

МНОГОКРАТНО РЕЦИКЛИРАНЕ НА ПЛУТОНИЙ В РЕАКТОР С ВОДА ПОД НАЛЯГАНЕ: ИЗМЕНЕНИЕ НА ОСТАТЪЧНОТО ЕНЕРГООТДЕЛЯНЕ

Златина Манчева, Ивайло Найденов

MULTIPLE PLUTONIUM RECYCLE IN A PRESSURISED WATER REACTOR: DECAY HEAT CHANGE

Zlatina Mancheva, Ivaylo Naydenov

The global plutonium stock amounts to 530 tHM of which 310 tHM are civilian material. Plutonium management is an important issue since all uranium fuelled reactors produce plutonium. One option is to recycle the plutonium in the form of mixed oxide fuel and burn it in pressurised water reactors. That would allow utilizing plutonium's energy content using well developed technologies. The current paper examines spent fuels' decay heat change in the case of multiple Pu recycle in a reference PWR.

Остатъчно енергоотделяне на отработеното гориво

Енергията, получена в резултат на пълния разпад ($t \rightarrow \infty$) на продуктите на едно делене на ^{235}U , е около 26 MeV, от които около 11 MeV се отнасят с неутрино, а останалите се преобразуват в топлинна енергия и се отдават в средата на горивото [1]. Тъй като процесът на радиоактивен разпад на нестабилните продукти на делене продължава и след спирането на ядрения реактор и прекратяването на верижната ядрена реакция на делене, ядреното гориво продължава да отделя топлинна енергия. Това явление се нарича остатъчно енергоотделяне.

Енергоотделянето на отработеното гориво се дължи основно на β - и γ -излъчването на продуктите на делене, както и от α -разпада на натрупаните трансуранови елементи [2]. Веднага след спирането на реактора, енергоотделянето на горивото в активната зона се дължи и на деленето на нуклидите в горивото, предизвикано от мигновени, закъсняващи и фотонейтрони [1].

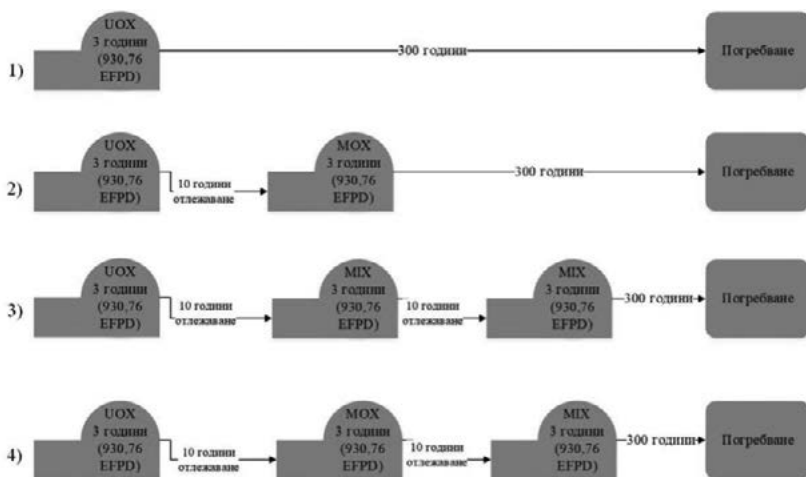
Отделената енергия е значителна – веднага след спирането остатъчната топлинна мощност възлиза на около 7% от топлинната мощност P_0 , на която е работил ядреният реактор [2], а в първите десет

минути след спирането топлинната мощност, дължаща се на разпада на продуктите на делене $P_{\beta,\gamma}$ е от порядъка на 2-3% от топлинната мощност P_0 [1]. Най-съществено влияние върху активността и енергоотделянето на отработеното гориво оказват актинидите – нептуний, плутоний, америций и кюрий, както и някои продукти на делене като технеций-99 [3].

Всичко това налага детайлно изследване на енергоотделянето на отработените ядрени горива, тъй като тази им характеристика е основополагаща при определяне на оптимален подход за управлението им, както и при избора и прилагането на цялостна стратегия за ядрения горивен цикъл.

