

ЕНЕРГИЕН ФОРУМ 2015

ВЪЗМОЖНОСТИ ЗА ПРОИЗВОДСТВО НА ПЛУТОНИЕВИ ИЗОТОПИ В РЕАКТОРИ ОТ ТИПА ВВЕР-1000

Калин Филипов, Костадин Зашев

THE ABILITY TO PRODUCE PLUTONIUM ISOTOPES IN WWER-1000 REACTORS

Kalin Filipov, Kostadin Zashev

In the current report are investigated the possibilities for plutonium producement for military usage in WWER-1000 type of reactors. In this context, the proliferation resistance of pressurized water reactors are examined. It is made a detailed analysis of the isotopic composition of TVC-A fuel assembly at different times through the fuel cycle. The main object of the article is to show the time of irradiation of the nuclear fuel after which it becomes "denaturated" and practically not usable for nuclear weapons production.

Въведение

Една от основните характеристики на съвременните ядрени горивни цикли и изобщо на развитието на ядрените технологии, е стремежът към защита от разпространение на дялящи се материали. Такива материали са вещества, които могат да бъдат използвани за производство на ядрени оръжия. Най-често използвани са изотопите на урана и плутония, но възможностите не се изчерпват с тях – провеждани са експерименти с използване и на други материали с оръжейно ниво на обогатяване като изотопите ^{233}U , ^{237}Np , ^{241}Am , ^{243}Am и други, които практически не са били употребявани за военни цели, но теоретично няма пречки това да бъде осъществено. За оценка защитеността на горивните цикли се използват технологичните затруднения пред възможността за получаване на дялящи се изотопи с подходяща чистота (неналичието на примеси, които могат да бъдат добавени и умишлено възпрепятстват или затрудняват употребата на материала като суровина за производство на ядрено оръжие) [8,9].

Основната цел в настоящето изследване е анализ на възможността за производство на плутониеви изотопи с военно предназначение в цивилни енергийни реактори на топлинни неутрони, каквито са реакторите ВВЕР-1000, експлоатирани на много места в света. Резултатите в голяма степен могат да бъдат пренесени и към реакторите PWR с аналогични мощности.

Своето създаване и развитие ядрената енергетика в днешния си вид дължи на военната промишленост и частност на проекта Манхатън, които има за крайна цел създаването на ядрено оръжие. За да бъде възможно това е необходимо наличието на определено количество дялящи се изотопи, които обаче не се срещат в природата. Единственият природен ядрен материал, който може да се дели относително лесно, е изотопът ^{235}U , чието съдържание в природния уран е под 1% и употребата му за подобни цели е невъзможна без изотопно обогатяване. Поради тази причина се подхожда към създаване на изотопи по изкуствен път, като това е възможно в активната зона на ядрен реактор, създаден точно за тази цел. Съществува една основна принципна разлика в реакторите, построени за производство на изотопи и реакторите, предназначени за производство на електроенергия и това е техният енергиен спектър, откъдето произтичат и редица други технологични особености.

Изотопите на плутония се произвеждат в активната зона на всеки един ядрен реактор, поради което те може и трябва да бъдат разглеждани като двуцелеви предприятия, включително и с отчитане на останалите звена от ядрения горивен цикъл.

Въпреки, че в енергийните реактори, работещи с топлинни неутрони, коефициентът на възпроизводство е много по-нисък, а енергийният спектър на неутроните и дълбочината на изгаряне на горивото обуславят различен състав на изотопите в отработеното гориво, не бива да бъде изключена възможността за производство на оръжейни изотопи и в реактори от този тип. Именно към анализ на тази възможност е насочено и настоящето изследване.

