Влияние на затварянето на горивния цикъл върху изменението на материалната бариера пред разпространението на плутоний, получен в леководни енергийни реактори

маг. инж. Ивайло Найденов, кат. „ТЕЯЕ“, ТУ – София

1. Въведение

Ускореното развитие на ядрените технологии започва по време на Втората световна война като най-големи усилия в тази насока се полагат от САЩ и техните съюзници – Великобритания и Канада. Израз на тези усилия е добре познатият проект „Манхатън“, чиято крайна цел е създаването на ядрено оръжие. Целта е постигната – произведени са две плутониеви и една уранова бомба, като и трите са използвани. Плутониевите устройства са използвани при теста „Тринити“ и при бомбардировката на японския град Нагасаки, а урановото оръжие е взривено над град Хирошима.

В течение на проекта „Манхатън” са развити множество технологии, включващи изгаждането и експлоатацията на сравнително прости ядрени реактори, технологии за изотопно разделяне на урановите изотопи, за химическо отделяне на плутония от отработеното ядрено гориво, за металургична обработка на урана и плутония и други.

Около десетилетие след края на Втората световна война започва развитието на граждански приложения на ядрената техника като технологиите за изграждане на енергийни реактори, преработка на отработено ядрено гориво и изотопно обогатяване на уран с течение на времето придобиват търговски статут.

Актуалността на проблемите, свързани с неразпространението на ядрени материали произтича от обстоятелството, че ядрената енергетика се счита за технология с двойно предназначение [18], а устойчивостта на разпространение е основно изискване пред разработката на енергийни реактори от поколение IV и избора на стратегия и конфигурация за горивните им цикли [27],[40].

За да бъде осигурено устойчиво присъствие и развитие на ядрената енергетика на световния енергиен пазар е необходимо да се вземе предвид загрижеността, произтичаща от наличието на риск от разпространение на ядрени материали. Поради това, при разработката на следващо поколение ядрени енергийни системи, не бива да се забравя, че към настоящия момент няма изцяло защитени от гледна точка на нерегламентираното разпространение горивни цикли. При все това, винаги е възможно рискът от разпространение да бъде снижен чрез прилагането на различни мерки, а също така е важно да се знае, че ръст на ядрената енергетика не е тъждествен на ръст в риска от разпространение [30].

2. Ядрени материали

Понятието „ядрени материали“ е добре дефинирано в българското и международното право. Съгласно българското законодателство ядрен материал е изходен материал или специален ядрен материал, като се дава възможност на

Министерски съвет да определя допълнително ядрени материали. Съгласно възприетите дефиниции изходен ядрен материал е:

1. уран, съдържащ смес от изотопи в съотношения, срещащи се в природата;
2. обеднен уран;
3. всяко от горепосочените вещества във формата на метал, сплав, химическо съединение или концентрат;
4. материал, съдържащ едно или няколко от изброените вещества с концентрация и в количества, превишаващи установените в нормативен акт стойности.

Законът дефинира като специален ядрен материал ^{239}Pu, ^{233}U, уран, обогатен с изотопите ^{235}U или ^{233}U и всякакъв друг материал, съдържащ един или няколко от изброените радионуклиди [47]. Това са дефинициите, възприети от МААЕ и Евратом [13],[51], като е логично тяхното пренасяне в националната нормативна уредба. В Наредбата за осигуряване на физическата защита на ядрените съоръжения, ядрения материал и радиоактивните вещества [50] от дефиницията за ядрен материал са изключени плутониевите изотопни смеси, съдържащи над 80% ^{238}Pu като това кореспондира с Конвенцията за физическа защита на ядрения материал [48].

Много по-детайлно са описани различните ядрени материали в САЩ, които, придържайки се към международно възприетите определения, категоризират допълнително материалите според приложенията и изотопния им състав [43]. Списъкът с ядрени материали се допълва от американския Департамент по енергетика [41] като включва уран с всякакво съдържание на ^{235}U (природен, обеднен, обогатен), ^{233}U, ^{238}Pu, ^{239}Pu, ^{240}Pu, ^{241}Pu, ^{242}Pu, ^{241}Am, ^{243}Am, Bk, ^{252}Cf, Cm, обогатен литий, ^{237}Np, торий, деутерий, тритий, както и уранът, находящ се в разделителните каскади.

3. Неразпространение на ядрени материали и физическа защита

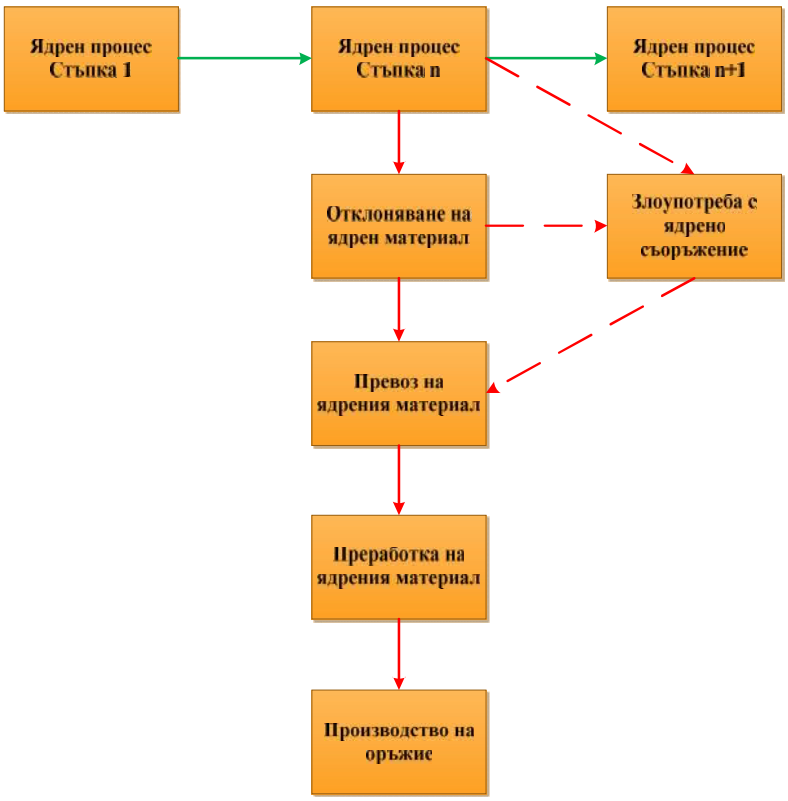
Неразпространението на ядрени материали е дефинирано от Международната агенция по атомна енергия като такава характеристика на ядрена система или съоръжение, която възпрепятства отклонението или недекларираното производство на ядрен материал, както и злонамереното използване на ядрена технология от държава за придобиване на ядрено оръжие или друг ядрен експлозив. Така определена, устойчивостта на нерегламентирано разпространение на ядрени материали в известна степен измерва трудностите (технически и технологични пречки, необходими време и ресурси и т.н.), свързани с разработката и/или построяването на ядрено оръжие или други ядрени експлозиви, използвайки граждански горивен цикъл. Използването на граждански горивен цикъл за целите на придобиване на ядрен експлозив може да включва използване на материали, оборудване, технологични процеси, съоръжения и знания, свързани с ядрения горивен цикъл [12]. Особено важно е уточнението, че в този случай злоупотребата с ядрените съоръжения и/или ядрения материал би се извършила от страната, която ги притежава [2].

Понякога значението на понятието „устойчивост на разпространение“ се пренася и върху понятието „физическа защита“. Физическата защита е характеристиката на ядреноенергийните системи, която затруднява кражбата на материали, подходящи за направата на ядрени експлозивни устройства или устройства за разпръскването на радиоактивни материали, както и саботажите срещу ядрени съоръжения и транспорт на ядрени и радиоактивни материали. За разлика от неразпространението на ядрени

материали, тук нарушителят е трета страна – било то ненационална групировка или нация, различна от притежаващата ядрените съоръжения и материали. Тъй като „привлекателността“ на материалите може да се отнася и за двете мерки, но в различен контекст, е необходимо при анализите да се прави разграничение между тях [2], [4], [34].

4. Пътища на разпространението. Връзка между граждански и оръжеен горивен цикъл

От гледна точка на устойчивостта на разпространение, нерегламентираните дейности протичат основно на пет етапа (Фигура 1) – отклоняване на материал, нерегламентирано използване на ядрено съоръжение, транспорт, преработка и производство на оръжие.



