

ДО ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ ВАЖКОВОДНИХ РЕАКТОРІВ В ЕНЕРГЕТИЦІ УКРАЇНИ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглянуті питання застосування важководних реакторів CANDU в енергетиці України. Визначені річні витрати на паливо варіантів енергоблоків потужністю 470 МВт з реакторами CANDU 3 та з малим модульним реактором фірми Rolls-Royce.

Ключові слова: атомні електростанції, ядерні реактори, важка вода.

Abstract

The issues of using heavy water CANDU reactors in the Ukrainian energy sector are considered. The annual fuel costs of the 470 MW power unit variants with CANDU 3 reactors and with a small modular reactor from Rolls-Royce are determined.

Keywords: nuclear power plants, nuclear reactors, heavy water.

Вступ. Постановка задачі

На сьогодні в Україні діють чотири атомні електростанції (АЕС) з 15 енергоблоками, які забезпечують понад половину потреби країни в електроенергії. Запорізька, Рівненська, Південноукраїнська та Хмельницька АЕС є основою енергосистеми, при цьому Запорізька АЕС (6 блоків) тимчасово не працює через окупацію. Усі працюючі реактори на українських АЕС це реактори типу ВВЕР-1000 та ВВЕР-440 (водо-водяні енергетичні реактори). Реактори типу ВВЕР працюють на збагаченому урані. Процес збагачення урану складний, дорогий та забруднюючий навколишнє середовище. Збагачений уран надходив в Україну з Росії. Із-за російської агресії необхідно шукати інші способи забезпечення паливом українських АЕС, тим більше, що до виводу з експлуатації майже усіх блоків українських АЕС залишилось не так багато часу.

Результати досліджень

Альтернативою для вітчизняних АЕС можуть бути важководні реактори типу CANDUPHWR [1], які використовуються в багатьох країнах світу таких як Канада, Румунія, Індія, Південна Корея та інші. Однією з найбільш значних переваг реакторів CANDU є їхня здатність використовувати природний уран як паливо. Це не тільки знижує витрати на паливо, але й робить реактори CANDU доступними для країн, які не мають можливостей збагачення урану.

Як приклад розглянемо Рівненську АЕС. На АЕС працює енергоблок з легководним реактором ВВЕР потужністю 440 МВт, вивід з експлуатації якого передбачено на 2030 рік. Розглянемо варіанти заміни його блоком або з легководним або з важководним реактором близької потужності. В Україні великі надії покладаються на малі модульні реактори (ММР), зокрема, на ММР фірми Rolls-Royce [2]. Це водо-водяний з водою під тиском реактор PWR електричної потужності 470 МВт. Реактор працює на стандартному ядерному паливі з оксиду збагаченого урану. В якості другого варіанту приймемо блок з реактором CANDU 3 – це найновіша і сама компактна версія проектів сучасної лінійки реакторів з важкою водою під тиском (РПВР), розроблених в Канаді [3,4]. Його потужність також 470 МВт.

Річні витрати на паливо, дол/рік:

$$B = (C + CB) \cdot P,$$

де C – ціна палива, дол/кг; CB – супутні витрати, дол/кг; P – річні витрати палива, кг/рік.
Ціну збагаченого палива варіанта енергоблоку знайдемо за виразом:

$$C_B = C_{ПУ} \cdot f + EPP \cdot C_{1EPP} \cdot r,$$

де $C_{ПУ}$ – ціна природного урану у вигляді гексафториду, дол/кг; f – витратний коефіцієнт, що визначає кількість природного урану, яка забезпечить міру збагачення x при вмісті урану 235 у відвалі збідненого урану y та при вмісті урану 235 у гексафториді перед збагаченням C_0 ; C_{1EPP} – ціна одиниці роботи розділення (1EPP) ізотопів урану, дол/1EPP; r – робота розділення, EPP.

Витратний коефіцієнт:

$$f = \frac{x-y}{C_0-y}.$$

Для варіанта з ММР $x=4,95\%$, $y=0,2\%$, $C_0=0,71\%$

$$f_{ММР} = \frac{0,0495-0,002}{0,0071-0,002} = 9,135.$$

Робота розділення:

$$r = (2x-1) \cdot \ln\left(\frac{x}{1-x}\right) + \frac{x-C_0}{C_0-y} \cdot \ln\left(\frac{y}{1-y}\right) \cdot (2y-1) - \frac{x-y}{C_0-y} \cdot (2C_0-1) \cdot \ln\left(\frac{C_0}{1-C_0}\right).$$

Підставивши значення x , y , C_0 , отримаємо:

$$r = (2 \cdot 0,0495 - 1) \cdot \ln\left(\frac{0,0495}{1-0,0495}\right) + \frac{0,0495-0,0071}{0,0071-0,002} \cdot \ln\left(\frac{0,002}{1-0,002}\right) \cdot (2 \cdot 0,002 - 1) - \frac{0,0495-0,002}{0,0071-0,002} \cdot (2 \cdot 0,0071 - 1) \cdot \ln\left(\frac{0,0071}{1-0,0071}\right) = 7,7$$

При ціні концентрату урану (жовтого кеку) 120 долл/кг, вартості конверсії 20 дол/кг та вартості 1EPP 190 дол.:

$$C_{ММР} = (120 + 20) \cdot 9,135 + 190 \cdot 7,7 = 2742 \text{ дол/кг}$$

При вартості тонкого очищення жовтого кеку 10 дол/кг:

$$C_C = 120 + 10 = 130 \text{ дол/кг.}$$

Супутні витрати (CB) дорівнюють сумі витрат на виготовлення тепловиділяючих збірок (ТВЗ), транспортування ТВЗ, транспортування відпрацьованого палива, тривале зберігання відпрацьованого палива.

