

НАДІЙНІСТЬ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА БЕЗПЕКА ФУНКЦІОНУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ І СИСТЕМ

ISSN 1562-8965. The problems of general energy. 2017, 1(48): 33–49
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.033>

УДК 621.311.183

С.В. ШУЛЬЖЕНКО, канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
О.Л. РАДЧЕНКО, канд. техн. наук
Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

ПЕРСПЕКТИВНІ УМОВИ ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕНЕРГОБЛОКІВ УКРАЇНСЬКИХ АЕС З УРАХУВАННЯМ ВИМОГ ЄС ТА МАГАТЕ

Визначено перспективні умови зняття з експлуатації атомних електростанцій в Україні на основі аналізу сучасного стану та перспектив розвитку атомної енергетики з урахуванням світового досвіду. Проаналізовано поточний стан регуляторного забезпечення, а також виконано оцінки вартості зняття з експлуатації атомних електростанцій в Україні з урахуванням світового досвіду і можливості його реалізації в Україні.

Ключові слова: атомні електростанції, радіоактивні відходи, зняття з експлуатації, сховища радіоактивних відходів.

Значущість атомної енергетики в Україні останніми роками суттєво підвищилась. До 2014 р. майже 50% відсотків електроенергії ОЕС України генерувалось вітчизняними атомними електростанціями (АЕС), а останніми роками ця частка для окремих календарних місяців перевищувала показник 65%. У перспективі можна очікувати нарощування потужностей АЕС, оскільки значення середньозваженої собівартості електричної енергії (англійською *levelized cost of electricity*), виробленої на АЕС станом на 2015 р. в світі, є конкурентоздатним відносно технологій виробництва електроенергії, в яких використовують вугілля, природний газ та відновлювані джерела енергії [1], що відображено на рис. 1.

В разі збільшення потужностей АЕС на кожен ГВт нових потужностей буде потрібно

додатково близько 150 тонн урану на рік і близько 300–450 тонн урану для першого завантаження палива [2].

Станом на 2016 р. в Україні експлуатується чотири АЕС з 15 енергоблоками. Загальна встановлена потужність діючих українських енергоблоків за даними ДП НЕК Укренерго становить 13835 МВт(е) [3]. До 2020 р. в Україні закінчуються проектні терміни експлуатації 9 енергоблоків АЕС [4].

Необхідність виведення найближчим часом з експлуатації значної кількості об'єктів атомної енергетики в атомній промисловості світу стала очевидною в середині 80-х років ХХ століття. Одним з найбільш складних аспектів процесу зняття з експлуатації об'єктів атомної енергетики є те, що при цьому утворюються у великій кількості радіоактивні відходи (РАВ). Наприклад, при знятті з експлуатації 125 (станом на 2003 р.) енергоблоків АЕС в країнах ЄС загальний обсяг РАВ оцінено у 1600 тис. т [5]. Ці відходи треба

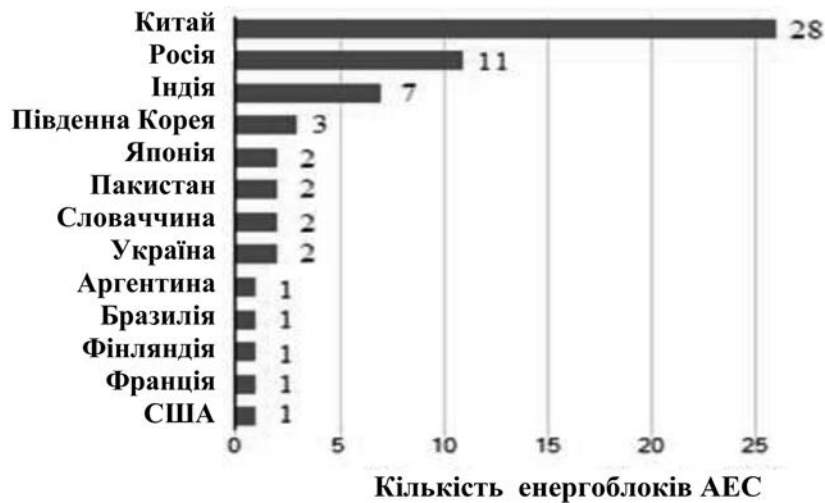


Рис. 1. Плани з побудови ядерних реакторів в світі

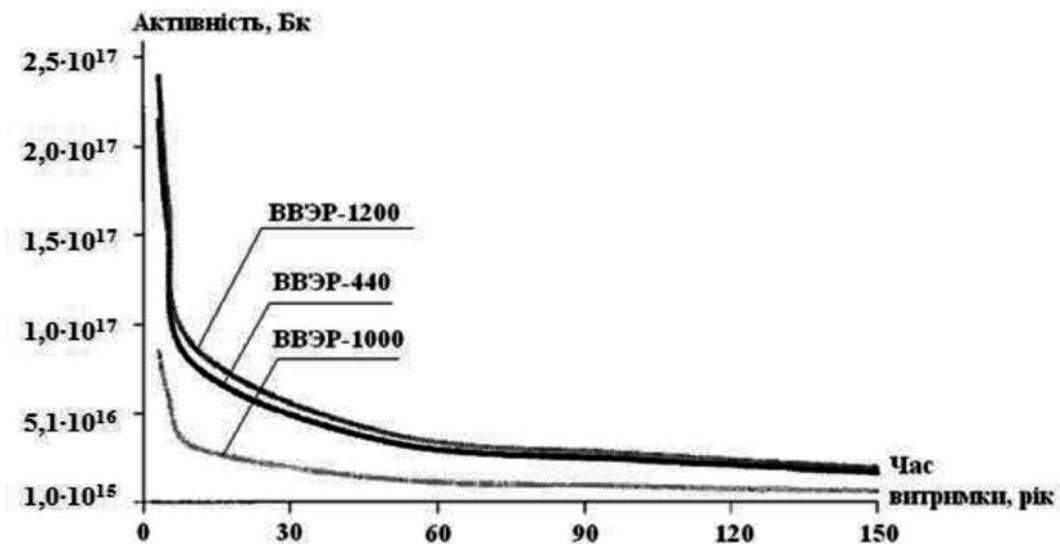


Рис. 2. Залежність радіоактивності зупиненого енергоблока від часу витримки

надійно ізолювати і зберігати протягом тривалого часу в спеціальних сховищах. За даними [6], при виведенні енергоблока ВВЕР з експлуатації сумарна маса твердих РАВ (ТРВ) навіть через 50 років витримки після остаточної його зупинки буде становити 320–350 тонн. Слід зазначити, що за наявними даними подовження терміну експлуатації реактора понад проектний термін (30 років) практично не впливає на радіоактивність його конструкцій – за кожні наднормовані 15 років ек-

сплуатації відбувається збільшення радіоактивності приблизно на 2%. На рис. 2 [6] показано залежність активності всього енергоблока від часу витримки після остаточної його зупинки.

Можна виділити три основних можливих варіанти виведення АЕС з експлуатації:

1. Безпосередній швидкий демонтаж електростанції. В цьому випадку відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) і теплоносій після тривалого відстою вивозяться в сховище з радіа-

ційним захистом. Всі забруднені радіацією матеріали та обладнання розбираються і видаляються. Територію станції переводять у радіаційно-безпечний стан. Обсяг радіоактивних відходів оцінюється в середньому у 18–20 тис. м³.

2. Відстрочений демонтаж. В цьому випадку з території АЕС видаляють ВЯП і теплоносій, а після консервації протягом кількох десятиліть (в залежності від існуючих в країні нормативів 30 – 100 років) здійснюють демонтаж і остаточне очищення території станції. Обсяг РАВ порівняно з безпосереднім швидким демонтажем знижується незначно – в середньому до 17 тис. м³.