Фигура 1. Протичане на процеса на нерегламентирано разпространение на ядрени материали [9]

Всеки етап протича както следва [9]:

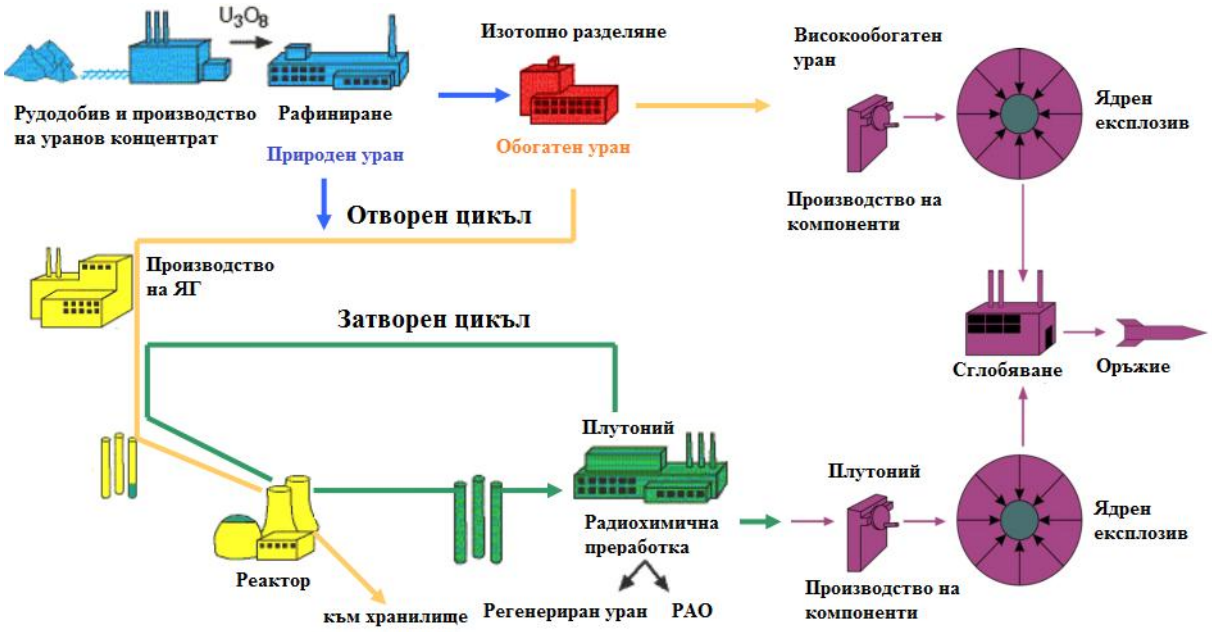
- **Отклоняване на ядрен материал** – тайно извеждане от контролирана зона на значително количество (SQ) от поне един материал, подлежащ на деклариране пред МААЕ, от декларирано складово количество от който и да е етап на горивния цикъл (включително горивото, находящо се в реактора) по време на дейност, която е под международно наблюдение;
- **Нерегламентирано използване на ядрено съоръжение** – използването на съоръжение за граждански цели, за да се произведе поне едно значително количество (SQ) недекларирано материал. Този етап не присъства във всички възможни пътища за сдобиване по нелегален начин с ядрен материал. В някои случаи този етап включва тайно преработване

на недекларирян материал в съоръжението. Етапът винаги включва използването на съоръжението по начин, който не съответства на официално обявеното му предназначение, както и недекларираното извеждане на ядрен материал от него. Този материал не е нужно да бъде нелегално внесен, достатъчно е да бъде нелегално отклонен;

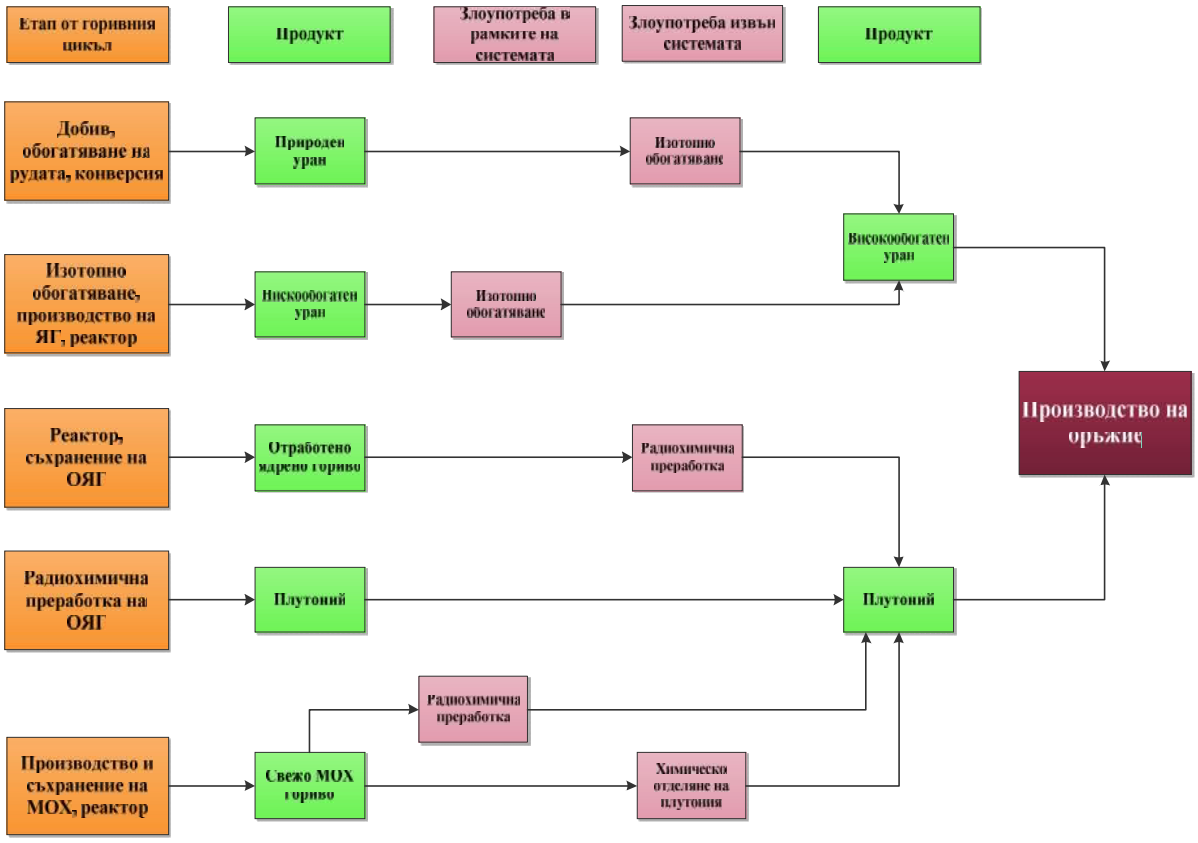
- **Транспорт** – превозът на недекларирян ядрен материал;
- **Преработка** – превръщането на отклонения материал в метална форма, подходяща за използване в ядрено оръжие. Преработката се случва в съоръжение, което не е под международен контрол на разпространението на ядрени материали;
- **Производство на оръжие** – процесът на проектиране и изработка на ядрено оръжие с отклонения ядрен материал.

Анализът на материали, произхождащи от граждански програми, произтича от обстоятелството, че развита гражданска ядрена програма би могла да предостави достъп до ядрени материали, ядрени съоръжения, знания и умения. Този потенциален достъп определя значимостта на гражданските програми в процеса на вземане на решения за нерегламентирано използване на тези материали и съоръжения [42]. Мястото на евентуална злоупотреба с гражданска ядрена програма се илюстрира добре от първия ядрен опит на Индия, осъществен през 1974 г. Взривеното ядрено устройство е използвало отклонен ядрен материал, предназначен за граждански цели, а за направата на оръжието са използвани граждански ядрени съоръжения [16].

От гледна точка както на неразпространението на ядрени материали, така и на физическата защита, най-уязвимите места в горивния цикъл са тези, в които е възможно да се получи използваем ядрен материал. Тези места личат ясно от потенциалната връзка между гражданския и оръжейния горивен цикъл, илюстрирана на Фигура 2, както и от етапите в гражданския горивен цикъл, в които е възможно да се случи злоупотреба с материал или съоръжение (Фигура 3).



Фигура 2. Потенциални свързващи звена между граждански и оръжеен горивен цикъл [3]



Фигура 3. Етапи от горивния цикъл, при които е възможна злоупотреба [42]

5. Използваемост на реакторния плутоний за направата на ядрен експлозив

Доколко плутонията, получен в отработеното ядрено гориво на енергийни реактори, е използваем, е тема на широк дебат в научната общност от няколко десетилетия, като мненията варират между двете крайности. Според част от изследователите реакторният плутоний може да бъде използван за направата на напълно функционално ядрено оръжие, докато друга част е на мнение, че реакторният плутоний е неизползваем за тези цели [17]. Част от тази неяснота се дължи на липсата на международно призната методика за анализ на устойчивостта на разпространение, както и на факта, че много от данните от различните оръжейни програми са все още класифицирани. Необходимо е да се има предвид и развитието на обстановката в международен план от 1940-те години до наши дни [33], както и да е налице пълно разбиране на полезността на съответния материал за изработката на ядрено оръжие [4]. Основните мнения и аргументи в този дебат са анализирани задълбочено в [17] и [33]. За целите на настоящия анализ е възприета дефиницията за ядрено оръжие, разписана в Закона за атомната енергия на САЩ, а именно – всяко устройство, използващо ядрена енергия, чиято основна цел е разработката или използването му като оръжие, оръжеен прототип или ядрено тестово устройство. Американското законодателство възприема ядрената енергия не само като получена в процеса на делене на тежки ядра, но и при всякакъв друг вид ядрено превръщане [39].

Макар все още да не съществува единна методика за оценка на устойчивостта на разпространение, в последните две десетилетия се разработват алгоритми за оценка на

различни аспекти на възможността за нерегламентирано разпространение на ядрени материали, които имат различна приложимост.

Въпреки описания по-горе дебат, като цяло е налице консенсус, че ядрената енергия е технология с двойно предназначение [18], гражданските ядрени програми предоставят достъп до нужните материали, технологии, знания и умения [42], както и че устойчивостта на разпространение е многостранна концепция [34] и за повишаването ѝ няма прост подход, а е необходимо да се вземат както технологични, така и институционални мерки [33]. Също така е необходимо да се вземе предвид, че повишаването на устойчивостта от разпространение може да бъде ограничено, поради нуждата да бъдат постигнати други цели в развитието на ядрената енергетика.

За да се определи доколко цивилният плутоний е използваем за изработката на ядрено експлозивно устройство, е необходимо да бъдат анализирани тези негови свойства, които го правят подходящ за нецивилни приложения. Най-често свързваните с устойчивостта на разпространение атрибути за анализ на използваемостта на ядрените материали са критичната маса на сфера без отражател от материала, специфичното енергоотделяне, емисията на неутрони при спонтанно делене и радиационната бариера [6].

