

ПРИЛАГАНЕ НА ТРАНСМУТАЦИЯТА КАТО МЕТОД ЗА ПОВИШАВАНЕ НА ЗАЩИТАТА ОТ РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА ДЕЛЯЩИ СЕ МАТЕРИАЛИ ПРИ РЕАКТОРИТЕ НА ТОПЛИННИ НЕУТРОНИ

Костадин Зашев, Калин Филипов

TRANSMUTATION AS A METHOD FOR ENHANCING THERMAL NUCLEAR POWER REACTORS PROLIFERATION RESISTANCE

Kostadin Zashev, Kalin Filipov

In addition to reliable and safe operation one of the main requirements to nuclear power energy sector is to ensure the high level of proliferation resistance. This is possible with the implementation of a set of administrative and technical measures at all stages of the nuclear fuel cycle. In this study are considered the possibilities for increasing the proliferation resistance of thermal nuclear power reactors through a process of one-stage or two-stage transmutation of minor actinides in stand-alone fuel campaigns. Calculations of the isotopic compositions of spent nuclear fuels in different configurations of nuclear fuel cycles have been performed using the SCALE computer code. The contribution of transmutation processes in reducing the risk of proliferation of nuclear materials has been assessed.

Въведение

Едно от основните изисквания към ядрената енергетика, наред с надеждната и безопасна експлоатация, е осигуряването на сигурна защита от разпространение на ядрени материали. Това е възможно само при изпълнението на комплекс от административни и организационно-технически мерки на всички нива и на всички етапи от ядрения горивен цикъл. В настоящето изследване са разгледани възможностите за повишаване на устойчивостта от разпространение на ядрени материали, добити от отработени ядрени горива на енергийни реактори на топлинни неутрони, чрез процес на едноетапна или двуетапна трансмутация на минорни актиниди в самостоятелни горивни кампании. Чрез софтуерният продукт SCALE [2,

3] са извършени пресмятания на изотопните състави на отработени ядрени горива в различни конфигурации на ядрените горивни цикли. Оценен е приносът на трансмутационните процеси по отношение на намаляване на риска от разпространение на ядрени материали, както са оценени потенциални негативни изменения в остатъчното топлоотделяне и спонтанните неутронни потоци.

Увеличаване на устойчивостта от разпространение на ядрени материали чрез прилагане на подход за редуциране на минорни актиниди

Един от основните подходи, които биха могли да осигурят надеждна защита на ядрените горивни цикли от разпространение на делящи се материали [1, 5], е изгарянето на трансурановите елементи в ядрени реактори с относително голяма мощност и голяма стойност на достиганата дълбочина на изгаряне [5, 6, 7]. В настоящето изследване е извършен софтуерен експеримент за оценка на възможностите за рециклиране на минорни актиниди чрез двуетапна и едноетапна схема на трансмутация (една и две пълни горивни кампании) с цел увеличаване на устойчивостта от разпространение на ядрени материали за неграждански цели. Рециклирането на минорни актиниди е извършено в два модела на реактори на топлинни неутрони: модел на двуетапно рециклиране на минорни актиниди, генерирани при работата на реактори тип ВВЕР-1000, чрез изгаряне в активната зона на кипящи реактори тип BWR GE (10x10-8) и модел на едноетапно рециклиране на отработено ядрено гориво от реактори тип ВВЕР-1000 в реактори тип CANDU. Разгледаните два модела притежават предимство в сравнение с редица други изследвани модели по отношение на получените резултати за трансмутационния потенциал на минорни актиниди.

