

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ**

**РУСІНКО Павло Михайлович**



УДК 621.039.7

**Контроль та прогноз утворення радіоактивних відходів діючих АЕС  
України**

05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Київ – 2021**

Дисертацією є рукопис.

Робота розпочата у Державному науково-інженерному центрі систем контролю та аварійного реагування Міністерства енергетики України, завершена у Товаристві з обмеженою відповідальністю «АЕСКАР».

Науковий керівник:

Доктор фіз.-мат. наук, старший науковий співробітник  
**Литвинський Людвиг Леонідович**,  
головний науковий співробітник ТОВ  
«АЕСКАР»

Офіційні опоненти:

Доктор технічних наук, старший науковий співробітник  
**Барбашев Сергій Вікторович**,  
професор кафедри АЕС Державного  
університету «Одеська політехніка»  
Кандидат технічних наук  
**Гальченко Віталій Володимирович**,  
завідуючий лабораторії моделювання  
ТОВ «ВІ ЕС СІ Інтернешенал  
Україна»

Захист відбудеться 23 вересня 2021 р. о 14<sup>45</sup> на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.167.01 Інституту ядерних досліджень НАН України за адресою: 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Інституту ядерних досліджень НАН України, 03028, м. Київ, проспект Науки, 47.

Автореферат розісланий «19» серпня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради  
кандидат фізико-математичних наук



Хоменков В.П.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Обґрунтування вибору теми дослідження:** Останні два десятиріччя атомні електростанції (АЕС) України забезпечують близько 50 % виробництва електроенергії в Україні. Їх безпечна експлуатація є основою енергетичної безпеки країни та її сталого розвитку.

У результаті виробничої діяльності на АЕС утворюється значна кількість радіоактивних відходів (РАВ), різного агрегатного стану та активності. Крім експлуатаційних РАВ, внаслідок роботи енергоблоків діючих АЕС напрацьовується відпрацьоване ядерне паливо (ВЯП) та з часом виникнуть РАВ від зняття з експлуатації (ЗЕ) енергоблоків. Крім того, РАВ виникають та виникатимуть надалі в разі переробки ВЯП. Поводження з РАВ є одним з принципових напрямків, що визначають довгострокові наслідки сучасної діяльності в ядерній енергетиці, належить до вищих пріоритетів МАГАТЕ та привертає підвищену увагу національної і міжнародної громадськості.

Поводження з РАВ є комплексним питанням, всі етапи поведження з такими відходами взаємопов'язані. Помилкові рішення на попередніх етапах часто призводять до виникнення серйозних технічних та організаційних проблем на наступних етапах та суттєвого збільшення витрат. Комплексність проблеми поведження з РАВ, довгострокові наслідки рішень, що приймаються, потреба в накопиченні ресурсів на майбутню діяльність потребують взаємоузгодженого та обґрунтованого планування діяльності в цій сфері. Таке планування в свою чергу потребує створення та постійного удосконалення системи контролю, проведення аналізу поточного стану для визначення дефіцитів та впровадження найкращих практик, виконання оцінок та прогнозів для визначення та обґрунтування оптимальних рішень.

### **Мета і завдання дослідження.**

**Метою роботи** було удосконалення контролю та прогнозу утворення радіоактивних відходів діючих АЕС України.

Для досягнення поставленої мети дисертаційної роботи були визначені завдання наукового дослідження за наступними напрямками в сфері поведження з РАВ:

- встановлення радіаційної еквівалентності ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 та ВАВ, отриманих після його переробки;
- прогноз обсягів РАВ від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР;
- планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС.

**Завданнями робіт за напрямком** «Встановлення радіаційної еквівалентності ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 та ВАВ, отриманих після його переробки» було:

- для осклованих ВАВ, що утворюються при переробці ВЯП реакторів ВВЕР-440 за технологією «ПО «МАЯК» моделювання та аналіз радіонуклідного складу їх для різних часів витримки, відбір значимих для визначення еквівалентності радіонуклідів і визначення та

обґрунтування критерію еквівалентності таких ВАВ, що будуть повертатися в Україну;

- визначення простих аналітичних функцій які описують активність радіонуклідів у ВЯП реакторів ВВЕР-440 для різних значень початкового збагачення та вигорання.

**Завданнями робіт за напрямком** «Оцінка обсягів РАВ від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР» було:

- прогноз утворення РАВ від ЗЕ реакторів типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 для сценаріїв невідкладного та відкладеного демонтажу та вартості їх захоронення;
- оптимізація графіків ЗЕ за обсягами РАВ, трудовитрат та фінансових витрат на ЗЕ енергоблоків в рамках майданчиків діючих АЕС України.

**Завданнями робіт за напрямком** «Планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС» було:

- визначення підходу до удосконалення планування та контролю утворення експлуатаційних РАВ та його практичне застосування для окремих АЕС та ДП «НАЕК «Енергоатом», в тому числі контролю з боку міжнародних фінансових організацій – кредиторів оператора;
- удосконалення алгоритму встановлення контрольних рівнів утворення експлуатаційних РАВ на діючих АЕС України.

**Об'єктом дослідження** є поведження з радіоактивними відходами, що виникають внаслідок експлуатації та зняття з експлуатації АЕС з енергоблоками типу ВВЕР, а також переробки їх ВЯП. **Предметом дослідження** виступають контроль та прогноз утворення цих РАВ.

#### **Методи дослідження:**

Роботи за напрямком «Встановлення радіаційної еквівалентності ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 та ВАВ, отриманих після його переробки» виконані за допомогою: апроксимації простими аналітичними функціями розрахункових результатів, наведених у відкритих публікаціях інших авторів; розрахункового моделювання та аналізу його результатів; експертних оцінок на основі результатів розрахунків.

Роботи за напрямком «Оцінка обсягів РАВ від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР» виконувались за допомогою: експертних оцінок на основі фізики реакторів та проектних даних реакторів типу ВВЕР; аналізу міжнародного досвіду та його застосовності до українських умов; варіаційного прогнозування.

Роботи за напрямком «Планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС» виконані шляхом узагальнення результатів сукупного аналізу: вимог нормативно-правових документів щодо системи поведження з РАВ діючих АЕС, її вихідного стану та планів по удосконаленню, попереднього досвіду, потреб у змінах для забезпечення безпечного поведження з РАВ АЕС до кінця проектного терміну експлуатації енергоблоків та при його продовженні.

**Наукова новизна отриманих результатів** полягає в тому, що в рамках роботи вперше були оцінені деякі характеристики РАВ, що виникають внаслідок експлуатації та зняття з експлуатації АЕС з енергоблоками типу ВВЕР АЕС України, а також переробки їх ВЯП та удосконалені методи планування та контролю в сфері поводження з такими РАВ. Отримані результати залишаються актуальними цілком або в частині основних рішень.

Зокрема для ВАВ від переробки ВЯП реакторів ВВЕР-440 за технологією «ПО «МАЯК» на основі розрахункових оцінок радіонуклідного складу для різних часів витримки вперше були: обґрунтований перелік радіонуклідів, значимих для визначення еквівалентності та визначений критерій еквівалентності для повернення таких ВАВ в Україну (є актуальними). Також були підібрані прості аналітичні функції, які задовільно описують активність радіонуклідів у ВЯП реакторів ВВЕР-440 для різних значень початкового збагачення та вигоряння (є актуальними), що дозволяє розраховувати активність радіонуклідів у ВЯП без виконання детального моделювання його опромінення в реакторі.

Для РАВ від ЗЕ діючих АЕС України вперше було запропонована методологія та оцінена кількість та вартість захоронення РАВ від ЗЕ енергоблоків з реакторами ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 (залишається актуальними в частині оцінки кількості РАВ від ЗЕ), що стало основою планування поводження з РАВ при ЗЕ. Також був розроблений алгоритм оптимізації графіків ЗЕ енергоблоків в межах окремих майданчиків АЕС (є актуальним).

Для експлуатаційних РАВ діючих АЕС був визначений підхід до удосконалення планування та контролю поводження з такими РАВ (залишається актуальним в частині основних рішень), розроблена методологія відповідного моніторингу з боку міжнародних фінансових організацій – кредиторів оператора (є актуальною), удосконалений алгоритм встановлення контрольних рівнів для них (залишається актуальним в частині основних рішень).

**Внесок здобувача та співавторів:** Автор був основним виконавцем всіх робіт, результати яких представлені у дисертації.

Метод визначення початкової активності радіонуклідів у ВЯП ВВЕР-440, шляхом апроксимації простими аналітичними функціями [5,16] був сформований за результатами обговорення з Л.Л.Литвинським та О.М.Масько. Моделювання та аналіз радіонуклідного складу, добір та обґрунтування критерію еквівалентності ВАВ від переробки ВЯП реакторів типу ВВЕР та відправленого на переробку ВЯП [6,7,19] і розроблення відповідного алгоритму формування партії осклованих ВАВ від переробки ВЯП ВВЕР-440, що має повертатися в Україну, [4,19] були виконані автором за підтримки С.М.Кондратьєва, Л.Л.Литвинського та О.М.Масько.

