиона тона), но съществуват други потенциални източници, например морска вода и черни глини. Тези ресурси може да се използват, ако се увеличи цената на урана. Торият е в изобилие, като възлиза на 4,5 милиона тона [46], въпреки че тази цифра не включва данни от много страни с възможни залежи на торий.

Стойността от 4,7 милиона тона установени находища трябва да бъде сравнена със световната годишна потребност от уран възлизаща на около 67 килотона през 2005 г. [19]. Предвижда се нуждата от уран за ядрени реактори в световен мащаб да нарастне между 82 килотона и 101 килотона до 2025г. Очаква се потребностите на северноамериканските и западноевропейски райони да останат почти непроменени или да спаднат леко, докато нуждите ще нараснат в останалата част на света [44]. От тези оценки следва, че има достатъчно уран от установени източници, за да бъдат снабдени с гориво реакторите с отворен цикъл в следващите 50 години. Вземайки под внимание конвенционалните (около 10 милиона тона) и неконвенционалните (около 22 милиона тона) ресурси, които могат да бъдат използвани при търсене, запасите на уранови руди ще стигнат за няколко стотин години дори уранът да бъде използван в отворен горивен цикъл. Ако се използва затворен горивен цикъл, урановите запаси ще бъдат достатъчни за хиляди години (виж по-нататък).

Отворен горивен цикъл

След като бъде добита, урановата руда се преработва в уранов хексафлуорид UF_6 . UF_6 , който е обогатен до изотопа U-235, за да се увеличи концентрацията на дялящи се U-235 ядра до 4,6%. Съдържанието на U-235 в природния уран е 0,72% и е много ниско за използване в повечето реактори освен тип КАНДУ, които могат да работят с природен уран. След това флуоридът се преработва в обогатен уранов оксид UO_2 , от който се произвеждат таблетки и се оформят в прътове. Тези прътове стоят в реактора до около четири години, докато контролираната верижна реакция на ядреното делене непрекъснато освобождава енергия, която се превръща в електричество. Всеки етап на производството сам по себе си е цялостен индустриален процес.

Тъй като прътовете с отработено гориво не се преработват, всички минорни актиниди и по-конкретно плутоният остават в горивните прътове, във форма, която не може да се използва удобно и ефективно за производство на оръжие. Тази вътрешно присъща безопасност, отнасяща се до разпространението на ядрените суровини, годни

за ядрено оръжие, е главното преимущество на отворения горивен цикъл. В [47] могат да бъдат намерени и други преимущества на този режим на експлоатация.

Основен недостатък на този процес е, че произвежда радиоактивни отпадъци, които трябва да бъдат съхранявани стотици хиляди години, за да намалее нивото им на радиотоксичност до това на природната руда. Този цикъл води до загуби на уран и дялящ се плутоний. Например, в съвременните реактори с обикновена вода началното обогатяване на горивото по U-235 е 3,3%, в отработеното гориво е все още 0,86% [48]. С този горивен цикъл урановите запаси ще стигнат само за следващите 50 години.

Затворен горивен цикъл

Процесите в реакторите със затворен цикъл до голяма степен следват същите стъпки като в отворения цикъл. Основната разлика е, че отработеното гориво се преработва химически (възстановяване на плутоний-уран чрез извличане), като плутоният и уранът се използват отново като смесено окисно гориво [49]. Извличане на уран и плутоний от отработеното гориво се извършва рутинно в Ла Хага (Франция), Селафилд (Обединено Кралство), Рокашо (Япония), и Маяк (Русия). Минорните актиниди не се извличат и са основните съставни части на дългоживущите радиоактивни отпадъци, които трябва да се съхраняват безопасно (виж по-горе: Отпадъци) или се изгарят/преобразуват (виж по-долу: Бъдещи перспективи за управление на отработеното гориво). Разбира се, разделянето е широко-машабен процес и рисковете, свързани с него, са обсъдени по-горе (виж Разпространение на ядрени суровини, годни за ядрено оръжие и терористична заплаха). В работещите понастоящем съоръжения отделените изотопи са строго наблюдавани от международни групи за документиране на техните местонахождения.