Един от факторите, влияещи на използваемостта на плутония е неутронната емисията при спонтанно делене. Този фактор отчита вероятността за предетонация, водеща до намаляване на мощността на устройството. Първият извършен такъв анализ оценява мощността на устройството при предетонация на 2,7% от проектната (0,54 kt при номинална мощност 20 kt) [25]. По-късни и детайлни анализи оценяват тази частична мощност съответно на 0,12 kt при ниско технологично равнище и 0,54 kt при високо технологично равнище [17]. Мощността на устройството е съществен фактор, ако се цели създаването на устройство, което може да се складира и има предсказуема мощност [3]. Ако целта е да се постигне взрив с надпрагова мощност (точката, при която мощността на ядрено взривно устройство надвишава максималната възможна мощност на химическите експлозиви), този фактор не е достатъчен, тъй като се смята, че дори при използването на нискотехнологични устройства, в повечето случаи те биха имали надпрагови мощности [4]. В същото време е налична информация за съществуването на технология, която разрешава проблема с предетонацията [1]. Друго съществено обстоятелство, свързано с предетонацията, е че макар и тя да намалява експлозивната сила, това не предотвратява успешна експлозия – радиусът на разрушенията е пропорционален на мощността на степен ⅓ ($\mathbf{Y}^{⅓}$), а броят на засегнатите хора е пропорционален на $\mathbf{Y}^{⅔}$, т.е. хипотетично хилядократно намаляване на мощността би довело до десеткратно намаляване на радиуса на пораженията [36].

Друг съществен фактор е специфичното енергоотделяне, чието повишаване би могло да разтопи химическите експлозиви и така да направи устройството неизползваемо. Влошаването на оръжейното качество на плутония (т.нар. денатуриране) чрез увеличаване на концентрацията на ^{238}Pu (поради високото му специфично енергоотделяне) и/или ^{240}Pu (висока емисия на спонтанни неутрони) (Таблица 10) е широко изследвано – подробни анализи са налице в [17]-[21]. Влиянието на увеличаването на специфичното енергоотделяне с цел определяне на стойности за концентрациите на ^{238}Pu е извършено в [17] и [19], където авторите препоръчват минимални стойности за концетрацията на ^{238}Pu в изотопната смес в зависимост от нивото на използваната технология (Таблица 1).

Таблица 1. Минимален дял на ^{238}Pu в изотопната смес, гарантиращ непригодността ѝ за построяване на ядрен експлозив

	Критерий на Kessler [17]	**Критерий на Kimura [19]**
	w_{Pu-238}, %	
Ниска технология (LT)	1,6	2,0
Средна технология (MT)	3,2	6,0
Висока технология (HT)	9,0	15,0

6. Класификация на плутония. Контролируеми количества

По отношение на класификацията на ядрените материали като цяло и на плутония в частност съществуват различни подходи. В [32] е извършен обстоен преглед, обобщаващ различните методи за класификация на плутония, както и критериите, по които се извършва тази класификация. Двата основни признака, по които може да бъде класифициран плутонията са описаните в точка 5 – според концентрацията на ^{238}Pu и според съдържанието на ^{240}Pu

Една от основните класификации на плутония, която се използва понастоящем, го категоризира в пет класа в зависимост от съдържанието на ^{240}Pu. Тези категории са обобщени в Таблица 2.

Таблица 2. Класове плутониеви изотопни смеси според концентрацията на ^{240}Pu и тяхната използваемост за направата на ядрен експлозив [31]

Класове чистота по ^{240}Pu	**Pu-240**	***Използваемост***
Супер клас (SG)	< 3%	*Най-добра*
Оръжеен клас (WG)	3-7%	*Стандартен материал*
Горивен клас (FG)	7-18 %	*Практически използваем*
Реакторен клас (RG)	18-30 %	*Възможно използваем*
MOX клас	> 30 %	*Практически неизползваем*

Подробна информация за оръжейните класове е налична в [31]:

- **Оръжеен клас** – стандартен оръжеен материал, лесен за употреба, даващ големи мощности в съчетание с ниска активност и ниско енергоотделяне. Супер класът притежава още по-добри оръжейни характерситики;
- **Горивен клас** – до 70-те години на XX век, определението за реакторен плутоний включва изотопни смеси със съдържание на ^{240}Pu над 7%, тъй като по това време смесите с концентрация на ^{240}Pu над 7% не са разглеждани като потенциален оръжеен материал. С разсекретяването на информация, че през 1962 г. САЩ извършват ядрен опит с оръжие, използващо плутоний с концентрация на ^{240}Pu около 12% (което го поставя в текущия горивен клас), горивният клас е обособен от реакторния клас. Причината за това разделение е, че макар и неподходящ за използване в целенасочена програма за ядрено въоръжаване, в смисъла на създаване на голяма наличност от лесни за съхранение и експлоатация оръжия с предвидима експлозивна сила, има частични данни за използваемостта на такъв плутоний в ядрени

експлозиви. Той може да се използва за направата на ядрен експлозив при наличието на добре развита имплозионна технология, въпреки че мощността на изработеното оръжие няма да може да бъде точно определена;

- **Реакторен клас** – от над 2000 ядрени експлозии по света от 1945 г. насам няма данни която и да е от тях да е осъществена с реакторен клас плутоний (^{240}Pu >18%). В нито една от тези експлозии не е използван плутоний, произведен в леководен реактор.
- **MOX клас** – това е плутонията, който се получава при рециклирането на отработено ядрено гориво в леководни реактори. При този клас съдържанието и на ^{240}Pu, и на ^{238}Pu (около и над 2%) е толкова високо, че обработката на материала е почти невъзможна поради високите енергоотделяне и активност.

От друга страна, според критериите на МААЕ, се изключва от регулация само плутоний със съдържание на ^{238}Pu над 80%. За всички останали възможни изотопни състави се приема масата на „значителното количество“ от 8 kg [12][1]. Съгласно дефиницията на МААЕ „значително количество“ е приблизителното количество ядрен материал, за което не може да се изключи възможността за изработване на ядрено взривно устройство. В това количество са включени загубите при преработка и производство, като то не съвпада и не бива да се бърка с критичната маса на съответния материал [12]. На практика от контрол е изключен само плутонията, предназначен за използване в термоелектрични генератори.Значителните количества за някои ядрени материали са представени в Таблица 0-3.

Таблица 0-3. Количества ядрени материали, подлежащи на международен контрол [1]

	FQ	**SQ**	**Критична маса**	
			без отражател	**с отражател‡**
	kg	*kg*	*kg*	*kg*
^{235}U	5	25	50	25
^{233}U	2	8	15	8
^{239}Pu	2	8	16†	8

†δ-фаза

‡природен уран с дебелина съответно 4 cm, 3,5 cm и 4,5 cm

Макар и широко използвана, класификацията на МААЕ не се приема безкритично от някои изследователи и институции. Поради тази причина съществуват и няколко други метода за определяне на контролируемото количество ядрени материали. Комисията за ядрено регулиране на САЩ (U.S. NRC) използва т.нар. „изчислително количество“ (FQ). Контролираното количество варира според категориите ядрен материал, определени в [43], като за Категория I (стратегически ядрен материал, включващ плутоний и уран, обогатен по ^{235}U и/или ^{233}U) то е над 5000 g еквивалент от която и да е комбинация от ядрен материал, изчислено като:

$$FQ = m_5 + 2,5.\left(m_3 + m_{Pu}\right) \quad (1)$$

При наличието само на плутоний, уравнение (1) придобива следния вид

(2) $$FQ_{Pu} = 2,5.m_{Pu}$$

Тогава едно изчислително количество плутоний е

(3) $$m_{Pu} = \frac{5000}{2,5} = 2000\ g$$

Недобре дефинирани обстоятелства в тези две класификации са изотопните състави на различните ядрени материали, които следва да бъдат поставени под международен контрол.

В договора за Евратом е предвидено количеството на материалите да се изразява в ефективни килограми като за плутония (отново без оглед на изотопния му състав) се приема, че един ефективен килограм е равен на един действителен килограм [51].

Тъй като има известна неяснота относно класификацията на плутониевите изотопни смеси по отношение на използваемостта им като ядрен материал за направата на ядрено взривно устройство, в [31] се предлага класификацията, поместена в Таблица 0-4. В нея се взема предвид и концентрацията на ^{240}Pu в изотопната смес.

Таблица 0-4. Предложение за нова класификация на плутония [31]

Категория	**Дял на ^{240}Pu**	**SQ**
Висок клас	< 17 %	8 kg
Нисък клас	17-30%	16 kg
Обеднен клас	> 30 %	-

Високият клас е определен консервативно като обхваща сега използвания оръжеен клас плутоний, както и почти целия материал от междинния горивен клас. В тази категория влизат плутоният от изведени от експлоатация ядрени оръжия, преди и след еднократно рециклиране под формата на MOX, материалът от екранните касети на реакторите-размножители на бързи неутрони (РБН), както и плутоний, получен от различни енергийни реактори, в това число и леководни, ако са постигнати анормално ниски дълбочини на изгаряне. Предварителен анализ на възможността за производство на материал с оръжейно качество при скъсена горивна кампания в леководен реактор, използващ ураново гориво е направен в [49] и [52].

Ниският клас съответства предимно на отработено ядрено гориво от леководни реактори, постигнало средни до високи дълбочини на изгаряне. Обедненият клас включва в себе си плутония от изгоряло MOX-гориво за леководни реактори, както и от отработено ураново гориво, достигнало висока дълбочина на изгаряне, превишаваща 50 000 MWd/t [31].

