

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2016

ПОЛУЧАВАНЕ НА МИНОРНИ АКТИНИДИ В РЕАКТОРИ С ВОДА ПОД НАЛЯГАНЕ (I) – ИЗПОЛЗВАНЕ НА УРАНОВО ГОРИВО

Ивайло Найденов, Калин Филипов

MINOR ACTINIDES PRODUCTION IN PRESSURISED WATER REACTORS (I) – URANIUM 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 uranium spent fuel at discharge is presented.

Въведение

В предходен анализ [1] е извършена предварителна оценка на влиянието на вида на свежото ядрено гориво (ураново или уран-плутониево) върху концентрациите на минорните актиниди в отработеното ядрено гориво при извеждането му от активната зона. В този анализ са разгледани три разновидности на свежото ураново гориво, използвано в реактори от типа ВВЕР-1000, както и три условни разновидности на смесени уран-плутониеви горива за ВВЕР. Условните горива са разгледани поради липсата на реални уран-плутониеви горива за този тип реактори. Получените резултати демонстрират ясна зависимост между вида на свежото гориво и количеството и състава на минорните актиниди.

За да се оцени пълното влияние на минорните актиниди върху управлението на отработеното ядрено гориво е необходимо да се извършат детайлни анализи на съществуващи горива, тъй като е необходимо да се демонстрират не само общите тенденции, но и да се определят изотопните състави на различните елементи, както и техните концентрации в отработеното гориво. Поради тази причина, резултатите, получени в [1], са добра отправна точка, но са крайно недостатъчни за провеждане на подробни изследвания на влиянието на минорните актиниди (Np, Am, Cm) върху управлението на отработените ядрени горива.

Минорни актиниди

Минорните актиниди са трансуранови елементи, част от серията на актинидите в периодичната система [4]. Те се получават в малки количества, но имат голям принос към активността и енергоотделянето на отработеното ядрено гориво [1]. Някои свойства на често срещаните техни нуклиди са представени в Таблица 1.

Получаване на минорни актиниди в енергийните реактори

Основният път за получаване на ^{237}Np е чрез два последователни неутронни захвата от ядрата на ^{235}U и ^{236}U . Изотопът ^{241}Am е продукт на β -разпад на ^{241}Pu , като от него се получава ^{242}Am в резултат на неутронен захват. От своя страна, ^{242}Am се явява нуклид-предшественик на ^{242}Cm , а ^{243}Am пък е дъщерен продукт на β -разпада на ^{243}Pu , като от него, чрез неутронен захват, се получава ^{244}Am , който в резултат на β -разпад се превръща в ^{244}Cm .

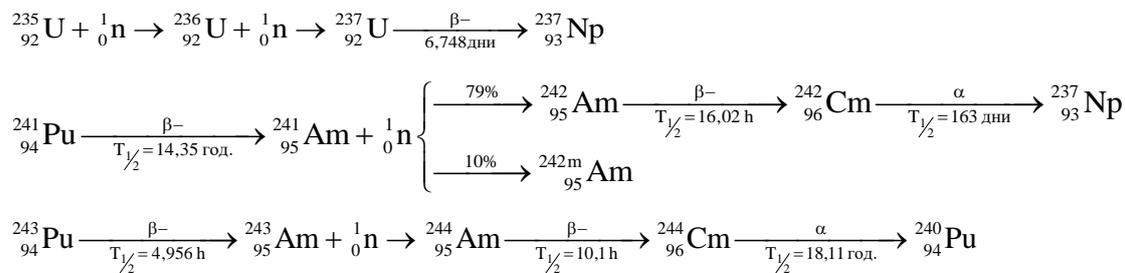


Таблица 1. Свойства на някои минорни актиниди [2]

Нуклид	$T_{1/2}$	Специфична активност	Мощност на γ -дозата	Специфично енергоотделяне
	год.	Bq/kg	mSv/h/kg	W/kg
^{237}Np	$2,10 \cdot 10^6$	$2,61 \cdot 10^{10}$	1,3	-
^{241}Am	432,70	$1,27 \cdot 10^{14}$	312 000,0	114,00
$^{242\text{m}}\text{Am}$	140,0	$3,87 \cdot 10^{14}$	12 000,0	4,49
^{243}Am	7 370,00	$7,33 \cdot 10^{12}$	44 000,0	6,43
^{242}Cm	0,45	$1,23 \cdot 10^{17}$	-	122 000,00
^{244}Cm	18,10	$3,00 \cdot 10^{15}$	4 900,0	2 830,00
$^{245}\text{Cm}^*$	8 500,00	няма данни	няма данни	5,71

*данните за ^{245}Cm са получени от 3

Цели на проведения анализ

Целта на настоящето изследване е получаването на детайлна информация за:

- количествата минорни актиниди, които се получават при експлоатацията на различни типове ядрени горива, използвани в реактори с вода под налягане;
- изотопните състави на получените елементи нептуний, америций и кюрий в момента на извеждане на горивото от активната зона.

