

С. В. Бегун¹, С. В. Широков²

¹Національний інститут стратегічних досліджень, м. Київ, Україна

²Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна

Відповідь на коментар А. П. Чернова та В. В. Токаревського до статті «Реактори, що базуються на технології CANDU»

Наша стаття «Реактори, що базуються на технології CANDU», яка опублікована в журналі «Ядерна та радіаційна безпека», випуск 1(53). 2012, є оглядом літературних джерел стосовно реакторів CANDU, зокрема й даних від розробників цих реакторів. Головне завдання статті — звернути увагу керівників, котрі прийматимуть відповідальні рішення щодо вибору реакторних технологій, як на переваги, так і на недоліки даного типу реактора. Додатковим завданням було заповнити наявний вакуум інформації про реактори типу CANDU у відкритих для загального доступу джерелах в Україні. Для цього максимально докладно, наскільки це було можливо в рамках однієї статті, розкрито інформацію щодо реакторної технології CANDU як з технічної, так і з економічної точок зору. При цьому в основному тексті статті розглядалася технологія CANDU, а не весь клас ядерних установок типу PHWR. У статті містяться посилання на першоджерела інформації, на підставі яких можна впевнитися в коректності наведених у статті положень.

У своєму коментарі до зазначеної статті А. П. Чернов та В. В. Токаревський не навели посилань на першоджерела інформації, хоча вони не є авторами більшості наведених положень та цифрових даних, а там, де робиться спроба надати посилання, наводяться застарілі дані.

Проаналізуємо ключові положення коментаря А. П. Чернова та В. В. Токаревського.

Твердження у п. 5 коментаря про будівництво блоків № 3 та № 4 АЕС «Чернавода» в Румунії та відповідна пропозиція збільшити цифру «0,0 %» до «3,9 %» щодо реакторів CANDU є некоректними. За інформацією румунської компанії Nuclearelectrica, будівельні конструкції на майданчиках цих блоків з 1992 р. перебувають у законсервованому стані (не ведуться роботи з будівництва), а ступінь їхньої готовності оцінюється 15 % та 12—14 % відповідно [1, 2]. За даними Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ), станом на 15.06.2012 [3] у Румунії кількість блоків, що будуються, — нуль, а кількість блоків, що експлуатуються, — два. Тобто за класифікацією МАГАТЕ вказані блоки № 3 та № 4 знаходяться на підготовчій до будівництва стадії, яка може тягтися роками [3, 4], а не на стадії будівництва. З цього приводу в Румунії є суттєві проблеми з пошуком інвестора для добудови вказаних енергоблоків [1, 2, 4, 5].

Використана в п. 6 коментаря інформація щодо паливної складової вартості електроенергії, виробленої на АЕС, теж є некоректною. Згідно з даними Міжнародного енергетичного агентства (МЕА), станом на 2010 р. [6] паливна складова для нових енергоблоків АЕС у США становила 12—19 %, в Європі — 8—19 % [6], для нових російських ВВЕР — 6—10 % [6]. І тільки в Китаї та Південній Кореї, завдяки використанню власних відносно дешевих на їх внутрішньому ринку проектів ядерних реакторів з низькою вартістю будівництва та низькою вартістю виготовлення обладнання, паливна складова за даними МЕА становила 17—32 % [6]. Паливна складова в усіх наведених даних МЕА охоплює повний цикл поводження з ядерним паливом, зокрема захоронення відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) [6]. Ми ж у своїй публікації використовували оцінку МАГАТЕ 2009 р. (15 %), яка включає тільки вартість свіжого ядерного палива [7]. Згідно з цією ж публікацією [7], вартість поводження з ВЯП становить 5—10 %, а сумарна вартість повного циклу поводження з ядерним паливом (20—25 %) добре узгоджується з наведеними вище даними МЕА [6]. Крім того, за інформацією Nuclear Energy Institute (NEI), на який спираються А. П. Чернов

та В. В. Токаревський, станом на 2012 р. паливна складова у вартості нових блоків АЕС у США становить 8–9 % [8].

Тариф на електроенергію, вироблену українськими АЕС, є економічно необґрунтованим [9–12], тому використовувати його для порівняння з економічно обґрунтованими цифрами некоректно. З цього приводу дивує, що автори коментаря необізнані навіть з поточною величиною паливної складової у тарифі на електроенергію, вироблену АЕС України. Замість цього у п. 6 коментаря наводиться цифра за 2007 р. з посиланням на російську Інтернет-сторінку proatom.ru 2008 р. і не враховується той факт, що тариф на електроенергію, вироблену українськими АЕС, з 2007 р. збільшився у 2,3 рази [11, 12].

