

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2015

ВЛИЯНИЕ НА ТИПА НА ЯДРЕНИЯ ГОРИВЕН ЦИКЪЛ ВЪРХУ АКТИНИДНИЯ СЪСТАВ НА ОТРАБОТЕНИТЕ ГОРИВА

Калин Филипов, Ивайло Найденов

NUCLEAR FUEL CYCLE TYPE INFLUENCE ON ACTINIDES' COMPOSITION IN SPENT FUEL

Kalin Filipov, Ivaylo Naydenov

Today the nuclear power reactors generally use two types of fresh nuclear fuel – uranium dioxide with different level of ^{235}U enrichment (around 95% of all fuel), and mixed uranium-plutonium oxide (MOX) fuel with its use gradually increasing. These fuels have a different isotopic composition which means spent nuclear fuels' isotopic composition will be different as well, especially concerning the minor actinides. Minor actinides have disproportional impact on spent fuel's activity and decay heat. The objective of this article is to calculate minor actinides' concentrations in uranium and MOX spent fuel of WWER reactor type in order to gather data for assessing MOX fuel use impact on spent fuel management.

Въведение

Важна част от дейностите, които съпровождат експлоатацията на ядрените енергийни реактори, е управлението на отработеното ядрено гориво. Този етап от горивния цикъл има отношение към всички аспекти на ядрената енергетика – технически, икономически и социални. Без значение какъв ядрен горивен цикъл се използва и каква е стратегията за управление на отработено ядрено гориво, крайният стадий винаги е погребване на отработеното гориво или високоактивните отпадъци в геоложко хранилище [1]. Усвояването и прилагането на технологии, свързани с намаляването на количеството и активността на отработеното гориво, ще понижи изискванията към геоложките хранилища и ще доведе до значими ефекти, както от икономическа, така и от технологична и екологична гледна точка.

Един от основните фактори, които имат отношение към определянето на стратегиите за управление на отработените ядрени горива, е техният изотопен състав. Той зависи както от първоначалния състав на свежото ядрено гориво, така и от типа и мощността на енергийния реактор и постигнатата дълбочина на изгаряне. При най-често използваните днес отворени ядрени горивни цикли, основната част от отработеното гориво представлява смес от изотопи на урана – най-вече ^{238}U и в по-малки концентрации изотопите ^{235}U и ^{236}U . Тези изотопи заемат приблизително 95% от масата на отработеното гориво. Основен източник на отработено ядрено гориво в световен мащаб са реакторите със забавител и топлоносител лека вода, които представляват 81,5% от световния ядреноенергиен парк.

От гледна точка на управлението на отработените ядрени горива, значими затруднения произтичат от наличието на плутоний, минорни актиниди и някои високоактивни дългоживущи продукти на деленето като ^{99}Tc . Минорните актиниди (Np, Am, Cm) имат масов дял в отработеното ядрено гориво по-малко от 1%, но заедно със своите продукти на разпад, те притежават основен принос към активността и остатъчното енергоотделяне на отработеното гориво. Това значително затруднява и оскъпява неговото управление, а също така усложнява проектирането и управлението на геоложките

хранилища, в които трябва да бъде погребано отработеното гориво или високоактивните радиоактивни отпадъци, получени при неговото преработване. [2]. В тази връзка, наличието на детайлна и коректна информация за състава и количеството на минорните актиниди в отработените горива ще даде възможност за адекватна оценка и анализ на стратегиите за тяхното управление. Това от своя страна е от съществена важност при вземането на решения относно цялостната стратегия за управление на задния край на горивния цикъл.

