

# ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2016

## ПОЛУЧАВАНЕ НА МИНОРНИ АКТИНИДИ В РЕАКТОРИ С ВОДА ПОД НАЛЯГАНЕ (II) – ИЗПОЛЗВАНЕ НА СМЕСЕНО U-PU ГОРИВО

Ивайло Найденов, Калин Филипов

### MINOR ACTINIDES PRODUCTION IN PRESSURISED WATER REACTORS (II) – MOX FUEL USAGE

Ivaylo Naydenov, Kalin Filipov

*Minor actinides represent a significant concern when it comes to spent nuclear fuel management. In spite of their low concentrations, they disproportionately contribute to spent fuel's activity and decay heat. In the current paper an estimation of the minor actinides' concentrations and isotopic vectors in spent MOX fuel at discharge is presented.*

#### Въведение

В настоящата статия е анализирано влиянието на използването на смесено уран-плутониево оксидно (MOX) гориво върху концентрацията на минорните актиниди в отработеното гориво в момента на извеждане от активната зона. За разлика от анализа, публикуван в [1], настоящето изследване е съсредоточено върху действително използвани горива. Това е причината да бъдат изследвани само конструкции на горивни касети, намиращи приложение в западноевропейски или американски реактори. Едната разглеждана касета (S14x14) е представител на по-ранните поколения ядрени горива с ниски проектни дълбочини на изгаряне, а другата конструкция (W17x17) е характерен представител на съвременните ядрени горива, достигащи и надвишаващи дълбочини на изгаряне от 60 000 MWd/tTM.

#### Входни параметри

Поради липсата на стандартизиран изотопен състав на свежото MOX гориво (масовият дял на плутония варира в широки граници, а самият плутоний може да бъде извлечен от разнообразни по дълбочина на изгаряне и период на отлежаване отработени горива) са разгледани два вида горива, условно обозначени с MOX-1 и MOX-2. Изотопният състав на плутония в тях е подбран по литературни данни (таблица 1), като е допуснато, че концентрацията на  $^{235}\text{U}$  в обеднения уран, използван за производството на горивото, е 0,3%. За всяко от горивата са разгледани два подслучая, в зависимост от масовия дял на плутония в горивото – съответно 5% и 7,23%.

Разгледаните ядрени реактори са референтни. Тяхната брутна електрическа мощност е 1000 MW, брутният термодинамичен коефициент на полезно действие на енергийния блок е 32,6% и коефициентът на използване на инсталираната мощност е 85%. Достигнатите дълбочини на изгаряне са 30 000 MWd/tTM за касетите S14x14 и 62 000 MWd/tTM за касетите W17x17. Изследването е проведено с модула за пресмятане на изотопни състави ORIGEN, част от компютърния код SCALE6.1 [3].

Таблица 1. Изотопен състав на плутония, използван за изработката на смесените горива

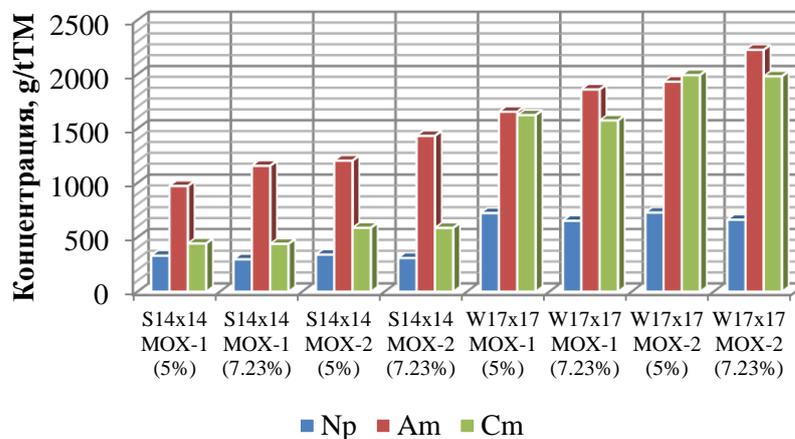
Изотоп	МОХ-1 [1]	МОХ-2 [2]
$^{238}\text{Pu}$	0,92%	2,56%
$^{239}\text{Pu}$	61,82%	53,16%
$^{240}\text{Pu}$	22,20%	27,73%
$^{241}\text{Pu}$	10,96%	9,52%
$^{242}\text{Pu}$	4,10%	7,02%

## Резултати от анализа

Получените резултати за концентрациите на минорните актиниди са обобщени в табличен (таблица 2) и графичен вид (фигура 1).