Преимуществото на затворения горивен цикъл е, че има по-малка потребност от уранова руда. Преработеният материал може да се използва в бързи реактори-размножители, които са стократно по-ефективни. Със сега известния ни запас от уранова руда, ядрените реактори на делене могат да работят за 5000 години вместо само 50 години с отворения горивен цикъл. По-малката нужда от уранова руда ще намали влиянието на рудодобива върху околната среда и в допълнение ще облекчи геополитическите и икономическите конфликти за запасите на уранови руди. Друг възможен затворен горивен цикъл се основава на торий [50], който е 3-4 пъти по-разпространен от урана.

Бъдещи перспективи за работа с отработеното ядрено гориво

Алтернативата на много дълго съхранение на отработеното ядрено гориво (ОЯГ) е то да бъде изгорено в специално предназначени реактори ([43], виж по-долу) или да се преобразуват дългоживущите изотопи в краткоживущи чрез системи, управлявани от ускорители. И двата процеса изискват ефективното разделяне не само на U/Pu, но също и на минорни актиниди. Ефективността на разделянето е 99,9%; тази на изгарянето/преобразуването, обаче се очаква да бъде около 20%. Затова са необходими няколко цикъла на разделяне и изгаряне/преобразуване, за да се намали значително количеството на дългоживущия радиоактивен материал [34]. Тогава след малко повече

от триста години, период за който е възможно безопасно съхранение на ОЯГ, радиотоксичността на ОЯГ ще е по-малка от тази на урана, от който е първоначално получено горивото.

Обещаващи схеми на трансмутация, основаващи се на системи управлявани от ускорители се изучават в последните десетилетия [51]. Тази нова концепция се следва в Европа и в Азия. Основната идея е да се използва хибриден реактор, комбиниращ реактор на делене със силнотокков ускорител на протони до високи енергии. Последният се използва за произвеждането на много интензивен неутронен поток, който предизвиква делене в мишената от уран, плутоний и минорни актиниди. Неутроните са нужни, за да започне и поддържа процеса на делене, тъй като не се използва самоподдържаща се верижна реакция. По принцип такава хибридна система може да превръща радиоактивните отпадъци в краткоживущи продукти на делене и едновременно да произвежда енергия.

Започнат е проект по 6-та Рамкова програма на Европейската комисия за разработване на първото експериментално съоръжение, което да демонстрира възможността за трансмутация със системи управлявани от ускорители. Успоредно с това се развива идеен проект за модулна реализация на индустриално ниво. Тези проучвания трябва да включват изучаване на надежността и икономическата конкурентноспособност. Такива хибридни системи имат, освен изгарянето на отпадъци, също и потенциала да допринесат съществено за широко-мощно енергийно производство след 2020г. Системите управлявани от ускорители се конкурират силно с реакторите от IV-то поколение, които са също проектирани за ефективно изгаряне на минорни актиниди (за реактори IV-то поколение виж следващата глава).

Ядрените реактори с отворен и затворен горивен цикъл произвеждат енергия чрез делене на гориво от тежки ядра с неутрони, но третират произведените отпадъци по различни начини. Системата с отворен цикъл е привлекателна от гледна точка на безопасността. Системите със затворен цикъл извличат използваното гориво от отпадъците и следователно имат значително по-малка необходимост от уранова руда.

5. Производство на ядрена енергия в бъдеще

Модерни ядрени реактори

Енергийните планове за следващите 50 години показват, че е жизнено важно да не се пренебрегва ядрената алтернатива за производство на енергия. Въпреки това съвременните реакторни технологии и свързаните с тях горивни цикли, основаващи се на U-235, произвеждат голямо количество потенциално опасни отпадъци, като при някои типове реактори рискът от катастрофално събитие е неприемливо висок. Като резултат от тези проблеми на безопасността и свързането на ядрената енергия с аварията в Чернобил и с ядрените оръжия, ядрената индустрия е изправена пред силна опозиция в някои европейски страни.