Смесени уран-плутониеви оксидни горива

Първоначално, смесените уран-плутониеви оксидни горива (MOX горива) са разработвани като метод за утилизирание на непрекъснато нарастващите количества плутоний, получени от военни и цивилни източници. Структурата на смесените оксидни горива се отличава от тази на обикновения уранов диоксид. Тя може да представлява двуфазна смес от UO_2 и PuO_2 и/или еднофазен твърд разтвор – $(U,Pu)O_2$. Тегловният дял на PuO_2 може да се изменя в широки граници – от 1,5% до 30%, в зависимост от типа на реактора, за който е предназначено горивото [3]. Уран-плутониевото гориво позволява бързо връщане на плутония от отработеното гориво (делящите се изотопи представляват около 2/3 от плутониевата смес) в горивния цикъл, използвайки го в леководни реактори или реактори на бързи неутрони [4]. Изгарянето на смесени оксидни горива в леководни реактори понижава значително активността на вторичното отработено гориво, като при многократно рециклиране активността може да се намали от 3 до 10 пъти [5]. Понастоящем около 40 реактора в Европа и 10 в Япония са лицензирани за използването на смесено уран-плутониево гориво, като обикновено то се зарежда в приблизително 1/3 от активната зона, но при някои реактори зареждането на смесено оксидно гориво може да достигне до 50% от общата маса на горивото в активната зона. Около 5% от използваното свежо ядрено гориво в света е смесено уран-плутониево гориво.

Едно от най-големите предимства на оксидните горива е свързано с възможността за по-лесното увеличаване на концентрацията на делящия се материал, в сравнение с обогатяването на урановите горива. По-голямото количество на делящите се изотопи от своя страна позволява достигането на по-голяма дълбочина на изгаряне [6] и съответно по-дълга кампания на реактора и по-пълно изгаряне на ядреното гориво. Прилагането на затворени ядрени горивни цикли и рециклирането на плутониевите изотопи под формата на смесени оксидни горива има решаващо значение в още няколко основни насоки – разширяване на ресурсната база на ядрената енергетика и намаляване на зависимостта от природния ресурс, подобряване на устойчивостта на неразпространение на ядрени материали и значително намаляване на обемите на складираните плутоний и обеднен уран.

Цели на проведения анализ

Целта на настоящето изследване е провеждането на сравнителен анализ на състава на отработеното ядрено гориво от реактор ВВЕР-1000 при различни начални условия – отворен горивен цикъл, както се експлоатира в момента при реакторите ВВЕР и горивен цикъл с рециклиране на плутониевите изотопи. От своя страна отвореният горивен цикъл е изследван в три свои разновидности, за три типа горивни касети, представители на отделни генерации – ТВС-М, ТВСА и ТВСА-12 [8]. Затвореният горивен цикъл също е изследван в три свои разновидности (Таблица 1), но поради липсата на експлоатационен опит със смесено уран-плутониево гориво за реакторите ВВЕР, са разгледани три случая с условни смесени оксидни (MOX) горива, различаващи се по проектните си дълбочини на изгаряне (приети за идентични с тези на изследваните три уранови горива). Изследваните смесени оксидни горива са означени условно като MOX-1, MOX-2 и MOX-3 и са изработени от обеднен уран със съдържание на ^{235}U 0,3% и плутоний с изотопен състав, както следва: ^{238}Pu – 0,92%, ^{239}Pu – 61,82%, ^{240}Pu – 22,20%, ^{241}Pu – 10,96% и ^{242}Pu – 4,10%. Масовият дял на плутония в горивото е 7,23%. Изчисленията са извършени със софтуерния продукт Nuclear Fuel Cycle Simulation System, разработен от МААЕ [10], за период от една календарна година.

За определяне на концентрацията на минорни актиниди в отработеното гориво от реактори тип ВВЕР-1000 е разгледан референтен реактор 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%.