Кількість та вартість захоронення РАВ від ЗЕ реакторів ВВЕР-440 і ВВЕР-1000 [1,2,9,15] були оцінені автором за результатами співпраці з Л.Л.Литвинським та Ю.М.Лобачем. Алгоритм оптимізації графіків ЗЕ

енергоблоків в межах окремого майданчику АЕС [3,8,10] розроблявся автором за участі Л.Л.Литвинського, О.М.Масько та С.В.Рундюка.

Роботи з удосконалення контролю поведження з РАВ на окремих АЕС [11,18], планування діяльності щодо поведження з РАВ на окремих АЕС [13] та оператора всіх діючих АЕС України в цілому [14,17], та удосконалення алгоритму встановлення контрольних рівнів утворення та надходження РАВ до сховищ АЕС [20] виконувались автором у співпраці з Л.Л.Литвинським та О.М.Масько та доопрацьовувались із врахуванням зауважень та пропозицій Л.В.Близнюкової, В.Ф.Войцеховського, С.Е.Коротова, Ю.О.Ольховика, Ю.П.Рощіна, Е.І.Суховерхого, Л.І.Терещенко та О.В.Яковенко. Методологія моніторингу поведження з РАВ на діючих АЕС України з боку ЄБРР та Євратом [21-24] була сформована за результатами обговорення з Л.Л.Литвинським та Г.В.Сазоновим.

Огляд технологій поведження з РАВ був підготовлений автором самостійно, його редагування для публікації у посібнику [11] було виконано В.М.Ефременковим.

**Апробація результатів:** Основні результати робіт викладених у дисертації доповідалися на:

- Щорічній міжнародній конференції Українського Ядерного Товариства (УкрЯТ) «Екологічні аспекти ядерних технологій», 23-24 Листопада 2004 р. Київ, Україна, (доповідь на пленарному засіданні [8]);
- 10-тій Міжнародній конференції з відновлення навколишнього середовища та поведження з радіоактивними відходами, 4-8 Вересня 2005 р., Глазго, Шотландія, (доповідь на пленарному засіданні [9]);
- Щорічній міжнародній конференції УкрЯТ «Екологічні аспекти ядерних технологій», 17-18 жовтня 2005 р., Київ, Україна, (доповідь на пленарному засіданні [10]);
- Координаційній Науково – технічній нараді (НТН) з питань поведження з РАВ на АЕС РФ та України, 6-7 Липня 2006 р., Запорізька АЕС, Україна (доповідь на пленарному засіданні), раді фахівців ДП «НАЕК «Енергоатом», секція 1 «Поведження з РАВ», 7 Липня 2009, Київ, Україна (доповідь на пленарному засіданні);
- Спільній координаційній НТН з питань поведження з РАВ та Міжнародній нараді начальників цехів дезактивації АЕС Росії та України, 12-15 Листопада 2010 р., Севастополь, Україна, (доповідь на пленарному засіданні).

**Публікації:** Основні результати включені у дисертацію опубліковані у 24 публікаціях, з яких 7 – публікації у наукових журналах, (з яких одна у виданні включеному до переліку наукових фахових видань України категорії А та 2 – у виданні на момент публікації зареєстрованому у ВАК України), 1 – чотири розділи у посібнику, 3 – матеріали конференцій та 13 – стандарти, програми та звітні документи, у яких результати практично використані в галузі.

**Структура та обсяг дисертації:** Загальний обсяг дисертації складає 183 стор. Дисертація включає анотації українською та англійською мовою на 11 стор., основну частину на 136 стор., список використаних джерел на 17 стор. та чотири додатки на 18 стор. Основний текст складається з вступу, чотирьох розділів та висновків. Дисертація містить 46 рисунків, 31 таблицю, (без врахування додатків), та список використаних джерел з 161 найменування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами:**

Огляд технологій поводження з РАВ виконаний в рамках проекту міжнародної допомоги INSC U4.01/09 – А «Допомога міністерствам і організаціям, відповідальним за поводження з радіоактивними відходами в Україні». Оригінальні роботи автора за всіма вказаними напрямками виконувались в рамках наукових планів та тем ДНІЦ СКАР та ТОВ «АЕСКАР».

**Практичне значення отриманих результатів:** Всі представлені у дисертації результати були практично використані в ядерній енергетиці України та, як вказано вище, залишаються актуальними цілком або в частині основних рішень.

Результати за напрямом «Встановлення радіаційної еквівалентності ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 та ВАВ, отриманих після його переробки» використані в рамках стандартів Мінпаливенерго України [16,19] щодо методики визначення кількості та характеристик ВАВ, які мають повертатися Україні після переробки ВЯП ВВЕР-440 у Російській Федерації.

Результати за напрямом «Оцінка обсягів РАВ від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР» використані в рамках Концепції ЗЕ діючих атомних електростанцій України [15] та концепцій ЗЕ ВП АЕС.

Результати за напрямом «Планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС» використані/реалізовані в рамках:

- Стандартів Міністерства палива та енергетики України (Мінпаливенерго) [11,13,18];
- Програм та стандартів ДП «НАЕК «Енергоатом» [14,17,20];
- Розділів щодо поводження з РАВ звітів ДП «НАЕК «Енергоатом» до ЄБРР та Євратом у рамках виконання КЗПБ:
  - Квартальних звітів Позичальника про хід робіт у період 2015 - 2017 роки.
  - Звітів з екологічних та соціальних питань за період з 2013 по 2017 роки [21-24];

Результати огляду технологій поводження з РАВ використані в рамках навчальних курсів для фахівців в сфері поводження з РАВ, проведених у Києві 22-26 лютого 2016 р., та опубліковані у розділах 11, 12, 13 та 21 посібника [11].

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі дисертаційної роботи обґрунтована актуальність виконаних досліджень, представлені мета та основні завдання, описані методи дослідження та основні наукові результати, надана інформація щодо їх апробації, оприлюднення та практичного застосування в ядерній енергетиці України.

У першому розділі представлений огляд технологій поводження з РАВ АЕС, включаючи ВЯП та ВАВ від його переробки та коротко описаний вихідний стан поводження з РАВ АЕС України.

У другому розділі наведені результати автора за напрямком «Встановлення радіаційної еквівалентності вихідного ВЯП реакторів типу ВВЕР та ВАВ, отриманих після його переробки».

При переробці ВЯП на ПО «Маяк» одержати кондиціоновані РАВ, які по відносному нуклідному складу та повному вмісту радіонуклідів точно відповідають конкретній партії перероблених відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) з урахуванням витримки перед переробкою, неможливо. У світі на сьогоднішній день відсутній загальноприйнятий підхід для встановлення еквівалентності РАВ з різним радіонуклідним складом та іншими фізико-хімічними характеристиками. Для практичного визначення еквівалентності відходів із близькими характеристиками використовують критерії, де у якості вагових коефіцієнтів застосовують визначені у міжнародних стандартах величини, які характеризують вплив радіонуклідів на навколишнє середовище, персонал та населення за різних сценаріїв опромінення.

Для оцінок характеристик ВЯП, необхідно знати його активність та радіонуклідний склад в будь-який момент часу після вивантаження ВЯП з активної зони реактора. Розрахунок зміни активності із часом не викликає труднощів, проте визначення початкової активності радіонуклідів є нетривіальною задачею. Запропонований метод визначення початкової активності радіонуклідів у ВЯП ВВЕР-440 в залежності від вигорання і початкового збагачення базується на інтерполяції довідникових даних простими аналітичними функціями.

Для продуктів поділу та  $^{236}\text{U}$  і  $^{239}\text{Pu}$  початкові активності непогано апроксимуються формулою:

$$A(S, O) = a \cdot S^b \cdot (1 + c \cdot O) \quad (1),$$

де: S - вигорання палива, Мвт·діб/тU;

O - початкове збагачення палива, частка;

a, b і c – параметри визначені методом найменших квадратів.

Для  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  початкові активності задовільно апроксимуються формулами:

$$A = 8 \cdot 10^{10} \cdot O + a \cdot S^b \cdot (1 + c \cdot O) \quad (2),$$

$$A = 1,24 \cdot 10^{10} \cdot (1 - O) + a \cdot S^b \cdot (1 + c \cdot O) \quad (3).$$



де перші доданки у (2) та (3) враховують вміст,  $^{235}\text{U}$  та  $^{238}\text{U}$  у «свіжих» (неопромінених) тепловиділяючих збірках (ТВЗ).

Для актиноїдів важчих за  $^{239}\text{Pu}$  початкові активності задовільно описується формулою:

$$A = a \cdot (\sin(\Omega \cdot S))^b \cdot (1 + c/O^2) \quad (4),$$

де феноменологічний коефіцієнт  $\Omega = 3,14159 \times 10^{-5}$  був обраний для виходу на умовне насичення при вигорянні  $S=50000$  МВт•діб/тU.

Враховуючи простоту підібраних функцій, малу кількість коефіцієнтів, що визначаються методом найменших квадратів та, відповідно, потребу у вихідних даних для інтерполяції, підібрана форма функцій залишається актуальною.

