

В. І. Борисенко\*, В. В. Горанчук, Д. І. Хвалін

Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: vborysenko@ispnpp.kiev.ua

**КРИТИЧНІСТЬ ПАЛИВОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ В ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ»**

У статті представлено результати проведеного аналізу обґрунтованості спрощень і припущень, які приймаються дослідниками в моделях нейтронно-фізичних характеристик паливовмісних матеріалів (ПВМ) в об'єкті «Укриття» (ОУ). Аналіз і обґрунтування ядерної безпеки ПВМ буде одним з важливих питань під час експлуатації ОУ ще тривалий час, аж до моменту вилучення і захоронення ядерних матеріалів зруйнованого у 1986 р. енергоблока № 4 ЧАЕС. Значна кількість ядерних матеріалів в ОУ знаходяться в неконтрольованому стані, а також є маловідомою геометрія розташування їх. Тому застосування традиційних методів аналізу ядерної безпеки для визначення умов досягнення критичності в об'ємі ПВМ може призводити до значних невизначеностей, залежно від припущень і спрощень, прийнятих у моделях ПВМ. На відміну від традиційних ядерних установок з проектними характеристиками і системами контролю, в ОУ відсутня можливість детерміновано впливати на ПВМ, а відповідно і визначати їхні динамічні характеристики. У таких умовах необхідно відповідально ставитися до отримання і інтерпретації результатів контролю параметрів ПВМ системами контролю ОУ. Так наприклад, у 1990 р. один з детекторів нейтронного потоку протягом ~100 год фіксував аномальну зміну в швидкості лічення нейтронних імпульсів. Цю подію часто називають «нейтронним інцидентом», і вона лягла в основу ряду моделей, в яких припускається можливість досягнення критичності в одному із скупчень ПВМ. У статті представлено результати дослідження щодо фізичної можливості аномальної події 1990 р., а також представлено результати аналізу спрощень і припущень у моделях критичності ПВМ. Важливим результатом проведеного дослідження є обґрунтування необхідності включення в моделі критичності ПВМ ефектів реактивності за температурою палива і води, а також враховувати нейтрони, що запізнюються.

*Ключові слова:* паливовмісні матеріали, об'єкт «Укриття», ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів, реактивність, ефекти реактивності, нейтронний інцидент, нейтрони, що запізнюються.

**1. Вступ**

Оцінка і обґрунтування ядерної безпеки паливовмісних матеріалів (ПВМ) об'єкту «Укриття» (ОУ) є одним з важливих питань як під час тривалого періоду післяаварійного моніторингу ПВМ (вже більше 38 років), так і при плануванні дій щодо поведінки з ПВМ при перетворенні ОУ в екологічно безпечну систему. Серед основних завдань при поведінці з ПВМ є забезпечення надійного моніторингу і контролю ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів  $K_{\text{ef}}$  в умовах можливих змін матеріального складу ПВМ і геометрії розташування ядерних матеріалів під час тривалого неконтрольованого зберігання.

У статті представлено результати аналізу залежності  $K_{\text{ef}}$  від матеріального складу і геометрії розташування ПВМ. При проведенні аналізу було

враховано експериментальні дані щодо таких важливих параметрів моделей критичності ПВМ як вміст ядерного палива в ПВМ, а також доступна вологоємність об'єму пор у ПВМ. Представлені результати, в яких продемонстровано обмеженість і необґрунтованість застосування в моделях динаміки нейтронних процесів у ПВМ спрощень [1 - 5], в яких не враховано зворотний зв'язок за важливими ефектами реактивності: температура палива, густина води, концентрація  $^{135}\text{Xe}$ .

**2. Загальна інформація про ПВМ в ОУ**

У табл. 1 наведено інформацію про кількість ядерного палива, що знаходилося в реакторному приміщенні енергоблока № 4 ЧАЕС станом на 26.04.1986 р. [6].

Таблиця 1. Кількість ядерного палива у реакторному приміщенні енергоблока № 4 ЧАЕС станом на 26.04.1986 р.