3. Ізолювання. Всі РАВ залишають на АЕС, яку ізолюють в саркофагу. Конструкція саркофага повинна дозволити періодично контролювати стан його вмісту. Через визначену кількість років (100 або більше) може бути проведено розбирання вмісту саркофага і його дезактивація. Кількість РАВ – в середньому 10 тис. м³.

Негайний демонтаж має низку переваг: можливість використовувати на демонтажі персонал АЕС, а також технологічне обладнання АЕС. Відстрочений демонтаж має недолік – після очікування в десятки років для продовження робіт з демонтажу АЕС

будуть задіяні інші технології, неминуче буде втрачена частина інформації про об'єкт. З іншого боку, в разі відкладеного демонтажу протягом тривалого часу витримки зупинених реакторів будуть розроблені нові технології і технічні рішення, які дозволять більш ефективно виконати роботи. Підставою для прийняття рішення стосовно конкретного варіанта слугують [7]:

а) наявність сховища для остаточного збереження елементів реактора/реакторів, відсутність/наявність необхідного фінансування для безпосереднього видалення, зниження радіоактивності і витрат на обробку і кондиціонування РАВ;

б) можливість в процесі демонтажу зайнятості та застосування досвіду експлуатаційного персоналу АЕС, наявності на станції інфраструктури та технологічного обладнання, умов для отримання ліцензій, відсутність потреби у витратах на контроль і утримання об'єкта в разі, якщо буде прийнятий варіант безпечної консервації, повторне використання майданчика АЕС.

До теперішнього часу, через відсутність достатнього практичного досвіду, жодного «надійного» проекту по демонтажу великого промислового реактора повністю не реалізовано. Тому всі економічні розрахунки,

Таблиця 1 – Витрати (в цінах 1994 р.) на виведення з експлуатації і демонтаж АЕС в країнах світу [8]

Країна	Тип реактора	Потужність, МВт	Швидкий демонтаж, млн марок	Відстрочений демонтаж, млн марок
Німеччина	PWR	1200	565	570
	BWR	770	740	690
Бельгія	PWR	900	560	660
Нідерланди	PWR*	450	470	350
	BWR	60	305	
Швеція	PWR	860	200	-
	BWR	1160	260	-
США	PWR	1100	300	-
	BWR	1100	370	-

*) У цінах 1995 р.

пов'язані з виведенням АЕС з експлуатації, є приблизними. За експертними оцінками, загальні витрати становитимуть не менше 10% вартості будівництва АЕС. При цьому в Німеччині, на території колишньої НДР, демонтаж 6 реакторів, виготовлених у СРСР, оцінено мінімум в 3 млрд дол. США. Саме стільки коштувало б будівництво такого ж числа сучасних АЕС такої самої потужності. Орієнтовні узагальнені оцінки вартості таких робіт наведено в табл. 1. В цій таблиці використано позначення: PWR – водо-водяний реактор, в якому використовують в ролі сповільнювача і теплоносія звичайну (легку) воду, BWR – водо-водяний реактор, в якому пара генерується безпосередньо в активній зоні реактора і направляється в турбіну.

З урахуванням міжнародного досвіду МАГАТЕ був розроблений документ, присвячений економії виведення з експлуатації реакторів ВВЕР-440. В цьому брали участь всі країни, які експлуатують такий тип реакторів. Оцінка витрат проводилася за уніфікованою методикою МАГАТЕ та Агентства з ядерної енергії ОЕСР [9]. За даними проведеного аналізу, середня вартість виведення з експлуатації енергоблока з реактором ВВЕР-440 становить 350 млн дол. США за негайний демонтаж і 300 млн дол. США при демонтажі через 40 років. Наведені дані свідчать про дуже велику, навіть з урахуванням розбіжностей у часі визначення, вартість виведення АЕС з експлуатації.

Реалізація проекту зняття АЕС з експлуатації залежить від точності оцінки його вартості, оскільки така оцінка є фактором, за яким оцінюють різні альтернативні сценарії з метою вибору найбільш оптимального варіанта. Побудувати математичну функцію, яка визначає витрати для такого проекту, вбачається можливим використовуючи класифікацію витрат виходячи з їх оцінки. Традиційні підходи до класифікації витрат, що є в літературі і які застосовують на практиці, до процесу зняття з експлуатації можна застосувати лише умовно. Для того щоб розробити таку класифікацію витрат, необхідно уявляти всі етапи виконання робіт, оскільки загальна класифікація витрат буде мати на кожному етапі свої особливості. Через велику кількість різних технічних рішень в проектах різних АЕС, місць їх розташування, різний термін

експлуатації та інші показники, а також конфіденційність інформації, важко порівнювати і давати характеристики вартості зняття АЕС з експлуатації. На підставі проведеного вітчизняними авторами аналізу [10] зроблено висновок, що вартість робіт безпосередньо по зняттю з експлуатації атомних реакторів потужністю 900/1000 МВт можна розглядати в ціновому діапазоні від 210 Євро/кВт до 240 Євро/кВт. Ці ж автори пропонують визначати загальну вартість проекту зняття АЕС з експлуатації як суму прямих витрат, витрат поточного періоду, непередбачених витрат та вартості реалізованого після виконання проекту обладнання і матеріалів. Непередбачені витрати на етапі попередніх оцінок становлять 25–30%. Для попередньої стадії планування витрати на непередбачені потреби становлять 10–20%; для остаточної стадії планування – 5–10% від загальної суми витрат.

Для визначення прямих витрат зняття АЕС з експлуатації запропоновано застосовувати методи орієнтовних розрахунків з використанням укрупнених показників, виведених за проектами-аналогам і заснованих на обліку сформованої структури витрат на об'єктах-аналогах. Укрупнена структура цих витрат, із зазначенням питомої ваги у відсотках від загального обсягу робіт зі зняття з експлуатації енергоблока АЕС, становить:

- дезактивація обладнання та приміщень – 3,6%;
- демонтаж обладнання, інженерних систем і трубопроводів – 65,5%;
- переробка рідких РАВ – 10,6%;
- переробка ТРВ – 14,8%;
- глибока дезактивація і переплавлення металу – 4,8%;
- доведення приміщень блока АЕС до санітарних норм – 0,7%.

Значущість та складність проблеми зняття АЕС з експлуатації для багатьох країн світу зумовила міжнародне співробітництво для її розв'язання. МАГАТЕ та інші міжнародні організації використовують світовий досвід для розроблення систематизованих та комплексних заходів, які в найбільшій мірі, на рівні сучасних знань, дозволяють забезпечити планування зняття АЕС з експлуатації. Прикладом такого документа, розробленого за участю багатьох країн, є International

Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, розроблений Nuclear Energy Agency [11]. Однією з найбільш важливих частин цього документа є Appendix D: Standardised definitions for cost items – детальне визначення та перелік, з урахуванням міжнародного досвіду, складових вартості процесу зняття АЕС з експлуатації. З використанням цього переліку, у якому враховано всі наразі відомі різновиди організаційних, технічних робіт та заходів інформаційного забезпечення і керування процесами зняття блоків/блока АЕС, можливе найбільш повне врахування витрат на зняття АЕС з експлуатації в кожній країні з урахуванням технічних особливостей проекту АЕС, місцевих умов ціноутворення та оподаткування.