Для аналізу та обґрунтуванні переліку радіонуклідів що є значимими при визначенні еквівалентності ВАВ від переробки ВЯП реакторів типу ВВЕР та відправленого на переробку ВЯП було виконано моделювання радіонуклідного складу осклованих ВАВ від переробки ВЯП реакторі ВВЕР – 440 за технологією «ПО «Маяк». Вилучення цільових продуктів переробки та включення відходів переробки у скляну матрицю враховувалось за допомогою коефіцієнтів наданих «ПО «Маяк»». Модельні розрахунки виконувались при різних значеннях вигоряння вихідного ВЯП для наступних моментів часу: 23 (момент повернення ВАВ в Україну), 100, 300,  $10^3$ ,  $10^4$ ,  $10^5$ ,  $10^6$ ,  $10^7$ ,  $10^8$  років. Враховувались 22 продукти поділу та 20 актиноїдів. Для кожного радіонукліда крім питомої активності розраховувались, еквівалент активності (ЕА) пероральний та інгаляційний (добутки активностей р/н на дозові коефіцієнти пероральний і інгаляційний відповідно), фактор токсичності (відношення активностей р/н до їхнього рівня звільнення).

Приклад результатів моделювання питомої активності ВАВ від переробки ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 за технологією «ПО «МАЯК» для відпрацьованих ТВЗ (ВТВЗ) з початковим збагаченням 3,6 % та вигорянням 36 ГВт•діб/тU представлений на рисунках 1-3.

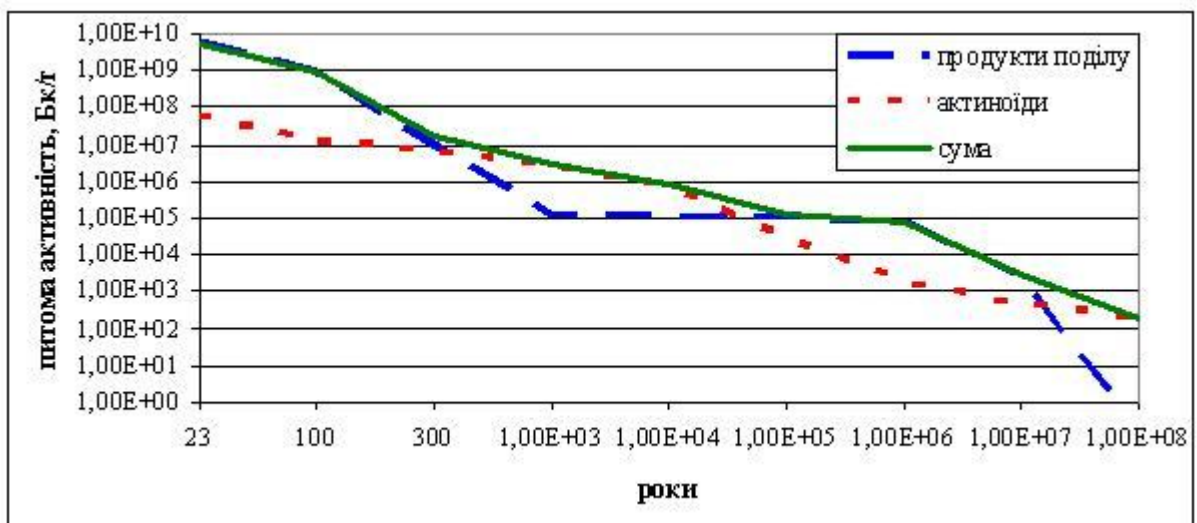


Рис. 1 Питома активність осклованих ВАВ

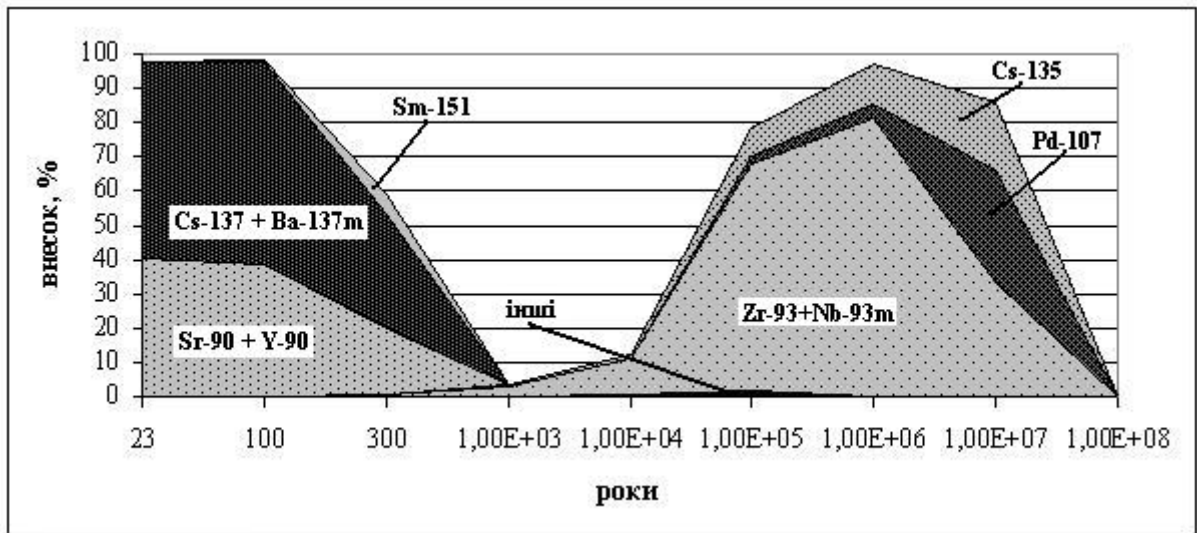


Рис. 2 Внесок продуктів поділу у питому активність осклованих ВВВ

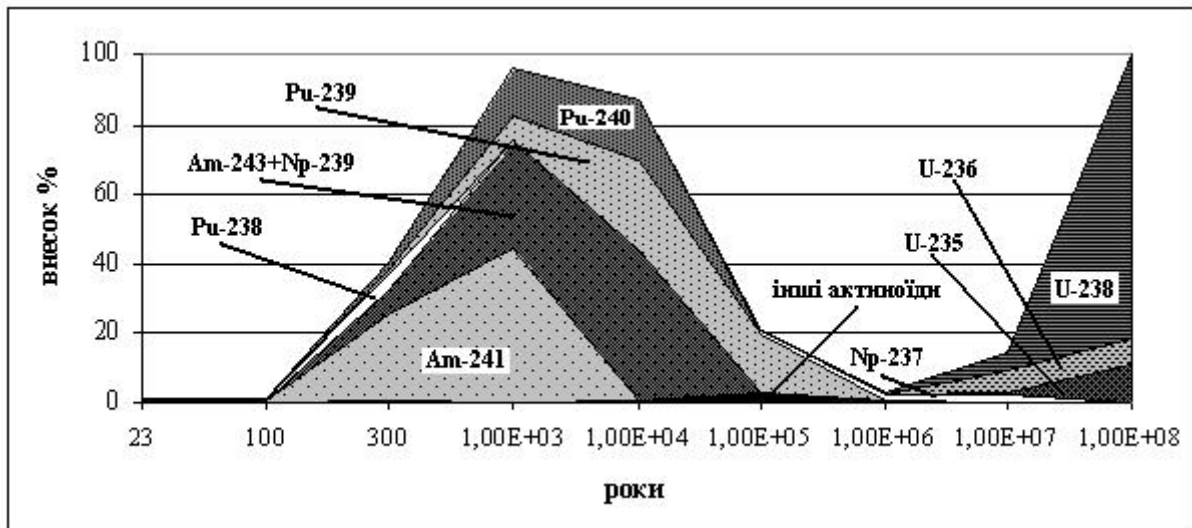


Рис. 3 Внесок актиноїдів у питому активність осклованих ВВВ

Аналіз результатів моделювання показав, що внески в сумарну питому активність осклованих ВВВ від продуктів поділу та актиноїдів істотно залежать від часу витримки та вигорання вихідного ВЯП. У періоди момент 23-100 та близько  $10^6$  років питома активність осклованих ВВВ практично повністю визначається продуктами поділу, а у періоди близько  $10^3$  та  $10^8$  років – актиноїдами. Динаміка внеску продуктів поділу та актиноїдів до сумарного перорального ЕА та фактору токсичності якісно відповідає їх внеску до питомої активності. Сумарний інгаляційний ЕА ВВВ практично визначається актиноїдами для будь яких часів витримки. З точки зору найбільшої придатності для встановлення еквівалентності ВВВ для передачі їх Україні з аналізованих характеристик ВВВ найкращім вбачається пероральний еквівалент активності.

За результатами аналізу, враховуючи похибки вихідних значень та особливості технології переробки ВЯП на «ПО «Маяк» з 22 продуктів поділу для визначення еквівалентності ВВВ можна розглядати як значущі тільки 3

радіонукліди:  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  та  $^{129}\text{I}$ , а з 20 актиноїдів - наступні 9:  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{244}\text{Cm}$ .

При обґрунтуванні вибору критерію еквівалентності партії українських ВТВЗ, що були відправлені на переробку та осклованих ВАВ, які будуть повернуті Україні було прийнято, що РАВ із різним радіонуклідним складом можна вважати еквівалентними, якщо вплив даних відходів на людину буде однаковим на всіх етапах наступного поводження з ними.

