

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Білодіда Євгена Ігоровича

«Науково-технічні основи зменшення надлишкового консерватизму при аналізі безпеки ядерних установок»,

подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки

Дисертаційна робота Білодіда Є.І. присвячена обґрунтуванню можливості врахування ізотопного складу вигорілого ядерного палива при аналізі ядерної безпеки систем поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП). Завдяки зниженню надлишкового консерватизму, притаманного традиційному підходу до аналізу критичності, коли паливо вважається свіжим (невигорілим), розроблений Білодідом Є.І. підхід дозволяє збільшити кількість палива у системі поводження з ВЯП без зниження рівня ядерної безпеки і без додаткових матеріальних витрат, лише за рахунок врахування зміни концентрації ізотопів, що містяться у ВЯП.

Актуальність теми дисертаційної роботи. Враховуючи вищенаведене, робота Білодіда Є.І. у напрямку підвищення надійності та економічної ефективності експлуатації установок поводження з відпрацьованим ядерним паливом (ВЯП) є актуальною.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій. Дисертація є логічною та аргументованою науковою працею, виконаною з врахуванням сучасного рівня науки і техніки.

Ступінь обґрунтування наукових положень є досить високою та базується на використанні сучасних тривимірних розрахункових кодів, що пройшли відповідну верифікацію та валідацію на експериментальних даних. Також обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій,

сформульованих у дисертаційній роботі Білодіда Є.І., засновано на всебічному аналізі науково-технічної, нормативної документації, літературних джерел за проблематикою роботи, постановці мети і задач дослідження, використанні надійних методів досліджень, співставленні і критичному аналізі отриманих результатів, якісному формулюванні отриманих висновків.

Достовірність отриманих результатів забезпечена використанням апробованого математичного апарату і методик досліджень та підтверджена результатами виконання широкого спектра валідаційних розрахунків з використанням розроблених моделей систем поведження з ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК.

Новизна наукових положень, висновків і рекомендацій. Дисертаційна робота дозволила вирішити науково-технічну задачу, що є важливою як для відповідного напрямку науки, так і для практичних питань експлуатації ядерних установок, пов'язаних з поведженням з ВЯП.

Підтверджується, що в роботі міститься наукові положення і наукові результати, які раніше не захищалися, а саме:

– вперше для врахування вигорання ядерного палива при аналізі ядерної безпеки виконано комплексний аналіз всіх систем поведження з ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК в Україні;

– вперше обґрунтовано перелік ізотопів для подальшого використання при врахуванні глибини вигорання в аналізі ядерної безпеки систем поведження з ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК;

– вперше виконано дослідження впливу параметрів експлуатації і характеристик палива на ізотопний склад та розмножуючі властивості ВЯП, а також обґрунтування можливості використання середніх параметрів експлуатації палива шляхом врахування обмеженого переліку ізотопів у відпрацьованому паливі;

– вперше проведено дослідження впливу просторового розподілу

вигорання на розмножуючі властивості відпрацьованого палива та розроблено консервативні профілі розподілу вигорання для ТВЗ реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000;

– вперше виконано обґрунтування консервативності використання запропонованого набору ізотопів при виконанні аналізу ядерної безпеки систем поводження з ВЯП.

Загальна характеристика структури та змісту роботи. Дисертацію викладено українською мовою. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків і чотирьох додатків.

Роботу викладено на 166 аркушах, з них: 144 аркушів основного тексту і 12 аркушів додатків.

У вступі обґрунтовується актуальність теми, вказано поставлені мета і задачі досліджень, методи досліджень, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів. Наведено перелік наукових програм та планів, з якими тема дисертаційної роботи має зв'язок. Указано, яким чином відбувалась апробація дисертації та кількість публікацій з основними результатами роботи. Виділено особистий внесок дисертанта, щоправда, не вказано, де саме: у публікаціях чи у самій дисертаційній роботі.