В Україні в організації процесу зняття АЕС з експлуатації відбувається певний поступ. В цій царині існує співробітництво з провідними міжнародними організаціями щодо створення, зокрема, нормативної бази з організації зняття АЕС з експлуатації. Останньою, спільною з МАГАТЕ, розробкою є Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України [12] (далі – Концепція). Ця Концепція є нормативним документом, що в узагальненій формі відображає основні аспекти діяльності із зняття АЕС з експлуатації в Україні, кількість стадій зняття АЕС з експлуатації, основні положення стратегії зняття АЕС з експлуатації та обґрунтовано дає відповідь на те, в якому кінцевому стані буде знаходитися енергоблок АЕС після зняття з експлуатації. Концепція охоплює діяльність із зняття з експлуатації всіх діючих АЕС України, включаючи всі ядерні енергоблоки та інші ядерні установки, які експлуатуються або вводяться в експлуатацію на їх майданчиках протягом аналізованого в цій Концепції періоду (40 років), а також можливу діяльність із зняття з експлуатації інших АЕС України в разі їх створення протягом вказаного періоду.

Визначальними умовами стратегічного планування діяльності із зняття з експлуатації АЕС відповідно до Концепції є:

- безумовне дотримання всіх норм і вимог з безпеки та обмеження негативного впливу на персонал, населення і навколишнє середовище ядерних установок АЕС, об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними

відходами на АЕС, на завершальному етапі їх життєвого циклу і відходів, які виникатимуть на цьому етапі (пріоритет безпеки);

- забезпечення ефективного використання вкладених раніше коштів (пріоритет виправданості капіталовкладень);

- забезпечення безперервності функціонування ядерно-енергетичного комплексу України за межами планованого періоду (пріоритет стабільності в майбутньому);

- мінімізація за межами планованого періоду негативних економічних, соціальних, екологічних та інших наслідків від прийнятих рішень і діяльності із зняття АЕС з експлуатації протягом планованого періоду (пріоритет захищеності наступних поколінь).

В Концепції оцінені величини повних та питомих витрат на зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-440 і ВВЕР-1000, які є зіставними із світовими даними (табл. 2).

Очевидно, що ефективне рішення проблеми поводження з РАВ в процесі зняття з експлуатації АЕС може здійснюватися тільки в рамках державної системи поводження з радіоактивними відходами, яка передбачає комплексний підхід, включаючи створення установок з переробки, наявність транспортних засобів, пунктів зберігання та захоронення відходів.

Основними проблемами в сфері зняття АЕС з експлуатації можна визначити такі:

- відсутність цілісної законодавчої та нормативної бази з забезпечення всього процесу зняття з експлуатації АЕС;

- необхідність розробки і схвалення загальнодержавної програми по зняттю з експлуатації АЕС і утилізації всіх видів радіоактивних відходів, яка повинна бути безумовно забезпечена фінансуванням з використанням всіх можливих джерел;

- відсутність необхідної кількості сховищ для РАВ і ВЯП;

- відсутність спеціалізованих організацій та підприємств, які мають виконувати весь комплекс робіт зняття з експлуатації АЕС.

В Україні відсутній досвід планового зняття з експлуатації АЕС. Досвід, набутий в процесі подолання наслідків Чорнобильської катастрофи, є, безумовно, дуже цінним, але його можна розглядати як результат здійснен-

ня індивідуального проекту, в процесі реалізації якого були застосовані заходи, в переважній більшості, аварійного характеру. Однією з особливостей була відсутність попереднього планування всього процесу і в тому числі обсягів фінансування виконуваних заходів.

Оцінити потреби у фінансуванні зняття з експлуатації українських АЕС поки що можливо тільки приблизно за розрахунковими та експертними оцінками.

За наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України вартість виконання робіт із зняття з експлуатації для ВВЕР-440 оцінено у 524 дол. США/кВт, ВВЕР-1000 у 378 дол. США/кВт [12]. Оцінка питомої вартості таких робіт за різними джерелами становить від 750 до 1000 дол. США/кВт.

Наближення строків виведення з експлуатації українських АЕС потребує оцінення обсягу його фінансування. Виконання такої оцінки можна зробити виходячи з таких припущень. В ролі джерела фінансування відкладеного зняття з експлуатації українських АЕС визначимо виключно тариф на вироблену ними електроенергію. Оскільки поки що остаточно не визначені повні терміни роботи українських АЕС до зняття їх з експлуатації, використаємо оцінки таких термінів з різних

джерел. Вважають можливими роботу енергоблока АЕС за проектом протягом 30 років, продовження його експлуатації ще на 30 років та після остаточної зупинки зняття з експлуатації і демонтаж протягом 20 років. Коефіцієнт використання встановленої потужності (КВВП) за різними оцінками можна вважати таким, що змінюється в межах 0,65—0,72 протягом проектного терміну експлуатації та 0,68—0,75 протягом терміну продовженої експлуатації. Для різних років експлуатації енергоблоків АЕС значення КВВП з зазначених діапазонів визначено випадковим чином.

Застосовуючи вказані фінансові та часові показники процесу зняття з експлуатації енергоблоків АЕС та зазначені у Концепції терміни введення у експлуатацію енергоблоків українських АЕС обчислено потрібний щорічний та загальний обсяги фінансування для остаточного виведення українських АЕС з експлуатації. Щорічна потреба у фінансуванні визначалась сталою протягом року пропорційно встановленій потужності енергоблока АЕС. Результати розрахунків щорічної потреби у фінансуванні зняття з експлуатації всіх українських АЕС із існуючим складом енергоблоків наведено на рис. 3.

За даними проведених розрахунків щорічної потреби у фінансуванні зняття з експлуа-

Таблиця 2 – Оцінка трудовитрат і фінансових витрат на зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 (станом на 31.12.2012 р.)

Тип реактора	Параметр	Трудовитрати, людинороки*	Повні витрати**		Питомі витрати на 1 МВт**	
			млн грн	млн дол. США	млн грн	млн дол. США
Відкладений демонтаж						
ВВЕР-440		7069	2303,0	288,1	5,52	0,69
ВВЕР-1000		8142	2934,5	367,1	2,93	0,37
Невідкладний демонтаж						
ВВЕР-440		5444	1808,3	226,3	4,33	0,54
ВВЕР-1000		6418	2328,7	291,3	2,33	0,29

* З урахуванням трудовитрат на стадії припинення експлуатації.

** З урахуванням витрат на стадії припинення експлуатації.

тації всіх українських АЕС відповідно вибраному діапазону значень питомої потреби у такому фінансуванні визначено діапазон значень загального обсягу фінансування. Він становить від 5,4 до 13,84 млрд дол. США. В разі фінансування робіт із зняття з експлуатації блоків ВВЕР за рахунок тарифу для АЕС необхідна надбавка до діючого тарифу 2,8 – 5,3 дол. США/МВт·год. Станом на червень 2016 р. накопичено близько 2575 млн грн у фонді зняття АЕС України з експлуатації (приблизно 93 млн дол. США). Відрахування в цей фонд розпочато у 2005 р. Виходячи з пропорції між строком накопичення коштів та їх обсягом, можна очікувати накопичення не більше 300 млн дол. США в разі експлуатації українських АЕС протягом 30 років.

Накопичення потрібного обсягу коштів для зняття українських АЕС з експлуатації та його збереження протягом кількох десятиліть є окремою задачею, шляхи розв'язання якої потребують окремого вивчення. З метою компенсації інфляції на обсяг коштів, які будуть накопичуватись за рахунок цільової надбавки можливо протягом накопичення здійснювати їх інвестування в надійні цінні папери, наприклад, в облігації Казначейства США.