В отговор са създадени реактори от III-то поколение, като Европейският реактор под налягане (EPH), който се изгражда в Олкилуото, Финландия и представлява крачка напред в технологията за безопасност [35]. Той се характеризира със съвременна аварийна защита, за да бъде намалена още повече вероятността от повреждане на активната зона. Подобреният аварийен контрол ще осигури задържането на целия радиоактивен материал в защитната обвивка на реактора в изключително редкия случай на стопяване на активната зона, а също така и ограничаването на последиците от авария в самата ядрена централа. Ще има също подобрена издържливост при директен сблъсък с летателен апарат, включително и с големи реактивни самолети.

През 2001 година над 100 експерти от Аржентина, Бразилия, Канада, Франция, Япония, Корея, Южна Африка, Съединените Щати, МААЕ и Агенцията по ядрена енергия към Организацията за икономическо сътрудничество и развитие (NEA/OECD) започнаха работа по определянето на целите на новите системи, като идентифицираха и оцениха най-обещаващите концепции и установиха какви научно-изследователски усилия ще бъдат необходими. До края на 2002 г. работата доведе до описването на шест системи и свързаните с тях научно-изследователски нужди [43]. В създаването на реакторите от IV-то поколение (GEN IV) се поставя силен акцент върху безопасността. Ключово изискване е избягването на авария като Чернобил. В допълнение тези реактори ще подобрят икономиката на производство на електроенергия, ще намалят количествата ядрени отпадъци, нуждаещи се от погребване, ще засилят устойчивостта на разпространение на ядрени материали за ядрени оръжия и ще въведат нови възможности, като производство на водород за транспорта [сравни с **таблица 2**]. Също така има възможност за използване на торий-уранов цикъл. Преимуществовата на този цикъл – като например невъзможността според физическите закони да се произвежда плутоний и/или минорни актиниди и следователно намаляването на радиотоксичността на отпадъците около 1000 пъти в сравнение с отворения уранов цикъл - бяха обсъдени в неотдавнашна статия [53].

Таблица 2: IV-то поколение реактори и някои от техните характерни свойства, взети от [43]

БРГ	Бърз реактор с газово охлаждане	Ефективно управление на актиниди; затворен горивен цикъл. Произвежда електричество, водород или топлина
БРО	Бърз реактор с оловно охлаждане	Малка, промишлено построена централа; затворен цикъл с дълъг интервал на презареждане на гориво (15-20 години). Лесно-преносима до мястото, където има необходимост от производство на енергия, питейна вода, водород. Обмислят се и по-големи БРО.
РСС	Реактор с разтопени соли	Приспособен за ефективно изгаряне на Pu и MA; течното гориво отменя необходимостта от производството на гориво, с вътрешно присъща безопасност. От най-висок ранг по отношение на устойчивостта, най-добре пригоден за ториев цикъл.
БРН	Бърз реактор с натриево охлаждане	Ефективно управление на актинидите; конверсия на възпроизвеждащия U; затворен цикъл
СКРВ	Супер критичен реактор с водно охлаждане	Ефективно производство на електроенергия; възможност за управление на актинидите; отворен уранов цикъл в най-опростена форма, възможен е и затворен цикъл.
ВТР	Високотемпературен реактор	Отворен уранов цикъл; производство на електроенергия и топлина за петро-химическата индустрия; термо-химично производство на водород.

Въпреки, че са необходими още изследвания, се очаква някои от тези системи да заработят до 2030 г. При най-съвременните горивни цикли, съчетани с рециклиране, голяма част от дългоживущите продукти на делене се изгарят, така че изискванията за изолиране на отпадъците се намаляват до няколко стотин години вместо стотици хиляди години.

Много е рано да се дава окончателна оценка на достойнствата на системи управлявани от ускорители и реакторите IV-то поколение като системи, произвеждащи

енергия и преобразуващи отпадъците, но общите положителни свойства на двете системи са очевидни. За сравнително проучване виж [54].