Тип ядерного палива	ТВЗ, од.	U, кг	$^{235}\text{U}$ , кг	$^{239}\text{Pu}$ , кг
Свіже ядерне паливо	48	5596,7	111,2	–
Опромінене ядерне паливо	1659	188400	1900	685,2
Відпрацьоване ядерне паливо	129	14637	134,4	56,9

Примітка. ТВЗ – тепловидільна збірка.

Перша оцінка кількості ядерного палива, що могло залишитися після аварії в зоні зруйнованого енергоблока № 4 в ОУ ~185 т була дана ще влітку 1986 р. [7, 8]. Найбільш небезпечним, з точки зору можливості досягнення умов критичності, вважається ядерне паливо у складі лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ), що знаходяться у приміщенні 305/2. Відповідно до [9] оціночна кількість урану в приміщенні 305/2 становить  $86 \pm 24$  т, нижня межа становить ~60 т, з яких 5,7 т – паливо у складі ТВЗ. Наведені дані щодо кількості ядерного палива в приміщенні 305/2 підтверджуються й іншими способами оцінки: високими радіаційними полями, високими тепловими потоками на границях місць скупчення ЛПВМ, що характерні тільки для значної кількості відпрацьованого ядерного палива ~ 80 т.

Для визначення можливості досягнення умов критичності в ЛПВМ необхідно дослідити матеріальний (хімічний) склад і межі його можливої зміни з часом, а також геометрію розташування ЛПВМ й інших компонентів будівельних конструкцій в ОУ. Відповідно до матеріального складу «сухих» ЛПВМ у вигляді і чорної, і коричневої керамік будь-які скупчення їх є глибоко підкритичними [7, 9].

Можливість потрапляння у ЛПВМ ефективного сповільнювача, наприклад води, призведе до збільшення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів. При застосуванні консервативних умов у моделі дослідження критичності в ЛПВМ можна отримати і досягнення критичності [1 - 4]. Такі зони в ЛПВМ будемо називати – критично можливі зони (КМЗ) або зони критмасового ризику [5].

Тому для підтвердження ядерної безпеки ЛПВМ в ОУ необхідно проводити ґрунтовні дослідження моделей критичності скупчень ЛПВМ на основі фактично підтверджених даних щодо матеріального складу і геометрії розташування скупчень ЛПВМ.

Першою інформаційною системою ОУ був комплекс «Шатер», який було введено в експлуатацію у 1987 р. В автоматичному режимі проводилася реєстрація щільності потоку нейтронів (ЩПН), потужності експозиційної дози (ПЕД) гамма-випромінювання, температури і густини теплових потоків. Датчики комплексу «Шатер» були розташовані в доступних для встановлення місцях можливого розташування ПВМ.

Для детального визначення місць розташування ЛПВМ в ОУ у 1987 р. було прийнято рішення про буріння дослідницьких свердловин. Бурильні роботи було розпочато у 1988 р. Перші свердловини було просвердлено саме у приміщенні 305/2. Схема розташування свердловин

представлена у [7, 8]. Станом на 1992 р. загальне число свердловин становило ~150 од. [8]. При визначенні місць розташування ЛПВМ у свердловинах розміщувалися детектори нейтронів, ПЕД, температури і густини теплових потоків. Таким чином, виникла потреба в накопиченні і систематизації отриманої інформації, що і було реалізовано в новій інформаційно-вимірвальній системі (ІВС) «Фініш».

У червні 1990 р. в ІВС «Фініш» вже було реалізовано реєстрацію ЩПН за допомогою п'яти детекторів. Схему розміщення детекторів нейтронів наведено на рис. 1 [7]:

- два в реакторному просторі – канали 46 та 48;
- один у приміщенні 305/2, ПРК – канал 45;
- один у приміщенні 304/3 – канал 50;
- один у свердловині 3.11.ж [7, 8].