У першому розділі дисертант навів огляд і виконав аналіз міжнародних та українських сучасних підходів та регулюючих вимог щодо врахування зміни ізотопного складу ядерного палива при обґрунтуванні безпеки.

На основі аналізу міжнародного досвіду використання глибини вигорання ядерного палива як фактору безпеки (англ. "burnup credit") та, виходячи з відсутності наукового обґрунтування (основи) та розробленого підходу до використання глибини вигорання палива під час аналізу ядерної безпеки систем поводження з ВЯП реакторів ВВЕР та РВПК, було запропоновано провести

розробку підходу врахування глибини вигорання ВЯП як фактору безпеки систем поведження з ВЯП.

Другий розділ присвячено вибору програмного коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант для розрахунку ізотопного складу й оцінки розмножуючих властивостей відпрацьованого ядерного палива, проведення валідації програмного коду і бібліотеки нейтронно-фізичних констант на існуючих експериментальних даних. Виконанню поставлених задач передувала розробка відповідних розрахункових моделей.

Для виконання досліджень, результати яких представлено в даній роботі, було обрано пакет розрахункових кодів SCALE, що є добре відомим та поширеним. Крім того, цей код містить інструменти для підготовки бібліотек перерізів, стандартні нейтронно-фізичні бібліотеки та коди для розрахунку ізотопного складу та властивостей паливних систем.

Дисертантом було оцінено величину максимальної похибки розрахунку k_{eff} як рівну 1,1%. При цьому, у висновках до цього розділу сам автор вказує на те, що цей отриманий ним у розділі 1 результат не рекомендується використовувати на практиці, що виглядає досить дивно.

Далі автором пропонується враховувати глибину вигорання для палива ядерних енергетичних установок з ВВЕР та РВПК не на основі достовірної оцінки всіх складових похибки визначення коефіцієнта розмноження нейтронів, як це поширено на практиці у країнах західної Європи, а при визначенні консервативних параметрів експлуатації ТВЗ у реакторі, консервативних параметрів виробництва палива, консервативного просторового розподілу вигорання.

У третьому розділі наведено детальний опис розробленого науково обґрунтованого підходу до врахування глибини вигорання ВЯП як фактору безпеки об'єктів поведження з ВЯП.

Сенс даного підходу полягає в обґрунтуванні використання в аналізі ядерної безпеки систем поводження з ВЯП обмеженого переліку ізотопів із багатьох наявних в опроміненому паливі. Обмеження кількості ізотопів дозволяє компенсувати можливі неточності визначення глибини вигорання і похибки визначення зміни ізотопного складу ВЯП у залежності від величини вигорання, а також дозволяє контролювати похибку визначення коефіцієнту розмноження нейтронів, що виникає внаслідок варіації умов експлуатації ТВЗ у реакторі, тобто, гарантує консервативність отриманих результатів. Додатковий консерватизм результатів розрахунків забезпечується використанням консервативних аксіальних розподілів вигорання.

Для визначення консервативного ізотопного складу ВЯП, зважаючи на критичність системи зберігання ВЯП, розглядався вплив на коефіцієнт розмноження нейтронів експлуатаційних та технологічних факторів. Автор наводить перелік цих факторів, для кожного з яких (у межах можливих його змін) визначалось значення, що призводить до збільшення $k_{\text{эф}}$ системи зберігання ВЯП. Ця сукупність величин складає консервативний набір параметрів виготовлення та експлуатації ТВЗ, що призводить до встановлення консервативного ізотопного складу ВЯП.

На підставі проведених розрахунків та аналізу міжнародного досвіду дисертант пропонує при визначенні розмножуючих властивостей ВТВЗ враховувати вміст наступних ізотопів (приймаючи до уваги вигорання, напрацювання і радіоактивний розпад): ^{235}U , ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , ^{241}Pu . У даному розділі також показано, що консерватизм, що полягає у використанні вище зазначеного переліку ізотопів, компенсує можливі неточності визначення глибини вигорання і похибки визначення зміни ізотопного складу ВЯП у залежності від вигорання, а також перевершує похибку визначення коефіцієнту розмноження нейтронів, яка виникає внаслідок варіації можливих умов експлуатації ТВЗ у реакторі.