Друг подход за определяне на количествата ядрен материал е изчисляването на „значително количество еквивалент на ядрено оръжие“ или „оръжеен потенциал“ [35], който се определя като:

(4) $$W_i = \sum_j \frac{M_{ij} C_{ij} T_{ij}}{Q_j} \ ,$$

където $\boldsymbol{M_{ij}}$ – масата на материала (^{235}U или плутоний), *kg*, $\boldsymbol{C_{ij}}$ – фактор, отчитащ вида, в който се намира материала, $\boldsymbol{T_{ij}}$ – технологичен параметър, $\boldsymbol{Q_j}$ – количество на

материала в *SQ*. Двата параметъра C_{ij} и T_{ij} се изменят в интервала от 0 до 1 и отчитат съответно доколко даденият материал може да бъде манипулиран и доколко от него е възможно да бъде произведено оръжие. Стойностите на тези параметри в зависимост от вида изотопна смес са представени в Таблица 5.

Таблица 5. Стойности на технологичния и материалния параметър, използвани за изчисляването на оръжейния потенциал [35]

Материал	C_{ij}	T_{ij}
МОХ гориво	0,8	0,9
Отработено МОХ гориво	0,8	0,3
Отделен граждански плутоний	0,8	1,0
Отработено ураново гориво	0,8	0,3
Свежо ураново гориво	0,3	0,3
Гориво за РБН	0,8	0,9
Отработено гориво от РБН	0,8	0,3

Тук отново не се отчита изотопният състав на плутония, но това произтича от използването на значителното количество като мярка за нормиране между материалите.

Други автори [45] използват „еквивалент значително количество“, за да анализират различни материални потоци, съдържащи ядрени материали, като съчетават това количество с индекс на вида на материала (MTI), който отчита химическата форма, физичните му свойства и ефективността му като оръжеен материал. Еквивалентното значително количество е масата на материала от съответния поток, от която може да се извлече едно значително количество ^{235}U или плутоний.

Основната критика към определените от МААЕ количества, подлежащи на контрол е направена в [10]. Авторите изтъкват, че количеството оръжеен плутоний, използван в ядрената бомба, взривена над Нагасаки, е 6,1 kg, получената мощност е 20 kt, а устройството е нискотехнологично. Приведени са и примери от американски изпитания, проведени през 1951 г., в които са взривени устройства с мощност от 1 kt, като необходимият за целта плутоний е бил между 1 и 2 kg. Авторите изчисляват, че за да се произведе оръжие с мощност от 10 kt са необходими около 2 kg плутоний, ако се използва високотехнологично оръжие. Те смятат също, че нивото, което се определя като високотехнологично, е било достъпно за страните, притежаващи ядрени оръжия, още през 50-те. Техните оценки за нужните количества плутоний са приведени в *Таблица **0-6***. Съответно, предложените стойности на значителните количества са 1 kg за плутоний (без оглед на изотопния състав, с изключение на случая, когато концентрацията на ^{238}Pu надвишава 80%), 1 kg за ^{233}U и 3 kg за уран с обогатяване над 20%. Прави впечатление, че предложението за плутония приема допускането на МААЕ за пренебрегване на изотопния състав, а в същото време е базирано на изследвания само с оръжеен плутоний.

Като цяло, вероятно най-детайлната класификация на ядрените материали, отчитаща както количеството на материала, така и формата и изотопния му състав е тази, въведена от Департамента по енергетика на САЩ [41]. В нея се въвеждат пет категории „привлекателност“ от *A* до *E*, като всяка категория е разделена на четири класа – от *I* до *IV*. Извадка от класификацията, съдържаща критериите за категоризация

на материалите, съдържащи плутоний, е направена в Таблица 0-7. Подробните и добре дефинирани критерии на тази категоризация позволяват тя да залегне в разработката на различни методики за оценка на устойчивостта на разпространение [4],[8].

Таблица 0-6. Количество оръжеен плутоний, необходимо за изработката на едно оръжие според желаната мощност и нивото на технологично развитие [10]

Мощност	**Технологично развитие**		
kt	*LT*	*MT*	*HT*
1	3,0	1,5	1,0
5	4,0	2,5	1,5
10	5,0	3,0	2,0
20	6,0	3,5	3,0

Таблица 0-7. Класификация на материалите, съдържащи плутоний, използвана от Департамента по енергетика [41]

	Привлека-телност	**Според съдържанието на Pu/^{233}U, kg**			
		I	***II***	***III***	***IV***
ОРЪЖИЯ Сглобени бойни и изпитателни устройства	***A***	Всички	N/A	N/A	N/A
ЧИСТИ ПРОДУКТИ Ядрени експлозиви, слитъци, отливки, материал за директна обработка	***B***	≥ 2	[0,4;2)	[0,2;0,4)	< 0,2
ВИСОКОКАЧЕСТВЕНИ МАТЕРИАЛИ Карбиди, оксиди, нитрати, разтвори (≥25 g/l) и др.; TOE и касети; сплави и смеси; UF_4 или UF_6 (обогатяване ≥50%)	***C***	≥ 6	[2;6)	[0,4;2)	< 0,4
НИСКОКАЧЕСТВЕНИ МАТЕРИАЛИ Разтвори (1 - 25 g/l), остатъци от преработка, изискващи допълнителна обработка, Pu-238 (освен в отпадни потоци); UF_4 или UF_6 (обогатяване 20% - 50%)	***D***	N/A	≥ 16	[3;16)	< 3
ВСИЧКИ ОСТАНАЛИ МАТЕРИАЛИ	***E***	N/A	N/A	N/A	Докладват се

7. Количество на плутония в световен мащаб

Основният източник на граждански плутоний е отработеното ядрено гориво, извеждано ежегодно от енергийните реактори. Оценките за натрупаното количество варират, като две от тях са съответно 240 000 tTM [15] и 290 000 tTM [11]. Счита се, че годишно се извеждат около 10 500 tTM отработено гориво, от които за преработка се

насочват приблизително 2 000 tTM [15]. По оценки на МААЕ, общото количество отработено гориво, съхранявано в различни съоръжения, ще достигне 445 000 tTM, от които ¼ ще бъде преработено [11]. Годишното количество генериран плутоний е между 136 и 366 kg на реактор, от които между 47 и 69% са ^{239}Pu, в зависимост от типа реактор [7], като по данни на Международния панел за делящи се материали, към края на 2014 г. общото количество натрупан плутоний с граждански произход е 271 t, а оръжейният е 140±10 t [14]. Количеството плутоний от леководни реактори нараства с темп от около 60 t/год. [6], инсталираните преработващи мощности в гражданските радиохимични заводи са 5800 tTM/год., а във военните и заводите с двойно предназначение – 1155 tTM/год. От гражданските мощности в процес на извеждане от експлоатация е капацитет от 2700 tTM/год. (двата британски завода), в мощностите с двойно предназначение влизат 300 tTM/год. в Индия и около 400 tTM/год. в Русия. От горните оценки са извадени руските заводи в Северск и Железногорск с обща мощност 9500 tTM/год., които не се експлоатират в момента [14]. В таблица 8 са представени запасите на плутоний по страна-притежател.

таблица 8. Световни запаси от плутоний според източника и страната-собственик, tTM [44]

	В бойни глави или военен резерв	Излишен военен плутоний	Граждански плутоний	Друг
САЩ	38,30	43,40	0,00	6,60
Русия	88,00	34,00	50,00	6,00
Великобритания	3,20	0,30	99,60	4,10
Франция	6,00	0,00	60,20	0,00
Китай	1,80	0,00	0,01	0,00
Индия	0,54	0,00	0,50	4,70
Израел, Пакистан и КНДР	1,00	0,00	0,00	0,00
Япония	0,00	0,00	47,10	0,00
Други	0,00	0,00	5,00	0,00
ОБЩО	***138,84***	***77,70***	***262,41***	***21,40***

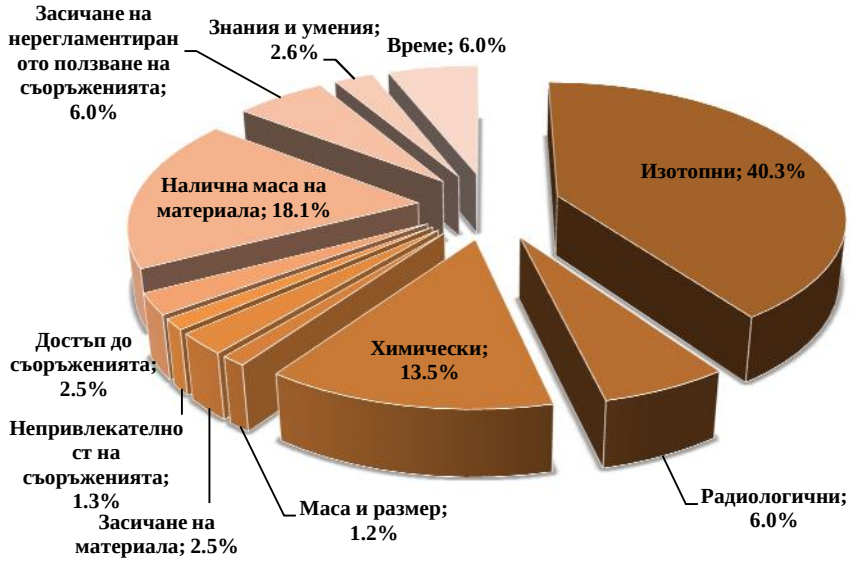
8. Бариери пред разпространението

Бариерите пред нерегламентираното разпространение на ядрени материали се разделят на вътрешноприсъщи и външни[12],[37]. Вътрешноприсъщите бариери могат да бъдат физически, които са свързани със свойствата на материалите и технически, които са свързани с характеристиките и достъпа до съоръжения, с наличието на специалисти с достатъчно познания и умения, както и с времето, което е на разположение за конструирането на ядреното взривно устройство. Външните фактори са свързани с мерките по контрол на ядрените материали и нерегламентираното използване на ядрени съоръжения.