В якості критерію еквівалентності обраний сумарний еквівалент активності радіонуклідів - сума добутків активності радіонуклідів на коефіцієнти впливу рівні дозовим коефіцієнтам радіонуклідів для перорального надходження. Основною умовою еквівалентності обрана рівність сумарних ЕА радіонуклідів на момент повернення. Додатковою умовою є рівність сумарного ЕА актиноїдів у ВАВ та ВТВЗ у межах похибки визначення. При розрахунку ЕА ВТВЗ враховується вилучення цільових продуктів переробки. Також зафіксований ряд додаткових вимог до ВАВ, ключовою з яких є те, що радіонуклідний склад ВАВ, що повертаються в Україну, визначається радіонуклідним складом ВТВЗ реакторів ВВЕР-440, що переробляються.

Показано що за таких умов забезпечується еквівалентність впливу радіонуклідів на людину для поточного опромінення (нормальна діяльність) та потенційного опромінення (аварійні події) при транспортуванні; довгостроковому зберіганні до захоронення та захороненні ВАВ в глибоких стабільних геологічних формаціях (геологічне захоронення).

У відповідному підрозділі описаний алгоритм формування партії осклованих ВАВ від переробки ВЯП ВВЕР-440, що має повертатися в Україну.

Перелік значимих радіонуклідів, критерій еквівалентності та алгоритм формування партії осклованих ВАВ від переробки ВЯП ВВЕР-440, що має повертатися в Україну використані у чинному стандарті Мінпаливенерго [19] і відповідно залишаються актуальними.

У третьому розділі наведені результати автора за напрямком «Радіоактивні відходи від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР».

Оцінка обсягів РАВ, що утворюються під час ЗЕ енергоблоку, була виконана для двох варіантів ЗЕ енергоблоків діючих АЕС: невідкладний демонтаж та відкладений демонтаж. При прогнозах передбачалось, що РРВ та НАВ від ЗЕ будуть перероблятися для зменшення об'ємів. Прогнози динаміки утворення РАВ від ЗЕ для енергоблоків ВВЕР 440 та ВВЕР-1000 наведені на рисунках 4, 5 та 6, 7 відповідно.