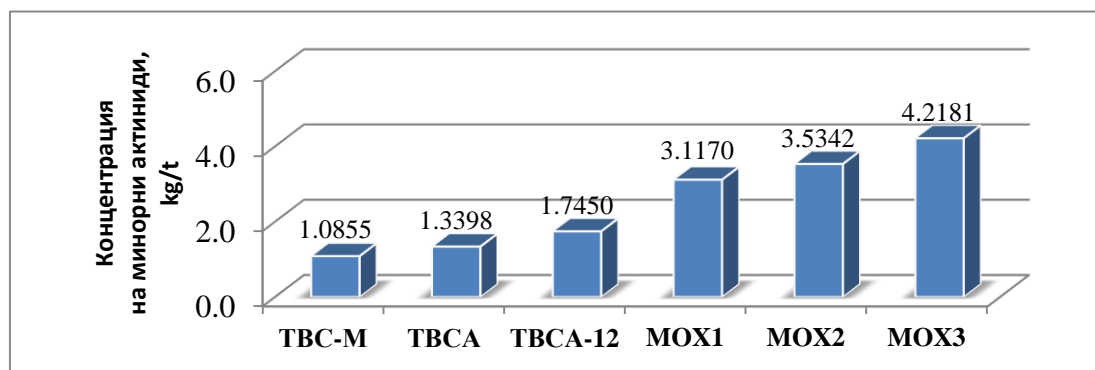
Таблица 1. Параметри на зарежданото гориво

	ТВС-М	ТВСА	ТВСА-12	МОХ-1	МОХ-2	МОХ-3
Обогатяване по ^{235}U	4,31%	4,40%	4,95%	-	-	-
Дълбочина на изгаряне, MWd/t	49 000	55 000	65 000	49 000	55 000	65 000

Акцентът в настоящето изследване е определянето на влиянието на вида гориво (конвенционално ураново и смесено уран-плутониево) върху сумарната концентрация на минорните актиниди в отработеното ядрено гориво, с отчитане и на конкретните концентрации на актинидите нептуний, америций и кюриий. Получените резултати ще бъдат използвани от една страна за целите на анализ на приноса на актинидите към общата активност и остатъчното енергоотделяне на отработеното ядрено гориво, а от друга – за оценка на влиянието на генерираните актиниди върху защитата на ядрения горивен цикъл от нерегламентирано разпространение на дялящи се материали.

Резултати от анализа

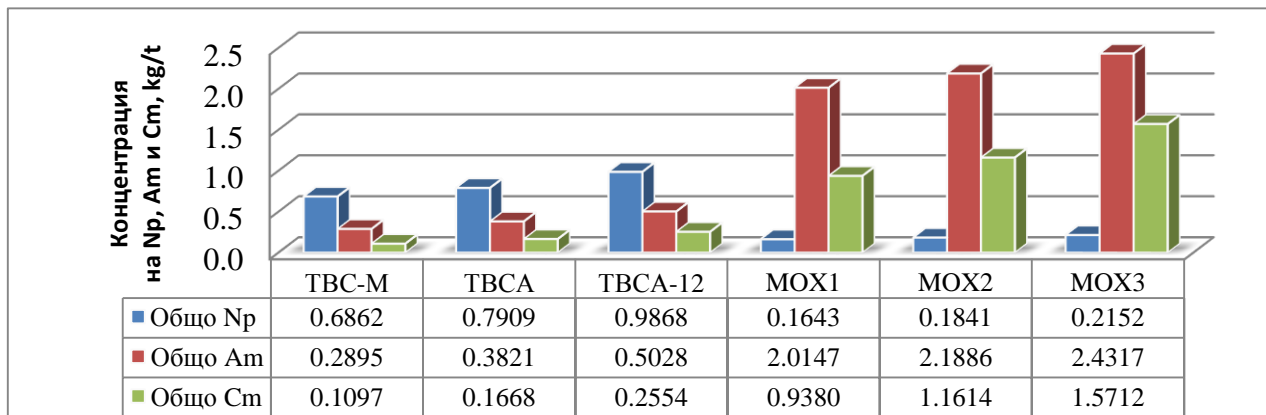
Получените резултати показват закономерно увеличаване на генерираните актиниди при увеличаване на дълбочината на изгаряне, породено от по-високата начална стойност на обогатяването и по-дългия период на престой на ядреното гориво в активната зона на реактора (Фигура 1). Рециклирането на плутониевите изотопи чрез използване на смесени оксидни горива има значителен принос по отношение на общото количество генерирани минорни актиниди.