В Таблица 9 са систематизирани вътрешноприсъщите бариери пред разпространението на ядрени материали, а на Фигура 4 е представена оценка за относителната им тежест.

Таблица 9. Видове вътрешноприсъщи бариери пред разпространението на ядрени материали [37]

Физически бариери	Технически бариери
Изотопен състав	Непривлекателност на съоръженията
Трудност на радиохимичното отделяне	Достъп до съоръженията
Радиологична опасност	Налична маса от материала
Маса и обем на материала	Възможност за установяване на нерегламентираното ползване на съоръженията
Възможност за залавяне на материала	Знания, умения и компетенции
	Време



Фигура 4. Относителен дял на различните фактори във вътрешноприсъщите бариери към неразпространението на ядрени материали [37]

Както личи от фигурата, най-значимите фактори във вътрешноприсъщите бариери са свързани със свойствата на материала – общо изотопните, радиологичните, химическите и масовите фактори имат относителна тежест от 79,1%. Това е основна причина за анализ на материалната бариера пред разпространението на ядрени материали.

9. Свойства на реакторния плутоний, имащи отношение към материалната бариера

Горивният клас плутоний не е практичен за разработката и натрупването на ядрен арсенал, макар и използваемостта му за направата на взривни устройства да е

демонстрирана успешно. От друга страна може да се каже, че плутонията от смесените оксидни горива е на практика неизползваем. Съществува противоречие, обаче, за използваемостта на реакторния клас плутоний (съдържание на ^{240}Pu между 18 и 30%), като се срещат и двете мнения – някои твърдят, че тази изотопна смес е лесна за използване в ядрено взривно устройство, докато други са на мнение, че тази възможност е само теоретична (точка 5).

Основните изотопи в плутония от отработеното ядрено гориво са ^{239}Pu, ^{240}Pu и ^{241}Pu. ^{238}Pu е с най-малка концентрация, но е най-нежелан от гледна точка на изработката на ядрен експлозив, като концентрацията му започва да представлява бариера пред разпространението при дълбочни на изгаряне над 30 000 MWd/t.

Таблица 10. Основни характеристики на плутониевите изотопи [31]

	Период на полуразпад	Критична маса без отражател	Критична маса без отражател [32]	Критична маса без отражател [26]	Брой спонтанни неутрони	Енерго-отделяне
	год.	*kg*	*kg*	*kg*	*n/kg/s*	*W/kg*
^{238}Pu	87,7	10	9,03	9,72	2 600 000	560,0
^{239}Pu	24 100,0	10	10,23	10,11	22	1,9
^{240}Pu	6 560,0	40	31,45	37,43	910 000	6,8
^{241}Pu	14,4	10	12,24	13,09	49	4,2
^{242}Pu	376 000,0	100	62,20	89,98	1 700 000	0,1

Основни пречки при конструирането на взривно устройство са високите стойности на броя спонтанни неутрони и енергоотделянето за ^{238}Pu и ^{240}Pu. Спонтанните неутрони могат да доведат до предварителен старт на верижната реакция, а енергоотделянето и активността затрудняват производството и работата с устройството. Проблеми поставя и ^{241}Pu, който се разпада до високоактивния ^{241}Am. Голямата критична маса на ^{242}Pu също поставя известни пречки при изработката на ядрено взривно устройство от реакторен клас плутоний.

Въпреки че, ако е налична достатъчно напреднала имплозионна технология, плутонията, получен в леководни реактори, би могъл принципно да се използва за направата на грубо ядрено взривно устройство, то използването на реакторен плутоний води след себе си редица технологични трудности [31]:

- По-голяма критична маса;
- По-големи размери и маса на утройството;
- По-малка взривна мощност;
- Непредсказуемост на взривната мощност;
- По-голяма вероятност за по-ранен старт на верижната реакция;
- Риск от промяна на металните фази;
- Високи дози и температури на повърхността;
- Необходима е система за принудително охлаждане на устройството.

10. Методи за анализ на устойчивостта на разпространение

В литературата съществуват множество оценки на устойчивостта на разпространение на ядрени материали. Тук ще бъдат изключени методики, подобни на разработените от Международния форум за технологии четвърто поколение (GIF) и MAAE INPRO, които представляват алгоритми за съвместен анализ на устойчивостта на разпространение и физическата защита. Тези алгоритми изискват наличието на множество входни данни и са приложими при детайлен анализ на цялостната защита на горивния цикъл, когато е налична пълна информация. Сравнителен анализ на приложимостта на двете методики е направен в [34] и [46]. Това са йерархични алгоритми, които включват анализ както на вътрешноприсъщи, така и на външни бариери. Техният резултат не е числена стойност, а е израз на силните и слабите страни на конкретна система. Методиката на INPRO се съсредоточава върху система, на която е наложен международен контрол, като имплицитно изключва възможностите за разпространение чрез недекларирани съоръжения. Методиката на GIF (PR&PP) от своя страна разделя разглежданата система на компоненти и анализира различни сценарии на разпространението.

Друг подход, който съчетава устойчивостта на разпространение и анализа на физическата защита, чийто резултат е числена стойност, е изчисляването на „загриженост от разпространение“ (Proliferation Concern) [35]. Тази стойност се изчислява като:

$$PC = LC + SC \quad , \tag{5}$$

където

$$LC = BC.(1-S).\sum_i W_i \tag{6}$$

$$SC = \sum_i W_i.(1-P_i) \tag{7}$$

Величината, дефинирана в уравнение (6) се нарича „латентна загриженост“ (latent concern). Тя дава оценка на възможността дадена страна да превърне гражданската си ядрена програма във военна. В този израз $\boldsymbol{BC}$ е загриженост дадената страна да наруши международното право в областта на неразпространението (breakaway concern), а $\boldsymbol{S}$ е нивото на прилагане на контрола на MAAE (safeguards). Двете величини заемат стойности между 0 и 1, като $\boldsymbol{BC}$ е изцяло субективна преценка.

Величината от уравнение (7) се нарича „загриженост за сигурността“ (security concern) и е измерител на способността дадена страна да защитава ядрения си материал от саботаж или кражба. Тук $\boldsymbol{P_i}$ е нивото на физическата защита на i-тия материал, а величината $\boldsymbol{W_i}$ е оръжейният потенциал на i-тия материал, така както е дефиниран в зависимост (4). Този метод е изключително субективен и може да се прилага само за предварителни оценки, нужни в процеса на вземане на политически решения.

Възможно е анализите на устойчивостта на разпространение да бъдат извършвани с прилагането на Марковски процеси [45] или на алгоритми, разработени на базата на размита логика [23],[24],[37][38].

В настоящия анализ са използвани две методики, които позволяват да се оцени използваемостта на ядрените материали за направата на ядрен експлозив.

a. ‘Figure of Merit’

Тази методика е разработена от екип на лабораториите „Лос Аламос“. Целта е да се анализира използваемостта на съответния материал, отчитайки няколко фактора от вътрешно присъщите бариери, които имат основен принос при неразпространението на ядрени материали. Методиката пресмята два коефициента в зависимост от типа организация, желаеща да придобие ядрен материал. В тези коефициенти са включени количествени оценки за критичната маса на сфера без отражател, енергоотделянето, дозовото натоварване и емисията спонтанни неутрони (уравнения (8) и (9)). Методиката е разработена по такъв начин, че получените числени стойности да кореспондират приблизително с класификацията на Департамента по енергетика

Първият коефициент (***FOM₁***) е приложим за оценка на използваемостта на ядрен материал или от по-малко напреднали нации и поднационални групи, или от технически напреднали страни. Това е така, тъй като технологично по-слабо развита група, желаеща да се сдобие с ядрен експлозив, би приела всякаква мощност на устройството, така че предетонацията не би била проблем, а група или страна, притежаваща по-развити технологии, би била способна да сглоби устройство, така че да избегне ефекта на предетонацията. В някои по-редки случаи, когато технологично неразвита група желае постигането на голяма взривна мощност, предетонацията е проблем, така че, за да се постави бариера пред такива разпространители, е необходимо материалът да съдържа мощен източник на спонтанни неутрони. Това се отчита с коефициента ***FOM₂*** [2][5].

(8) $$FOM_1 = 1 - \lg\left[\frac{M}{800} + \frac{M.DH}{4500} + \frac{M}{50}.\left(\frac{D}{500}\right)^{\frac{1}{\lg 2}}\right]$$

(9) $$FOM_2 = 1 - \lg\left[\frac{M}{800} + \frac{M.DH}{4500} + \frac{M.S}{6,8.10^6} + \frac{M}{50}.\left(\frac{D}{500}\right)^{\frac{1}{\lg 2}}\right]$$

В тези уравнения ***M*** е критичната маса на сфера без отражател, *kg*, ***DH*** – специфичното енергоотделяне, *W/kg*, ***S*** – емисията спонтанни бързи неутрони, *n/kg/s*, ***D*** – дозата за един час, получена на 1 m от материал с дадения състав, имащ маса 20% от критичната, *rad/h*.