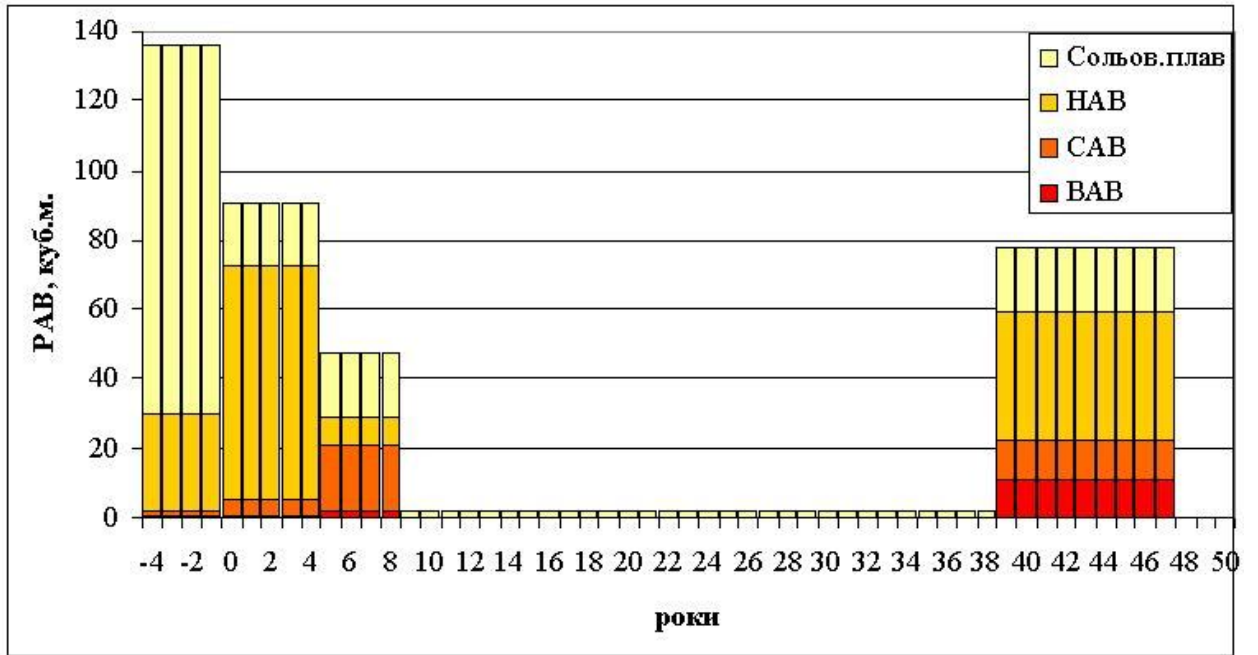


Рис. 4 – Відкладений демонтаж. РАВ від ЗЕ блока з РУ ВВЕР-440

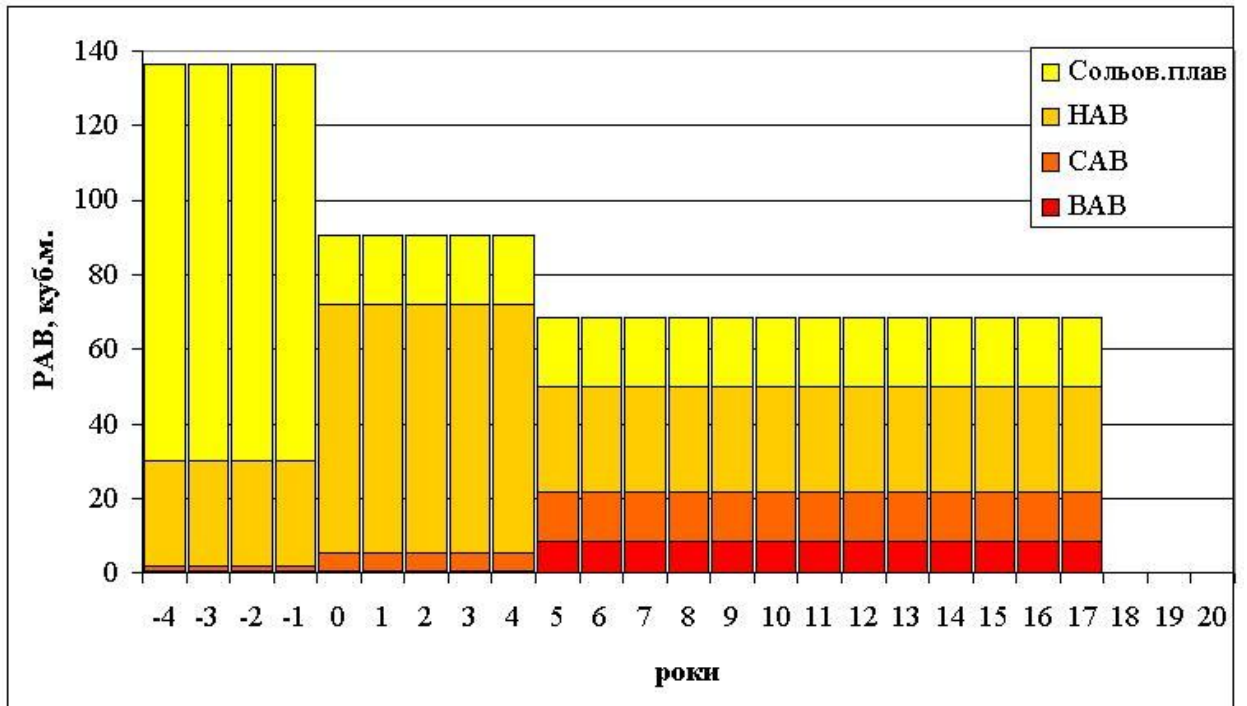


Рис. 5 – Невідкладний демонтаж. РАВ від ЗЕ блока з РУ ВВЕР-440

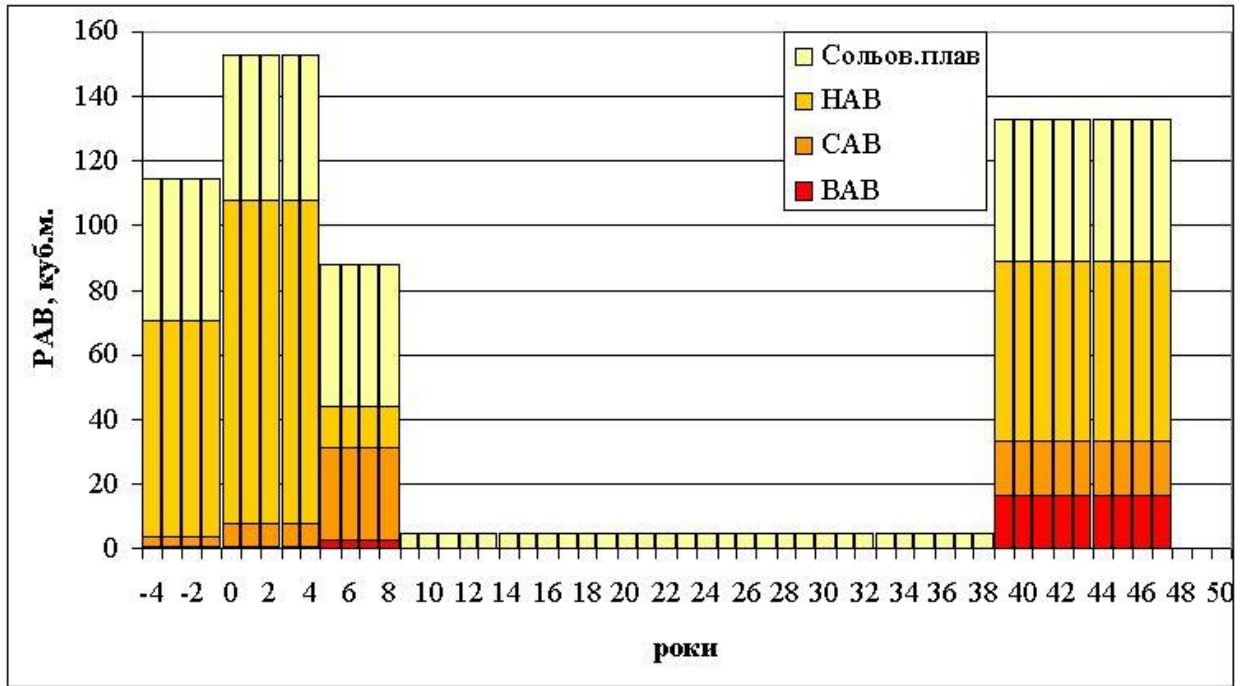


Рис. 6 – Відкладений демонтаж. РАВ від ЗЕ блока з РУ ВВЕР-1000

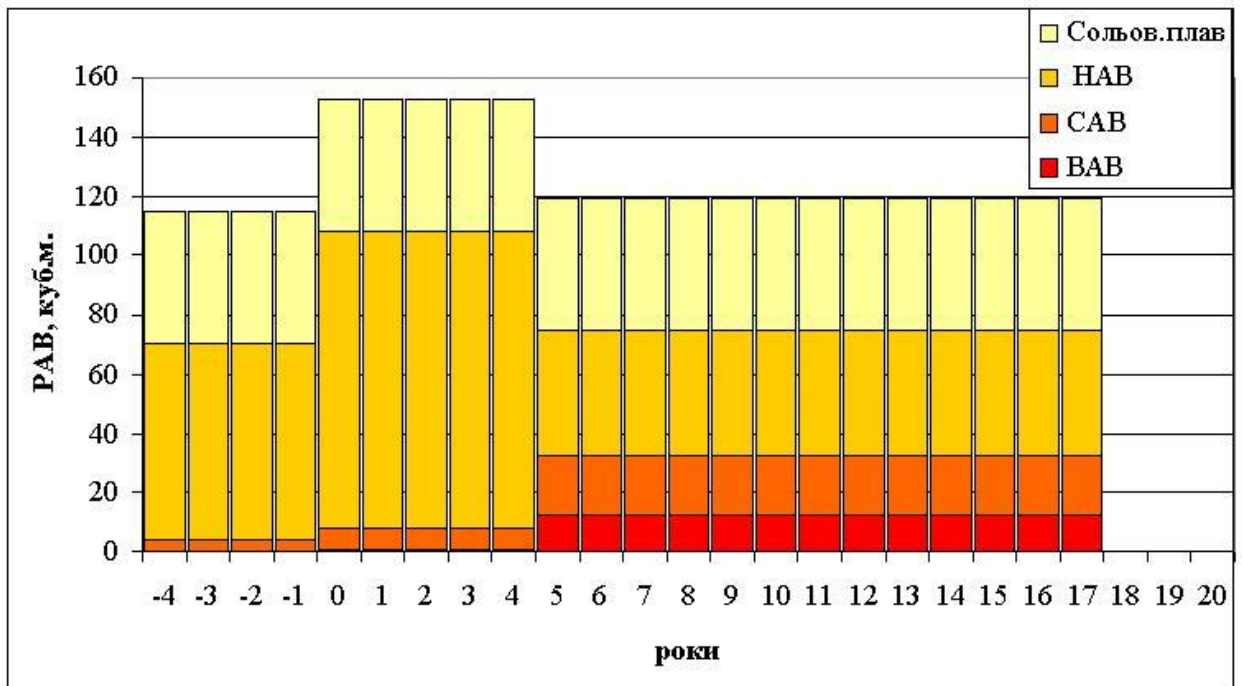


Рис. 7 – Невідкладний демонтаж. РАВ від ЗЕ блока з РУ ВВЕР-1000.

Для оцінки витрат на захоронення РАВ, які утворюються під час експлуатації і ЗЕ АЕС, за основу були прийняті вартісні оцінки, представлені в матеріалах Європейського Співтовариства. Оцінки повної та питомої (на одиницю встановленої потужності) вартості захоронення РАВ від ЗЕ енергоблоків з РУ типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, наведені в табл. 1 (в цінах 2002 року).

Таблиця 1 – Вартість захоронення РАВ від ЗЕ, Млн.US\$

№	Етап	Відкладений демонтаж		Невідкладний демонтаж	
		ВВЕР-440	ВВЕР-1000	ВВЕР-440	ВВЕР-1000
0	Припинення експлуатації	1,7	1,1	1,7	1,1
1	Остаточне закриття	1,7	2,6	1,7	2,6
2	Консервація	3,9	5,9	0,0	0,0
3	Витримка	0,1	0,1	0,0	0,0
4	Демонтаж	41,9	63,0	45,8	68,9
<b>Загалом</b>		<b>49,3</b>	<b>72,7</b>	<b>49,2</b>	<b>72,6</b>
<b>Питома вартість (на 1 МВт ВП)</b>		<b>0,118</b>	<b>0,073</b>	<b>0,118</b>	<b>0,073</b>

Оцінки обсягів РАВ від ЗЕ енергоблоків ВВЕР -440 та ВВЕР-1000 використані у Концепції ЗЕ [15], яка діяла з 2004 по 2015 рік та у переглянній Концепції ЗЕ, яка є чинною. Тому ці оцінки залишаються актуальними.

В Концепції ЗЕ [15] в якості базового визначений варіант відкладеного демонтажу енергоблоків при продовженні терміну експлуатації на 10 років та тривалості етапу витримки 30 років. Він не враховує послідовності і проміжків часу між введенням в експлуатацію різних енергоблоків на майданчиках АЕС. В результаті, етапи ЗЕ різних енергоблоків для більшості АЕС перекриваються, що призводить до виникнення двох максимумів у очікуваних витратах, утворенні РАВ та потребах у персоналі. Оптимізація графіків зняття з експлуатації була проведена шляхом варіювання термінів продовження експлуатації та тривалості етапу витримки.

На рис. 8-10 представлені порівняння динаміка витрат, напрацювання РАВ та кількість необхідного персоналу для ЗЕ Запорізької АЕС при оптимізованому варіанті (Варіант-1) у порівнянні з базовим (Варіант-0). Як видно з рисунків, оптимізація дозволяє суттєво покращити динаміку за всіма трьома параметрами. Аналогічні результати отримані і для інших АЕС.