Термоядрени реактори

Бъдеща възможност за производство на ядрена енергия без отделяне на CO₂ е термоядреният процес. През 2005г. важна стъпка към неговото осъществяване беше направена с вземането на решение да бъде построен Международния Термоядрен Експериментален Реактор, [55] в Кадараш, Франция. В този реактор се синтезират деутерий и тритий, за да образуват хелий-4 и неутрон, който отнася 80% от освободената енергия. Хелий-4 е “нерадиоактивна пепел” в процеса на синтез. Когато заработи, такъв реактор размножава трития, необходим като гориво, от лития. Деутерият е тежък изотоп на водорода и е разпространен в практически неограничени количества в природата. Световните ресурси на литий са оценени на 12 милиона тона [56], което е достатъчно ядрения синтез да се разгледа като енергиен източник за значително време. При изграждането на термоядрена електроцентрала ще се използват материали, за които след неизбежната неутронна активация, активността спада сравнително бързо до допустимо ниво в рамките на сто години. След това материалът може да бъде безопасно манипулиран на работна маса. Опитът с боравенето с радиоактивен тритий оправдава твърдението, че източникът на термоядрена енергия е много безопасен. Ядреният синтез обаче може да стане значително средство за енергоснабдяване най-рано във втората част на този век, тъй като технологията на термоядрените реактори се нуждае от по-нататъшно разработване.

Новите реакторни концепции (GEN IV) ще удовлетворят строгите критерии за постоянно и надеждно енергийно производство и тези за безопасност и неразпространение. Ядреното делене и синтез имат потенциала да допринесат съществено за задоволяване на бъдещата потребност от електроенергия.

6. Заключение

Нашите разглеждания водят до следните заключения:

- Нито един енергиен източник няма да може да удовлетвори нуждите на бъдещите поколения.

- Ядрената енергия може и трябва съществено да допринесе за разнообразния спектър от източници на електроенергия.
- Съвременните ядрени реактори, основани на доказана технология и използващи усъвършенствани средства за аварийна защита, включително и пасивни системи за безопасност, ще направят практически невъзможна авария от типа на тази в Чернобил и всичките нейни последици.
- Обширни и дългосрочни програми за проучване, развитие и демонстрация (ПРИД), включващи всички възможни начини за постоянно производство на енергия, трябва да бъдат започнати или продължени. ПРИД за специфични възможности трябва да бъдат насочени към осъществяването и оценката на функционираща демонстрационна система, например базирана на IV-то поколение реактори.
- Трансмутацията на отпадъците при използване на системи управлявани от ускорител или на IV-то поколение реактори ще трябва да бъде следвана; при това необходимите следващи стъпки са инженерно разработване и демонстрационна инсталация.
- Възможността за удължаване на живота на съществуващите реактори трябва също да бъде проучена.
- Ядрената алтернатива трябва да означава разглеждане на производството на енергия чрез ядрени и термоядрени процеси.
- Потенциалът на ядрената алтернатива след 2020г. година може да бъде оценен на базата на значителни ПРИД усилия, като се има предвид дългия период между демонстриране и реализация на предложените проекти. Такива усилия трябва да бъдат съгласувани между учените и политиците, за да се определи дългосрочната безопасност и икономическите аспекти на енергийното производство.
- Предложението на Европейската комисия от май 2006г. за обща европейска енергийна политика трябва да бъде осъществено. Тази политика цели да даде възможност на Европа да се изправи пред бъдещите предизвикателства на енергийното снабдяване и техните ефекти върху растежа и околната среда [57], както и да следва Зелената харта на ЕК за европейска стратегия за сигурността на енергийното снабдяване [58].
- Една програма за ПРИД за ядрената алтернатива също изисква подкрепа на фундаменталните научни изследвания в областта на ядрената наука и съответното материалознание, тъй като само по този начин може да бъде изграден експертен потенциал, необходим за намирането на нови технологични решения.
- Необходимо е Европа да продължи активно да участва в развитието на проектирането на ядрени реактори, независимо от решенията за тяхното изграждане в Европа. Това е важна допълнителна причина за инвестиране в ПРИД на реакторите и е съществено Европа да може да следва програмите в бързо-развиващите се страни като Китай и Индия, които са се ангажирали да построят ядрени електроцентрали, и да помогне да се осигури тяхната безопасност, например чрез активно участие в МААЕ.
- ПРИД трябва да се изпълняват в глобален мащаб. Проблемите, свързани с устойчиво и широкомащабно производство на ядрена енергия, като съхранение

на отпадъците, безопасност, неразпространение на ядрените материали и обществено одобрение надхвърлят националните граници.

