

МНОГОКРАТНО РЕЦИКЛИРАНЕ НА ПЛУТОНИЙ В РЕАКТОР С ВОДА ПОД НАЛЯГАНЕ: НАЧАЛНА ОЦЕНКА НА ЕФЕКТА ВЪРХУ РАЗХОДИТЕ ЗА ГОРИВО НА ЯЕЦ

Златина Манчева, Ивайло Найденов

MULTIPLE PLUTONIUM RECYCLE IN A PRESSURISED WATER REACTOR: INITIAL ASSESSMENT OF THE EFFECT ON NUCLEAR POWER PLANT'S FUEL COSTS

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 pressurized water reactors. That would allow utilizing plutonium's energy content using well developed technologies. The current paper examines the effect of plutonium recycle on the fuel cost component in the electricity production costs.

Въведение

Настоящият доклад представлява трета част от изследването на ефектите на различни варианти за рециклиране на плутоний в реактори с вода под налягане, представени в [1]. След извършването на сравнителен анализ на изменението на изотопния състав на плутония и остатъчното енергоотделяне, е извършен и начален икономически анализ. Този анализ се състои в определяне на специфичния размер на горивната компонента в производствените разходи при разглежданите горивни цикли. Горивната компонента е нормализирана за цялото електропроизводство в горивния цикъл. Следва да се отбележи, че оценката е опростена и би могла да се счита за първоначален етап от по-обстоятелствен технико-икономически анализ. Целта е да се проследи ефектът на рециклирането на плутония върху горивните разходи при производството на електроенергия.

Входни данни

За определяне на специфичния размер на горивната компонента в производствените разходи при разглежданите горивни цикли са използ-

вани данни за разходите, извършвани на различните етапи на горивния цикъл, публикувани от Националната лаборатория Айдахо [2]. Тези входни данни са обобщени в Таблица 1.

Разходите за гориво са анализирани както за единична кампания на всеки тип гориво, така и за всеки анализиран вариант на горивен цикъл (в три от вариантите се използва повече от един тип гориво). За определянето на икономическите величини, освен ценовите данни, обобщени в Таблица 1, са необходими и данни за материалните потоци, определени при изчисляването на материалните баланси на всеки цикъл. Обобщени данни за материалните потоци в разгледаните горивни цикли са представени в Таблица 2, а пълните резултати от анализа на материалните баланси са публикувани в [3].

Таблица 1. Разходи, извършвани на отделните етапи на горивния цикъл, участващи във формирането на горивната съставляваща в стойността на електроенергията, USD/kgTM [2]

| Тип разход | Стойност |
|---|---------------|
| Разходи за уранов концентрат | 50 USD/kgTM |
| Разходи за конверсия | 5 USD/kgTM |
| Разходи за разделителна работа | 100 USD/kgTM |
| Разходи за междинно съхранение на отработено ураново гориво | 100 USD/kgTM |
| Разходи за междинно съхранение на отработено смесено гориво | 165 USD/kgTM |
| Разходи за преработка на отработено гориво | 800 USD/kgTM |
| Разходи за производство на ураново гориво | 250 USD/kgTM |
| Разходи за производство на MOX гориво | 1250 USD/kgTM |
| Разходи за производство на MIX гориво | 1375 USD/kgTM |

Определяне на стойността на разходите за гориво

Стойността на разходите за гориво за единична кампания е определена съгласно равенство (1).

$$P_f = P_{U_3O_8} G_{U_3O_8} + P_{\text{конв.}} G_0 + P_{\text{pp}} U + P_{\text{съхр.}} G_{\text{яг}} + P_{\text{произв.}} G_{\text{яг}} + P_{\text{пер.}} G_{\text{яг}} \quad (1)$$

където с $P_{U_3O_8}$ са означени разходите за уранов концентрат, USD/kg; $P_{\text{конв.}}$ – разходите за конверсия, USD/kg; P_{pp} – разходите за разделителна работа, USD/kg; $P_{\text{съхр.}}$ – разходите за съхранение на отработеното ядрено гориво, USD/kg; $P_{\text{пер.}}$ – разходите за преработка на отработеното ядрено гориво, USD/kg и $P_{\text{произв.}}$ – разходите за производство на гориво, USD/kg;

$G_{U_{3O_8}}$ - маса на урановия концентрат, kgTM; G_0 - маса на природния уран, kgTM; $G_{ЯГ}$ – маса на горивото, kgTM; ΔU – разделителна работа, EPP.