Изследвани са както отворен (използване на ураново гориво), така и затворен (използване на уран-плутониево гориво) ядрен горивен цикъл.

За анализа на отворения горивен цикъл са подбрани пет типа горивни касети – три разновидности на ядрено гориво, използвано в реактори от типа ВВЕР-1000 (ТВС-М, ТВСА, ТВСА-12) и две разновидности на ядрено гориво, използвани в западноевропейски и американски реактори – горивна касета на „Сименс“ (S14x14) и горивна касета на „Уестингхаус“ (W17x17) (Таблица 2). Причината за този избор е стремежът да се разгледа широк обхват на ядрени технологии, начални обогатявания и проектни дълбочини на изгаряне.

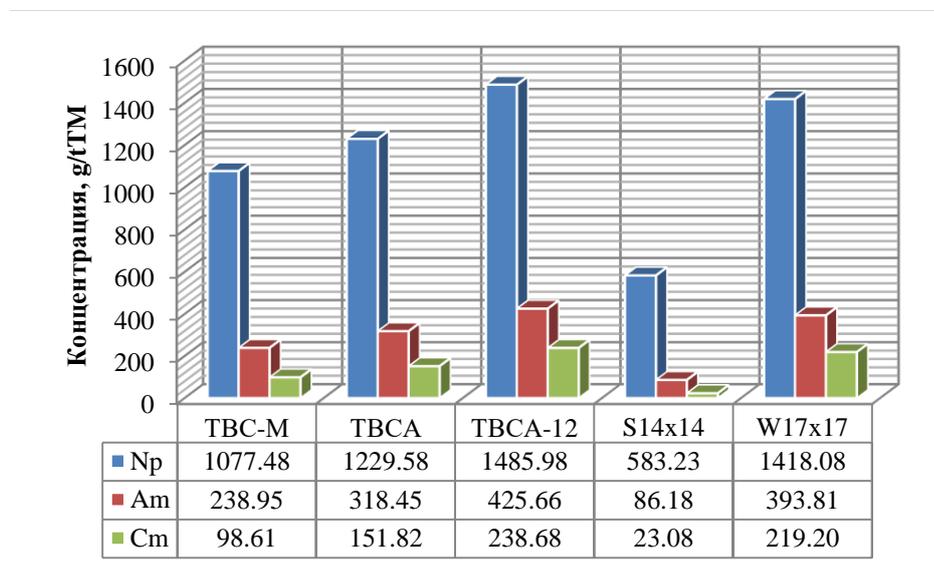
Таблица 2. Характеристики на изследваните горивни касети

	ТВС-М	ТВСА	ТВСА-12	S14x14	W17x17
	5	5	5	6	7
Обогатяване по ^{235}U , %	4,31%	4,40%	4,95%	3,13%	4,80%
Проектна дълбочина на изгаряне, MWd/tM	49 000	55 000	65 000	30 000	62 000

Изследването е проведено с модула за пресмятане на изотопни състави ORIGEN, част от компютърния код SCALE6.1, разработен от Националната лаборатория „Оук Ридж“, САЩ [8]. Разгледани са референтни ядрени реактори с брутна електрическа мощност 1000 MW, брутен термодинамичен коефициент на полезно действие на енергийния блок 32,6% и коефициент на използване на инсталираната мощност 85%.

Резултати от анализа

Получените резултати показват закономерно увеличаване на генерираните актиниди при увеличаване на дълбочината на изгаряне, породено от по-високата начална стойност на обогатяването и по-дългия период на престой на ядреното гориво в активната зона на реактора (Фигура 1).