- Решението на политиците трябва да задоволява неотложната необходимост от разрешаване на проблема на парниковия ефект в рамките на добре дефинирана енергийна стратегия, чрез стимулиране и финансиране на ПРид включително и ядрената алтернатива. Европейската комисия вече е приела тази фундаментална концепция [59].
- За да бъде получено обществено одобрение и подкрепа, е необходима разумна и безпристрастна информационна програма по всички аспекти на производството на ядрена енергия, поддържана от програма, която помага на широката общественост да оценява правилно и да се произнася по технологичните рискове и определянето на риска в индустриализираната икономика. Нужни са големи усилия, за да се информира широката общественост за краткосрочните и дългосрочни аспекти на безопасност и за екологичното въздействие на различните технологии, които допринасят за високо индустриализираните райони в Европа. Ако ядрената технология трябва да допринесе за задоволяването на бъдещите енергийни потребности на Европа и да облекчи сериозните ефекти, които оказват върху околната среда другите енергийни източници, тя трябва да получи обществено одобрение. В противен случай развитието на иновации може да бъде възпрепятствано и дори спряно от общественото мнение.

Нито един енергиен източник няма да може да удовлетвори нуждите на бъдещите поколения. Ядрената алтернатива, обхващаща най-новите значителни постижения в технологията и безопасността, трябва да бъде един от основните компоненти на енергийното снабдяване в бъдеще. Необходими са дългосрочни програми за проучване, развитие и реализация, както и фундаментални изследвания в областта на ядреното делене и термоядрения синтез, включително и на методите за трансмутация и съхранение на отпадъците. Трябва да се намерят начини за информиране на широката общественост за рационална оценка на рисковете. Всеки, който участва в процеса на вземане на решения, трябва да бъде добре информиран по енергийните въпроси. Важна задача на европейската наука и научните изследвания е да осигури тази информация.

References (Internet addresses effective 1 November 2007)

[1] World Commission on Environment and Development, Our Common Future (New York: Oxford University Press, 1987)

[2] Statistical Office of the European Communities

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu>

See also:

Europe in figures, eurostat yearbook 2006-07, ISBN 92-79-02489-2

Electronic version:

http://epp.eurostat.ec.europa.eu/cache/ITY_OFFPUB/KS-CD-06-001-ENERGY/EN/KS-CD-06-001-ENERGY-EN.PDF

[3] Helmut Geipel, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Berlin, Germany, at Greenpeace Workshop on "Klimaschutz durch CO₂-Speicherung Möglichkeiten und Risiken" (in German)

http://www.greenpeace.de/fileadmin/gpd/user_upload/themen/energie/Geipel_BMWA_CCS_50926.pdf

[4] Externalities of Energy. A Research Project of the European Commission

<http://www.externe.info>

[5] Uranium Information Centre Ltd., GPO Box 1649N, Melbourne, Australia

<http://www.uic.com.au/nip100.htm>

[6] Öko-Institut e.V. (Institute for Applied Ecology) Postfach 50 02 40, 79028 Freiburg, Germany

<http://www.oeko.de/service/gemis/en/index.htm>

[7] World Information Service on Energy (WISE), P.O. Box 59636, 1040 LC Amsterdam, The Netherlands

<http://www.nirs.org/mononline/nukesclimatechangereport.pdf>

[8] see also: Parliamentary Office of Science and Technology (October 2006, No. 268): Carbon Footprint of Electricity Generation

<http://www.parliament.uk/documents/upload/postpn268.pdf>

[9] http://auto.ihs.com/news/2006/eu-en-auto-emissions.htm?wbc_purpose=Ba

[10] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, Working group I

<http://www.ipcc.ch/SPM2feb07.pdf>

[11] Gesellschaft für ökologische Forschung e.V., Frohschammerstr. 14, 80807 München

<http://www.gletscherarchiv.de/202006past1.htm> , (in German)