Тази методика, отчита пригодността на ядрения материал за направата на стабилно устройство, което може да бъде складирано. Приема се, че материалът е в метална форма и може да бъде рафиниран, ако се касае за напреднала в технологично отношение нация, или нерафиниран, ако се касае за поднационална групировка. Тези допускания се правят, за да може да се изчисли влиянието на изотопните фактори. При използването на тази методика за анализи на физическата защита на ядрени материали, трябва да се използва коефициентът ***FOM₁***, тъй като той обвързва факторите, определящи материалите, които биха могли да бъдат обработени и използвани за направата на ядрено взривно устройство. Смисълът на различните стойности на тези коефициенти е показан в Таблица 11. Стойности на ***FOM₁*** за някои материали са показани в таблица 12.

Анализ на пригодността на различни материали, съдържащи плутоний е направен в [26].

Таблица 11. Значение на стойностите на коефициентите FOM [4]

FOM	Използваемост на материала	Привлекателност по [41]
>2	Предпочитан материал	~B
1 – 2	Привлекателен материал (необходими са предпазни мерки)	~C
0 – 1	Непрактичен материал (но все пак възможен за употреба)	~D
<0	Неизползваем	~E

таблица 12. Стойности на FOM_1 за някои материали [3]

Изотоп/смес	**FOM_1**	**Изотоп/смес**	**FOM_1**
^{233}U	2,70	^{242}Pu	1,90
^{235}U	2,20	^{242m}Am	2,60
^{236}Np	3,10	RG-Pu	2,13
^{237}Np	2,10	WG-Pu	2,73
^{238}Pu	0,90	^{238}Pu/^{239}Pu (80:20)	1,01
^{239}Pu	2,80	обогатен уран (x = 20%)	1,01
^{240}Pu	2,00	обогатен уран (x = 93%)	2,18
^{241}Pu	2,60	^{233}U (^{232}U – 10 ppm)	2,69

b. Многофакторен анализ на устойчивостта на разпространение (MAUA)

Тази методика е разработена от колектив от Университета в Тексас [8]. Тя разглежда 14 атрибута на устойчивостта на разпространение, на които са зададени относителни тегла (

таблица ***13***). За всеки атрибут се изчислява стойност, която в повечето случаи е точка от определена функция на полезност. Начините на изчисляване на стойностите на всяка функция на полезност са подробно описани в [8] и [22]. Сумата от произведенията на стойността на функцията на полезност с относителното тегло на всеки атрибут за i-тия етап в изследвания процес се нарича статична устойчивост на разпространение (уравнение (10)). В това уравнение $\boldsymbol{w_j}$ е относителното тегло на j-тия атрибут, а $\boldsymbol{u_j(x_{ij})}$ е стойността на j-тата функция на полезност за i-тия процес.

$$PR_i = \sum_{j=1}^{J} w_j . u_j\left(x_{ij}\right) \tag{10}$$

За цялата изследвена система или процес (напр. частичен или пълен анализ на горивния цикъл), както и за анализ на динамиката на устойчивостта на дадена система, се използва мярката „пълна ядрена сигурност“, в която се отчитат и масата $\boldsymbol{m_i}$ на съответния материал, *SQ* и времето $\boldsymbol{\Delta t_i}$, за което материалът се намира на дадения етап (уравнение (11)).

(11) $$NS = \frac{\sum_{i=1}^{I} m_i.\Delta t_i.PR_i}{\sum_{i=1}^{I} m_i.\Delta t_i}$$

таблица 13 Атрибути на неразпространението и относителните им тегла, използвани в MAUA [8]

Атрибут	Относително тегло W_{ij}
Привлекателност по DOE	0,10
Енергоотделяне в материала, дължащо се на плутония, *W*	0,05
Масов дял на четните плутониеви изотопи	0,06
Концентрация на делящ материал, *SQ/t*	0,10
Мощност на дозата, *rem/h*	0,08
Размер/тегло	0,06
Честота на измерването на количеството материал	0,09
Неопределеност на измерването, *SQ/год.*	0,10
Отделяемост на делящия материал	0,03
Дял на етапите в процеса, изискващи отчетност на материала	0,03
Вероятност за неидентифицирано преместване на материала	0,07
Физически бариери	0,10
Наличност, *SQ*	0,05
Вид презареждане на а.з.	0,06

11. Анализ на влиянието на затварянето на горивния цикъл върху изменението на материалната бариера пред разпространението на плутоний

За да се извърши анализ на влиянието затварянето на горивния цикъл върху изотопната бариера на плутония е разгледан референтен реактор с вода под налягане, използващ стандартно гориво от уранов диоксид (UOX) и смесено уран-плутониево гориво (MOX). Параметрите на референтния реактор са обобщени в таблица 14. Прието е, MOX горивото е произведено от плутоний, извлечен от отработено гориво на PWR, с постигната дълбочина на изгаряне 45 000 MWd/tHM и отлежавало 10 години (изотопният му състав е посочен в таблица 15, както и от обеднен уран с масов дял на ^{235}U от 0,3%.

таблица 14. Експлоатационни параметри на референтния реактор

Електрическа мощност	MW	1000
Термодинамичен к.п.д.	%	32,6
Коефициент на използване на инсталираната мощност	%	85,0
Обогатяване	%	4,4
Дял на плутония в MOX горивото	%	7,23

таблица 15 Изотопен състав на плутония, използван за изработката на MOX гориво за PWR, w% [5]

^{238}Pu	2,56
^{239}Pu	53,16
^{240}Pu	27,73
^{241}Pu	9,52
^{242}Pu	7,02

Разгледани са дълбочини на изгаряне в интервала 30 000 – 50 000 MWd/tHM, за да бъдат обхванати реактори от различни поколения, както и да бъде отразена динамиката на устойчивостта на разпространение като функция на дълбочината на изгаряне.

Приложени са методиките ‘Figure of Merit’ и MAUA, като са направени следните допускания:

1. Приема се, че плутонията от ОЯГ се извлича веднага след извеждането на горивото от активната зона;
2. Приема се, че плутонията е отделен и се намира в метална форма;
3. Не се взема предвид наличието на минорни актиниди и уран.

Целта на тези допускания е да се изследва изотопната бариера само на плутония и да се построи „базова линия“, която да служи като отправна точка за анализ в по-нататъшни изследвания, напр. на влиянието на отлежаването върху изотопната бариера. Необходимо допълнение към допусканията е, че институционалните мерки (физическа защита, измервания, международен контрол) са обекти на друг анализ. В настоящия случай се анализират само характеристиките на материала.

Тъй като методиката MAUA изследва устойчивостта на разпространение на цялостни процеси, за да има сравнимост на резултатите, получени по двата подхода, е изчислена само статичната устойчивост на разпространение, като е допуснато, че целият материален поток е от плутоний. Изотопните състави са пресметнати с помощта на системата SCALE [29], а критичните маси – с модула KENO V.a. [28].

Резултатите за получените изотопни състави са систематизирани в таблица 16 и таблица 17. Данни за критичните маси и енергоотделянето на плутониевите смеси са представени в таблица 18.

таблица 16 Изотопен състав на плутония в отработеното ураново гориво

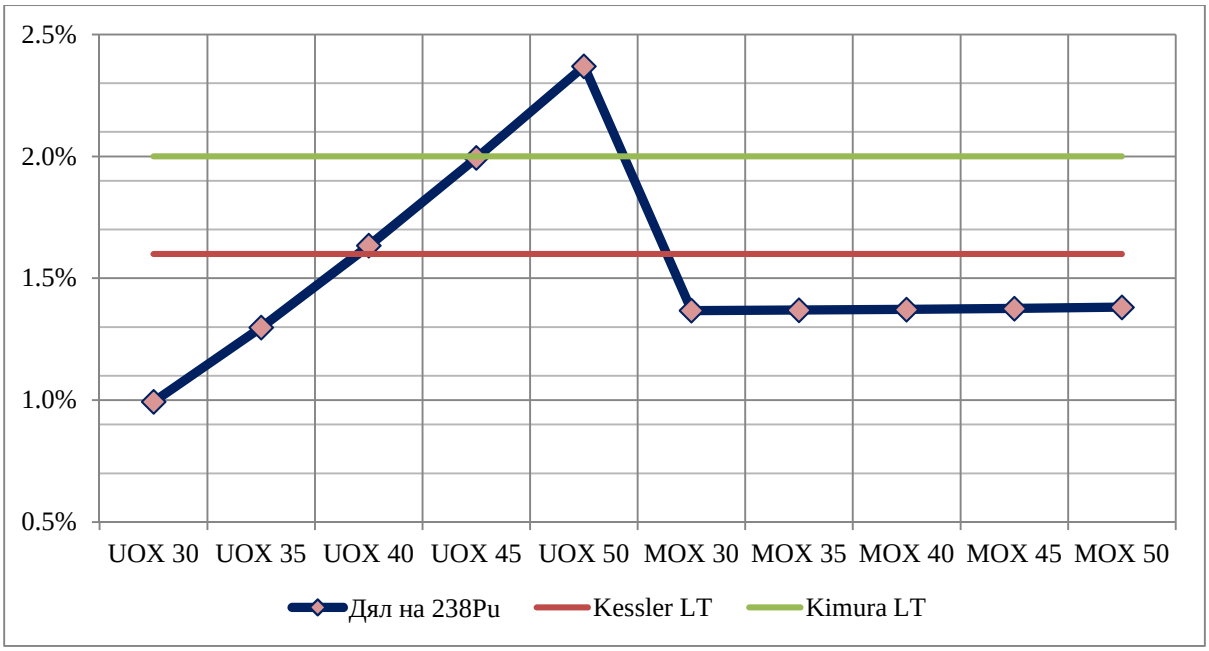
	30 000	**35 000**	**40 000**	**45 000**	**50 000**
	MWd/tHM	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*
pu238	0,994%	1,298%	1,634%	1,994%	2,370%
pu239	63,058%	59,460%	56,337%	53,626%	51,271%
pu240	18,333%	19,230%	19,953%	20,546%	21,030%
pu241	14,338%	15,660%	16,593%	17,195%	17,535%
pu242	3,277%	4,352%	5,482%	6,639%	7,795%

