

# ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2015

## ЗАЩИТА ОТ РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ДЕЛЯЩИ СЕ ИЗОТОПИ ПРИ ЕКСПЛОАТИРАНЕТО НА ЕНЕРГИЙНИ РЕАКТОРИ НА ТОПЛИНИ НЕУТРОНИ

Костадин Зашев, Калин Филипов, Ивайло Найденов

## PROLIFERATION RESISTANCE ASPECTS OF THERMAL POWER REACTORS' OPERATION

Kostadin Zashev, Kalin Filipov, Ivaylo Naydenov

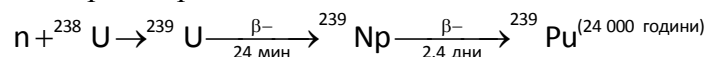
*Even though commercial nuclear power generation has become decoupled from military research, it is possible to produce weapons-grade nuclear material in civilian nuclear facilities. It is important for the commercial operation of power reactors to be proliferation resistant in order to prevent the misuse of isotopes with potentially weapons-grade quality. In this article the possibilities for production of uranium, plutonium, neptunium, and americium in power reactors are examined, along with their qualities related to non-civilian usability and proliferation resistance.*

### Въведение

Съгласно дефиницията на МААЕ [8], устойчивостта на нерегламентирано разпространение на ядрени материали е такава характеристика на ядрена система или съоръжение, която възпрепятства отклонението или недеklarираното производство на ядрен материал, както и злонамереното използване на ядрена технология, за придобиване на ядрено оръжие или друг ядрен експлозив. Като ядрени материали се класифицират уран с всякакво съдържание на  $^{235}\text{U}$  (природен, обеднен, обогатен),  $^{233}\text{U}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $\text{Bk}$ ,  $^{252}\text{Cf}$ ,  $\text{Cm}$ , обогатен литий,  $^{237}\text{Np}$ , торий, деутерий, тритий, както и уранът, находящ се в разделителните каскади [9]. Устойчивостта на нерегламентирано разпространение на ядрени материали отчита 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. Това може да включва използване на материали, оборудване, технологични процеси, съоръжения и знания, свързани с ядрения горивен цикъл.

### Производство на плутоний

Възможността за употреба на плутониевите изотопи за оръжейни цели се определя най-вече от съдържанието на изотопа  $^{240}\text{Pu}$  (Таблица 1). При поглъщането на неутрон от  $^{239}\text{Pu}$  се получава химически неотделим  $^{240}\text{Pu}$ , който притежава високо ниво на спонтанно делене. Това създава затруднения, тъй като е възможно да се получи предетонация (преждевременно получаване на критична маса) на ядреното оръжие, особено когато се използва методът за артилерийско сглобяване на критичната маса. За да се намали количеството на изотопа  $^{240}\text{Pu}$  в произвеждания плутоний, горивото в реакторите, използвани за производство на оръжеен плутоний, се облъчва значително по-кратко време спрямо нормалното за типичен ядрен енергиен реактор. Изотопът  $^{239}\text{Pu}$  не се среща в природата и единственият начин за неговото производство е в ядрените реактори по следната схема:



С натрупването на изотопа  $^{240}\text{Pu}$  е свързана и една от възможностите за защита на урановите ядрени горивни цикли от разпространение на плутониевите изотопи – вследствие на натрупването на  $^{240}\text{Pu}$  се влошава оръжейното качество на плутониевата смес. От тук произтича и основната разлика между двата типа ядрени реактори – енергийните и реакторите-размножители. Докато в енергийните реактори стремежът е към по-пълно оползотворяване на горивото и делящите се изотопи, съответно постигне на по-големи дълбочини на изгаряне, в реакторите-размножители по-голямата дълбочина на изгаряне означава по-големи количества на нежелания в оръжейния плутоний изотоп  $^{240}\text{Pu}$ . Необходимо е да се направи уточнението, че и в енергийните реактори е възможно да се получи плутоний с оръжейно качество, ако горивото бъде извадено от активната зона преждевременно, преди достигането до определена дълбочина на изгаряне [1].