[12] International Panel on Climate Change, IPCC-report 2007, WG III

<http://www.ipcc.ch/SPM040507.pdf>

23

[13] Kyoto-Protocol

<http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.html>

- [14] Energy to 2050: Scenarios for a Sustainable Future (2003), International Energy Agency (IEA/OECD) Paris, France.
http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/2050_2003.pdf
- [15] The Role of Nuclear Power in Europe, World Energy Council, 2007
http://www.cna.ca/english/Studies/WEC_Nuclear_Full_Report.pdf
- [16] World Energy Outlook, International Energy Agency, 9 rue de la Fédération, 75015 Paris, France
www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf
- [17] Institute of Physics Report: The Role of Physics in Renewable Energy, RD&D, 2005
- [18] http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/site/en/com/2007/com2007_0002en01.pdf
- [19] World Nuclear Association, 22a St James's Square, London SW1Y 4JH, United Kingdom
<http://www.world-nuclear.org>
- [20] Paul Scherrer Institut (PSI), 5332 Villigen, Schweiz, Technology Assessment/ GaBE
<http://gabe.web.psi.ch/research/ra/>
- [21] World Health Organisation, Avenue Appia 20, CH - 1211 Geneva 27, Switzerland
<http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2005/pr38/en/index.html>
- 22] Bernard L. Cohen: *Before it's too late*; Springer 1983, ISBN-13: 978-0306414251, and
http://www.ecolo.org/documents/documents_in_english/Bernard.Cohen.rankRisks.htm
- [23] Mineral Information Institute, 505 Violet Street, Golden CO 80401, USA
<http://www.mii.org/Minerals/photothorium.html>
- [24] Deutsche Zentrale für Biologische Information,
<http://www.biologie.de/biowiki/Uran> (in German)
- [25] Martin Volkmer, Radioaktivität und Strahlenschutz (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-45-3, new edition (in German)
http://www.ktg.org/r2/documentpool/de/Gut_zu_wissen/Materialien/Downloads/013radioaktivitaet_strahlenschutz2005.pdf
- [26] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Alexanderstraße 3, 10178 Berlin, Germany
http://www.bmu.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/anhang_a.pdf
(in German)

[27] Niedersächsisches Umweltministerium; Archivstraße 2, 30169 Hannover, Germany

http://www.umwelt.niedersachsen.de/master/C24150382_N23066970_L20_D0_I598.html

[28] Zur Geochemie und Lagerstättenkunde des Urans, (in German)
Gebrüder Borntraeger, Berlin Nikolassse, 1962, ISBN 3-443-12001-6

[29] Strahlenschutzkommission, Geschäftsstelle beim Bundesamt für Strahlenschutz, Postfach 12 06 29, 53048 Bonn, Germany
<http://www.ssk.de/werke/volltext/1981/ssk8102.pdf> (in German)

[30] Deutsches Krebsforschungszentrum, Im Neuenheimer Feld 280, 69120 Heidelberg, Germany,
http://web.archive.org/web/20050430173258/http://www.dkfz.de/epi/Home_d/Programm/AG/Praevent/Krebshom/texte/englisch/204.htm

[31] R. Neth: *Radioaktivität und Leukämie*, Deutsches Ärzteblatt 95, Ausgabe 27, 03.07.1998, S. A-1740 / B-1494 / C-1386 (in German)
<http://www.aerzteblatt.de/v4/archiv/artikeldruck.asp?id=12227>

[32] http://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3_en.pdf

[33] <http://www-ns.iaea.org/conventions/waste-jointconvention.htm>

[34] A. Geist et al.: *Reduzierung der Radiotoxizität abgebrannter Kernbrennstoffe durch Abtrennung und Transmutation von Actiniden: Partitioning*, NACHRICHTEN-Forschungszentrum Karlsruhe Jahrgang 36(2004) p. 97-102
<http://bibliothek.fzk.de/zb/veroeff/58263.pdf>

[35] Posiva Oy, 27160 Olkiluota, Finland
<http://www.posiva.fi>

[36] The Long Term Storage of Radioactive Waste: Safety and Sustainability; A Position Paper of International Experts, IAEA 2003
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/LTS-RW_web.pdf