таблица 17 Изотопен състав на плутония в отработеното смесено гориво

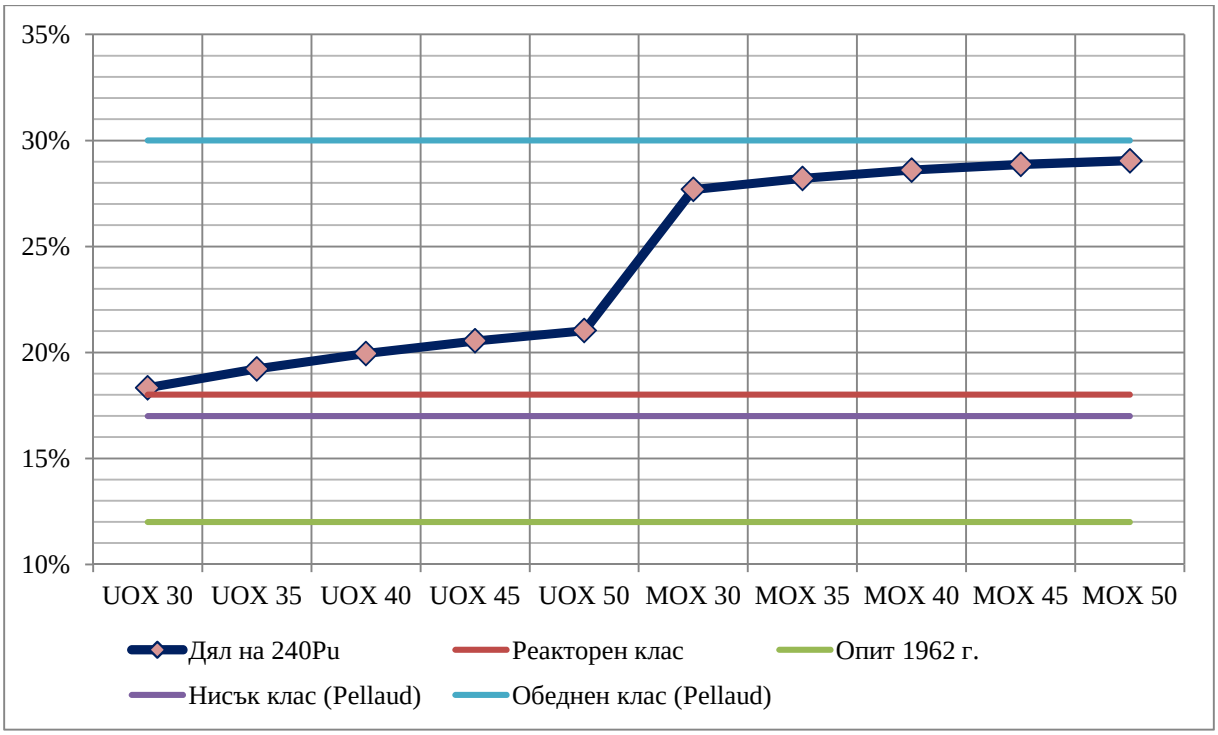
	30 000	**35 000**	**40 000**	**45 000**	**50 000**
	MWd/tHM	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*	*MWd/tHM*
pu238	1,368%	1,370%	1,372%	1,376%	1,381%
pu239	46,930%	45,138%	43,500%	42,039%	40,734%
pu240	27,689%	28,211%	28,610%	28,874%	29,041%
pu241	16,334%	17,049%	17,693%	18,256%	18,724%
pu242	7,679%	8,232%	8,824%	9,455%	10,119%

таблица 18. Критична маса без отражател и специфично енергоотделяне

	UOX		MOX	
	BCM	DH	BCM	DH
MWd/tHM	*kg*	*W/kg*	*kg*	*W/kg*
30000	12,726	8,616	14,831	11,127
35000	13,086	10,371	15,229	11,170
40000	13,602	12,282	15,310	11,210
45000	13,714	14,312	15,721	11,246
50000	13,827	16,420	15,758	11,280



фигура 5. Относителен дял на ^{238}Pu и стойности на критериите на Kessler и Kimura за нискотехнологично устройство

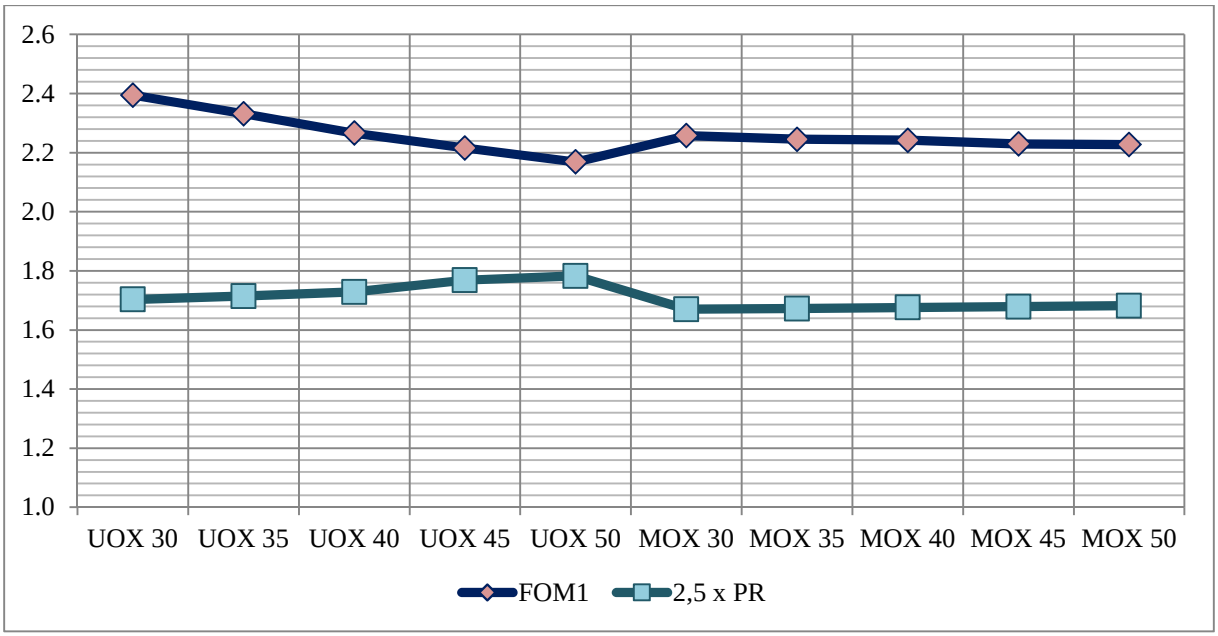


Фигура 6. Относителен дял на ^{240}Pu и стойности на различни гранични критерии

На фигура 5 Фигура 6 са илюстрирани относителните дялове на ^{238}Pu и ^{240}Pu в различните плутониеви смеси, като са показани и различни гранични критерии. Като цяло може да се изключи възможността за създаване на ядрено оръжие, използващо реакторен плутоний. Въпреки това не е възможно да се направи категорично заключение, че с този материал не може да се направи грубо експлозивно устройство. Това личи и от по-детайлния анализ, чиито резултати са обобщени в таблица 19 и на Фигура 7.

таблица 19. Стойности на критериите за устойчивост на разпространение, получени по двете методики

	FOM_1	FOM_2	PR
UOX 30	2,3950	1,3398	0,6812
UOX 35	2,3324	1,2787	0,6859
UOX 40	2,2666	1,2185	0,6915
UOX 45	2,2164	1,1762	0,7075
UOX 50	2,1692	1,1381	0,7131
MOX 30	2,2580	1,0505	0,6682
MOX 35	2,2454	1,0241	0,6690
MOX 40	2,2420	1,0079	0,6704
MOX 45	2,2296	0,9834	0,6716
MOX 50	2,2277	0,9702	0,6728



Фигура 7. Стойности на критериите за устойчивост на разпространение FOM_1 и PR

На Фигура 7 личи сходимост в резултатите, получени от двете методики, което показва, че те могат да се използват съвместно при подходящи допускания. В крайна сметка следва да се знае, че настоящият анализ разглежда само една от вътрешноприсъщите бариери пред разпространението на плутония – физичните свойства на изотопните му смеси. В допусканията, особено за отработеното MOX гориво, не са взети предвид минорните актиниди, както и фактът, че действителната форма, в която се намира плутонията, представлява значима бариера пред разпространението му.