ВИСНОВКИ

1. Атомні електростанції України відіграють важливу роль у забезпеченні електричною енергією національної економіки та соціальної сфери. Тому забезпечення надійності функціонування АЕС України є одним із завдань національної енергетичної безпеки, виконання якого потребує створення і дотримання умов реалізації їх повного життєвого циклу – проектної експлуатації, продовження експлуатації, виведення з експлуатації та поводження з радіоактивними відходами з забезпеченням необхідного фінансування.

2. Згідно з рекомендаціями МАГАТЕ, базованими на світовій практиці, до початку комерційної експлуатації АЕС мають бути визначені терміни і обсяги майбутніх витрат на її зняття з експлуатації, порядок накопичення коштів для покриття цих витрат при завершенні її експлуатації, джерела покриття витрат у разі передчасного припинення експлуатації АЕС.

3. Станом на 1 червня 2016 р. в Україні зарезервовано 2,575 млрд грн (близько 93 млн дол. США) для забезпечення діяльності із зняття з експлуатації вітчизняних АЕС, а мак-

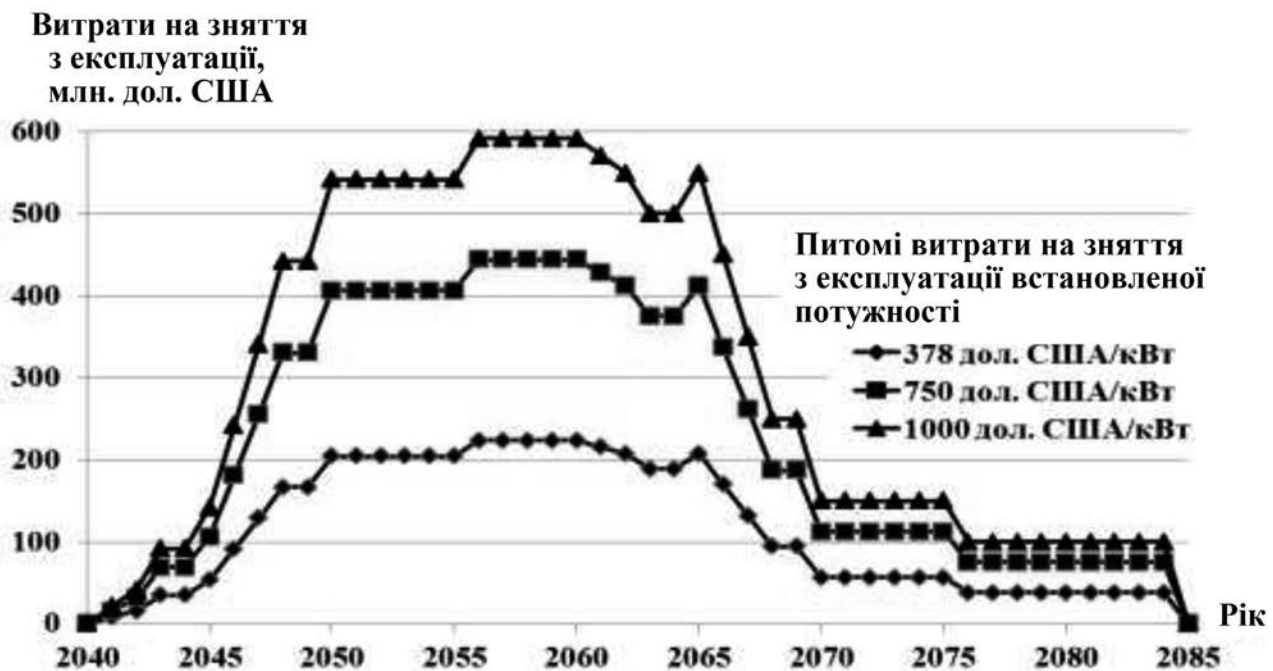


Рис. 3. Розрахункові потреби у фінансуванні зняття з експлуатації українських АЕС з урахуванням продовження терміну експлуатації

симальний обсяг накопичених коштів за діючим законодавством від усіх існуючих АЕС України протягом терміну їх експлуатації буде становити близько 300 млн дол. США. За оптимістичними оцінками питомої вартості зняття з експлуатації енергоблоків ВВЕР на рівні 390 дол. США за кВт встановленої потужності, яка наведена в «Концепції зняття з експлуатації діючих електростанцій України», затвердженої Наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 10.12.2015 р. № 798 необхідно буде витратити близько 5,4 млрд дол. США. Така невідповідність потрібного фінансування та можливостей його забезпечення за існуючої системи свідчить про необхідність її перегляду.

4. Результати виконаних досліджень свідчать про необхідність вирішення таких проблем:

– актуальною проблемою є створення в Україні комплексної системи поводження з радіоактивними відходами, особливо з огляду на те, що починаючи з 2018 р. може розпочатися процес повернення високоактивних відходів з Російської Федерації. Тому потрібна розробка концепції поводження з радіоактивними відходами діючих АЕС України, яка щонайменше має передбачати ґрунтовний аналіз існуючої системи класифікації радіоактивних відходів, урахування сучасного стану технологій їх переробки, а також, за необхідності, зміну існуючої системи з метою мінімізації обсягів утворення високоактивних та середньоактивних відходів, що потребують тривалого зберігання або захоронення;

– дієвим заходом, що дозволить в повному обсязі накопичити кошти на зняття з експлуатації діючих АЕС України, а також фінансування заходів з поводження з радіоактивними відходами є встановлення цільової надбавки до тарифу на електроенергію АЕС, яка згідно з виконаними дослідженнями має становити 0,6 – 1 цента США за кВт·год;

– з метою компенсації інфляції на обсяг коштів, які будуть накопичуватись за рахунок цільової надбавки для забезпечення зняття АЕС з експлуатації, доцільно протягом накопичення здійснювати їх інвестування в надійні цінні папери, наприклад, в облігації Казначейства США;

– задля відтермінування початку процесу

зняття з експлуатації діючих АЕС, а також отримання додаткового часу для накопичення достатніх коштів, доцільно забезпечити дотримання проектних режимів експлуатації діючих АЕС (в базовому режимі), що потенційно забезпечить високі показники надійності обладнання АЕС і дозволить подовжити терміни їх експлуатації більше ніж на 20 років.

1. Projected Costs of Generating Electricity 2015. URL: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCost2015SUM.pdf> (дата звернення: 21.11.2016).
2. Uranium Markets. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-markets.aspx> (дата звернення: 21.08.2016).
3. План розвитку Об'єднаної енергетичної системи України на 2016–2025 роки. URL: <https://drive.google.com/file/d/0BwZR8kgLwyBtMjA2SHM4cWY3Nmc/view> (дата звернення: 11.01.2017).
4. Доповідь про стан ядерної та радіаційної безпеки в Україні у 2014 році. URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=285032> (дата звернення: 24.02.2017).
5. Кузнецов В.М. Вывод из эксплуатации объектов атомной энергетики. URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/Kuznecov/snytie.pdf> (дата звернення: 14.08.2016).
6. Журбенко Е.А. Исследование радиационных характеристик окончательно остановленных реакторных установок с ВВЭР. URL: <http://dlib.rsl.ru/loader/view/01004858062?get=pdf> (дата звернення: 13.06.2016).
7. Кузнецов В.М. Чему учит чужой опыт? *Мировая энергетика*. 2005. № 5. С. 97–98.
8. Кузнецов В.М. «Российская атомная энергетика. Вчера, сегодня, завтра». 2000. URL: <http://nevirtry.ru/detail/38307.html> (дата звернення: 11.01.2017).
9. Nuclear Power Reactors in the World . IAEA. issue 2. Vienna, 2002, p. 26. URL: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/rds2-27_web.pdf (дата звернення: 24.11.2016).
10. Носовский А.В., Васильченко В.Н., Ключников А.А., Ященко Я.В. Снятие с экс-

плуатации ядерных энергетических установок. Київ: Техніка, 2005. 287 с.