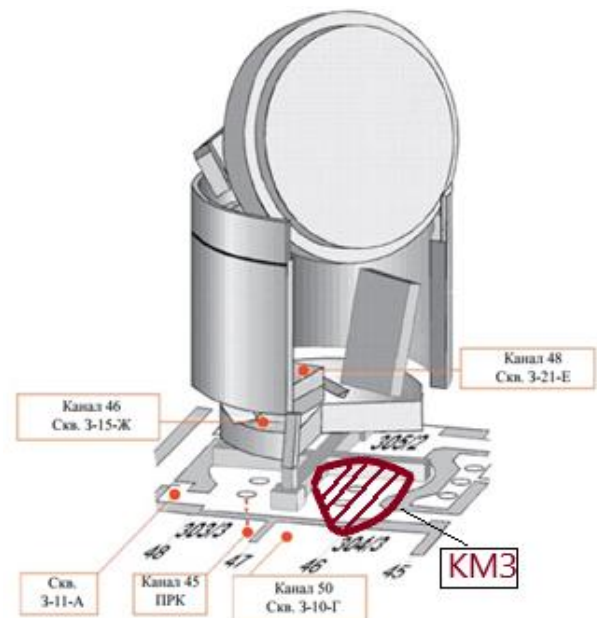


Рис. 1. Схема розміщення детекторів нейтронів ІВС «Фініш» у 1990 р. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Після роботи вимірвального каналу протягом декількох місяців у тестовому режимі його переводили у режим стаціонарних вимірювань у ІВС «Фініш» [10].

Дослідження підкритичності проводилися пасивними і активними методами [7]. Пасивні методи дали оцінку підкритичності  $K_{\text{эф}} < 0,4$ , а активні –  $K_{\text{эф}} < 0,7$ . В активному методі використовувалося штучне джерело нейтронів на основі каліфорнію, інтенсивністю  $2 \cdot 10^7$  н/с.

### 3. Аномальна подія при реєстрації нейтронного потоку в одному з каналів ІВС «Фініш»

Після встановлення 16 червня 1990 р. детектора нейтронів КНТ-31 у вимірвальний канал 50

(свердловина 3-10-Г, прим. 304/3, див. [7]) і підключення до ІВС «Фініш» почалися події, які пізніше назвуть «нейтронним інцидентом» («НІ»).

Вже 19 червня 1990 р. було зафіксовано перші недостовірні покази детектора каналу 50 [11]. Причини збою обладнання так і не були з'ясовані. 25 - 29 червня 1990 р. швидкість лічення у каналі 50 продовжувала збільшуватися і перевищила «звичайний» рівень у ~60 разів.

Протягом 19 - 29 червня 1990 р. проводився пошук причин аномальної поведінки каналу 50:

- перевірено всі елементи вимірювального каналу;
- у свердловині було розташовано штучне джерело нейтронів – відгук детектора очікуваний;
- у свердловині було розташовано додатковий нейтронний детектор – було підтверджено збільшення швидкості лічення.

Причини аномальної поведінки каналу 50 так і не було з'ясовано.

На рис. 2 наведено зареєстровані у період 27 - 30 червня 1990 р. результати швидкості лічення детектора нейтронів у каналі 50. На рисунку маркерами ( $\Delta$ ) позначено експериментальні значення, занесені оператором ІВС «Фініш» до журналу реєстрації. При роботі вимірювального каналу 50 у тестовому режимі оператор заносив дані до журналу реєстрації кожні 2 год тільки під час денної зміни з 9:00 до 19:00 год (див. рис. 2). Особливістю роботи ІВС «Фініш» можна назвати її роботу у сеансовому режимі, а саме запис інформації здійснюється декілька разів на добу [12]. Тому не виключено, що однією з можливих причин аномальної поведінки каналу 50, є вплив людського чинника. Наприклад, протягом більше 20 год з 28 на 29 червня 1990 р. зафіксовано однакові значення кількості зафіксованих імпульсів, а саме 14 імпл/с, у каналі 50 ІВС «Фініш» (див. рис. 2).