Також у даному розділі було визначено консервативні розрахункові розподіли вигорання для ТВЗ реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000, що пропонується використовувати при виконанні аналізу безпеки. Зазначений підхід є менш трудомістким, ніж при використанні розрахункового розподілу вигорання, отриманого на основі даних програм підтримки експлуатації, та більш консервативним, тобто, забезпечує додатковий запас при обґрунтуванні ядерної безпеки відповідних ядерних систем.

Четвертий розділ присвячено застосуванню розроблених основ врахування глибини вигорання при аналізі ядерної безпеки систем зберігання і транспортування ВЯП в Україні.

Наведено детальний опис застосування розроблених основ врахування глибини вигорання при обґрунтуванні ядерної безпеки систем зберігання ВЯП на сховищах Запорізької АЕС (ЗАЕС) та Чорнобильської АЕС (ЧАЕС). Акти про використання результатів дисертації на ЗАЕС та ЧАЕС наведено в додатках Б та В до дисертації, відповідно.

П'ятий розділ присвячено можливим шляхам подальшого вдосконалення та розширення запропонованого підходу щодо врахування глибини вигорання ВЯП як параметра ядерної безпеки. Найбільш імовірним вдосконаленням цього підходу може бути розширення набору ізотопів, що враховуються при розрахунках розмножуючих властивостей ВЯП. Дисертантом виконано попередні дослідження щодо обґрунтування використання набору з 10 актинідів.

У Висновках конкретизовано отримані результати проведених досліджень.

Практичне значення результатів дисертаційного дослідження.

Результати виконаної дисертаційної роботи знайшли своє застосування на ЗАЕС та ЧАЕС при обґрунтуванні безпеки зберігання ВЯП у сховищах, що підтверджено відповідними актами з використання результатів роботи в експлуатуючих організаціях, а також виданим документом Державної інспекції з ядерного регулювання України, наведених у додатках Б, В та Г до дисертації.

Досвід використання розроблених науково-технічних основ дозволяє вважати, що результати роботи можуть бути застосованими також у інших системах поводження з ВЯП реакторів ВВЕР-1000 та РВПК-1000, а розроблені підходи та рекомендації можуть бути використаними при проведенні обґрунтування врахування глибини вигорання палива будь-яких реакторів.

Повнота відображення результатів дослідження в опублікованих працях і авторефераті. Результати роботи викладено у 14 публікаціях, з яких: 8 статей - у спеціалізованих фахових виданнях, що входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України, 1 з яких увійшла до бази цитування Scopus; та 4 – доповіді на наукових конференціях та нарадах. Основні положення дисертації повністю викладені в опублікованих роботах.

Автореферат написано українською мовою, він повністю відповідає дисертаційній роботі і включає всю необхідну для оцінки роботи інформацію. Містить всі основні положення висновки і рекомендації, що наведено в дисертації.

Зауваження до дисертаційної роботи

1) Актуальність, викладена у роботі, не зовсім відповідає проведеним дослідженням.

2) Мету роботи досягнуто не повністю. Не зрозуміло, яким чином автор взагалі планував провести «зменшення кількості радіоактивних відходів», і що

значить «кількість»? Якщо планувалося «зменшити обсяг РАВ», то це – нонсенс. Якщо ж малося на увазі активність, то після виконаних ним розрахунків активність РАВ буде чисельно більшою. Отже, мету роботи вже початково було сформульовано не зовсім коректно, тому і досягти її практично не є можливим.

3) Поставлені дослідницькі задачі місцями сформульовано некоректно, пропущено ключові слова, і тому за результатами проведених досліджень, деякі з них залишилися не виконаними. Так, задача 1: «1) аналіз сучасного досвіду використання глибини вигорання ядерного палива як фактору безпеки для реакторів PWR та BWR, розділ 1» є дивною, бо вся робота присвячена дослідженню поведження з ВЯП та аналізу безпеки систем поведження з ВЯП, а не експлуатації реакторів.