11. International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations // OECD 2012NEA No. 7088. URL: <https://www.oecd-neo.org/rwm/reports/2012/ISDC-nuclear-installations.pdf> (дата звернення: 24.10.2016).

12. Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України, затверджена наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості № 798 від 10.12.2015 р. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/kse_2015.pdf (дата звернення: 14.08.2016).

Надійшла до редколегії 11.03.2017

OPERATING RELIABILITY AND SAFETY OF THE FUNCTIONING OF ENERGY FACILITIES AND SYSTEMS

ISSN 1562-8965. *The problems of general energy*. 2017, 1(48): 33–49
doi: <https://doi.org/10.15407/pge2017.01.033>

UDC 621.311.183

S.V. SHULZHENKO, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher,
O.L. RADCHENKO, Cand. Sci. (Eng.)
Institute of General Energetics, NAS of Ukraine,
172, Antonovycha str., Kyiv, 03150, Ukraine

PROSPECTIVE CONDITIONS OF THE DECOMMISSIONING OF POWER UNITS OF THE UKRAINIAN NPP WITH REGARD FOR THE REQUIREMENTS OF THE EU AND IAEA

We have determined the prospective conditions for the decommissioning of nuclear power plants in Ukraine on the basis of analysis of the current state and prospects of the development of nuclear power generation with regard for world experience. We have analyzed the current state of regulatory support and estimated the cost of the decommissioning of Ukrainian nuclear power plants with regard for international experience and opportunities of its implementation in Ukraine.

Key words: nuclear power plants, radioactive waste, decommissioning, radioactive waste storage.

The importance of nuclear power generation in Ukraine in recent years has increased significantly. Until 2014, almost 50% of electricity of the Integrated Power System of Ukraine was generated by domestic nuclear power plants (NPP), and this percentage in recent years for certain calendar months was higher than 65%. In the future, we can expect an increase in the NPP capacity because the levelized cost of electricity produced at nuclear power plants as of 2015 in the world is competitive relative to electricity-generating technologies that use coal, natural gas and renewable energy sources [1], as shown in Fig. 1.

In the case of increasing nuclear power generation, each GW of new capacities will require additional 150 tons of uranium per year and about 300–450 tons of uranium for the first fuel load [2].

As of 2016, four nuclear power plants with 15 generating units work in Ukraine. The total

installed capacity of the working Ukrainian power units according to National Power Company “Ukrenergo” (provides operative management control of Integrated Power System of Ukraine) is 13,835 MW(e) [3]. Till 2020, the project operation life of 9 nuclear reactors comes to an end in Ukraine [4].

The need for the decommissioning in the near future of a significant number of nuclear facilities in the nuclear industry of the world became obvious in the middle of 80-ies of the XX century. One of the most difficult aspects of the process of decommissioning of nuclear power facilities lies in the fact that it forms radioactive waste (RW) in large quantities. For example, at the decommissioning of 125 (as of 2003) nuclear reactors in the EU, the total amount of RW is estimated as 1,600 thousand tons [5]. These wastes must be securely isolated and stored for long periods of time in special storage facilities. It is known [6] that, at the decommissioning of a VVER-type reactor, the total mass of solid

© S.V. SHULZHENKO, O.L. RADCHENKO, 2017

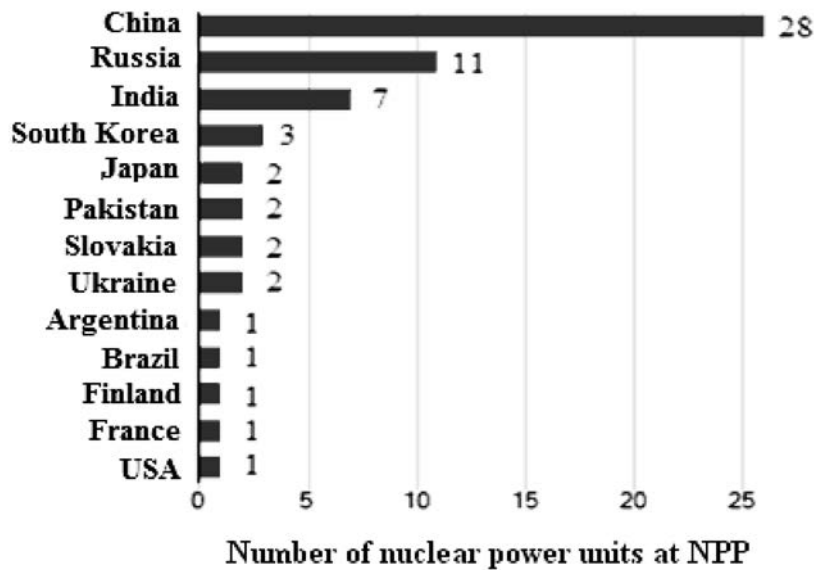


Fig. 1. Plans to build nuclear reactors in the world

RW even in 50 years after its final stop will be 320–350 tons. It should be noted that, according to available data, the extension of the lifetime of a reactor over the design period (30 year) practically has no effect on the radioactivity of its structures: for every additional 15 years of operation, there is an increase in radioactivity by approximately 2%. Fig. 2 [6] shows the dependence of activity of the entire power unit on the time of exposure after its final stop.

There can be selected three main possible options for the decommissioning of NPP:

1. Direct fast dismantling of the power plant. In this case, the spent nuclear fuel and coolant after long-term standing are taken out to the storage with radiation protection. All materials and equipment contaminated with radiation are dismantled and removed. The station area is transferred to the radiation-safe condition. The volume of radioactive waste is estimated as 18–20 thousand m³ on the average.

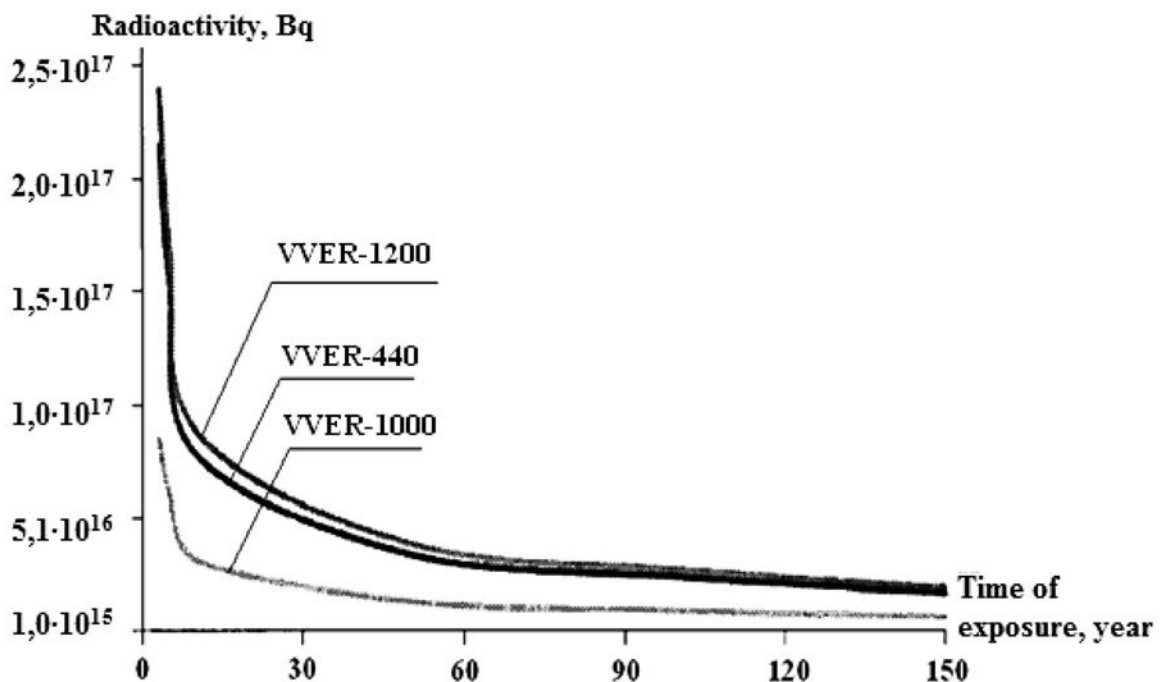


Fig. 2. Dependence of the radioactivity of a stopped VVER-type reactor on the time of exposure