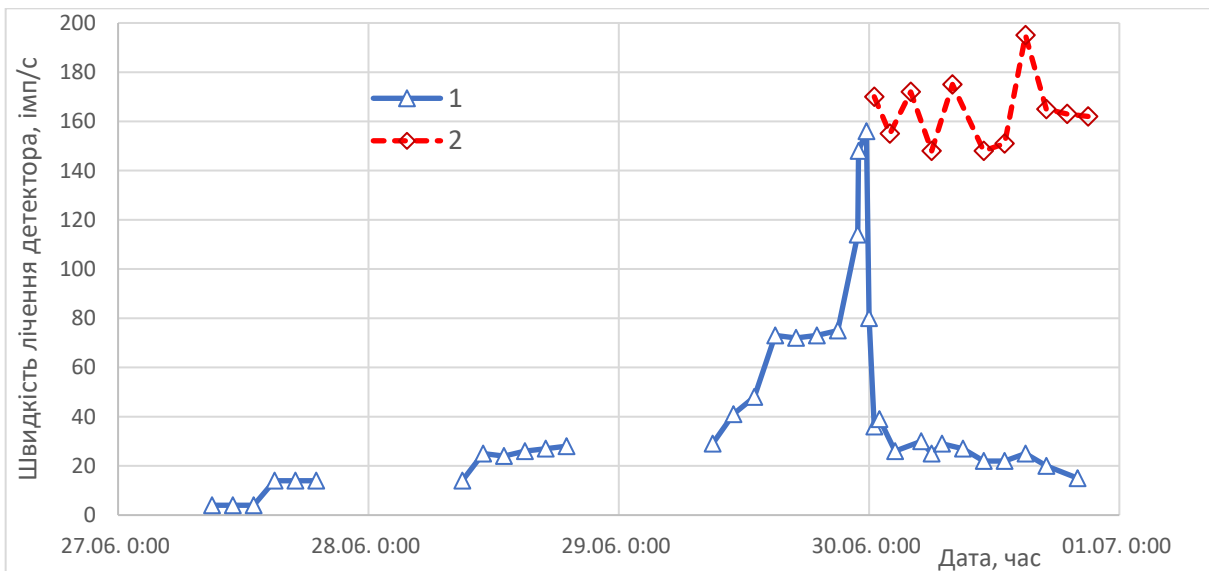


Рис. 2. Швидкість лічення по каналу 50. 1 - маркер  $\Delta$  – експериментальні значення, 2 - маркер  $\diamond$  – відновлені дані. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Саме в цей час проводилися пошуки причин аномальної поведінки каналу 50, але жодного відображення в зареєстрованій інформації ці факти не знайшли. Розміщення зовнішнього джерела нейтронів [7] і додаткового детектора в трубі каналу 50, звісно, могли призвести до зміни положення як самого детектора нейтронів, так і його компонентів: парафінового утеплювача, кадмієвого екрану. Такі можливі зміни у фактичній геометрії розташування детектора у каналі 50 могли вже призвести до суттєвої зміни ефективності детектора в геометрії каналу 50. У роботі [13] наведено експериментальні дані щодо зміни ЩПН у каналах іонізаційних камер ВВЕР-1000 на ~70 % залежно від місця установки детектора у каналі.

За даними [11], о 23:37 29 червня 1990 р. і о 00:50 30 червня 1990 р. у приміщення 304/3, де

розташовано детектор нейтронів каналу 50, було злито 1 %-ний розчин гадоліній-нітрату, результатом чого стало зниження швидкості лічення детектора нейтронів (див. рис. 2). Саме зареєстровані дані щодо швидкості лічення детектора нейтронів каналу 50 29 - 30 червня 1990 р. стали основою багатьох гіпотез і моделей, які саме і називають «НІ». Розглянемо різні факти щодо фізичної можливості і обґрунтованості «НІ».

А. Канал 50 з детектором нейтронів КНТ-31 було встановлено за ~10 діб до подій, що розглядаються. Який на той час був офіційний статус вимірювального каналу 50: він міг знаходитися тільки в режимі тестових вимірювань. Як відомо з [10], вимірювальний канал переводився у режим стаціонарних вимірювань ІВС «Фініш» тільки після тривалої (декілька місяців) роботи у тестовому режимі.