При определянето на горивните разходи са пренебрегнати разходите за транспорт и съхранение на горивото, подлежащо на погребване в края на горивния цикъл. Поради това, например, в разходната част при отворения горивен цикъл не са включени разходи по крайното съхранение и преработка. Това е така, тъй като е прието, че тези разходи се поемат от отчисления, правени от ядрените оператори в специализиран фонд. Тези отчисления са част от производствените разходи, но не са преки разходи за гориво и поради това не са разгледани.

Необходимите данни от материалните баланси, както и получените резултати за горивните разходи са представени в Таблица 2.

Специфичният размер на горивната компонента в производствените разходи, нормализиран за цялото електропроизводство в горивния цикъл, е определен съгласно (2):

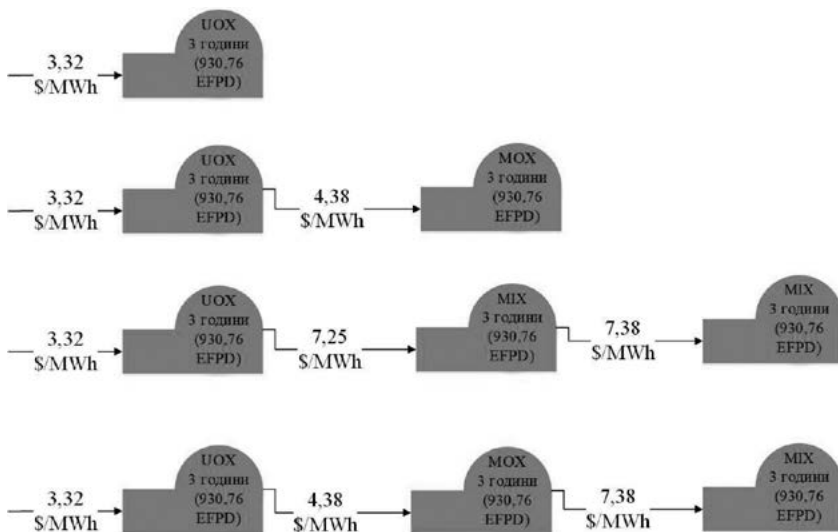
$$c_i = \frac{P_f}{\sum_i W_{бр,i}}, \frac{USD}{MWh} \quad (2)$$

където в знаменателя е сумата от брутните електропроизводства от всяка горивна кампания в разглеждания горивен цикъл.

Таблица 2. Икономически показатели за определяне на разходите за гориво за отделните горивни кампании

| | UOX | MOX | MIX след UOX | MIX след MIX | MIX след MOX |
|---|--------|--------|--------------|--------------|--------------|
| Брутно електропроизводство, TWh | 22,338 | 22,338 | 22,338 | 22,338 | 22,338 |
| Маса на урановия концентрат, t U_3O_8 | 587,4 | - | 546,3 | 546,3 | 546,3 |
| Маса на природния уран, tTM | 498,1 | - | 463,2 | 463,2 | 463,2 |
| Маса на урана, tTM | 45,5 | - | 42,3 | 42,3 | 42,3 |
| Маса на плутония, kgTM | - | 3184,4 | 3184,4 | 3184,4 | 3184,4 |
| Маса на обеднения уран, tTM | - | 42,3 | - | - | - |

| | | | | | |
|--|--------|--------|---------|---------|---------|
| Разделитена работа, хил. ЕРР | 309,8 | - | 288,1 | 288,1 | 288,1 |
| Разходи гориво, хил. USD | 74 211 | 97 806 | 161 932 | 164 889 | 164 889 |
| Горивна компонента в производствените разходи, USD/MWh | 3,32 | 4,38 | 7,25 | 7,38 | 7,38 |



Фигура 1. Горивна компонента за всяка горивна кампания от разглежданите горивни цикли©

Въз основа на получените резултати от Таблица 2 най-високи са разходите за горивната композиция MIX преди третата горивна кампания (второ рециклиране във варианти 3 и 4), които са с близо 3 000 000 USD по-високи от тези за горивна композиция MIX за първото рециклиране. Това се обяснява с разликата между разходите за междинно съхранение на килограм ураново и смесено оксидно гориво. Разходите за горивната композиция MOX, в сравнение с тези за MIX след ураново гориво са по-ниски с около 40%, тъй като в стойността на MOX горивото не влизат разходите, свързани с нужда от уранов концентрат, конверсия и обогатяване.