Фигура 1. Концентрация на минорните актиниди в отработеното гориво в зависимост от вида на свежото гориво, kg/t

Изследването на съдържанието на минорните актиниди Np, Am и Cm показва спецификата при експлоатирането на уранови и смесени оксидни горива (Фигура 2), породена от различния състав на ядрените горива както по време на работа в активната зона на реактора, така и след извеждането от нея. Концентрацията на Np при отработено ураново гориво нараства, тъй като с увеличаване на дълбочината на изгаряне се увеличава генерирането на ядрото-предшественик ^{237}U , докато увеличението на концентрациите на Am и Cm се дължат на повишеното изгаряне на възпроизведения в реактора плутоний. Увеличената сумарна концентрация на минорни актиниди при използването на смесено оксидно гориво се дължи на факта, че със свежото гориво се зареждат повече техни ядра предшественици, отколкото се зареждат с урановото гориво. Високите концентрации на Am, а в следствие на това и на Cm, в отработеното смесено оксидно гориво, се дължат на факта, че 15% от заредените в реактора изотопи на плутония са директни ядра-предшественици

^{241}Pu и ^{242}Pu , а над 1/5 е ^{240}Pu , от който чрез захват се получава ^{241}Pu . От друга страна, ниската генерация на ^{237}Np се дължи на това, че в смесеното оксидно гориво концентрацията на ^{235}U е по-ниска от природната и поради това вероятността за получаване на ядрото-предшественик ^{237}U е много по-малка, отколкото при свежо ураново гориво.



Фигура 2. Концентрация на актинидите Np, Am и Cm в отработеното гориво в зависимост от вида на свежото гориво, kg/t

Заклучение

Проведеният сравнителен анализ на актинидния състав на отработените горива недвусмислено показва ефективността от използването на смесени оксидни горива, но показва също така и необходимостта от прилагане на нова стратегия за управление на отработените горива. Увеличената концентрация на актинидите безспорно е нежелан ефект, но възможността за достигане на по-високи дълбочини на изгаряне ще намали значително зависимостта от природния ресурс и количествата на високоактивните отпадъци, а усъвършенстването на ядрените горивни цикли, въвеждането на реактори-размножители на бързи неутрони и на трансмутационни цикли ще доведат до допълнителни възможности за редуциране на актинидите и постигане на значителни екологични и технологични ползи.

Литература:

1. S. Valcheva, I. Naydenov, K. Filipov, Advanced Nuclear Fuel Cycles with Actinides' Transmutation: an Overview, XIX JINR Annual Young Scientists' and Students' Conference, Dubna, Russia 16-20.02.2015.
2. M. Salvatores, G. Palmiotti, Radioactive waste partitioning and transmutation within advanced fuel cycles: Achievements and challenges, Progress in Particle and Nuclear Physics 66, p. 144 – 166, 2011
3. B. E. Burakov, M. Ojovan, W. E. Lee, Crystalline Materials for Actinide Immobilisation, Imperial College Press, London, 2011, p.57-58
4. Nuclear fuel cycle science and engineering, ed. by Ian Crossland, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 2012, p. 144
5. IAEA, Status and Advances in MOX Fuel Technology, TRS415, Vienna, 2003
6. World Nuclear Association, Mixed Oxide (MOX) Fuel, <http://world-nuclear.org/info/Nuclear-Fuel-Cycle/Fuel-Recycling/Mixed-Oxide-Fuel-MOX/>, достъпно на 31.03.2015 г.
7. I. Naydenov, K. Filipov, LWR Fuel Cycles' Material and Isotopic Balance, сп. Доклади на БЯД 2014
8. TVEL Fuel Company, Nuclear Fuel for VVER Reactors, Moscow, 2011
9. IAEA, Nuclear Fuel Cycle Simulation System (VISTA), IAEA-TECDOC-1535, Vienna, 2007

Автори:

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

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

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