Щодо п. 7 коментаря, то найкращим критерієм оцінки виграшу від застосування технології CANDU у порівнянні з технологією PWR є наявні поточні ціни на електроенергію, вироблену на реакторах CANDU та вироблену на реакторах PWR. На батьківщині технології CANDU в Канаді тариф на електроенергію, вироблену АЕС з реакторами типу CANDU, станом на травень 2012 р. дорівнює 55 USD/(МВт·год)* [13–15], а для нових CANDU взагалі йдеться про 59–88 USD/(МВт·год) [14]. У США тариф на електроенергію, вироблену АЕС з реакторами типу PWR та BWR (66 % PWR, 34 % BWR), які всі були побудовані до глобального зростання цін (останній у 1996 р.), станом на 2011 р. дорівнює 22 USD/(МВт·год) [16], а відповідний тариф для нових блоків сягатиме 44–93 USD/(МВт·год) [6, 8, 17]. У Франції тариф на електроенергію, вироблену АЕС з реакторами типу PWR (100 % PWR), станом на травень 2012 р. дорівнює 53 USD/(МВт·год) [17], а відповідний тариф для нових блоків становитиме 56–75 USD/(МВт·год) [6, 18, 19].

Дані, наведені у табл. 1 коментаря, є застарілими і не відповідають другому після цієї таблиці абзацу, де наводяться ціни на спотовому ринку станом на 2011 р. Крім того, запозичені з документа МЕА дані цієї таблиці щодо поводження з ВЯП ґрунтуються на базовому сценарії та відповідній технології, яка впроваджується у Швеції, в той час як наведені в цьому ж джерелі дані щодо сценарію та технології, запропонованих у США, є дешевшими у 4 рази, тому розглядати вказані цифри як кінцевий критерій некоректно. Некоректно також використовувати у п. 7 коментаря порівняння з CANDU-850, який є ефективнішим, ніж ЕС-6, але не пропонується на зовнішні ринки компанією AECL [20, 21].

Якщо використати поточні дані щодо цін на спотовому ринку [22], методики, наведені у [6, 23], нормовані на 1 кг урану дані [23] про вартість захоронення ВЯП, згадані нижні межі вартості електроенергії для нових потужностей PWR (44 USD/(МВт·год) та CANDU (59 USD/(МВт·год) і коректно розрахувати складові вартості поводження з ядерним паливом для нових енергоблоків, то можна отримати максимальну оцінку внеску окремих складових у сумарну вартість.

Паливна складова у вартості електроенергії, виробленої з використанням реакторів типу PWR, становитиме 16,2 % (свіже паливо) плюс 5,6 % (поводження з ВЯП) — загалом 21,8 %. У даному випадку розрахунок проводився виходячи з припущення, що збагачення відбувається до 4,4 %, а залишковий вміст ^{235}U у збідненому (відвальному) урані становить 0,3 %. Вартість поводження з ВЯП визначалася за цифрою 840 USD за 1 кг важкого металу ВЯП, що

* Тут і далі USD — долари США.

відповідає шведському варіанту і є консервативною (максимальною) оцінкою даної величини; за таким варіантом вартість поводження з ВЯП PWR дорівнює 2,46 USD/(МВт·год) [6, 23]. Для порівняння, відрахування на поводження з ВЯП та радіоактивними відходами у США складають 1,0 USD/(МВт·год) електроенергії, виробленої АЕС [24], але були запроваджені заздалегідь, ще з 1982 р.

Паливна складова у вартості електроенергії, виробленої з використанням реакторів типу CANDU, становитиме 7,2 % (свіже паливо) плюс 3,0 % (поводження з ВЯП) — загалом 10,2 %. Вартість поводження з ВЯП визначалася за цифрою 86 USD за 1 кг важкого металу ВЯП, що відповідає мінімальним потребам [23]; за таким варіантом вартість поводження з ВЯП CANDU дорівнює 1,77 USD/(МВт·год).

Природний уран для ядерних реакторів ВВЕР не є паливом, яке використовується (вигорає) в їх активній зоні, тому некоректною є пропозиція А. П. Чернова та В. В. Токаревського у п. 19 коментаря стосовно використання кількості природного урану в знаменнику для розрахунку вигорання палива ВВЕР.

У пп. 14 та 22 автори коментаря створюють плутанину щодо кількості ВЯП, високоактивних радіоактивних відходів і середньо- та низькоактивних радіоактивних відходів. З цього приводу ще раз підкреслимо, що реактори CANDU неекономічно витрачають природний уран, перетворюючи весь завантажений в активну зону природний уран у ВЯП, що за рівнем активності є високоактивною радіоактивною речовиною і потребує відповідних заходів безпеки.