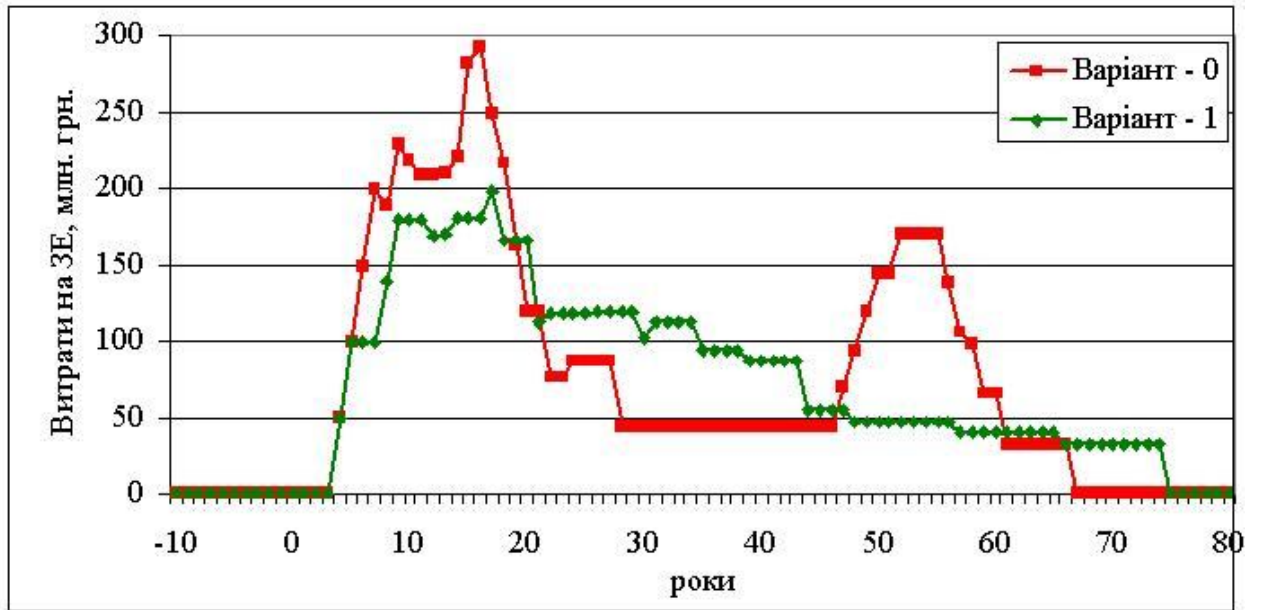


Рис. 8 – Витрати на ЗЕ ЗАЕС

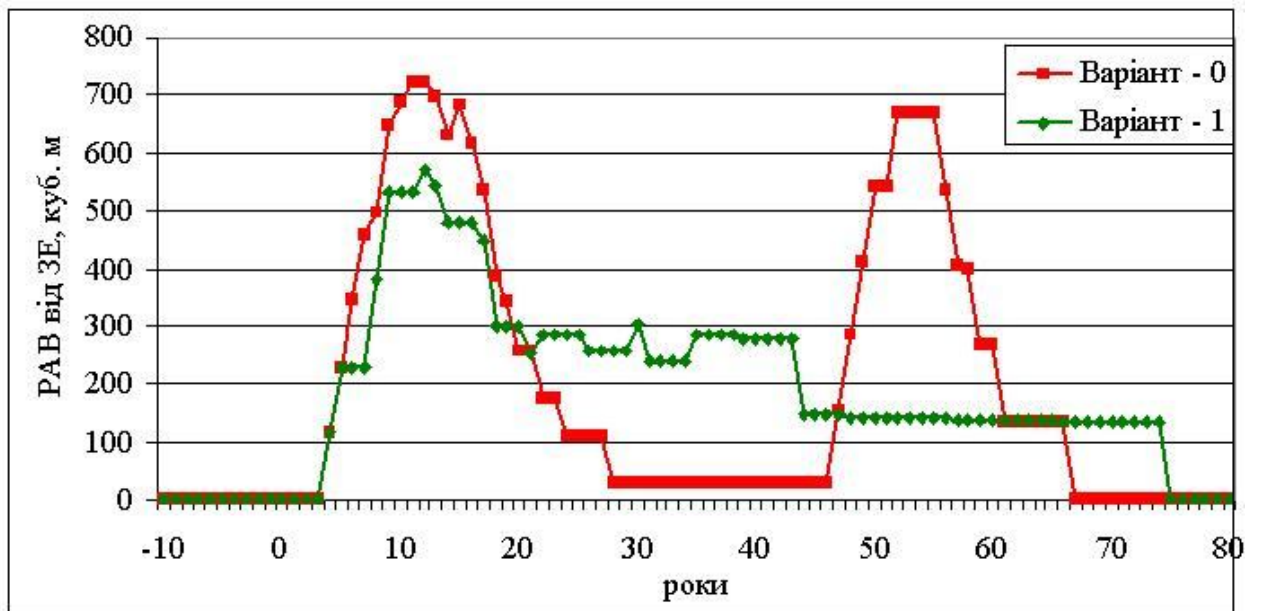


Рис. 9 – РАВ від ЗЕ ЗАЕС

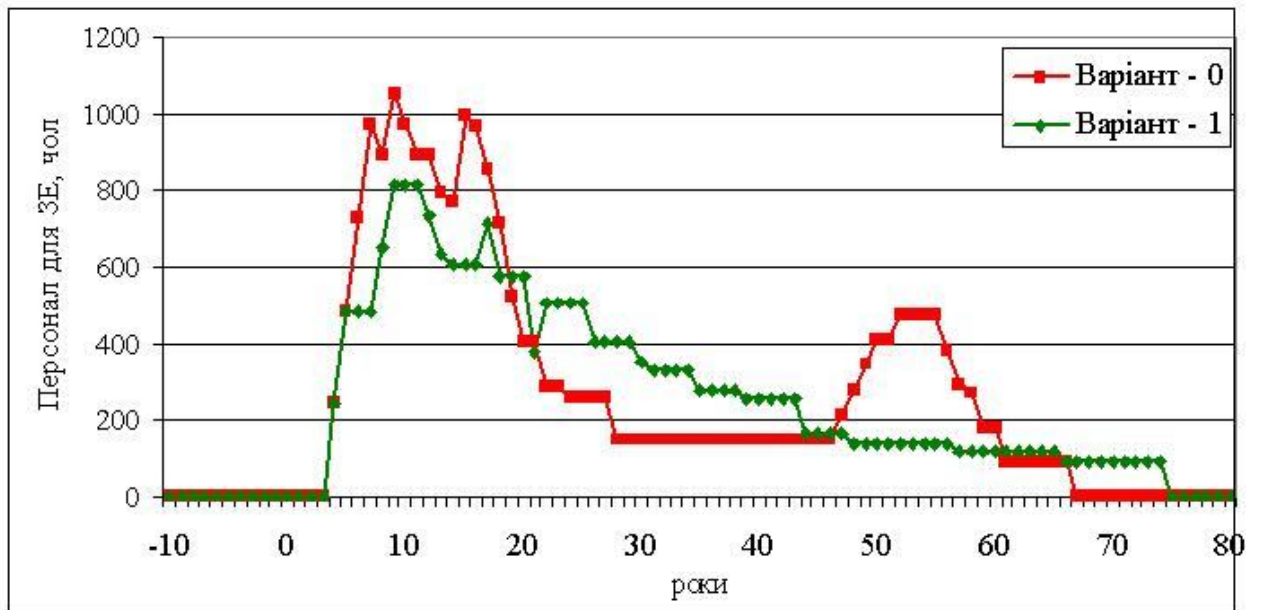


Рис. 10 – Персонал для ЗЕ ЗАЕС

На рис. 11 та 12 представлені порівняння сумарних прогнозів витрат на ЗЕ та напрацювання РАВ при ЗЕ всіх діючих енергоблоків АЕС України для базового та оптимізованого варіантів ЗЕ.