Супутні витрати для варіанта з ММР [5]:

$$CB_{ММР} = 275 + 5 + 69 + 230 = 579 \text{ дол/кг.}$$

Ціна палива:

$$C_{\text{ММР}} = 2742 + 579 = 3321 \text{ дол/кг.}$$

Супутні витрати для варіанта з CANDU 3:

$$CB_C = 65 + 5 + 5 + 47 = 122 \text{ дол/кг.}$$

Ціна палива для варіанта з CANDU 3:

$$C_{\text{ПС}} = 120 + 132 = 252 \text{ дол/кг.}$$

Річні витрати ядерного палива варіанта з ММР:

$$П = \frac{N_e \cdot 365 \cdot K_{\text{ММР}}}{\text{ККД} \cdot B_{\text{ММР}}},$$

де N_e - електрична потужність, МВт; $K_{\text{ММР}}$ - коефіцієнт використання встановленої потужності; $B_{\text{ММР}}$ - глибина вигорання, МВт·доба/кг. Тут $N_e = 470$ МВт; $K_{\text{ММР}} = 0,9$; $\text{ККД} = 0,31$; $B_{\text{ММР}} = 55$ МВт·доба/кг.

$$П_{\text{ММР}} = \frac{470 \cdot 365 \cdot 0,9}{0,31 \cdot 55} = 9055 \text{ кг/рік.}$$

Річні витрати ядерного палива варіанта з CANDU 3:

$$П_C = \frac{Q_T \cdot 365 \cdot K_C}{B_C},$$

де Q_T - теплова потужність CANDU 3. Тут $Q_T = 1441$ МВт; $K_C = 0,95$; $B_C = 8$ МВт·доба/кг.

$$П_C = \frac{1441 \cdot 365 \cdot 0,95}{8} = 62460 \text{ кг/рік.}$$

Річні витрати на паливо у варіанті з ММР:

$$B_{\text{ММР}} = 9055 \cdot 3321 = 30071655 \text{ дол/рік.}$$

Річні витрати на паливо у варіанті з CANDU 3:

$$B_{\text{ПС}} = 62460 \cdot 252 = 15740000 \text{ дол/рік.}$$

Різниця витрат:

$$\Delta B = B_{\text{ММР}} - B_{\text{ПС}} = 30,072 - 15,74 = 14,332 \text{ млн. дол/рік}$$

Висновки

1. Розглянуто альтернативний варіант заміни легководних реакторів, які використовуються на українських АЕС на важководні реактори CANDU.

2. Визначені річні витрати на паливо варіантів енергоблоків потужністю 470 МВт з реакторами CANDU 3 та з малим модульним реактором фірми Rolls-Royce. Різниця склала 14,3 млн. доларів на користь варіанта з CANDU 3.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Velez-Lopez, E. Why the Future CANDU Reactor Will Probably Be a Superior Choice Over LWRs for Modern Energy Needs (in most countries). Boston Atomics, 19.05.2025. URL: <https://bostonatomics.com/blog/>

2. In Venture. Rolls-Royce допоможе Україні з розгортанням малих модульних реакторів [Електронний ресурс] / Rolls-Royce, НАЕК «Енергоатом». – 21.03.2023. – Режим доступу: <https://inventure.com.ua/news/ukraine/rolls-royce-pomozhet-ukraїne-s-razvertvuvaniem-malyh-modulnyh-reaktorov>

3. AECL. ML20100R435 – Rev 10. CANDU 3 Technical Outline. Atomic Energy of Canada Limited, 101 с., 08.04.1992. URL: <https://www.nrc.gov/docs/ml2010/ML20100R435.pdf>

4. Chaplin, R. Genealogy of CANDU Reactors / The Essential CANDU Textbook. – UNENE. – 2016 (розділ 2). – URL: <https://unene.ca/essentialcandu/pdf/2%20-%20Genealogy%20of%20CANDU%20Reactors.pdf>

5. Красноруцький, В. С., Кирсанова, О. С. Про варіанти ядерного паливного циклу України / *Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение*. – 2019. – № 2 (120). – С. 74–81. – URL: https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2019_2/article_2019_2_74r.pdf

Олена Миколаївна Нанака – к. т. н., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Олександр Анатолійович Паянок – к. т. н., доцент кафедри комп'ютеризованих електромеханічних систем і комплексів, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Олексій Михайлович Головченко – к. т. н., доцент.

Olena M. Nanaka – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor of the Department of computerized electromechanical system sand complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: e_nanaka@ukr.net.

Oleksandr A. Payanok – Cand. Sci. (Tech), Assistant Professor of the Department of computerized electromechanical systems and complexes, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Oleksiy M. Golovchenko – Cand. Sc. (Eng), Assistant Professor.