Table 1 – Costs (in prices of 1994) for the decommissioning and dismantling of nuclear power plants in the world [8]

Country	Reactor type	Power, MW	Fast dismantling, mln. DM	Deferred dismantling, mln. DM
Germany	PWR	1200	565	570
	BWR	770	740	690
Belgium	PWR	900	560	660
Netherlands	PWR*	450	470	350
	BWR	60	305	
Sweden	PWR	860	200	–
	BWR	1160	260	–
USA	PWR	1100	300	–
	BWR	1100	370	–

*) In prices of 1995

2. Deferred dismantling. In this case, the spent fuel and coolant are removed from the territory of NPP and, after preservation for several decades (30–100 years depending on the standards existing in the country), dismantling and final cleanup of the NPP territory are carried out. The volume of radioactive waste as compared with immediate rapid dismantling is reduced slightly to 17 thousand m³ on the average.

3. Isolation. All radioactive waste is left at the NPP, which is isolated in a sarcophagus. The construction of the sarcophagus must enable one to monitor periodically the state of its contents. After a certain number of years (100 or more), the examination of contents of the sarcophagus and its decontamination can be performed. The quantity of radioactive waste is 10 thousand m³ on the average.

Immediate dismantling has several advantages, namely, the opportunity to use the plant staff and technological equipment of NPP at the dismantling. Deferred dismantling has the following drawback: after waiting for dozens of years, other technologies will be involved for the continuation of dismantling of nuclear power plants, and a piece of the information about the object will inevitably be lost. On the other hand, in the case of deferred dismantling, during the long-term exposure of stopped reactors, new technologies and technical solutions will be developed, and they will enable

one to accomplish the work better. The grounds for taking decision on the specific option are the following [7]:

a) the presence of a final repository for elements of the reactor/reactors, the absence/presence of necessary funding for the immediate removal, the reduction of radioactivity, and the cost of processing and conditioning of RW;

b) the opportunity, in the course of dismantling, of employment and the application of experience of the operating plant staff, the existing plant infrastructure and technological equipment, the conditions for obtaining licenses, the absence of need in the expenditures for control and retention of the object if the option of safe conservation is adopted, and the repeated use of NPP site.

Up to now, due to the lack of sufficient practical experience, any "reliable" project for the dismantling of a large industrial reactor has not been implemented completely. Therefore, all economic calculations related to the decommissioning of nuclear power plant are approximate. According to expert estimates, the total costs will constitute no less than 10% of the cost of NPP construction. For example, in Germany, on the territory of former GDR, the dismantling of 6 reactors manufactured in the USSR is estimated as at least \$3 billion. The cost of construction of the same number of modern nuclear power plants of the same power would be equal to this value. The approximate generalized

estimates of the cost of such works are given in Table 1. In this table, the following notation is used: PWR is a pressurized water reactor where ordinary (light) water is used as moderator and coolant; BWR is a pressurized water reactor where steam is generated directly in the reactor core and is directed to a turbine.

With regard for international experience, the IAEA has developed a document on the economics of decommissioning of VVER-440 reactors. This work involved all countries where this type of reactors is operated. Cost estimation was performed by the unified method of the IAEA and Nuclear Energy Agency of the OECD [9]. According to the results of analysis, the average cost of decommissioning of a power unit with a VVER-440 reactor is \$350 million for the immediate removal, and \$300 million for dismantling after 40 years. The above data indicate a very large, even with regard for the differences in time of determination, value of NPP decommissioning.

The realization of the project of decommissioning of a nuclear power plant depends on the accuracy of estimating its cost because such an estimate is a factor used for the analysis of different alternative scenarios to choose the optimal variant. It is possible to build a mathematical function that determines the costs for such a project using the classification of expenses based on their estimation. Traditional approaches to the classification of expenditures that can be found in the literature and are used in practice can be applied only conditionally to the process of decommissioning. In order to develop such a classification of costs, it is necessary to imagine all the stages of works because the general classification of costs will have its features at each stage. Due to a large number of different technical decisions in the projects of different nuclear power plants, their locations, different service life, and other parameters as well as the confidentiality of information, it is difficult to compare and give details of the costs of decommissioning of nuclear power plants. Based on the analysis of the domestic authors [10], it was concluded that the cost of work involved in the decommissioning of nuclear reactors with a power of 900/1000 MW can belong to the price range from 210 € /kW to 240 € /kW. These authors propose to determine the total cost of project of the decommissioning of NPP as the sum of direct costs, the costs of current period, unforeseen costs, and the value of equipment and materials sold after realization of the project. The

unforeseen costs at the stage of previous estimations make up 25–30%. For the preliminary stage of planning, the costs of unforeseen needs are 10–20% and, for the final stage of planning, 5–10% of the total costs.

To determine the direct costs of the decommissioning of NPP, it is proposed to apply the methods of approximate calculations with the use of aggregated parameters, derived according to projects-analogs and based on taking into account the existing cost structure at objects-analogs. The aggregated structure of these costs with mentioning the specific weight in percents of the total volume of works on the decommissioning of an NPP unit is:

- decontamination of equipment and premises is 3.6%;
- dismantling of equipment, utility systems, and pipelines is 65.5%;
- liquid radioactive waste processing is 10.6%;
- solid radioactive waste processing 14.8%;
- deep deactivation and melting of the metal is 4.8%;
- bringing the premises of an NPP unit to sanitary standards is 0.7%.

The importance and complexity of the problem of decommissioning of nuclear power plants in many countries has led to the world cooperation for its solution. The IAEA and other international organizations use international experience to develop systematic and comprehensive measures, which to the greatest extent, at the level of modern knowledge, will enable one to provide planning of the decommissioning of NPP. An example of such a document, developed with the participation of many countries, is the International Structure for Decommissioning Costing (ISDC) of Nuclear Installations, developed by the Nuclear Energy Agency [11]. One of the most important parts of this document is Appendix D: Standardized Definitions for Cost Items, where one can find a detailed definition and a list, based on international experience, of the components of cost decommissioning of the of NPP. With using this list, which takes into account all currently known varieties of the organizational and technical works and measures on the information provision and management of the processes of decommissioning of NPP blocks, it is possible to most completely take into account the costs of decommissioning of NPP in each country with regard for the technical characteristics of NPP project, and local conditions of pricing and taxation.