У пп. 15 коментаря стверджується, що делегації ДП НАЕК «Енергоатом» на румунській АЕС «Чернавода» (реактор CANDU-6 [3]) у квітні 2010 р. було продемонстровано маневрування потужністю реактора CANDU-6 в діапазоні 60–100 % зі швидкістю 30 % за хвилину Далі в коментарі А. П. Чернов і В. В. Токаревський розглядають швидкість маневрування 30 % за хвилину як дозволена для реакторів CANDU в режимі щодобового використання. Проте дані твердження не узгоджуються з наявною документацією [25–29].

Цій делегації могли демонструвати тільки зниження потужності реактора з такою швидкістю, і то вказана швидкість зниження потужності не є оптимальною для реактора CANDU-6 [29] — оптимальна швидкість зменшення потужності реактора CANDU-6 становить 5–10 % [29]. Якщо ж йдеться про підвищення потужності, то для CANDU-6 збільшення потужності дозволено на рівні не швидше 1 % номінальної потужності за хвилину в діапазоні 25–80 % номінальної потужності і не швидше 0,15 % номінальної потужності за хвилину в діапазоні 80–100 % номінальної потужності [29]. Тому твердження А. П. Чернова та В. В. Токаревського щодо можливості маневрування потужністю реактора CANDU-6 зі швидкістю 30 % за хвилину в діапазоні 60–100 % є помилковими.

З цього приводу слід зазначити, що в реакторах ВВЕР-1000 (В-320) є система прискореного розвантаження блока (в російському варіанті «УРБ»), яка дає змогу в аварійних ситуаціях швидко (набагато швидше 30 % за хвилину) зменшувати потужність реактора [30], але щодобове використання вказаної системи не передбачене і вона працює тільки на зменшення потужності. При цьому дозволений рівень маневрування потужністю реактора ВВЕР-1000 (В-320) системою управління та захисту (СУЗ) в режимі планової зміни потужності становить не більше 3 % номінальної потужності за хвилину в режимі зменшення

потужності для всього діапазону рівнів потужності, і не більше 1 % номінальної потужності за хвилину при збільшенні потужності в діапазоні 45—100 % номінальної потужності з обов'язковою витримкою не менше 3 годин на рівні 75—85 % [30].

Щодо п. 17 коментаря, то А. П. Чернов і В. В. Токаревський не помітили у наведеному джерелі [54, с. 9] цифри «15000 тонн» важкої води, виготовленої за період з 1973 по 1993 рр. для реакторів CANDU. У нашій статті необхідно було оцінити максимально можливу потужність заводу з виробництва важкої води, якщо Україна будуватиме реактори CANDU та самостійно виготовлятиме важку воду для українських CANDU, зокрема важку воду для першого завантаження. Для цього вказані 15000 тонн виготовленої в Канаді за 20 років важкої води [31] було розділено на встановлену потужність канадських CANDU [32] та на 20 років і враховано, що будівництво проводилося нерівномірно в часі. Крім того, автори коментаря чомусь забувають про наявний на кожному сучасному енергоблоці CANDU завод з очищення важкої води від домішок легкої води, так званий heavy water upgrader building чи upgrader [25, 27]. Такий завод на енергоблоці № 1 АЕС «Чернавода» (загальна потужність енергоблока 702 МВт (ел.) [3]) у 1997—2008 рр. щорічно виробляв 17—76 тонн важкої води тільки на щорічні потреби цього енергоблока [1, 33], а сумарно із зовнішніми надходженнями важкої води в цей же період вироблялося 21—81 тонн важкої води лише на щорічні потреби цього енергоблока [1, 33], або 30—115 тонн важкої води щорічно на 1000 МВт встановленої потужності.

Наведені приклади ілюструють некоректність положень коментаря А. П. Чернова та В. В. Токаревського в цілому, які не спираються на надійні першоджерела інформації і є недостатньо обгрунтованими.

Список використаної літератури

1. Nuclearelectrica. 2006 Corporate report. — Nuclearelectrica: SNN SA, 2007. — 33 p. — <http://www.nuclearelectrica.ro/publicatii/corporate-reports-ccl1f4/>
2. 2010 raport anual. — Nuclearelectrica: Nuclearelectrica, 2011. — 40 p. — <http://www.nuclearelectrica.ro/publicatii/corporate-reports-ccl1f4/>
3. International Atomic Energy Agency. Power Reactor Information System // International Atomic Energy Agency. — <http://pris.iaea.org/PRIS/home.aspx>
4. Nuclear Power in Romania // World Nuclear Association. — <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=364>
5. China may invest in Romanian reactors // World Nuclear News. — 21 October 2011. — http://www.world-nuclear-news.org/IT-China_may_invest_in_Romanian_reactors-2110116.html
6. Projected Costs of Generating Electricity. — OECD/IEA: Organisation for Economic Co-operation and Development / International Energy Agency, 2010. — 218 p.
7. Issues to improve the prospects of financing nuclear power plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.1. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2009. — 43 p.
8. White Paper. The Cost of New Generating Capacity in Perspective. — Washington DC. — Nuclear Energy Institute (NEI), January 2012. — 12 p.
9. Україна-2012. Плани ДП НАЕК «Енергоатом» на рік // Енергоатом України. — 2011. — № 7(37). — С. 7, 8.
10. Науково-практична конференція «Енергетичні ринки: практичні засади функціонування конкурентних моделей енергетичних ринків» / ДП НАЕК «Енергоатом». 01.06.2012. — http://www.energoatom.kiev.ua/ua/news/nngc?_m=pubs&_t=rec&_c=view&id=32136