4) Об'єкт дослідження сформульовано некоректно, тобто, він не зовсім відповідає вимогам до об'єкту («проведення аналізу» не може бути об'єктом дослідження, об'єкт – це ВЯП). Це, скоріше, схоже на метод дослідження.

5) У «Методах досліджень» пунктом 4) вказано використання розрахункових кодів «ORIGEN-S» та «KENO-VI», а у самій роботі автор наголошує, що самостійно обрав код «SCALE», про який у «Методах досліджень» не має жодного слова. Також дивним є «методи абстрагування та узагальнення», особливо з науково-технічної точки зору.

6) У розділі «Публікації» вказано: «Матеріали, наведені в дисертації, містяться у 14 публікаціях, з яких 8 - у спеціалізованих фахових виданнях, які входять до переліку, затвердженого ДАК МОН України, та 5, які входять до бази цитування Scopus.». По-перше, фразу побудовано некоректно, по-друге, дане твердження не відповідає дійсності, оскільки журнал «Ядерна та радіаційна безпека» входить до наукометричної бази SCOPUS лише з 2012 р., а автор публікував свої статті з основними результатами дисертації в даному журналі з 2002 по 2012р., отже лише 1 з вказаних статей міститься у базі SCOPUS.

7) Зазначу, що як опубліковані роботи, так і їх апробація є дещо застарілими: перша – ще у 1999 р., остання – аж у 2012 р. Не зрозуміло, чому дисертант не захистив ці результати, коли вони були тільки отриманими та ще значно більш актуальними. Наразі, деякі із тверджень у роботі вже не відповідають дійсності (наприклад, на початку п.3.1.1, стор.53), оскільки за останні 10-15 років відбулися зміни як у технологіях, так методиках, інструкціях тощо.

8) З попереднього зауваження можна легко відслідкувати також невідповідність опублікованим результатам (останні – у **2012 р.**) та наведеним зв'язком виконання даної дисертації з розпорядженням Кабінету Міністрів України № 380-р від **7 червня 2017 року** "Про затвердження проекту "Будівництво централізованого сховища відпрацьованого ядерного палива реакторів типу ВВЕР вітчизняних атомних електростанцій". Також, у переліку розділу «Зв'язок роботи з науковими програмами, планами» мало бути вказаними як роки виконання зазначених НДР, так і особистий внесок дисертанта;

9) Таблиця 1.1 – відсутня (стор. 29).

10) Стор. 42, абзац 1: фраза «... був дозволений нормативними документами [66].» - посилання на одноосібну роботу наукового керівника, а не нормативний документ.

11) Оформлення багатьох таблиць та деяких рисунків не відповідає вимогам ДАК України до оформлення дисертаційних робіт.

12) У роботі по всьому тексті є наявними орфографічні та синтаксичні помилки, русизми (на кшталт «стержні» замість «стрижні»), а також дивно побудовані речення (тобто, пропущено слова чи навіть фрази), через що зрозуміти деякі речення дуже важко.

13) Автор інколи плутається у термінології. Так, по всьому тексті він називає «ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів» «коефіцієнтом

розмноження нейтронів». У меті зазначено «РАВ» замість «ВЯП», а це не є одним і тим же поняттям.

14) Загальне зауваження: автор дуже часто використовує займенники «я», «мною», підкреслюючи, що він зробив дослідження самостійно. Приймаючи до уваги наявність лише однієї одноосібної публікації з результатами дисертації, це є дивним, особливо, приймаючи до уваги, що після фраз:

- а). стор. 49, фраза «Мною було встановлено [84], що навіть при моделюванні таких складних систем як контейнер зберігання, похибка невизначеності завдання геометрії не перевищує 0.3% у $k_{\text{эф}}$.» - посилання на роботу у співавторстві з науковим керівником Ковбасенко Ю., причому дана робота не є наведеною у переліку публікацій основних результатів дисертації;
- б). стор. 52, фраза «Нижче наведені результати моїх досліджень для палива реакторів ВВЕР, які добре збігаються з представленими в публікаціях [72], [87], [88].» - посилання на одноосібні статті наукового керівника Ковбасенка Ю.П.;
- в). стор. 98, фраза «Методичні вказівки з виконання обґрунтування ядерної безпеки паливного завантаження ВКЗ ССВЯП з врахуванням глибини вигорання відпрацьованого ядерного палива 00.ОБ.УУ.МУ.09 [106], розроблені на основі виконаних мною досліджень і рекомендацій з врахування глибини вигорання відпрацьованого палива у аналізі безпеки систем поводження з вигорілим паливом.» – посилання на «Методические указания», тобто, не одноосібна робота, і перевірити чи був у ній внесок автора взагалі не є можливим;
- г). стор. 108, фраза «При врахуванні вигорання палива відповідно до розробленого мною підходу, розміщені стрижнів поглиначів по заданій у [111] схемі (рисунок 4.3) і заповненні контейнера водо-повітряною сумішшю оптимальної густини (1 г/см³) отримуємо...», -

посилання на [111] – посилання на «Техническое решение №03.ОБ.УУ.ТР.1732», тобто, не одноосібну роботу, і перевірити чи був у ній вклад автора взагалі не є можливим;

д). стор 110, фраза «Мною було виконано обґрунтування ядерної безпеки відсіків БВ АЕС України, що містять пенали СВДЗ, з врахуванням реальної геометрії розміщення ТВЗ і умов експлуатації БВ [113] і застосуванням врахування глибини вигорання палива.», - посилання на [113] та [114] – науково-технічний звіт якоїсь організації (посилання оформлено некоректно, без чіткої назви організації) та стаття, де серед співавторів немає дисертанта;

е). стор. 129, фраза «У 2010 році мною була розроблена комп'ютерна програма для визначення критичності відсіків басейну витримки СВЯП-1» - посилання на [133] та [134] – звіт з НДР (тобто, не одноосібна робота, і перевірити чи був у ній внесок автора не є можливим) та абстракт конференції, де серед співавторів немає дисертанта;

ж).стор. 135, фраза «Попередньо за мою участь вже було проведено порівняння...» - посилання на [72], [85], [86], [87], [88], [115] на одноосібні статті наукового керівника Ковбасенка Ю.П.;

та інші, тож це виглядає як мінімум дивно, та можна зробити висновок, що автор намагається захистити дослідження та результати, до яких сам не має відношення на рівні, що декларується.

15) Стор. 53, останній абзац містить фразу «...(середня температура по активній зоні, 285 °С)...», але середня температура у активній зоні складає 302 °С.

16) Стор. 54, фраза «При глибині вигорання ~ 20 МВт·діб/кгU стрижні СВП практично повністю вигорають за ^{10}B і вже не здійснюють помітного впливу на реактивність палива (див. рисунок 3.1).», але це – вже друга паливна кампанія, і стрижні СВП - відсутні у ТВЗ.

17) Стор. 54, фраза «Оскільки значна частина теплових нейтронів буде поглинатися стрижнями СУЗ/СВП, через більшу жорсткість спектра нейтронів ^{235}U буде вигоряти слабкіше, і тим більша його кількість, порівняно до ТВЗ без СУЗ/СВП, залишиться у паливі після вилучення з реактора, підвищуючи розмножуючі властивості відпрацьованого палива.». Бажано б було це показати, а саме: спектри нейтронів у ТВЗ з СВП, та без СВП.

18) Стор. 55, «Рисунок 3.1 – Вплив наявності стрижнів СВП у ТВЗ на k_{∞} в умовах експлуатації реактора (розрахунок чарунки з ТВЗ 4.4% збагачення при використанні середніх експлуатаційних параметрів з температур, потужності, густині теплоносія та концентрації борної кислоти)» є дивним, оскільки не є незрозумілим, як стрижні СВП впливають на $K_{\text{эф}}$ після вигорання у 15 МВт, якщо їх вже немає у ТВЗ.