In Ukraine, there is a certain progress in the organization of the process of decommissioning of NPP. In this field, there exists a cooperation with leading international organizations to establish, in particular, the regulatory framework for the organization of decommissioning of NPP. The latter, together with IAEA, development is the Concept of Decommissioning of the Operating Nuclear Power Plants of Ukraine [12] (hereinafter – Concept). This Concept is a normative document that in generalized form reflects the main aspects of the decommissioning of nuclear power plants working in Ukraine, the number of stages of the decommissioning of nuclear power plants, the main statements of strategy of the decommissioning of NPP and gives a substantiated the answer to the question on the final state of a power generating unit of the nuclear power plant after decommissioning. The concept covers the activity on the decommissioning of all working nuclear power plants in Ukraine, including all nuclear power units and other nuclear installations, which work or will be put into operation at their sites during the Concept period (40 years) as well as possible activities for the decommissioning of other nuclear power plants of Ukraine in the case of their building for the specified period.

The defining conceptions of strategic planning of the decommissioning of nuclear power plants according to the Concept are:

- unconditional observance of all norms and safety requirements as well as the limitation of negative impact on the personnel, population, and the environment of nuclear installations of

NPP and objects intended for the management of radioactive waste at nuclear power plants at the final stage of their life cycle and waste that will arise at this stage (safety priority);

- ensuring of the efficient use of previously invested funds (priority of investment justification);
- ensuring of the continuity of functioning of the nuclear energy complex of Ukraine outside the planning period (priority of stability in the future);
- minimization beyond the planning period of negative economic, social, environmental and other consequences of the decisions and activities of the decommissioning of NPP during the planning period (priority of the protect ability of future generations).

In the Concept, the values of full and specific costs for the decommissioning of VVER-440 and VVER-1000 units were estimated, and they are comparable to global data (Table 2).

It is obvious that an efficient solution of the problems of RW management in the process of the decommissioning of nuclear power plant may only be carried out in the framework of a state system of radioactive waste management, which envisions a complex approach, including the building of reprocessing facilities, the availability of vehicles, storage facilities and waste disposal.

We may think that the main problems in the field of the decommissioning of NPP are the following:

- the lack of integral legislative and regulatory framework for ensuring the entire process of the decommissioning of nuclear power plants;

Table 2 – Assessment of labor costs and financial costs for the decommissioning of power units with VVER-440 and VVER-1000 reactors (as on 31.12.2012)

Reactor type	Parameter Staff, person × year*	Full cost**		Specific costs per 1 MW**	
		mln. UAH	\$M	mln. UAH	\$M
Deferred dismantling					
VVER-440	7069	2303.0	288.1	5.52	0.69
VVER-1000	8142	2934.5	367.1	2.93	0.37
Immediate dismantling					
VVER-440	5444	1808.3	226.3	4.33	0.54
VVER-1000	6418	2328.7	291.3	2.33	0.29

* Considering labor costs at the stage of decommissioning.

** Taking into account costs at the stage of decommissioning.

- the need for the development and adoption of national programs for the decommissioning of nuclear power plants and utilization of all types of radioactive waste, which must be undoubtedly funded by using all possible sources;
- the lack of the required number of repositories for radioactive waste and spent nuclear fuel;
- the lack of specialized organizations and companies which must fulfill the whole complex of works for the decommissioning of nuclear power plants.

In Ukraine, there is no experience of the planned decommissioning of nuclear power plants. The experience acquired in the course of overcoming the consequences of the Chernobyl disaster is, of course, very valuable, but it can be considered as the result of implementation of the individual project, in the process of realization of which the measures of emergency nature were mainly applied. One of the features was here the lack of pre-planning of the entire process, including funding of the activities carried out.

Funding requirements for the decommissioning of Ukrainian nuclear power plants can be only roughly estimated according to calculations and expert evaluation. By the order of the Ministry of Energy and Coal Industry, the cost of works for the decommissioning of VVER-440 is estimated as \$524/kW, VVER-1000 as \$378/kW [12]. Assessment of the specific cost of such work according to different sources constitutes from \$750 to \$1,000 /kW.

The approach of time of the decommissioning of Ukrainian nuclear power plants requires to estimate of the volume of its financing. This assessment can be carried out proceeding from the following assumptions. As a source of funding of the deferred decommissioning of Ukrainian nuclear power plants, we take solely the tariff for the produced electricity. Since the full term of work of Ukrainian nuclear power plants until their decommissioning has not been determined finally, we shall use the estimates of these terms from different sources. It is assumed that a power unit of the NPP will work under the project for 30 years, then its operation will be extended for additional 30 years, and after the final stop, it will be decommissioned and dismantled for 20 years. We may assume that, according to various estimates, the coefficient of installed capacity utilization (capacity factor) changes in the range from 0.65 to 0.72 for the design lifetime and from 0.68 and 0.75 for the period of extended oper-

ation. For different years of the operation of power units, the value of capacity factor from mentioned intervals is determined randomly.

By applying these financial and time parameters of the process of decommissioning of NPP units and the terms of commissioning of the power units at Ukrainian NPP, specified in the Concept, we calculated the required annual and total funding for the final withdrawal of Ukrainian NPP from operation. The annual funding requirements were considered as constant throughout the year in proportion to the installed capacity of the unit. The results of calculations of the annual funding requirement for the decommissioning of all Ukrainian nuclear power plants with the existing composition of power units are presented in Fig. 3.

According to the calculations of annual funding requirements for the decommissioning of all Ukrainian nuclear power plants according to the chosen range of values of the specific needs in such financing, we have determined the range of values of the overall funding. It varies from 5.4 to 13.84 billion US dollars. In the case of financing of the decommissioning of VVER units at the expense of tariff for nuclear power plants, a surcharge to the current tariff of \$2.8 – \$5.3/MWh is required. As of June 2016, about 2,575 million hryvnas was accumulated at the Fund of decommissioning of nuclear power plants of Ukraine (approximately 93 million US dollars). Contributions to this Fund commenced in 2005. On the basis of proportion between the period of accumulation of these funds and their volume, one may expect the accumulation of not more than 300 million US dollars in the case of operation of the Ukrainian nuclear power plants within 30 years.

The accumulation of necessary volume of funds for the recommissioning of Ukrainian nuclear power plants and its conservation for several decades is a separate task, the solution of which requires a separate study. To compensate the influence of inflation on the amount of funds that will be accumulated at the expense of purposeful surcharge, it is possible, during their accumulation, to carry out their investing to reliable securities, e.g., Treasury bonds of the United States.

CONCLUSIONS

1. The nuclear power plants of Ukraine play an important role in providing electric energy for the national economy and social sphere. Therefore,