Плутоний от свръхвисок оръжеен клас (<3%  $^{240}\text{Pu}$ ) се извлича от отработеното ядрено гориво при горивни цикли с ниска дълбочина на изгаряне, които обикновено са специално проектирани за целите на производството на плутоний с оръжейна цел, като оръжейното качество на плутония се влошава много бързо с увеличението на дълбочината на изгаряне.

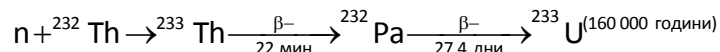
Таблица 1. Класификация на обогатяването на плутониевите смеси

Степен на обогатяване	$^{240}\text{Pu}$ %	Използваемост
Свръхчист оръжеен клас	<3	Най-добро качество
Оръжеен клас	3-7	Стандартен материал
Стандартен клас (СЯГ)	7-18	Практически използваемо
Реакторен клас (ОЯГ)	18-30	Евентуално използваемо
МОХ клас	>30	Практически неизползваемо

## Производство на уран

Природният уран се обогатява до оръжейно ниво чрез определени методи на изотопното обогатяване, които най-често се основават на разликата в масите на разделяните изотопи. Съдържанието на делящия се материал  $^{235}\text{U}$  в природния уран е 0.714%, като остатъкът е съставен от изотопа  $^{238}\text{U}$  (99.28%) и  $^{234}\text{U}$  (0.006%). Високообогатеният уран (със съдържание на изотопа  $^{235}\text{U}$  до 90%) се счита за оръжеен ядрен материал.

Друга възможност за използването на урана е чрез изотопа  $^{233}\text{U}$ , който не се среща в природата, но се получава по изкуствен път от  $^{232}\text{Th}$  чрез поглъщане на неутрон. Полученият по този начин  $^{233}\text{U}$  не изисква обогатяване и може да бъде сравнително лесно отделен от изотопа  $^{232}\text{Th}$ . Поради тази причина е контролиран като *специален ядрен материал* и често се смесва умишлено с изотопа  $^{238}\text{U}$ , за да бъде ограничена възможността за разпространение.

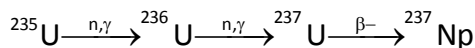


Изотопът  $^{233}\text{U}$  се получава относително лесно и на пръв поглед употребата му за оръжейни цели изглежда неизбежна, но съществуват и някои затруднения. Най-голямата преграда срещу неговото разпространение е едновременното получаване и на изотопа  $^{232}\text{U}$ , свързан с някои високоактивни продукти на делене като  $^{208}\text{Th}$ , които притежават голям добив. Ядрените оръжия, създавани по метода на имплозията, изискват съдържание на  $^{232}\text{U}$  под 50 ppm (над тази концентрация  $^{233}\text{U}$  е считан за *недостатъчно обогатен*). За сравнение стандартният оръжеен плутоний изисква концентрация на  $^{240}\text{Pu}$  не повече от 7% (70 000 ppm) и на  $^{238}\text{Pu}$  по-малко от 0.5% (5000 ppm). Ядрените оръжия, създавани по метода на артилерийското сглобяване, изискват много малки количества на изотопа  $^{232}\text{U}$  и още по-малки на други примеси (от порядъка на 1 ppm).

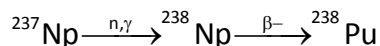
## Производство на нептуний

В горивния цикъл на енергийните реактори се произвежда само един изотоп на нептуния –  $^{237}\text{Np}$  и за разлика на урана и плутония, химическата сепарация на нептуния води до директно получаване на чист използваем изотоп, без да съществува възможност за намаляване на оръжейното качество чрез смесване с други нептуниеви изотопи и поради тази причина

подобряването на защитата срещу разпространение на нептуния е съществена, но и трудна задача. Най-важният клон на добив на  $^{237}\text{Np}$  е веригата на трансмутация на  $^{235}\text{U}$ :