19) Стор. 56, перший абзац, речення «Вважалось, що ВЯП знаходиться у неборованій воді нормальної густини (0.998 г/см³) з температурою 20 °С, що відповідає прийнятим умовам зберігання відпрацьованого палива.». Але температура завжди буде більшою за 20°C.

20) Стор. 57, третій абзац, речення «Як і було зазначено вище, розмножуючі властивості вивантаженого палива будуть тим вище, чим більша ефективність встановленого у ній поглинача.» є незрозумілим, оскільки стрижні всі є однаковими.

21) Стор. 58, підпис до рис.3.3: не має «води першого контуру», є теплоносієм першого контуру.

22) Стор. 59, перший абзац, речення «Це призведе до того, що на момент вивантаження палива з активної зони кількість ^{235}U збільшується, підвищуючи розмножуючі властивості відпрацьованого палива.» є некоректним: кількість не збільшується, а залишається більшою у порівнянні з...

23) Стор. 60, «Рисунок 3.4 – Залежність накопичення Хе-135 у відпрацьованому паливі від енерговиділення касети» - коректним є не накопичення, а рівноважна концентрація.

24) Стор. 61, третій абзац, речення: «Вплив енерговиділення на розмножуючі властивості відпрацьованого палива тільки за рахунок зміни концентрації ^{135}Xe наведено на рисунку 3.5.». Сам ^{135}Xe не буде впливати на $K_{\text{эф}}$ ВЯП. Необхідно навести дані, що вказують, за рахунок саме чого (Pu? . . .) можна наводити таке твердження.

25) Стор. 74: "Згідно формули Уїлкіса для двостороннього інтервалу з 95% імовірністю на рівні 95%..." є набором слів без глибокого розуміння сенсу даної фрази.

26) Стор. 108: "...заповнені контейнери водо-повітряною сумішшю оптимальної густини 1г/см^3 отримуємо..." - що це за нова фізика?

Розуміючи, як було б правильно висловити або переформулювати наявні положення дисертаційної роботи, можна відмітити, що наведені зауваження не псують позитивного враження від дисертації. В цілому, результати роботи здобувача мають логічно завершений характер.

Автореферат дисертації повністю відображає її зміст.

Висновок щодо відповідності дисертації вимогам ДАК МОН України

У підсумку, дисертаційна робота є суттєвою науковою доробкою в актуальному напрямку сучасної фізики, що містить нові та корисні результати.

Результати роботи опубліковано у провідних вітчизняних виданнях та апробовано на конференціях та семінарах. Автореферат дисертації адекватно передає її зміст та основні положення.

Тема дисертації є актуальною, наукові положення, висновки та рекомендації містять наукову новизну та є обґрунтованими і достовірними. Основні результати дисертації є впровадженими в практичну діяльність.

Аналіз публікацій дисертанта показує, що основні результати дисертації було отримано автором самостійно. Автореферат адекватно відображає зміст роботи.

Таким чином, на підставі актуальності теми дисертації, обґрунтованості її наукових положень і висновків, практичного значення і новизні здобутих результатів, вважаю, що дисертаційна робота «Науково-технічні основи зменшення надлишкового консерватизму при аналізі безпеки ядерних установок» повністю відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 і 13 "Порядку присудження наукових ступенів", затвердженого Постановою КМУ від 24 липня 2013 р. №567 (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ №656 від 19.08.2015 р., №1159 від 30.12.2015 р. та №567 від 27.07.2016 р.), які висуваються до кандидатських дисертацій, а її автор, Білодід Євген Ігорович, заслуговує на присудження йому наукового ступеня технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – теплові та ядерні енергоустановки.

Офіційний опонент,
завідувач кафедри ядерної фізики
фізичного факультету Київського
національного університету
імені Тараса Шевченка,
проф., доктор фіз.-мат. наук

І.М.Каденко