Таблица 2 Концентрации на Np, Am и Cm според вида на горивото, касетата и масовия дял на плутония, g/t тежък метал

$W_{Pu}$	S14x14				W17x17			
	МОХ-1		МОХ-2		МОХ-1		МОХ-2	
	5%	7,23%	5%	7,23%	5%	7,23%	5%	7,23%
Np	330,44	297,17	340,19	309,62	722,11	651,04	726,57	660,74
Am	970,87	1156,72	1203,83	1432,24	1654,22	1859,77	1931,25	2224,81
Cm	442,69	439,05	587,10	586,20	1622,90	1574,32	1992,35	1981,00



Фигура 1. Концентрации на Np, Am и Cm според вида на горивото, касетата и масовия дял на плутония, g/t тежък метал

За да се проследят най-пълно ефектите от различните типове уран-плутониеви горива, е необходимо да се разгледа и детайлният изотопен състав на всеки от минорните актиниди. Съставът на изотопните вектори е обобщен в таблица 4.

## Нептуний

От таблица 2 се вижда, че концентрацията на нептуния е почти право пропорционална на дълбочината на изгаряне – тя е приблизително 2,2 пъти по-голяма при дълбочина на изгаряне от 62 000 MWd/tTM, в сравнение с концентрацията, получена при дълбочина на изгаряне от 30 000 MWd/tTM. Освен това, тя намалява с между 9% и 10% при увеличаване на

масовия дял на плутония. Причината е, че с увеличаване на плутония намалява концентрацията на  $^{235}\text{U}$ , съответно намалява и нептуния.

За разлика от резултатите, получени при анализа на отработено ураново гориво, тук основният нептуниев изотоп е  $^{239}\text{Np}$ , който е директен продукт на реакцията  $^{238}\text{U}(n,\gamma)$ . В случая с MOX горивата, най-често като компонент в тях се използва обеднен уран, което означава, че при дял на плутония от 5% и съдържание на  $^{235}\text{U}$  в обеднения уран 0,3%, дялът на  $^{238}\text{U}$  в горивото е около 95%. Това води до повишено поглъщане на неутрони в резонансната област и повишен дял на  $^{239}\text{Np}$ . От своя страна, този нуклид е с период на полуразпад около 2,7 дни, като след  $\beta^-$  разпад се превръща в  $^{239}\text{Pu}$ . Това означава, че след извеждането на отработеното гориво ще се наблюдава нарастване на концентрацията на  $^{239}\text{Pu}$ . Този ефект е наличен и при урановото гориво, като дори е по-висок, тъй като макар и изотопните съотношения при него да са по-ниски, концентрацията на  $^{239}\text{Np}$  е по-висока (таблица 3).

Таблица 3. Концентрация на  $^{239}\text{Np}$  в различните горива, g/t тежък метал

	S14x14					W17x17				
	UOX	MOX-1		MOX-2		UOX	MOX-1		MOX-2	
$W_{Pu}$	-	5%	7,23%	5%	7,23%	-	5%	7,23%	5%	7,23%
$^{239}\text{Np}$	243,73	213,30	186,00	218,10	192,70	537,08	510,70	443,50	511,60	447,70