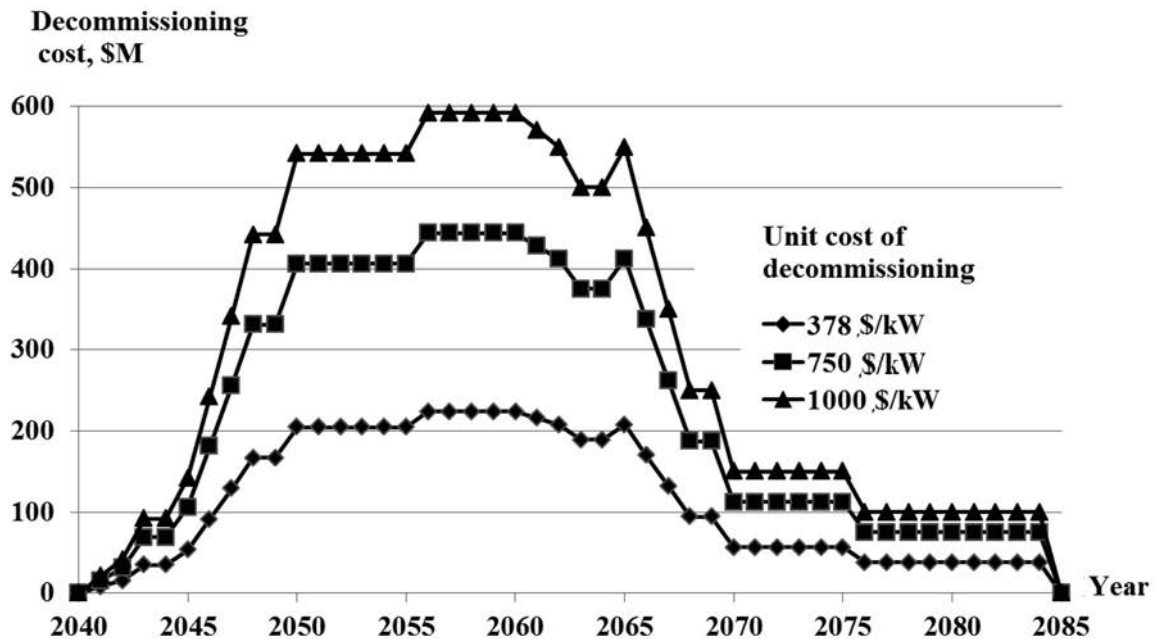


Fig. 3. Estimated funding requirements for the decommissioning of Ukrainian NPP with regard for their lifetime extension

ensuring the reliability of functioning of the nuclear power plants of Ukraine is one of the important objectives of national energy security, the implementation of which requires to establish and observe the conditions of realization of their full life cycle, namely design operation, extension of operation, decommissioning, and radioactive waste management with the provision of necessary funding.

2. According to the recommendations of IAEA, based on international practice, before the beginning of the commercial operation of nuclear power plants, it is necessary to determine the timing and volumes of future costs for their decommissioning, the order of accumulating funds to cover these costs at the end of their operation, and the sources of financing in the case of early termination of NPP operation.

3. As of June 1, 2016, 2.575 billion hryvnas (about 93 million US dollars) was reserved in Ukraine to provide activities for the decommissioning of domestic nuclear power plants. Under current legislation, the maximum amount of accumulated funds from all existing NPP of Ukraine during their lifetime will be about 300 million US dollars. According to optimistic estimates of the specific cost of decommissioning of a VVER unit at a level

of \$390 per kW of installed capacity, which is given in the Concept of Decommissioning of the working Nuclear Power Plants of Ukraine, approved by the order of the Ministry of Energy and Coal Industry on December 10, 2015 No. 798, it will be necessary to spend about 5.4 billion US dollars. This discrepancy between the required funding and opportunities to ensure it under the existing system demonstrates the need for its revision.

4. The results of our investigation indicate the necessity to address the following issues:

- the creation in Ukraine of an integrated system of the management of radioactive waste is an actual problem, especially in view of the fact that, starting from 2018, the process of return of high-level waste from the Russian Federation can be initiated. Therefore, it is necessary to develop the concept of radioactive waste management at the operating NPP of Ukraine. This concept, as a minimum, should include a thorough analysis of the existing system of the classification of radioactive waste, taking into account the current state of the technologies of their processing, and, if necessary, a change in the current system to minimize the volume of the formation of high- and intermediate-level waste requiring long-term storage or disposal;
- establishing a purposeful surcharge to the tariff

for electricity of nuclear power plants, which, according to our investigations, should be between 0.6 and 1 cent per kWh, is an efficient measure that will enable one to accumulate in full funds for the decommissioning of working NPP of Ukraine as well as the funding of radioactive waste management;

– to compensate the influence of inflation on the volume of funds that will be accumulated at the expense of purposeful surcharge to ensure the decommissioning of nuclear power plants, it is reasonable, during the accumulation, to carry out their investing to reliable securities, e.g., Treasury bonds of the United States;

– for the sake of postponing the beginning of process of the decommissioning of working nuclear power plants as well as obtaining additional time for the accumulation of sufficient funds, it is advisable to ensure the compliance with design modes of the operation of nuclear power plants (under basic mode) that will potentially provide a high reliability of NPP equipment and will extend the term of their operation for more than 20 years.

1. Projected Costs of Generating Electricity 2015. URL: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/ElecCost2015SUM.pdf> (Last accessed 21.11.2016).
2. Uranium Markets. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/uranium-resources/uranium-markets.aspx> (Last accessed 21.08.2016).
3. Plan rozvytku Ob'ednanoi energetychnoi systemy Ukrainy na 2016–2025 roky [The plan of development of the Integrated Energy System of Ukraine for 2016–2025 years]. URL: <https://drive.google.com/file/d/0BwZR8kgLwyBtMjA2SHM4cWY3Nmc/view> (Last accessed 11.01.2017) [in Ukrainian].
4. Dopovid' pro stan yadernoi ta radiatsiinoi bezpeky v Ukraini u 2014 rotsi [Report on the state of nuclear and radiation safety in Ukraine in 2014]. URL: <http://www.snrc.gov.ua/nuclear/doccatalog/document?id=285032> (Last accessed 24.02.2017) [in Ukrainian].
5. Kuznetsov V.M. Vyvod iz ekspluatatsii ob'ektov atomnoi energetiki [Decommissioning of nuclear power facilities]. URL: <http://www.seu.ru/programs/atomsafe/books/Kuznecov/snytie.pdf> (Last accessed 14.08.2016) [in Russian].
6. Zhurbenko E.A. Issledovanie radiatsionnykh

kharakteristik okonchatelno ostanovlennykh reaktornikh ustanovok s VVER [Investigation of the radiation characteristics of finally shut down reactor facilities with VVER]. URL: <http://dlib.rsl.ru/loader/view/01004858062?get=pdf> (Last accessed 13.06.2016) [in Russian].

7. Kuznetsov V.M. (2005). Chemu učit chuzhoi opyt? [To what does foreign experience teach?]/ *Mirovaya energetika – World Energy*, 5, 97–98 [in Russian].

8. Kuznetsov V.M. (2000). "Rossiiskaya atomnaya energetika. Vchera, segodnya, zavtra". [Russian nuclear power engineering. Yesterday, Today, Tomorrow]. URL: <http://nevirtry.ru/detail/38307.html> (Last accessed 11.01.2017) [in Russian].

9. Nuclear Power Reactors in the World // IAEA, issue 2. — Vienna, 2002, p. 26. URL: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/rds2-27_web.pdf (Last accessed 24.11.2016).

10. Nosovski A. V., Vasilchenko V.N., Klyuchnikov A.A., & Yashchenko Ya.V. (2005). *Sniatye s ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok [Decommissioning of nuclear power plants]*. Kyiv: Tekhnika [in Russian].

11. International structure for decommissioning costing (ISDC) of nuclear installations // OECD 2012NEA No. 7088. URL: <https://www.oecd-nea.org/rwm/reports/2012/ISDC-nuclear-installations.pdf> (Last accessed 24.10.2016).

12. Kontsepsiya znyattya z ekspluatatsii diguchykh atomnykh elektrostantsii Ukrainy, zatverdzhena nakazom Ministerstva enerhetyky ta vuhilnoi promyslovosti No. 798 vid 10.12.2015 [The concept of decommissioning of operating nuclear power plants of Ukraine, adopted by the Ministry of Energy and Mines No. 798 of December 10, 2015]. URL: http://www.energoatom.kiev.ua/files/file/kse_2015.pdf (Last accessed 14.08.2016) [in Ukrainian].

Submitted to the Editor 11.03.2017