вому режимі. Вище вже було відзначено, що аномальна поведінка каналу 50 почалася практично після його встановлення 16 червня 1990 р., а тому інформація каналу 50 ще не могла бути внесена до регламентів і інструкцій з експлуатації систем ОУ. Офіційний статус метрологічно атестованої системи ІВС «Фініш» отримала тільки у 1992 р. [10].

Б. Збільшення швидкості лічення у більш ніж 60 разів у каналі 50 жодним чином не вплинуло на інформацію з інших нейтронних детекторів як самої системи «Фініш» (див. рис. 1), так і комплексу «Шатер». Детектори комплексу «Шатер» розташовано, у тому числі, в практично «порожній» шахті реактора, а тому знаходяться в зоні вільного прольоту для нейтронів з ЛПВМ, що знаходяться на границі приміщень 305/2 і 304/3.

В. У багатьох роботах, наприклад, [1 - 5], припускається, що зареєстровані 29 - 30 червня 1990 р. результати свідчать про досягнення критичності у КМЗ і навіть про тривалу (декілька годин) роботу в режимі осциляцій і потужності, і критичності. У такому випадку, на таку подію, як працююча критична збірка, мали б відреагувати не тільки нейтронні детектори, а і детектори ПЕД гамма-випромінювання. Кількість детекторів ПЕД у радіусі до 5 м від КМЗ до  $\sim 5$  од., і жоден з детекторів на цю подію не відреагував.

Таким чином, наведені факти щонайменше свідчать про помилкову роботу каналу 50, а віднесення подій 29 - 30 червня 1990 р. до так званого критичного або «НІ» практично не підтверджено іншими каналами вимірювань різних інформаційних систем ОУ.

Одним з аргументів, які висуваються на підтвердження авторами гіпотези про досягнення критичності у КМЗ, є осциляції потужності, що вдалося встановити після процедури відновлення даних каналу 50 після його блокування від нейтронів КМЗ розчином гадоліній-нітрату 30 червня 1990 р. Один з прикладів «відновлених» даних наведено у [14]. На рис. 2 також представлено відновлені дані пунктирною лінією, маркер  $\diamond$ .

Процедура відновлення даних може бути прийнятна у випадку доступу до достовірної інформації про фактичну поведінку нейтронного потоку у моделі, якої на жаль немає: всі інші детектори навколо КМЗ жодним чином на «подію» не відреагували. Фактичні дані щодо нейтронного потоку у КМЗ могли зменшитися, залишитися незмінними або збільшитися. Автори відновлення напевно припустили, що нейтронний потік у КМЗ залишився на тому ж рівні, а відбулося тільки екранування розчином гадоліній-нітрату нейтронів КМЗ від детектора нейтронів каналу 50. Але таке припущення нічим не підтверджено.

Наприклад, у схожому «інциденті» у січні 1996 р. швидкість лічення по нейтронному каналу

після стрімкого збільшення у  $\sim 7$  разів також стрімко і зменшилася [10] без будь-якого зовнішнього впливу. Існують і багато інших прикладів аномальної або помилкової роботи вимірювальних каналів, які були відносно не тривалими [10].

Щодо самих «відновлених осциляцій», які становлять  $\sim 10 - 15\%$  від рівня сигналу, можна констатувати, що така зміна «нейтронної потужності» у КМЗ не може бути доказом досягнення критичного стану в КМЗ, а тим більше її переходу з надкритичного стану у підкритичний і навпаки. Для того, щоб це довести, перш за все підтвердимо, що системи нейтронного контролю, розташовані в зоні шахти реактора, є достатньо чутливими і адекватно реагують на зміну нейтронної активності ЛПВМ.