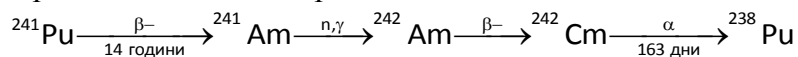


Тъй като добивът на  $^{237}\text{Np}$  започва след неутронно захващане от  $^{235}\text{U}$ , получаването на  $^{237}\text{Np}$  се наблюдава във всички горивни цикли, които използват  $^{235}\text{U}$ . Тъй като получаването на  $^{237}\text{Np}$  преминава през неутронно захващане от  $^{236}\text{U}$ , получаваните количества са незначителни при малка дълбочина на изгаряне, но с нарастването ѝ рязко се увеличава и полученото количество на изотопа  $^{237}\text{Np}$ . Характерно за този клон на добив е това, че производството се прекъсва веднага след изваждане на горивото от активната зона на реактора и съответно прекратяването на неговото облъчване. Рециклирането на урана, възстановен от преработката на отработеното ядрено гориво, съдържащо  $^{235}\text{U}$ , ще увеличи продукцията на  $^{237}\text{Np}$ , защото количеството на  $^{236}\text{U}$  в това отработено ядрено гориво ще бъде върнато в ядрения реактор за втори горивен цикъл. При излагане на допълнително неутронно облъчване изотопът  $^{237}\text{Np}$  може да бъде подложен на следната трансмутация:



Защитата срещу разпространение на  $^{237}\text{Np}$  може да бъде подобрена чрез нееднократното му връщане обратно в горивния цикъл след възстановяване от отработеното ядрено гориво. Тази стъпка освен, че ще доведе до унищожаването на натрупаните количества от изотопа  $^{237}\text{Np}$ , ще доведе и до получаването на  $^{238}\text{Pu}$ , който от своя страна ще доведе до увеличаването на отделената топлина в резултат на радиоактивно разпадане и до увеличаване на защитата срещу разпространение на плутониевите изотопи в отработените ядрени горива.

Важно е да се отбележи, че изотопът  $^{241}\text{Am}$  претърпява алфа разпадане ( $T_{1/2}=433$  години), при което се превръща в изотопа  $^{237}\text{Np}$ . Получените количества са ограничени поради големия период на полуразпад на  $^{241}\text{Am}$  и малкия дял на наличния  $^{241}\text{Am}$  по време на изгарянето, поради постоянната трансмутация на  $^{241}\text{Am}$  в  $^{242}\text{Am}$  (чрез неутронно захващане). След изваждането на горивото от активната зона на реактора, по-голямата част от изотопа  $^{241}\text{Pu}$  ще се разпадне до  $^{241}\text{Am}$  в рамките на две десетилетия.



Неосъществяването на трансмутация на изотопа  $^{241}\text{Am}$  ще доведе до рязко увеличаване на неговото количество и съответно до малко, но важно увеличение на генерирания  $^{237}\text{Np}$ . След няколко десетилетия това ще доведе до натрупване на значими количества от изотопа  $^{237}\text{Np}$ , което може да представлява съществен риск от разпространение. Поради тази причина се налага ограничаване на натрупването на  $^{241}\text{Am}$ , а от там и на  $^{237}\text{Np}$ , чрез изгаряне на по-големи количества  $^{241}\text{Pu}$  преди дълбокото геоложко съхранение на отработените горива. Алтернативен вариант може да бъде и непрекъснатото рециклиране на отработеното ядрено гориво, при което  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  ще бъдат унищожавани чрез делене и радиационно захващане.

## Производство на америций

Америцийт е елемент, който се произвежда непрекъснато в ядрените реактори. Трите най-важни негови изотопа, които се съдържат в отработените ядрени горива, са  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{242\text{m}}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$ . Изотопът  $^{241}\text{Am}$  се получава и при радиоактивното разпадане на  $^{241}\text{Pu}$ , който има относително къс период на полуразпад от 14.4 години и представлява до 15% от общото количество плутоний, изваждано от реактора.

Почти цялото количество на произведените нептуний и америций се намират в отработеното ядрено гориво или високоактивните радиоактивни отпадъци, като само една малка част от тези материали са вече отделени, така че да могат да бъдат използвани за производство на ядрени оръжия. Изотопът  $^{241}\text{Am}$  може също така да бъде получен и от плутоний, извлечен от отработено ядрено гориво, което е съхранявано продължителен период от време. Количеството на америция в отработеното ядрено гориво не е значително, но с времето се увеличава в резултат от разпадането на  $^{241}\text{Pu}$  и в момента запасите от америций се увеличават с около 4 тона годишно.