тяване. В MOX горивото уранът, използван за изготвяне на горивото, е обеднен уран, който е отпаден продукт на разделителното производство. Въпреки че този продукт има вътрешна стойност, разходите за получаването му са платени под формата на разходи за уранов концентрат, конверсия и обогатяване при производството на обогатен уран и са включени в разходите за изготвяне на ураново гориво. Най-ниски са разходите за горивната композиция на урановото гориво, въпреки че разходите за уранов концентрат, конверсия и обогатяване са най-високи. Това се обяснява с факта, че производството при него има най-ниска цена (250 USD/kg) – 5 пъти по-ниска от тази за MOX (1250 USD/kg) и 5,5 пъти по-ниска от тази за производство на MIX касети (1375 USD/kg).

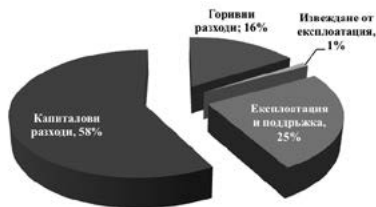
На Фигура 1 са представени горивните компоненти в производствените разходи за всяка горивна композиция. На практика тези стойности представляват размера на горивната компонента за всяка единична кампания на горивото

Сумарните разходи за горивните композиции, както и горивните компоненти, нормализирани за пълното електропроизводство в горивния цикъл, за всеки един от разглежданите варианти са представени в Таблица 3.

Таблица 3. Общи разходи за гориво за разглежданите горивни цикли

| Горивен цикъл | Брутно електропроизводство, <i>MWh</i> | Общи разходи за горивен цикъл, <i>USD</i> | Горивна компонента в производствените разходи за горивен цикъл, <i>USD/MWh</i> |
|---------------|--|---|--|
| UOX | 22 338 000 | 74 210 560,29 | 3,32 |
| UOX-MOX | 44 676 000 | 172 016 643,22 | 3,85 |
| UOX-MIX-MIX | 67 014 000 | 401 030 690,76 | 5,98 |
| UOX-MOX-MIX | 67 014 000 | 336 905 173,40 | 5,03 |

Многократното рециклиране на плутония увеличава стойността на горивната компонента за целия цикъл между 34% и 55% в сравнение с отворения горивен цикъл – вариант 1. Въпреки еднакъв брой горивни кампании, това отклонение се получава въз основа на разликата в горивните компоненти за MOX и MIX гориво, получено след преработка на отработено UO₂ гориво. Сравнявайки горивните компоненти при вариант 1 и 2, се отбелязва разлика от 14%, дължаща се най-вече на петкратно по-високите разходи за производство на MOX касети.



Фигура 2. Структура на себестойността на произвежданата електроенергия от ЯЕЦ при 5% дисконтов фактор [4]

Въпреки големите разлики в разходите за гориво за всеки от разгледаните горивни цикли, те не биха оказали съществено влияние върху себестойността на произвежданата електроенергия поради факта, че горивните разходи участват с 16% в структурата ѝ (Таблица 3). Този дял обхваща както разходите в предния край на цикъла, така и тези в задния край, като се оценява, че разходите в предния край на цикъла имат тежест от 12%, а тези в задния – 4% от общите производствени разходи [4].

Заклучение

Относително ниският принос на разходите за гориво в общата структура на производствените разходи на ЯЕЦ означава, че тя има ниска чувствителност към изменението на разходите за гориво. От своя страна това означава, че дори съществено изменение в горивните разходи не би довело до значимо увеличаване на себестойността на електрическата енергия. Предвид останалите ползи от рециклирането на плутоний и спестяването от разходи за съхранението му, както и повечето произведена електроенергия от първичния ресурс, рециклирането на плутония би могло да бъде икономически оправдано. Това естествено зависи от възприетата стратегия за въвеждането на конкретни ядрени горивни цикли, от интегрираността на съответната ЯЕЦ във веригата на доставки и предприятията от горивния цикъл на доставчиците на гориво и услуги в цикъла, както и от структурата и моделите на ценообразуване на пазарите, на които ще се реализира произведената електроенергия.

Източници:

[1] Манчева, Зл., И. Найденов (2020) Многократно рециклиране на плуто-

ний в реактор с вода под налягане: изменение на изотопния състав, Енергиен форум 2020 (под печат)

- [2] Idaho National Laboratory (2017) Advanced Fuel Cycle Cost Basis, INL/EXT-17-43826, Idaho Falls, ID, USA
- [3] Mancheva, Z., I. Naydenov (2020) Material Balance of Fuel Cycles for Plutonium Recycling in Pressurised Water Reactors, XXV Scientific Conference FP6PM 2020 (под печат)
- [4] OECD NEA (2013) The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle, Paris

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