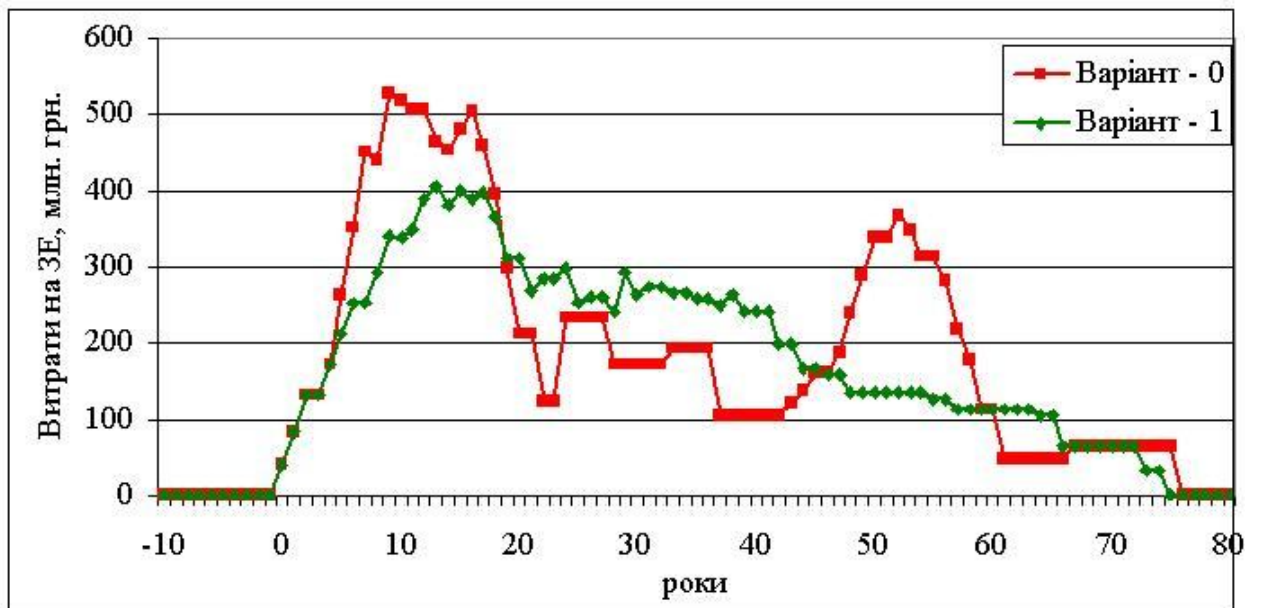


Рис. 11 – Витрати на ЗЕ АЕС України



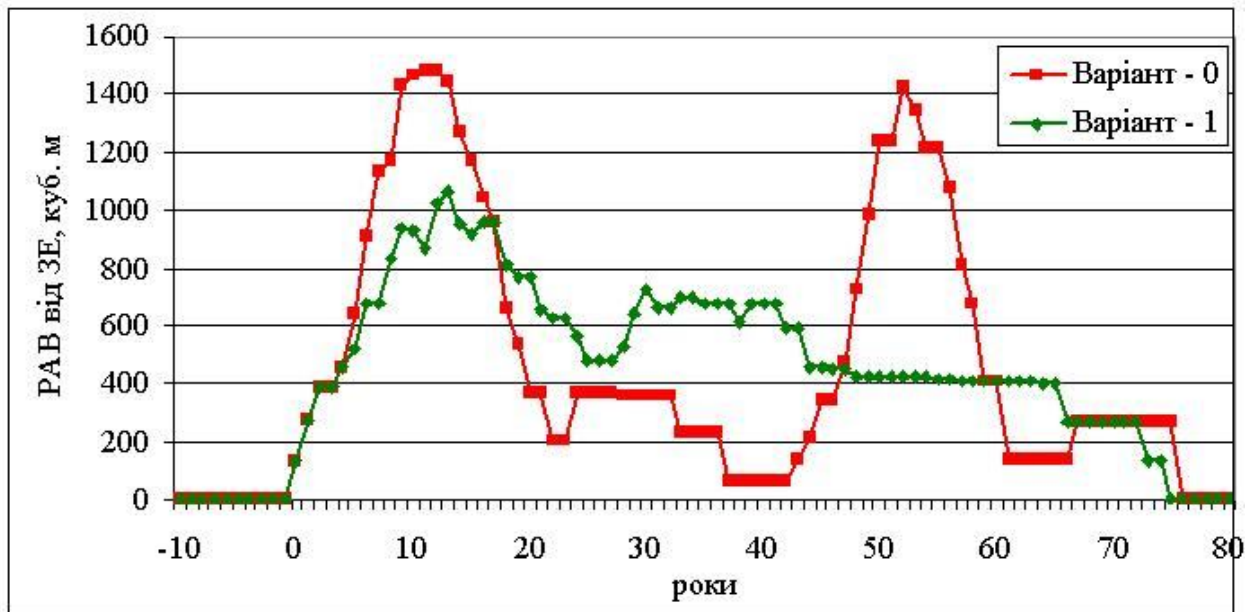


Рис. 12 – РАВ від ЗЕ АЕС України

Як видно з рисунків, оптимізований варіант ЗЕ забезпечує згладження піків, тому є помітно кращім по відношенню до базового як щодо фінансування робіт із ЗЕ, так і з точки зору поводження з РАВ.

У **четвертому розділі** наведені результати автора за напрямком «Планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС». Була обґрунтована потреба та визначений підхід, щодо удосконалення контролю утворення експлуатаційних РАВ та планування поводження з РАВ на АЕС та у ДП «НАЕК «Енергоатом», основними напрямками якого було стандартизація та удосконалення звітності АЕС по поводженню з РАВ, впровадження регулярного аналізу динаміки утворення та накопичення РАВ, прогнозування накопичення РАВ та аналізу достатності наявних сховищ, визначення та розповсюдження найкращого досвіду щодо мінімізації утворення РАВ.

Щодо удосконалення контролю поводження з експлуатаційними РАВ діючих АЕС стандартні форми квартальної та річної звітності АЕС з питань поводження з РАВ були розроблені у 2003 році та переглянуті у 2009 році. В них встановлено вимоги до звітування ВП АЕС про поводження з рідкими та твердими РАВ, а саме про їх утворення, переробку і зберігання. У зв'язку з специфічністю, питання поводження з сольовим плавом та зневодненими шламами винесені у окремі розділи Реалізовано звітування про утворення ТРВ за видами переробки. Передбачено порівняння утворення РАВ з встановленими контрольними рівнями. Забезпечений щорічний аналіз динаміки накопичення РАВ на АЕС.

Щодо удосконалення планування поводження з експлуатаційними РАВ у 2003 році був стандартизований зміст програм мінімізації РАВ АЕС, зокрема введена вимога щодо виконання прогнозів накопичення РАВ на АЕС в залежності від повноти виконання заходів програми та з урахуванням продовження терміну експлуатації енергоблоків АЕС. Також для взаємоузгодженого планування діяльності щодо поводження з РАВ АЕС та

удосконалення системи поводження з РАВ були розроблені у 2003 та переглянуті у 2008 Програми поводження з РАВ ДП «НАЕК «Енергоатом». Заходи, заплановані в рамках Програм поводження з РАВ ДП «НАЕК «Енергоатом» у період 2003-2010 роки були виконані частково. Незважаючи на лише часткове виконання запланованих заходів, результатом реалізації Програм за цей період стало суттєве (більше ніж в 1,5 рази) зменшення утворення РАВ у ВП АЕС.

Одним із методів мінімізації утворення РАВ є встановлення контрольних рівнів (КР) та контроль за їх дотриманням. У 2014 році за результатами аналізу попереднього алгоритму та результатів його використання було виконано удосконалення алгоритму встановлення контрольних рівнів утворення РАВ у ВП АЕС. Основними особливостями удосконаленої процедури є незалежне встановлення річних та місячних КР, єдиний алгоритм встановлення КР на основі статистичного аналізу для трапних вод, кубового залишку та ТРВ і окремий алгоритм для відпрацьованих фільтруючих матеріалів та шламів виходячи з проектного рівня їх утворення.

На сьогодні частина документів у яких були використані описані вище результати автора за даним напрямком вже переглянута. Проте подальше удосконалення питань контролю та планування поводження з експлуатаційними РАВ АЕС виконувалось на основі попередніх версій з використанням рішень запропонованих автором.

НАЕК «Енергоатом» реалізує Комплексну (зведену) програму підвищення безпеки енергоблоків атомних електростанцій. Частина витрат на виконання КЗПБ здійснюються за рахунок кредитів ЄБРР та Євратомом. Кредитні угоди передбачають щоквартальне та щорічне звітування Кредиторам, зокрема, з питань поводження з РАВ. Форми для звітування кредиторам з питань поводження з РАВ були розроблені, узгоджені з кредиторами і з 2015 року по теперішній час згідно з ними складаються відповідні розділи кварталних та річних звітів. Вчасне та достатнє звітування Кредиторам забезпечило можливість фінансування реалізації заходів КЗПБ та, відповідно, підвищення рівня безпеки діючих енергоблоків АЕС України.

## ВИСНОВКИ

Дисертація присвячена удосконаленню системи контролю та прогнозу утворення радіоактивних відходів діючих АЕС України. В роботі представлені результати автора отримані в рамках такого удосконалення:

1. Для осклованих ВАВ від переробки ВЯП реакторів ВВЕР-440 за технологією «ПО «МАЯК» на основі розрахункових оцінок радіонуклідного складу для різних часів витримки вперше обґрунтований перелік значимих при визначенні еквівалентності радіонуклідів, визначений критерій еквівалентності та розроблений алгоритм формування партії осклованих ВАВ для повернення в Україну;

2. Підібрані прості аналітичні функції які задовільно описують активність радіонуклідів у ВЯП реакторів ВВЕР-440, для різних значень початкового збагачення та вигоряння, що дозволяє розраховувати активність радіонуклідів у ВЯП без виконання детального моделювання його опромінення в реакторі;
3. Вперше оцінена кількість та вартість захоронення РАВ від ЗЕ реакторів ВВЕР-440 і ВВЕР-1000, що стало основою планування поводження з РАВ при ЗЕ;
4. Розроблений алгоритм оптимізації графіків ЗЕ енергоблоків в межах окремого майданчику АЕС;
5. Удосконалені контроль поводження з експлуатаційними РАВ АЕС в тому числі з боку міжнародних фінансових організацій і планування діяльності по поводженню з РАВ на окремих АЕС та у ДП «НАЕК «Енергоатом»;
6. Удосконалений алгоритм встановлення контрольних рівнів утворення РАВ на АЕС.

Отримані результати практично застосовані в галузі, сприяли удосконаленню системи прогнозу та контролю сфері поводження з РАВ діючих АЕС, ефективного функціонування якої забезпечує безпечне та ефективне поводження з РАВ АЕС, що є необхідною умовою безпечної експлуатації АЕС України.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### 1. Наукові праці, в яких опубліковані основні результати

1. Литвинський Л.Л., Лобач Ю.М., Русінко П.М. Прогноз витрат на зняття з експлуатації енергоблоків типу ВВЕР. *Ядерні та Радіаційні Технології*. 2003. Том 3, № 3, С. 58-70.
2. Литвинський Л.Л., Лобач Ю.М., Русінко П.М. Основні положення Концепції зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України. *Ядерні та радіаційні технології*. 2004. Том 4, №2. С. 4 - 25.
3. Русінко П.М., Литвинський Л.Л., Масько О.М., Рундюк С.В. Оптимізація сценаріїв зняття з експлуатації діючих АЕС України. *Ядерні та радіаційні технології*. 2004. Том 4, №3. С. 69-80.
4. Близнюкова Л.В., Литвинский Л.Л., Масько О.М., Русинко П.М., Яковенко Е.В. Основные положения методики расчета количества высокоактивных отходов, возвращаемых Украине после технологического хранения и переработки партии ОТВС ВВЭР-440 *Ядерні та радіаційні технології*. 2007. Том 7, №3-4. С. 79-89.
5. Литвинский Л.Л., Масько А.Н., Русинко П.М. Метод оценки активности радионуклидов в отработавшем ядерном топливе реакторов типа ВВЭР-440. *Ядерні та радіаційні технології*. 2006. Том 6, №4. С. 21-29.
6. Масько А. Н., Кузнецов С. А., Русинко П. М. Обоснование критерия эквивалентности высокоактивных отходов переработки отработанного

ядерного палива ВВЭР-440. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2013, № 2. С. 13-21.

7. **Русінко П.М.**, Литвинський Л.Л. Моделювання та аналіз радіонуклідного складу високоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР-440 за технологією «ПО «Маяк». *Ядерна фізика та енергетика*. 2019. Том - 20, № 1, С. 26-33.