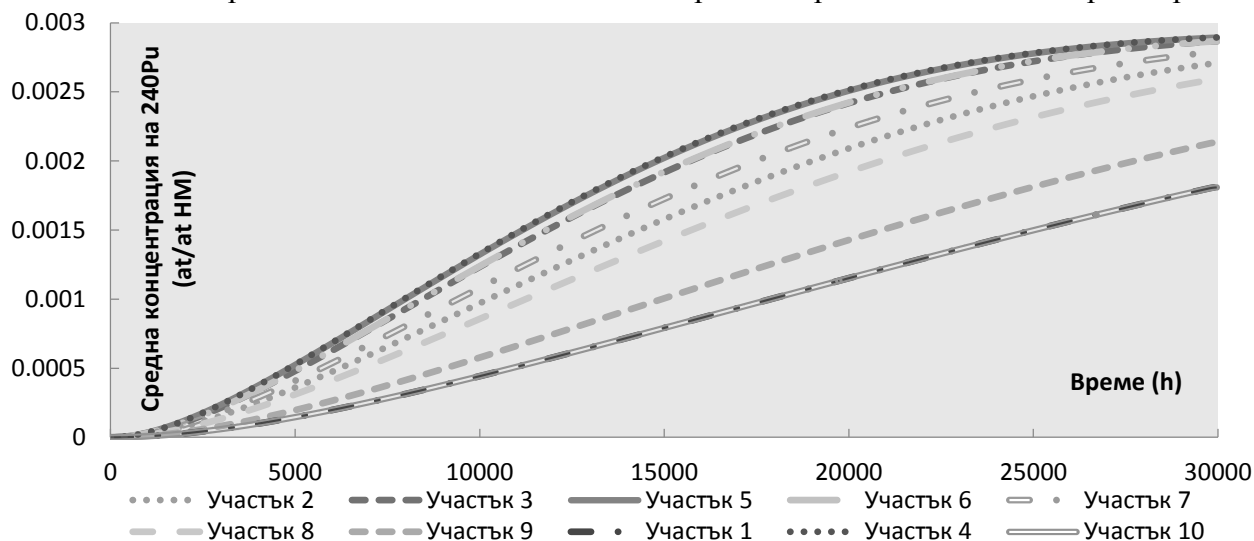
Изотопът ^{239}Pu се получава в реакторите чрез поглъщането на неутрон от ^{238}U , в следствие на което се получава ^{238}U , който от своя страна се разпада до ^{239}Pu . При поглъщането на неутрон от ^{239}Pu се получава изотопът ^{240}Pu , който е неотделим от изотопа ^{239}Pu . Тъй като обаче едно от основните изисквания към оръжейния плутоний е ниското съдържание на изотопа плутоний-240 (поради голямата стойност на спонтанното му делене и затрудненото сформирание на критична маса в резултат на преждевременната детонация), се налага производството на оръжеен плутоний да се осъществява при условия, които ограничават производството на ^{240}Pu . Тези съоръжения работят с неутрони с по-висока енергия и позволяват по-ранното изваждане на плутония от размножаващата среда (реактори-размножители, които работят с бързи неутрони). На практика плутониевите изотопи се произвеждат във всяка една активна зона на реактор, работещ с ураново гориво, но при енергийните реактори, където целта е по-пълно оползотворяване на горивото и постигане на по-голяма дълбочина на изгаряне на ядреното гориво, при продължителния престой на горивото в активната зона, едновременно с производството на изотопа ^{239}Pu (при захващането на неутрон от ^{238}U) се получава и изотопът ^{240}Pu (при захващането на неутрон от ^{239}Pu). В допълнение една голяма част от получените плутониеви изотопи изгарят в активната зона, при което допринасят с приблизително 30% към общото енергопроизводство. Единствената възможност за получаване на оръжеен плутоний в енергийните реактори с вода под налягане е преждевременното извеждане на горивото от активната зона. Тази възможност, макар и непрактична от икономическа гледна точка, не бива да бъде изключвана при анализите на защитеността на ядрените горивни цикли.

Генериране на плутониеви изотопи в реактори от типа ВВЕР-1000

В настоящето изследване е анализиран изотопният състав на ядрено гориво от типа ТВС-А, което се използва в реакторите ВВЕР-1000/В-320. За целта на анализите е създаден модел на горивните касети, който е използван в специализиран компютърен код за изследване на термомеханичните процеси в ядрените горива. Топлоотделящите елементи са разделени по височина на 10 участъка и за всеки един от тези участъци е изследвано съдържанието на плутониевите изотопи при различни дълбочини на изгаряне и при различен престой в активната зона на реактора. Крайната цел е да бъде определен моментът от времето за престой, до който, ако горивото бъде извадено от активната зона, концентрацията на плутониевите изотопи ще бъде подходяща за оръжейни цели.

При горивна кампания с нормална продължителност от четири години ($t=30\ 000\ \text{h}$) концентрацията на ^{240}Pu в най-натоварената зона на теплоотделящите елементи (*участък 4*) достига до 2.89% от общото количество гориво или 23.34% от общото количество плутоний. В най-слабо натоварения *участък 10*, където дълбочината на изгаряне е най-ниска (и съответно условията за производство на оръжеен плутоний са най-добри), концентрацията на ^{240}Pu достига до 0.109% от общото количество гориво или 15.64% от общото количество плутоний (Фигура 1). За целия теплоотделящ елемент средната концентрация на ^{240}Pu е 22.31% от общото количество плутоний (таблица 1). Гориво с такава концентрация попада в така нареченото „реакторно ниво“ на обогатяване, при което концентрацията на ^{240}Pu е между 18 и 30%. Това го класифицира като евентуално използваемо, но практически негодно за използване като материал за производството на ядрени оръжия. Горивото в най-слабо

натовареният участък 10 обаче се класифицира като „стандартно ниво“ на обогатяване по изотопа ^{240}Pu и е практически използваемо като материал за производството на ядрено оръжие.



Фигура 1. Изменение на концентрацията на изотопа ^{240}Pu по височина на топлоотделящите елементи

Изследването на промяната в изотопния състав на отработеното гориво при касетите тип ТВС-А показва очаквано увеличаване на дълбочината на изгаряне (61.7 kg/tHM спрямо 51.6) при увеличаването на обогатяването по изотопа ^{235}U от 4.39% до 4.95% и съответно заради по-дългата горивна кампания, полученото общо количество плутоний е със 74 кг по-голямо, а количеството на ^{240}Pu с приблизително 1% по-малко.