В допълнение, в заводите за производство на смесено уран-плутониево гориво (МОХ гориво) съществува практика за отделянето на америция с цел намаляване на дозовите натоварвания на работниците по време на производството на горивните касети. Въпреки, че отделяните количества не са големи, завод за производство на смесено уран-плутониево гориво с капацитет 40 тона на година може да произвежда годишно чрез сепариране около 90 килограма от изотопа  $^{241}\text{Am}$ .

## Заклучение

Сравняването на физическите свойства на нептуний и америций с тези на плутоний-239 и уран-235 (основните изотопи, използвани в ядрените оръжия) показва ясно, че те също могат да бъдат използвани за изработване на ядрени експлозиви, а критичните маси на  $^{237}\text{Np}$  и  $^{241}\text{Am}$  са сходни с тази на  $^{235}\text{U}$ . Това прави необосновано изключването на възможността за произвеждане на ядрено оръжие от изотопите на нептуний и америций. Нептуният е с голям период на полуразпад (равен на повече от 2 милиона години), термичните му свойства няма да попречат на използването му като ядрен експлозив, а спонтанното неутронното излъчване е малко и може да бъде използван и в ядрени оръжия, произведени по метода на артилерийското сглобяване (обаче при значително по-големи количества ядрен материал).

Съществуват известни разногласия относно възможността за употреба на америций в ядрени експлозиви, като те са свързани най-вече с отделената топлина и радиационното лъчение, които създават технологични затруднения. В това отношение америцият е сравняван с изотопа  $^{238}\text{Pu}$ , който се разглежда като неподходящ за ядрени експлозиви, поради високото ниво на отделяната топлина. От друга страна, това ниво при америция е само 20% от нивото при  $^{238}\text{Pu}$ , правейки го по този начин значително по-подходящ от него за ядрени оръжия. Въпреки проблемите с отделената топлина, в крайна сметка е установено, че работещ проект на ядрено оръжие от америций е напълно възможен.

## Литература:

1. Филипов К., Зашев К., Възможности за производство на плутониеви изотопи в реактори от типа ВВЕР-1000, Енергиен форум, Варна, 2015
2. Albright D., K. Kramer. (2005). Neptunium 237 and Americium: World Inventories and Proliferation Concerns, <[http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/np\\_237\\_and\\_ameridium.pdf](http://isis-online.org/uploads/isis-reports/documents/np_237_and_ameridium.pdf)>(10.01.2015)
3. INPRO Collaborative Project: Proliferation Resistance: Acquisition/Diversion Pathway Analysis (PRADA), IAEA, Vienna, 2012.
4. Kang J., F. von Hippel. (2001). U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233 in Spent Fuel, <<http://scienceandglobalsecurity.org/archive/sgs09kang.pdf>>(10.02.2015)
5. Nakano Y., T. Okubo. (2011). Plutonium isotopic composition of high burnup spent fuel discharged from light water reactors, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454911003380>>(05.02.2015)
6. Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, IAEA STR-332, 2002.
7. Serfontein D., E. J. Mulder, F. Reitsma. (2014). Assessment and reduction of proliferation risk of reactor-grade plutonium regarding construction of “fizzle bombs” by terrorists, <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029549313007103>> (01.02.2015)
8. Technical Features to Enhance Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems, Nuclear Energy Series, No. NF-T-4.5, Vienna, 2010
9. U.S. DOE, Nuclear Material Control and Accountability, Manual DOE M 470.4-6, 2006

## Автори:

Маг. инж. Костадин Иванов Зашев, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, [k\\_zashev@mail.bg](mailto:k_zashev@mail.bg).

Доц. д-р Калин Боянов Филипов, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, 02/965 2297, [filipov@tu-sofia.bg](mailto:filipov@tu-sofia.bg).

Ас. инж. Ивайло Тошков Найденов, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, тел. 0898597194, [ivaylo.naydenov@gmail.com](mailto:ivaylo.naydenov@gmail.com)

*Резултатите в публикацията са получени по проект, финансиран от субсидията за научни изследвания в Технически университет – София.*