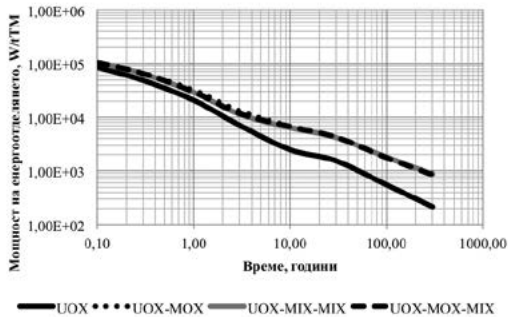
Постановка на задачата и входни данни

Настоящите резултати представляват втора част от изследването на ефектите на различни варианти за рециклиране на плутоний в реактори с вода под налягане, представени в [4]. Анализът на остатъчното енергоотделяне използва същите входни данни, а постановката на задачата е обобщена на Фигура 1. За извършване на пресмятанията е използван кодът ORIGEN [5].



Фигура 1. Постановка на задачата

Анализ на остатъчното енергоотделяне



Фигура 2. Мощност на остатъчното енергоотделяне на горивото след всеки цикъл в продължение на 300 години

На Фигура 2 е представено графично изменението на остатъчно енергоотделяне на отработеното ядрено гориво след всеки един от разглежданите цикли. Въз основа на графиката може да се обобщи, че отвореният горивен цикъл се характеризира с по-ниско остатъчно енергоотделяне в сравнение с частично затворените. Това се дължи на по-малкото количество натрупани нуклиди на трансуранови елементи в него поради еднократната му употреба. Триста години след последната кампания на горивото, мощността на остатъчното енергоотделяне на тон отработено ядрено гориво е почти еднаква при частично затворените горивни цикли. Най-висока е след цикъла UOX-MOX (Вариант 2) – 900 W/tTM, след него се нарежда цикъл UOX-MIX-MIX (Вариант 3) с 873 W/tTM и на последно място е UOX-MOX-MIX (Вариант 4) с 848 W/tTM. Тези относително ниски разлики биха могли да се обяснят със сходните концентрации на трансурановите елементи (напр. Np, Am, Cm) в отработеното ядрено гориво, които се получават в резултат на захващане на неутрон от ядрата на плутония. Тъй като плутоният е с по-високи концентрации в свежите смесени горива, концентрациите на Np, Am, Cm в смесените отработени горива са по-високи. Много от техните изотопи имат висока специфична мощност на остатъчното енергоотделяне. Тези явления са изследвани и демонстрирани например в [6-9].

Може да се заключи, че от гледна точка на мощността на остатъчно енергоотделяне на отработеното гориво след крайното извеждане от активната зона, вариантите на горивните цикли за двукратно рециклиране на плутония са равностойни.

Таблица 1. Относителен принос на плутония в остатъчното енергоотделяне при различните горивни цикли

Години	UOX		UOX-MOX		UOX-MIX-MIX		UOX-MOX-MIX	
	Pu	останали нуклиди	Pu	останали нуклиди	Pu	останали нуклиди	Pu	останали нуклиди
0,1	0,35%	99,65%	1,02%	98,98%	1,20%	98,80%	1,10%	98,90%
0,3	0,63%	99,37%	1,66%	98,34%	1,98%	98,02%	1,81%	98,19%
1,0	1,49%	98,51%	3,50%	96,50%	4,51%	95,49%	4,11%	95,89%
3,0	4,33%	95,67%	8,53%	91,47%	11,56%	88,44%	10,34%	89,66%
10,0	11,70%	88,29%	15,71%	84,29%	19,51%	80,49%	17,29%	82,71%
30,0	16,40%	83,60%	21,86%	78,13%	25,67%	74,32%	23,34%	76,66%
100,0	28,93%	71,07%	33,60%	66,40%	36,05%	63,95%	34,62%	65,38%
300,0	28,32%	71,68%	25,57%	74,43%	22,96%	77,04%	22,50%	77,50%

В Таблица 1 е представен относителният принос на плутониевите изотопи към енергоотделянето на отработеното гориво за всеки от разглежданите горивни цикли. С увеличаване на времето за отлежаване, дялът на енергоотделянето, дължащ се на плутония, нараства, поради постепенното намаляване на краткоживеещите нуклиди в състава на отработеното гориво, които имат основен принос към енергоотделянето към момента на извеждане на горивото от активната зона на реактора.

Относително големите периоди на полуразпад на повечето плутониеви изотопи са причината участието му в енергоотделянето да намалява по-бавно, което също допринася за обстоятелството, че на тристотната година на плутония се дължат между 20 и 30% от енергоотделянето на отработеното ядрено гориво, за разлика от момента на спиране на реактора, когато приносът му е около 1%.