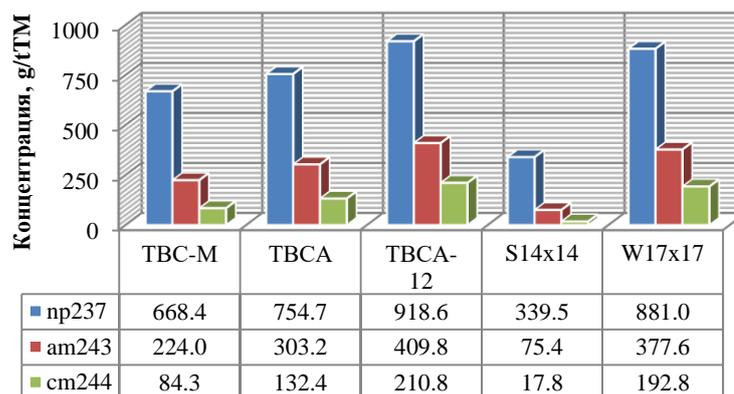


Фигура 1. Обща концентрация на минорните актиниди в отработеното ядрено гориво при извеждане от активната зона, g/t тежък метал

Съставът на получените изотопни вектори е представен в Таблица 3. От нея става видно, че доминиращите изотопи за всеки един от разглежданите елементи са съответно ^{237}Np , ^{243}Am и ^{244}Cm . Техните концентрации са представени графично на Фигура 2.

Таблица 3. Състав на изотопните вектори на нептуния, америция и кюрия при извеждане от активната зона

	TBC-M	ТВСА	ТВСА-12	S14x14	W17x17
np237	62,03%	61,38%	61,82%	58,21%	62,13%
np238	0,80%	0,91%	1,07%	0,50%	1,04%
np239	37,16%	37,70%	37,10%	41,29%	36,82%
np240	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%
am241	5,72%	4,24%	3,12%	12,04%	3,51%
am242m	0,12%	0,09%	0,07%	0,23%	0,08%
am242	0,06%	0,05%	0,05%	0,09%	0,05%
am243	93,74%	95,21%	96,27%	87,43%	95,88%
am244	0,35%	0,41%	0,49%	0,21%	0,48%
cm242	9,78%	7,56%	5,76%	19,90%	6,02%
cm243	0,29%	0,25%	0,21%	0,42%	0,22%
cm244	85,49%	87,21%	88,32%	77,07%	87,95%
cm245	3,97%	4,37%	4,90%	2,41%	5,04%
cm246	0,46%	0,60%	0,79%	0,20%	0,75%
cm247	0,01%	0,01%	0,01%	0,00%	0,01%



Фигура 2. Концентрации на доминиращите изотопи на Np, Am и Cm в ОЯГ при извеждане от активната зона, g/t тежък метал

Заклучение

С увеличаване на дълбочината на изгаряне на ядрените горива нараства и концентрацията на минорните актиниди. Това се дължи на увеличената дължина на горивната кампания, което дава възможност за получаване на по-големи концентрации на ядрата-предшественици на минорните актиниди и съответно на самите минорни актиниди. Нежелателните ефекти от гледна точка на управлението на отработеното гориво са няколко – от една страна се увеличава концентрацията на ^{237}Np , от която може да се получи ^{238}Pu , чието енергоотделяне е от порядъка на 0,6 MW/kg, а от друга страна, концентрацията на ^{244}Cm нараства десетократно – от под 20 g/t до над 200 g/t. Тези стойности не следва да се пренебрегват, тъй като неговото енергоотделяне е 2,8 MW/kg. По-скоро положителен ефект от увеличаване на дълбочината на изгаряне има намаляването на дяла на ^{241}Am (0,1 MW/kg) с мощност на γ -дозата от $312 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, за сметка на ^{243}Am , чието енергоотделяне е ниско, а мощността на γ -дозата е $44 \text{ mSv} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$, макар и това да е все още висока стойност. В абсолютни стойности, обаче, количеството на ^{241}Am нараства над 5 пъти. Нарастването на ^{237}Np е двукратно, а общо на нептуния – трикратно. Кюрият нараства десетократно, като делът на втория най-значим изотоп – ^{245}Cm , може да достигне до 5% от целия кюрий.

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. D. G. Cacuci (ed.), Handbook of Nuclear Engineering, Vol. IV, Chapter 26, Springer, 2010
3. C. G. Bathke et al., The Attractiveness of Materials in Advanced Fuel Cycles for Various Proliferation and Theft Scenarios, Los Alamos National Laboratory, LA-UR-10-00949, 2010
4. К. Зашев, К. Филипов, Методи за намаляване на съдържанието на дългоживущи радиоактивни отпадъци в отработените ядрени горива, Сборник доклади „XIX научна конференция с международно участие ЕМФ 2014“, том I, стр. 119-124, Созопол, 2014
5. TVEL Fuel Company, Nuclear Fuel for VVER Reactors, Moscow, 2011
6. Electric Power Research Institute, Burnup Credit — Contribution to the Analysis of the Yankee Rowe Radiochemical Assays, Palo Alto, CA, 2011
7. Westinghouse Electric Company, 17x17 Next Generation Fuel (17x17 NGF) Reference Core Report, WCAP-16498-NP, Monroeville, PA, 2008
8. 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)