[37] Gerald E. Marsh and George S. Stanford: *Bombs, Reprocessing, and Reactor Grade Plutonium*; Forum on Physics and Society of the American Physical Society, April 2006, Vol. 35, No. 2
<http://units.aps.org/units/fps/newsletters/2006/april/article2.cfm>

[38] Management and Disposition of Excess Weapons Plutonium, National Academy of Sciences (U.S.), Panel on Reactor-Related Options, 1995
http://www.ccnr.org/reactor_plute.html

[39] NuclearFiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation, 1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclearweapons/issues/terrorism/introduction.htm>

[40] J. Carson Mark, Science & Global Security, 1993, Vol. 4, pp 111-128
http://www.fissilematerials.org/ipfm/site_down/sqs04mark.pdf

[41] Making the Nation Safer - The Role of Science and Technology in Countering Terrorism. In: The National Academy Press (Washington DC, USA) 2002;
http://books.nap.edu/catalog.php?record_id=10415

[42] nuclearfiles.org, A Project of the Nuclear Age Peace Foundation
1187 Coast Village Road, Santa Barbara CA 93108-2794, USA
<http://www.nuclearfiles.org/menu/key-issues/nuclearweapons/issues/proliferation/fuel-cycle/index.htm>

[43] A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy System, issued by the U.S.DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee and the Generation IV International Forum, Decembre 2002,
<http://www.gen-4.org/Technology/roadmap.htm>

[44] Resources, Production and Demand, A Joint Report by the OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency ("Red Book", 21st edition)
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2006/uranium2005-english.pdf>

[45] International Atomic Energy Agency, P.O. Box 100, Wagramer Strasse 5 A-1400 Vienna, Austria
<http://www.iaea.org/NewsCenter/Statements/DDGs/2006/sokolov01062006.html>

[46] The 2005 IAEA-NEA "Red Book", quoted in
<http://www.world-nuclear.org/info/inf62.html>
26

[47] Frank N. von Hippel: *Plutonium and Reprocessing of Spent Nuclear Fuel*; Science, 293 (2001) 2397-2398
<http://www.princeton.edu/~globsec/publications/pdf/Sciencev293n5539.pdf>

[48] Martin Volkmer, Kernenergie Basiswissen (in German), Courier Druckhaus, Ingolstadt, 2003, ISBN 3-926956-44-5, new edition (in German)
<http://lbs.hh.schule.de/klima/energie/kernenergie/basiswissen2004.pdf>

[49] AREVA Head Office, 27 – 29 rue Le Peltier, 75433 Paris cedex , France
http://www.arevaresources.com/nuclear_energy/datagb/cycle/indexREP.htm

[50] Shaping the Third Stage of Indian Nuclear Power Programme, Government of India, Department of Energy
<http://www.dae.gov.in/publ/3rdstage.pdf>

[51] http://cdsagenda5.ictp.trieste.it/askArchive.php?base=agenda&categ=a04210&id=a04210s122t8/lecture_notes

[52] <http://nuklear-server.ka.fzk.de/eurotrans/>

[53] S. David et al. in europysicsnews 2007, Vol. 38, no.2, p. 24

[54] OECD Nuclear Energy Agency, Le Seine Saint-Germain12, boulevard des Îles, F-92130 Issy-les-Moulineaux, France
<http://www.nea.fr/html/ndd/reports/2002/nea3109.html>

[55] <http://www.iter.org/>

[56] Mineral Information Institute, 505 Violet Steet, Golden CO 80401, USA
<http://www.mii.org/Minerals/photolith.html>

[57] SCADPlus: Green Paper:
A European strategy for sustainable, competitive and secure energy
<http://europa.eu/scadplus/leg/en/lvb/l27062.htm>

[58] http://ec.europa.eu/energy/green-paper-energy-supply/doc/green_paper_energy_supply_en.pdf

[59] <http://ec.europa.eu/energy/nuclear/doc/brusselsfdemay2002.pdf>



Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика
Българска академия на науките
Бул. Цариградско шосе № 72
1784 – София

Директор: (02) 974 37 61
e-mail: inrne@inrne.bas.bg
<http://www.inrne.bas.bg>