Използвана литература

[1] Artisyuk V. *et al.*, Development of methodology to assess proliferation resistance of nuclear heavy metals, *Progress in Nuclear Energy* **50**, pp. 647-653, 2008

[2] Bathke C. G. *et al.*, An assessment of the attractiveness of material associated with a MOX fuel cycle from safeguards perspective, LA-UR-09-03637, Intended for: *INMM 50th Annual Meeting*, Tucson, AZ, 12-16 July 2009

[3] Bathke C. G. *et al.*, The attractiveness of materials in advanced nuclear fuel cycles for various proliferation and theft scenarios, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-09-02466, 2009

[4] Bathke C. G. *et al.*, The attractiveness of materials in advanced nuclear fuel cycles for various proliferation and theft scenarios, *Nuclear Technology* **179**, pp. 5-30, 2012

[5] Bathke C. G., Material attractiveness and why it is important, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-14-20797, 2014

[6] Beller D. E., R. A. Krakowski, Burnup dependence of proliferation attributes of plutonium from spent LWR fuel, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-99-751, 1999

[7] Castle B. K. et al., Plutonium discharge rates and spent nuclear fuel inventory estimates for nuclear reactors worldwide, Idaho National Laboratory, INL/EXT-12-27150, 2012

[8] Charlton W. S. *et al.* Proliferation resistance assessment methodology for nuclear fuel cycles, *Nuclear Technology* **157**, pp. 143-156, 2007

[9] Cleary V. D. *et al.*, Strengthening the foundations of proliferation assessment tools, Sandia National Laboratories, SAND2007-6158, September 2007

[10] Cochran T. B., C. E. Paine, The amount of Pu and HEU needed for pure fission weapon, Natural Resources Defense Council, Washington, DC, 1995

[11] IAEA, Costing of Spent Nuclear Fuel Storage, IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-3.5, Vienna, 2009

[12] IAEA, Technical Features to Enhance Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems, Nuclear Energy Series, No. NF-T-4.5, Vienna, 2010
[13] IAEA, Use of Nuclear Material Accounting and Control for Nuclear Security Purposes at Facilities, Implementing Guide, IAEA Nuclear Security Series No. 25-G, Vienna, 2015
[14] International Panel on Fissile Materials, Global Fissile Material Report 2015. Nuclear Weapon and Fissile Material Stockpiles and Production. 8th Annual Report of the IPFM, Princeton, NJ, 2015
[15] International Panel on Fissile Materials, Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, Princeton, NJ, 2011
[16] Kang J., Analysis of nuclear proliferation resistance, *Progress in Nuclear Energy* **47**, pp. 672-684, 2005
[17] Kessler G. *et al.*, A new scientific solution for preventing the misuse of reactor-grade plutonium as nuclear explosive, *Nuclear Engineering and Design* **238**, pp. 3429-3444, 2008
[18] Kessler G., Proliferation-proof Uranium/Plutonium Fuel Cycles. Safeguards and Non-proliferation, KIT Scientific Publishing , Karlsruhe, 2011
[19] Kimura Y. *et al*., Evaluation of proliferation resistance of plutonium based on decay heat, *Journal of Nuclear Science and Technology* **48**, pp. 715-723, 2011
[20] Kimura Y. *et al*., Evaluation of proliferation resistance of plutonium based on spontaneous fission neutron emission rate, *Annals of Nuclear Energy* **46**, pp. 152-159, 2012
[21] Kimura Y. *et al*., Improvement of evaluation methodology of plutonium for intrinsic feature of proliferation resistance based on its isotopic barrier, *Annals of Nuclear Energy* **40**, pp. 130-140, 2012
[22] Kollar L., Proliferation resistance assessment of various methods of spent nuclear fuel storage and disposal, Purdue University, School of Nuclear Engineering, West Lafayette, IN, 2012
[23] Li J. *et al.*, A fuzzy logic based barrier method for proliferation resistance screening, *Transactions of American Nuclear Society* **91**, pp. 311-312, 2004
[24] Li J. *et al.*, Assessment of proliferation resistance of nuclear reactors using fuzzy logic based barrier method, *Transactions of American Nuclear Society* **92**, pp. 276-277, 2005
[25] Mark J. C. *et al.*, Explosive properties of reactor-grade plutonium, *Science and Global Security* **17**, pp. 170-185, 2009 (reprint and addendum of Mark J. C., Reactor-grade plutonium's explosive properties, *Sci. Glob. Sec.* **4**, 1993)
[26] Naydenov I., K. Filipov, Plutonium-Containing Civilian Materials' Attractiveness Analysis Using the 'Figure of Merit' Methodology, *BgNS Transactions* **20**, pp. 124-131, 2015
[27] OECD NEA, Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems, 2014
[28] ORNL, KENO V.a: An Improved Monte Carlo Criticality Program, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, Sect. F11, 2011
[29] ORNL, Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, June 2011
[30] Paviet-Hartmann P. *et al.*, Analysis of nuclear proliferation resistance reprocessing and recycling technologies, In*: Proceedings of ICONE19, 19th Intl. Conf. on Nucl. Eng*., Chiba, Japan, May 16-19, 2011
[31] Pellaud B., Proliferation aspects of plutonium recycling, *Comptes Rendus Physique* **3.7**, 1067-1079, 2002
[32] Permana S., M. Suzuki, Basic evaluation on material attractiveness of isotopic plutonium barrier, *Progress in Nuclear Energy* **53**, 958-963, 2011
[33] Pilat J. F., The proliferation resistance debate and the proliferation resistance and physical protection evaluation methodology, *Nuclear Technology* **179,** pp. 31-34, 2012
[34] Pomeroy G. *et al.*, Approaches to evaluation of proliferation resistance of nuclear energy systems, *Proc. of Institute of Nuclear Materials Management Annual Meeting*, Nashville, TN, 2008
[35] Reis H. V. *et al.*, Nuclear fuel leasing, recycling and proliferation: modeling a global view, Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-TR-203085, 2004
[36] Serfontein D. E. *et al.*, Assessment and reduction of proliferation risk of reactor-grade plutonium regarding construction of 'fizzle bombs' by terrorists, *Nuclear Engineering and Design* **271**, pp. 545-551, 2014
[37] Skutnik S. E., M.-S. Yim, Assessment of fuel cycle proliferation resistance dynamics using coupled isotopic characterization, *Nuclear Engineering and Design* **241**, pp. 3270-3282, 2011
[38] Skutnik S. *et al.*, Reevaluating barrier attribute analysis for non-proliferation applications using fuzzy logic, *Transactions of American Nuclear Society* **99**, pp. 205-207, 2008
[39] THE ATOMIC ENERGY ACT OF 1954, AS AMENDED, Public Law 83–703, August 30, 1954, In: *U.S. NRC, Nuclear Regulatory Legislation*, NUREG-0980, Vol.1, No. 10, 2013
[40] U.S. DOE, A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems, GIF-002-00, 2002
[41] U.S. DOE, Nuclear Material Control and Accountability, Manual DOE M 470.4-6, 2006
[42] U.S. DOE,Nuclear Proliferation and Civilian Nuclear Power, Report of the Nonproliferation Alternative Systems Assessment Program, Volume II: Proliferation Resistance, June 1980

[43] U.S. Government Publishing Office, Code of Federal Regulations, Title 10 – Energy, Chapter I – Nuclear Regulatory Commission, Part 74 – Material Control and Accounting of Special Nuclear Material, 2014

[44] von Hippel, F., G. MacKerron, Alternatives to MOX. Direct-disposal options for stockpiles of separated plutonium, IPFM Research Report No.13, 2015

[45] Yue M., *et al.*, Relative proliferation risks for different fuel cycle arrangements, *Nuclear Technology* **165**, pp. 1-17, 2009

[46] Zentner M. D. *et al.*, Interpretation and use of the results of proliferation resistance studies, *Nuclear Technology* **179**, pp. 106-111, 2012

[47] ЗАКОН за безопасно използване на ядрената енергия, *Обн. ДВ. бр.63 от 28 Юни 2002г., изм. ДВ. бр.120 от 29 Декември 2002г., изм. ДВ. бр.70 от 10 Август 2004г., изм. ДВ. бр.76 от 20 Септември 2005г., изм. ДВ. бр.88 от 4 Ноември 2005г., изм. ДВ. бр.105 от 29 Декември 2005г., изм. ДВ. бр.30 от 11 Април 2006г., изм. ДВ. бр.11 от 2 Февруари 2007г., изм. ДВ. бр.109 от 20 Декември 2007г., изм. ДВ. бр.36 от 4 Април 2008г., изм. ДВ. бр.67 от 29 Юли 2008г., изм. ДВ. бр.42 от 5 Юни 2009г., изм. ДВ. бр.74 от 15 Септември 2009г., изм. ДВ. бр.80 от 12 Октомври 2010г., изм. ДВ. бр.87 от 5 Ноември 2010г., изм. ДВ. бр.88 от 9 Ноември 2010г., изм. ДВ. бр.97 от 10 Декември 2010г., изм. ДВ. бр.26 от 29 Март 2011г., изм. ДВ. бр.38 от 18 Май 2012г., изм. ДВ. бр.82 от 26 Октомври 2012г., изм. и доп. ДВ. бр.15 от 15 Февруари 2013г., изм. ДВ. бр.66 от 26 Юли 2013г.*, **изм. ДВ. бр.68 от 2 Август 2013г.**

[48] КОНВЕНЦИЯ за физическа защита на ядрения материал, Ратифицирана с Указ № 341 на Държавния съвет от 3.02.1984 г. - ДВ, бр. 12 10.02.1984, Обн., ДВ, бр. 44 от 9.06.1987 г., в сила от 8.02.1987 г.

[49] Найденов И., К. Филипов, К. Зашев, Анализ на възможността за получаване на плутоний с оръжейни характеристики в енергийни реактори от типа ВВЕР-1000, Сборник доклади XX научна конференция с международно участие ЕМФ 2015, том I, стр. 93-99, Созопол, 2015

[50] НАРЕДБА за осигуряване на физическата защита на ядрените съоръжения, ядрения материал и радиоактивните вещества, Приета с ПМС № 283 от 19.10.2015 г., Обн. ДВ. бр.82 от 23 октомври 2015г.

[51] РЕГЛАМЕНТ (Евратом) № 302/2005 НА КОМИСИЯТА от 8 февруари 2005 година за прилагане на предпазните мерки по Евратом, *Официален вестник на Европейския съюз*, 28.2.2005 г., стр. 129-198

[52] Филипов К., К. Зашев, Възможности за производство на плутониеви изотопи в реактори от типа ВВЕР-1000, Енергиен форум 2015, том I, стр. 55-61, Варна, 2015