Таблица 1. Съдържание на оръжейни материали в отработеното ядрено гориво от реактори ВВЕР-1000 в различни етапи от горивната кампания

	ТВС-А с5=4.39%		ТВС-А с5=4.95%	
Дължина на кампанията, часа	29 970	3 336	35 686	3 781
Дълбочина на изгаряне, MWd/kgHM	51.639	5.749	61.721	6.515
U-235, %	0.8401	3.728	0.8392	4.186
Общо количество Pu, %	1.1043	0.2627	1.208	0.293
Общо количество Pu, kg	784.6	186.6	858.2	208.2
Pu-239, %	53.85	90.940	53.44	90.654
Pu-239, kg	422,5	169.7	458.6	188.7
Pu-240 %	22.31	7.038	21.36	7.068
Pu-240, kg	175.0	13.13	183.3	14.72
Pu-241, %	15.92	1.950	16.76	2.197
Pu-241, kg	124,9	0.0698	143,8	0.0796
Pu-242, %	7.925	92.890	8.449	92.851
Делящ се Pu, %	69.77	173.3	70.20	193.3
Делящ се Pu, kg	547.4	5.749	602.4	6.515

Интерес представлява анализът на необходимото време на престой на горивото в активната зона, за което ще се получат плутониеви изотопи с подходящо съдържание. При двете различни обогатявания на работните касети от 4.39% и 4.95% пределната за оръжейния плутоний концентрация на ^{240}Pu от 7% се достига след кампания на горивото съответно 3336 часа и 3781 часа. В двата случая се генерираат съответно 5.7 kg и 6.5 kg делящи се плутониеви

изотопи. Получените материали съобразно съдържанието на ^{240}Pu (7%) се класифицират като материали с „оръжейно ниво“ на обогатяване. Това означава, че ако горивото бъде извадено от активната зона на реактора преждевременно, след сепарация на плутония в завод за радиохимична преработка, ще бъде произведен стандартен материал за производството на ядрени оръжия.

Допълнителен риск би могло да представлява и генерирането на изотопи на америция, които също се класифицират като материали, подходящи за производство на ядрени оръжия [1]. Въпреки, че съдържанието на ^{241}Am и ^{243}Am в отработеното гориво е относително малко (3.15 kg и 3.88 kg за двете изследвани обогатявания), веригата на поучаване на ^{241}Am от радиоактивното разпадане на ^{241}Pu ще позволи, след достатъчно дълъг престой на горивото, натрупването на достатъчни количества. Изхождайки от пресметнатите количества на изотопа ^{241}Pu в края на пълната горивна кампания за касетите ТВС-А, след срок на съхранение от 14 години, за двете анализирани обогатявания от 4.39% и 4.95%, ще бъдат генерирани съответно 63 kg и 72 kg от изотопа ^{241}Am – количество, напълно достатъчно за получаване на критична маса.

Заклучение

Енергийните реактори на топлинни неутрони не са предназначени за производство на изотопи за военната промишленост, но като всяко ядрено съоръжение, те трябва да бъдат разглеждани като предприятия с двойно предназначение, поради възможностите за производство на дялящи се материали, макар и с известни ограничения. Проведеният анализ на изменението на изотопния състав на отработеното гориво от касетите ТВС-А показва, че енергийните реактори на топлинни неутрони основателно са подложени на мерки като стриктен регулаторен контрол и усъвършенстване на ядрените горивни цикли, които целят да ограничат възможностите за разпространение на дялящи се материали.

Литература:

1. Зашев К., Филипов К., Методи за намаляване на съдържанието на дългоживущи радиоактивни отпадъци в отработените ядрени горива, Научна конференция ЕМФ 2014, Созопол, 14-17 септември 2014, ISSN: 1314 5371.
2. I. Naydenov, K. Filipov, LWR Fuel Cycles' Material and Isotopic Balance, сп. Доклади на БЯД 2014.
3. 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.
4. I. Naydenov, K. Filipov, Preliminary Assessment of Minor Actinides Inventory Available for Transmutation in Double Strata Fuel Cycle, XIX JINR Annual Young Scientists' and Students' Conference, Dubna, Russia 16-20.02.2015.
5. Proliferation Resistance Fundamentals for Future Nuclear Energy Systems, IAEA STR-332, December 2002.
6. 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)
7. Technical Features to Enhance Proliferation Resistance of Nuclear Energy Systems, Nuclear Energy Series, No. NF-T-4.5, Vienna, 2010
8. U.S. DOE, Nuclear Material Control and Accountability, Manual DOE M 470.4-6, 2006

Автори:

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

Маг. инж. Костадин Иванов Зашев, Технически Университет – София, катедра Топлоенергетика и ядрена енергетика, k_zashev@mail.bg.

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