В Таблица 1 са показани характеристиките на плутониевите изотопи, генерирани в отработеното ядрено гориво на реактори ВВЕР-1000 при нормална горивна кампания (без рециклиране на минорни актиниди). Двете основни характеристики – остатъчно топлоотделяне и спонтанен неутронен поток на плутониевата смес в отработеното ядрено гориво се отразява пряко върху устойчивостта срещу разпространение на ядрени материали. В таблицата е показано и дяловото разпределение на изотопите, допринасящи за увеличаване на топлоотделянето и неутронните емисии в плутониевите смеси. В Таблица 2 и Таблица 3 са показани характеристиките на плутониевите изотопи, генерирани в отработеното ядрено гориво след двуетапна трансмутационна схема на минорни актиниди от реактори ВВЕР-1000 в реактори BWR GE (10x10-8) и при едноетапна трансмутационна схема на отработено ядрено гориво от реактори ВВЕР-1000 в реактори тип CANDU. След анализиране на изотопните състави на

отработените ядрени горива е направено сравнение между остатъчното топлоотделяне и спонтанните неутронни емисии на нормална и трансмутационна горивна кампания. Резултатите са показани на Фигура 1 и Фигура 2.

Таблица 1. Основни характеристики на плутониеви изотопи, генерирани при нормална горивна кампания на реактори тип ВВЕР-1000

ВВЕР-1000 Нормална горивна кампания						
Pu изотопи	Дял %	маса на Pu изотоп, kg	Остатъчно топлоотделяне		Спонтанен неутронен поток	
			W/kg	W/дял	n/kg/s	дял/s
Pu238	3.15%	27.2	560	15231.5	2600000	7.07E+07
Pu239	51.30%	442.9	1.9	841.6	22	9.74E+03
Pu240	25.02%	216.0	6.8	1469.1	910000	1.97E+08
Pu241	12.00%	103.6	4.2	435.2	49	5.08E+03
Pu242	8.53%	73.7	0.2	14.7	1700000	1.25E+08
Остатъчно топлоотделяне на плутониевата смес, W/kg				20.8		
Спонтанни неутронни емисии на плутониевата смес, n/kg/s					4.55E+05	

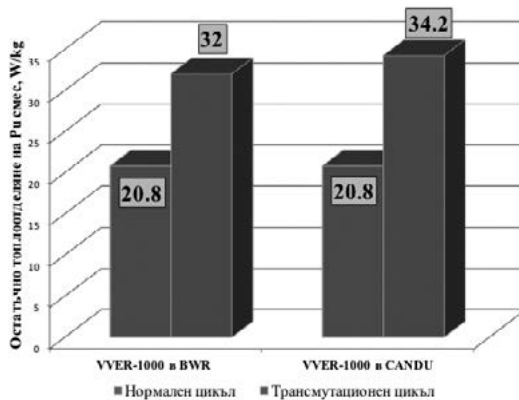
Таблица 2. Основни характеристики на плутониеви изотопи, генерирани при двуетапна трансмутационна кампания на минорни актиниди от реактори тип ВВЕР-1000 в кипящи реактори тип ВWR GE (10x10-8)

ВВЕР-1000 в ВWR (10x10-8) Двуетапна трансмутация						
Pu изо-топи	Дял %	маса на Pu изотоп, kg 894.1	Остатъчно топлоотделяне		Спонтанен неутронен поток	
			W/kg	W/дял	n/kg/s	дял/s
Pu238	5.13%	45.9	560	25686.3	2600000	1.2E+08
Pu239	51.71%	462.3	1.9	878.5	22	1.0E+04
Pu240	27.78%	248.4	6.8	1689.0	910000	2.3E+08
Pu241	9.12%	81.5	4.2	342.5	49	4.0E+03
Pu242	6.26%	56.0	0.2	11.2	1700000	9.5E+07
Остатъчно топлоотделяне на плутониевата смес, W/kg			32.0			
Спонтанни неутронни емисии на плутониевата смес, n/kg/s					4.93E+05	