При отворения горивен цикъл (Вариант 1) участието на плутония в остатъчното енергоотделяне в края на разглеждания период е най-високо, тъй като в отработеното ураново гориво концентрацията на трансуранови ядра с висока стойност на специфичната мощност на енергоотделянето е по-ниска, съответно приносът им към енергоотделянето е по-малък. При използването на MOX и MIX горива, приносът на плутония е малко по-нисък, тъй като при наличието на плутоний в свежото гориво, концентрациите на трансурановите елементи в отработеното гориво, съответно приносът им към енергоотделянето, нарастват. Изотопният със-

тав на отработеното гориво, съответно мощността на енергоотделянето му, зависят изцяло от изотопния състав на свежото гориво и режима на облъчване в активната зона.

От друга страна, относителният дял на плутония в остатъчното енергоотделяне може да се разгледа от гледна точка на междинните горивни кампании на разгледаните затворени горивни цикли. След всяка преработка на отработеното гориво на десетата година, плутоният и уранът в състава му се извличат за връщането им обратно в цикъла, а останалата част от отработеното ядрено гориво се разглежда като отпадък. Остатъчното енергоотделяне на този отпадък се намалява с извличането на плутония от състава му, което намалява енергоотделянето между 28,32 % след цикъл с ураново гориво и 25,57% след цикъл с MOX гориво (остатъчното енергоотделяне след първото рециклиране на MIX, дължащо се на плутония е 26,64%).

Заклучение

При рециклиране на плутония се повишава мощността на енергоотделянето на отработеното гориво, като този ефект е най-видим в края на разглеждания период на отлежаване. На десетата година от отлежаването остатъчното енергоотделяне на отработените смесени горива е приблизително 2,7 пъти по-високо от това на отработеното ураново гориво, което е безспорен отрицателен ефект. От друга страна, чрез извличане на плутония около десетата година може да се постигне намаляване с 26-28% на остатъчното енергоотделяне на високоактивния отпадък, съдържащ продукти на делене и трансуранови елементи.

От гледна точка на мощността на остатъчното енергоотделяне на отработеното гориво след крайното извеждане от активната зона, вариантите на горивните цикли за двукратно рециклиране на плутония са равностойни, т.е. двукратното рециклиране не влошава допълнително характеристиките на отработеното гориво.

Източници:

- [1] Владимиров, В. И. (1986) Практически задачи по эксплуатации ядерных реакторов, Энергоатомиздат, М.
- [2] Вапирев, Е., И. Христовков (2003) Неутронно-физични процеси при ВВЕР-440 (В-230) и ВВЕР-1000 (В-320), Пособие за инструктора, Физически факултет, СУ „Св. Климент Охридски“

- [3] Salvatores M., Nuclear Fuel Cycle Strategies including Partitioning and Transmutation, *Nuclear Engineering and Design* 235 (2005) 805 – 816
- [4] Манчева, Зл., И. Найденов (2020) Многократно рециклиране на плутоний в реактор с вода под налягане: изменение на изотопния състав, Енергиен форум 2020 (под печат)
- [5] ORNL (2011) Scale: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design, ORNL/TM-2005/39, Version 6.1
- [6] Найденов, И., К. Филипов (2016) Получаване на минорни актиниди в реактори с вода под налягане (I) - използване на ураново гориво, Сборник „Енергиен форум 2016“, стр. 194-199
- [7] Найденов, И., К. Филипов (2016) Получаване на минорни актиниди в реактори с вода под налягане (II) - използване на смесено U-Pu гориво, Сборник „Енергиен форум 2016“, стр. 200-205
- [8] Найденов, И., К. Филипов (2016) Влияние на вида на свежото гориво и периода на отлежаване върху актинидния състав на отработено гориво от реактори с вода под налягане, Сборник „XXI Конференция с международно участие ЕМФ 2016“, Том I, стр. 88-95
- [9] Найденов, И., К. Филипов (2016) Влияние на вида на свежото гориво и периода на отлежаване върху остатъчното енергоотделяне на отработено гориво от реактори с вода под налягане, Сборник „XXI Конференция с международно участие ЕМФ 2016“, Том I, стр. 96-101

Автори:

маг. инж. Златина Манчева, Агенция за ядрено регулиране, zlatina.mancheva@gmail.com

д-р инж. Ивайло Найденов, член на УС, Научно-технически съюз на енергетиците в България, +359 898 597194, ivaylo.naydenov@gmail.com