## **2. Опубліковані праці апробаційного характеру**

8. Литвинський Л.Л., Масько О.М., Рундюк С.М., **Русінко П.М.** Оптимізація сценаріїв зняття з експлуатації діючих АЕС України. [Електронний ресурс]: *Экологические аспекты ядерных технологий: Материалы ежегодной международной конференции УкрЯО, 23-24 ноября 2004 г.* Киев: УкрЯО, ГНИЦ СКАР, 2004. 1 електрон. опт. диск (CD-R)
9. **Rusinko P.**, Litvinsky L., Masko A. Decommissioning Conception of the operating NPPs in Ukraine. [Електронний ресурс]: *Environmental Remediation and Radioactive Waste Management: Proceedings of The 10th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, September 4-8, 2005, Glasgow, Scotland.* 2005. 1 електрон. опт. диск (CD-R)
10. **Русінко П.М.**, Литвинський Л.Л., Масько А.М. Оптимізація термінів зняття з експлуатації українських АЕС. [Електронний ресурс]: *Экологические аспекты ядерных технологий: Материалы ежегодной международной конференции УкрЯО, 17-18 октября 2005 г.* Киев: УкрЯО, ГНИЦ СКАР, 2005. 1 електрон. опт. диск (CD-R)

## **3. Документи у яких результати практично застосовані**

11. Основные принципы и системы обращения с радиоактивными отходами (учебное пособие): проект U4.01/09-А./ под общей редакцией В.М. Ефременкова. Киев: Издательство «Промінь», 2015.- 352 с.
12. ГНД 95.1.07.06.052-2003. Поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях України. Форми квартальної та річної звітності. [чинний від 2003-01-01 по 2009-08-01] Київ: Міністерство палив та енергетики України, 2003. 24 с. (стандарт Мінпаливенерго України)
13. ГНД 95.1.07.06.053-2003. Програма мінімізації радіоактивних відходів на атомних електростанціях України. Типовий зміст. [чинний від 2003-01-01], Київ: Міністерство палив та енергетики України, 2003. 32 с. (стандарт Мінпаливенерго України)
14. ПМ-Д.0.05.174-03 Програма по поводженню з радіоактивними відходами НАЕК «Енергоатом». [чинна від 2003-05-30 по 2008-06-15]. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2003. 38 с.
15. Концепція зняття з експлуатації діючих атомних електростанцій України. [чинна від 2004-05-12 по 2015-12-10]: затверджена наказом

- Міністерства палива та енергетики України від 12 травня 2004 р. № 249. Київ: Мінпаливенерго України, 2004. 89 с.
16. СОУ-Н ЯЕК 1.006:2007 Розрахунок складу кількості та активності високоактивних відходів від переробки відпрацьованого ядерного палива реакторів ВВЕР – 440. [чинна від 2007-05-28 по 2010-09-01]. Київ: Мінпаливенерго України, ДП «НАЕК «Енергоатом», 2007. 55 с. (стандарт Мінпаливенерго України)
  17. ПМ-Д.0.05.174-08 Програма поводження з радіоактивними відходами ДП НАЕК «Енергоатом». [чинна від 2008-06-15 по 2010-11-27]. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2008. 55 с.
  18. СОУ-Н ЯЕК 1.022:2009. Поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях України. Форми квартальної та річної звітності. [чинний від 2009-08-01 по 2015-04-30] Київ: Міністерство палива та енергетики України, ДП «НАЕК «Енергоатом», 2009. 34 с. (стандарт Мінпаливенерго України).
  19. СОУ-Н ЯЭК 1.027:2010 Методика розрахунку кількості високоактивних відходів, що повертаються Україні після технологічного зберігання та переробки партії ВТВЗ ВВЕР-440. [чинна від 2010-09-01]. Мінпаливенерго України, ДП «НАЕК «Енергоатом», Київ, 2010. 65 с. (стандарт Мінпаливенерго України)
  20. СОУ НАЕК 083:2015 Поводження з радіоактивними відходами. Встановлення контрольних рівнів утворення та надходження до сховищ радіоактивних відходів на атомних електростанціях. Методичні вказівки. [чинний від 2015-05-18] Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2015. (стандарт ДП «НАЕК «Енергоатом»)
  21. CCSUP-PMU-E\_\_\_\_-ESA-001-00 Звіт з екологічних та соціальних питань: 2013-2014. Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2015. с. 74-88.
  22. CCSUP-PMU-E\_\_\_\_-ESA-002-00 Звіт з екологічних та соціальних питань: 2015. Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2016. С.47-52.
  23. CCSUP-PMU-E\_\_\_\_-ESA-003-00 Звіт з екологічних та соціальних питань: 2016. Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2017. С. 47-54.
  24. CCSUP-PMU-E\_\_\_\_-ESA-004-00 Звіт з екологічних та соціальних питань: 2017. Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки. Київ: ДП «НАЕК «Енергоатом», 2018. С.47-55.

## АНОТАЦІЯ

*Русінко П.М.* Контроль та прогноз утворення радіоактивних відходів діючих АЕС України. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.14.14 «Теплові та ядерні енергоустановки» - Науковий центр «Інститут ядерних досліджень» НАН України, Київ, 2021.

В роботі представлені результати автора щодо удосконалення контролю та прогнозу утворення радіоактивних відходів діючих АЕС України за трьома напрямками.

За напрямком «Встановлення радіаційної еквівалентності ВЯП реакторів типу ВВЕР-440 та ВАВ, отриманих після його переробки» були: для осклованих ВАВ від переробки ВЯП реакторів ВВЕР-440 за технологією «ПО «МАЯК» на основі розрахункових оцінок радіонуклідного складу для різних часів витримки, вперше обґрунтований перелік значимих при визначенні еквівалентності радіонуклідів, визначений критерій еквівалентності та розроблений алгоритм формування партії осклованих ВАВ для повернення в Україну; підібрані прості аналітичні функції які задовільно описують активність радіонуклідів у ВЯП реакторів ВВЕР-440, для різних значень початкового збагачення та вигоряння.

За напрямком «Прогноз обсягів РАВ від зняття з експлуатації енергоблоків з реакторами типу ВВЕР» були: вперше оцінені кількість та вартість захоронення РАВ від ЗЕ реакторів ВВЕР-440 та ВВЕР-1000, що стало основою планування поводження з РАВ при ЗЕ, розроблений алгоритм оптимізації графіків ЗЕ енергоблоків в рамках майданчиків АЕС.

За напрямком «Планування та контроль утворення експлуатаційних РАВ діючих АЕС» були: удосконалені контроль поводження з експлуатаційними РАВ АЕС в тому числі з боку міжнародних фінансових організацій і планування діяльності по поводженню з РАВ на окремих АЕС та у ДП «НАЕК «Енергоатом»; удосконалений алгоритм встановлення контрольних рівнів утворення РАВ на АЕС.

Отримані результати практично застосовані в галузі та сприяли удосконаленню системи прогнозу та контролю сфері поводження з РАВ діючих АЕС, ефективного функціонування якої забезпечує безпечне та ефективно поводження з РАВ АЕС, що є необхідною умовою безпечної експлуатації АЕС України.

Ключові слова: радіоактивні відходи, поводження з радіоактивними відходами, контрольні рівні утворення радіоактивних відходів, відпрацьоване ядерне паливо, радіонуклідний склад осклованих високоактивних відходів, критерій радіаційної еквівалентності, радіоактивні відходи від зняття з експлуатації, оптимізація сценаріїв зняття з експлуатації.

**ABSTRACT**

*Rusinko P.M.* Radioactive waste generation control and forecast of operating NPPs of Ukraine. - Manuscript.

The thesis for a candidate of technical sciences degree in specialty 05.14.14 «Thermal and nuclear power plants». – Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2021

The paper presents the results of the author on improving the radioactive waste generation control and forecast of operating NPPs of Ukraine in three areas.

In the direction of "Establishing the radiation equivalence of WWER-440 reactors spent fuel and HLW obtained from its processing" were: for vitrified HLW from WWER-440 SNF reprocessing by the "PO "MAYAK" technology basing on estimates the radionuclide composition at different holding times, for the first time substantiated the list of radionuclides significant for equivalence determining, determined the criterion of equivalence, developed the algorithm of vitrified HLW batch formation for return to Ukraine; selected simple analytical functions that satisfactorily describe the activity of radionuclides in the spent fuel of WWER-440 reactors, for different values of initial enrichment and combustion.

In the direction "Forecast of radioactive waste from power units with WWER type reactors decommissioning" were: for the first time estimated the amount and disposal cost of radwaste from WWER-440 and WWER-1000 reactors decommissioning which became the basis for decommissioning radwaste management planning; developed the algorithm for optimizing the schedules of power units decommissioning within the sites of Ukrainian NPPs.

In the direction of "Planning and control of operational radwaste generation of existing NPPs" were: improved the control of NPP operating radwaste management, including by international financial organizations, and planning of radwaste management activities at individual NPPs and at Energoatoms; improved algorithm for establishing control levels of radwaste generation at NPPs.

The obtained results were practically used in the branch, contributed to the improvement of the control and forecast system in the field of radwaste management of operating NPPs of Ukraine, which effective operation of ensures safe and efficient management of radwaste, that is a necessary condition for safe operation of Ukrainian NPPs.

**Key words:** radioactive waste, radioactive waste management, control levels of radioactive waste generation, radionuclide composition of vitrified high-level waste, spent nuclear fuel, radiation equivalence criterion, radioactive waste from decommissioning, optimization of decommissioning scenarios.