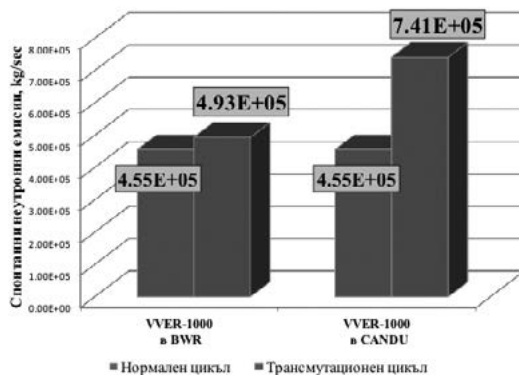
Таблица 3. Основни характеристики на плутониеви изотопи, генерирани при едноетапна трансмутационна кампания на ОЯГ от реактори тип ВВЕР-1000 в реактори тип CANDU

ВВЕР-1000 в CANDU Едноетапна трансмутация						
Pu изотопи	Дял %	маса на Pu изотоп, kg	Остатъчно топлоотделяне		Спонтанен неутронен поток	
			W/kg	W/дял	n/kg/s	дял/s
Pu238	5.50%	37.1	560	20779.7	2600000	9.65E+07
Pu239	34.76%	234.5	1.9	445.6	22	5.16E+03
Pu240	34.27%	231.2	6.8	1572.2	910000	2.10E+08
Pu241	8.65%	58.4	4.2	245.1	49	2.86E+03
Pu242	16.83%	113.5	0.2	22.7	1700000	1.93E+08
Остатъчно топлоотделяне на плутониевата смес, W/kg				34.2		
Спонтанни неутронни емисии на плутониевата смес, n/kg/s						7.41E+05

Трансмутацията на минорни актиниди, получени от отработеното ядрено гориво на реактори от типа ВВЕР-1000 в реактори кипящи реактори BWR (10x10-8) и в реактори CANDU води до повишение в стойността на топлоотделянето съответно с 54% (BWR) и 64% (CANDU) (Фигура 5-12), което се дължи основно на увеличението на дяла на Pu-238 и до повишение на спонтанните неутронни емисии съответно с 8.3% (BWR) и 63% (CANDU) (Фигура 5-13). Увеличението на спонтанните неутронни емисии и при двата варианта се дължи основно на увеличението на дяла на Pu-240, като в първия се понижава количеството на другия голям неутронен емитер – Pu-242, докато при реакторите CANDU съществува увеличение на дяла на Pu-242 с 54%, което в комбинация със увеличението от 7% на Pu-240 води до крайно по-големите спонтанни неутронни емисии.



Фигура 1. Остатъчно топлоотделяне на плутониевата смес преди и след рециклиране на минорни актиниди в моделите *BBEP-1000* в *BWR* и *BBEP-1000* в *CANDU*



Фигура 2. Спонтанни неутронни емисии на плутониевата смес преди и след рециклиране на минорни актиниди в моделите *BBEP-1000* в *BWR* и *BBEP-1000* в *CANDU*

Използвана литература:

- [1] Status of Minor Actinide Fuel Development. International Atomic Energy Agency, 2009.
- [2] Hermann, O., W., & Westfall, R., M. ORIGEN-S: SCALE system module to calculate fuel depletion, actinide transmutation, fission product buildup and decay, and associated radiation source terms. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA, Feb 1989.

- [3] Gauld, I., C., Radulescu, G., Ilas, G., & Wiarda, D. Isotopic Depletion and Decay Methods and Analysis Capabilities in SCALE. Nuclear technology, 2011.
- [4] Kloosterman, J., L., & Li, J., M. Transmutation of Americium in Fission Reactors. Netherlands Energy Research Foundation.
- [5] Hyland, B. et al. Transmutation of americium in light and heavy water reactors. Proceedings of Global 2009, Paris, 2009.
- [6] Production of Minor Actinides in Thermal Nuclear Reactors and Nonproliferation. Analytical report of U.S. Department of Energy.
- [7] Minor Actinide Burning в Thermal Reactors. A Report by the Working Party on Scientific Issues of Reactor Systems, OECD-NEA, 2013.

Автори:

Д-р Костадин Иванов Зашев, ТУ-София, катедра ТЕЯЕ, k_zashev@mail.bg

Доц. д-р Калин Боянов Филипов, ТУ-София, катедра ТЕЯЕ, filipov@tu-sofia.bg