11. Аналіз цін, що склалися в ОПЕ з 1 по 10 червня 2012 року / ДП Енергоринок. — <http://er.energy.gov.ua/doc.php?f=2600>

12. Аналіз цін, що склалися в ОПЕ з 21 по 31.12.07 / ДП Енергоринок. — <http://er.energy.gov.ua/doc.php?f=2010>

13. Aplin St. CANDU in Ontario: the unknown soldier? // Canadian Energy Issues. — 2012, May 21. — <http://canadianenergyissues.com/2012/05/21/candu-snc-vs-westinghouse-pickering-study-report-reflects-another-battle-in-quiet-nuclear-civil-war-in-ontario/>

14. Canada's Nuclear Industry: An Overview. — CNA: Canadian Nuclear Association, January 2012. — 23 p. — http://www.cna.ca/english/pdf/publications/CNA-Canadas_Nuclear_Industry-Overview.pdf

15. Carpenter D. Nuclear Projects and Costs: Jobs and affordability // CNA Responds. — 2012, May 7. — http://www.cna.ca/english/pdf/media_room/may7-2012-cna%20responds.pdf

16. Key Issues. Graphics and Charts. U.S. Electricity Production Cost Infographic (2011) / Nuclear Energy Institute (NEI). — <http://www.nei.org/keyissues/reliableandaffordableenergy/graphicsandcharts>

17. Nuclear Power in the USA / World Nuclear Association. — <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=384>

18. Mosca S. Conditional approval for regulated electricity rates in France // EUROPOLITICS. — 2012, June 13. — <http://www.europolitics.info/conditional-approval-for-regulated-electricity-rates-in-france-art336816-10.html>

19. Nuclear Power in France / World Nuclear Association. — <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=330>

20. Atomic Energy of Canada Limited. 2011 Annual Financial Report. — Canada: AECL, 2012. — 66 p.

21. Corporate Plan Summary 2012–2013 to 2016–2017. — Canada: AECL, 2012. — 69 p.

22. Uranium Market Data // Nuclear Market Review. — 2012. — April 30. — P. 10. — <http://www.uranium.info/>

23. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle. — NEA/OECD: Nuclear Energy Agency. Organisation for Economic Co-operation and Development, 1994. — 175 p.

24. US Nuclear Fuel Cycle / World Nuclear Association. — http://www.world-nuclear.org/info/countries/US_nuclear_fuel_cycle.html

25. Heavy Water Reactor: Status and Projected Development. Technical Report Series № 407. STI/DOC/010/407. — Vienna: IAEA, April 2002. — 703 p.

26. Status report 68 — Enhanced CANDU 6 (EC6). Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs — Report 68. — Vienna: IAEA, 01.04.2011. — 42 p.

27. Enhanced CANDU 6 Technical Summary. — Canada: AECL, November 2009. — 48 p.

28. CANDU 6 Technical Summary. — AECL: CANDU 6 Program Team, June 2005. — 62 p.

29. Jizhou Zh. Operational Characteristics and Management of the Qinchan Phase III CANDU Nuclear Power Plant / Jizhou Zh., Jianqiang Sh., McQuade D. — CANTEACH. AECL Technical Documents. Presentations and Papers, 1999. — 12 p. — <https://canteach.candu.org/Content%20Library/20054414.pdf>

30. Хмельницькая АЭС. Энергоблок № 1. Отчет по анализу безопасности. Техническое обоснование безопасности сооружения и эксплуатации АЭС. — Кн. 3. — Гл. 3: Описание важных для безопасности систем, оборудования и сооружений АС /НАЭК «Енергоатом»: М-во енергетики України. — 2000. — 266 с.

31. Andseta S. R. CANDU Reactors and Greenhouse Gas Emissions / Andseta S., Thompson M. J., Jarell J. P., Pendergast D. R. — Canadian Nuclear Association, 2000. — 13 p.

32. Nuclear Power in Canada. — <http://www.world-nuclear.org/info/default.aspx?id=25401>

33. SN «Nuclearelectrica» SA. 2008 Raport Anual /Nuclearelectrica, 2009. — 44 p. — <http://www.nuclearelectrica.ro/publicatii/corporate-reports-ccl1f4/>

Надійшла до редакції 20.06.2012.