Таблица 1. Състав на изотопните вектори на Np, Am и Cm

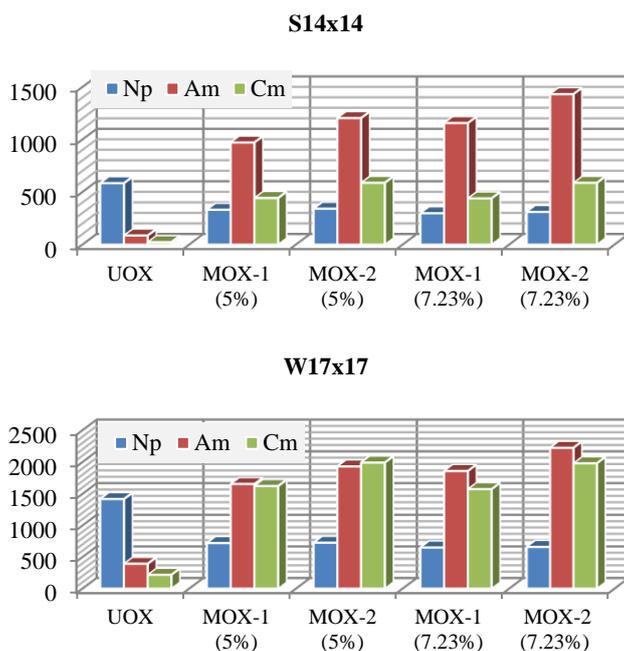
	S14x14				W17x17			
	MOX-1		MOX-2		MOX-1		MOX-2	
$W_{Pu}$	5%	7,23%	5%	7,23%	5%	7,23%	5%	7,23%
np237	35,23%	37,22%	35,66%	37,56%	28,83%	31,49%	29,14%	31,84%
np238	0,22%	0,19%	0,23%	0,19%	0,43%	0,37%	0,43%	0,38%
np239	64,55%	62,59%	64,11%	62,24%	70,72%	68,12%	70,41%	67,76%
np240	0,01%	0,01%	0,01%	0,01%	0,02%	0,02%	0,02%	0,02%
am241	15,06%	20,24%	12,00%	15,94%	4,73%	8,15%	4,00%	6,76%
am242m	0,40%	0,57%	0,31%	0,44%	0,13%	0,26%	0,11%	0,21%
am242	0,06%	0,05%	0,05%	0,04%	0,04%	0,05%	0,04%	0,05%
am243	84,32%	79,01%	87,47%	83,44%	94,67%	91,19%	95,43%	92,64%
am244	0,17%	0,13%	0,18%	0,14%	0,43%	0,34%	0,42%	0,34%
cm242	11,04%	12,73%	8,49%	9,65%	4,68%	6,11%	3,86%	4,95%
cm243	0,32%	0,34%	0,25%	0,27%	0,23%	0,28%	0,19%	0,23%
cm244	81,59%	80,20%	83,77%	82,79%	83,86%	82,00%	84,67%	83,04%
cm245	6,67%	6,48%	7,05%	7,00%	9,67%	10,53%	9,60%	10,59%
cm246	0,37%	0,24%	0,44%	0,29%	1,52%	1,05%	1,64%	1,16%
cm247	0,00%	0,00%	0,01%	0,00%	0,04%	0,03%	0,05%	0,03%

### Америций и кюри

Концентрацията на америций е около 3-4 пъти по-висока от тази на нептуния, като нараства с дълбочината на изгаряне и увеличаването на концентрациите на ядра-предшественици, особено при горивото MOX-2. И тук доминират изотопи са  $^{241}\text{Am}$  и  $^{243}\text{Am}$ , като нарастналият дял на  $^{241}\text{Am}$  е за сметка на  $\beta^-$ -разпад на  $^{241}\text{Pu}$  (плутоният за MOX е извлечен от отлежало ОЯГ). Концентрацията на кюри силно нараства със значителното увеличаване на дълбочината на изгаряне, което позволява увеличаването на дяла на по-

тежките  $^{245}\text{Cm}$ ,  $^{246}\text{Cm}$  и  $^{247}\text{Cm}$ . В същото време концентрацията на кюрий в отработеното МОХ гориво варира в границите от 0,5 до 2 kg/t в разглежданите случаи, за разлика от урановото гориво, където тези концентрации са от порядъка на 0,1-0,2 kg/t.

Ефектите от началния състав на свежото гориво и дълбочината на изгаряне стават очевидни при директното съпоставяне на ураново и МОХ гориво (фигура 2) – при МОХ горивото се зареждат ядра предшественици на минорните актиниди, което обуславя високата им крайна концентрация в отработеното гориво. В същото време концентрациите на Am и Cm превишават тази на Np, който е основният минорен актинид в отработеното ураново гориво, но няма принос в енергоотделянето, а специфичната му активност е по-ниска съответно със 7 порядъка от тази на  $^{242}\text{Cm}$ , с 5 порядъка от тази на  $^{244}\text{Cm}$  и с 2 порядъка от тази на  $^{243}\text{Am}$ .



Фигура 2. Концентрации на минорните актиниди в отработено ураново и уран-плутониево гориво

## Заклучение

Фактът, че в отработеното МОХ гориво доминират изотопите на америция и кюрия е силно негативен от гледна точка на управлението му веднага след извеждането от активната зона. Това се обуславя от повишаването на концентрациите на нуклиди, имащи отношение към енергоотделянето и активността на ОЯГ.

## Литература:

1. К. Филипов, И. Найденов, Влияние на типа на ядрения горивен цикъл върху актинидния състав на отработените горива, Сборник „Енергиен форум 2015“, част 1, стр. 62-68, Варна, 2015
2. С. G. Bathke, Material Attractiveness and Why It Is Important, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-14-20797, 2014
3. ORNL, Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1, June 2011

## Автори:

Ас. инж. Ивайло Тошков Найденов, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, тел. 0898597194, ivaylo.naydenov@gmail.com

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

Резултатите в публикацията са получени по проект, финансиран от субсидията за научни изследвания в Технически университет – София (Договор в помощ на докторанта № 152ПД0005-02)