Для свердловини 3.9.Е (див. рис. 3.17 із [7]) ЩПН становить  $300 \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$  поблизу «критичного» скупчення ЛПВМ, а на відстані приблизно 3 - 4 м становить  $\sim 20 - 15 \text{ н/см}^2\cdot\text{с}$  відповідно [7]. Тому припущення у роботах [1 - 3] про те, що нейтронний детектор, розташований на відстані декількох метрів від скупчення ЛПВМ, «не бачить» зміни ЩПН у 7 - 8 порядків не знаходять експериментального підтвердження. До того ж, навіть якщо прийняти таку «можливість», то амплітуда коливань сигналу детектора нейтронів має бути співставна, а саме прямо пропорційна амплітуді коливань нейтронного потоку у моделі [1 - 3] у декілька порядків, а не  $\sim 10\%$  відповідно до «відновлених осциляцій» (див. рис. 2). Тому один з висновків з роботи [3]: «розраховані розмножуючі властивості ПВМ для великої кількості моделей ПВМ (для деяких з цих моделей розрахунки потоків нейтронів збігаються з експериментальними даними)» – є необґрунтованим.

Товщина шару ЛПВМ у КМЗ  $\sim 1$  м, тому нейтрони витоку з такої розмножувальної системи будуть становити  $\sim 10\%$  і більше від їхньої загальної кількості у системі. Детектори нейтронів і гамма-випромінювання, які розташовані на відстані до 5 м від КМЗ, а також інші детектори, що знаходяться в шахті реактора, будуть спроможні надійно зафіксувати збільшення нейтронного потоку в КМЗ навіть на  $\sim 1$  порядок, не кажучи вже про 7 - 8 порядків.

Для порівняння наведемо інформацію про АКНП ВВЕР. У реакторах ВВЕР детектори нейтронів АКНП розташовані в каналах бетонного захисту на відстані  $\sim 1,2$  м від периферії активної зони. На шляху нейтронів до детекторів АКНП знаходяться:

- $\sim 15$  см залізо-водяного захисту (вигородка, внутрішньокорпусна шахта реактора);
- $\sim 15$  см водного розчину борної кислоти з концентрацією  $\sim 16 \text{ г/кг}$ ;



- 15 см металу корпусу реактора;
- ~60 см повітряного простору з ~10 см теплоізоляції бетону біологічного захисту;
- ~10 см серпентинітового бетону

і це «все» не заважає надійно контролювати нейтронну потужність реактора в діапазоні від  $10^{-10}$  до 100 % від номінальної потужності. Загальне ослаблення становить ~5 порядків, але це не заважає вимірювати нейтронний потік, а саме нейтрони витокують з реактора, в усьому вищезазначеному діапазоні.

Збільшення у 1,5 - 2 рази нейтронного потоку по деяких каналах контролю після встановлення комплексу НБК-Арка в проектне положення [15] зовсім не свідчить про те, що десь у зонах КМЗ нейтронний потік вже збільшився на 5 - 7 порядків.

#### 4. Нейтронно-фізична і теплова моделі скупчень ЛПВМ

Розглянемо інші можливості з оцінки характеристик нейтронно-фізичних і теплових процесів у КМЗ. Проведемо оцінку впливу вимушеного поділу в КМЗ на її теплові характеристики. Для такого розгляду приймемо, що залишкове енерговиділення на червень 1990 р. становило ~790 Вт/т U, а нейтронна активність за каналом спонтанного поділу актинідів становить ~13 н/с·г U [7].

Припустимо, що у сухому стані КМЗ ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів  $K_{\text{эф}} \sim 0,5$ , а під час «інциденту»  $K_{\text{эф}} \sim 0,9999$ , що призведе до збільшення щільності нейтронів у КМЗ у ~5000 разів, і згідно із законом зворотного множення, кількість нейтронів буде становити 130 000 н/с·г U. І навіть якщо всі нейтрони візьмуть участь у вимушеному поділі ізотопів ядерного палива, то додаткова потужність енерговиділення буде становити  $(130000 \cdot 200 \text{ MeV}) = 4,2 \text{ мкВт/г U}$ .

Порівняно з потужністю залишкових енерговиділень ядерного палива зруйнованого блока, яке становить 790 мкВт/г U, є очевидним, що для того, щоб вплинути на тепловий стан ядерного палива в КМЗ, кількість нейтронів у системі має збільшитися хоча б у ~100 000 разів, що неодмінно буде (або було б) зафіксовано системами контролю в ОУ.

Таким чином, автори гіпотез і припущень щодо можливості досягнення у червні 1990 р. умов критичності в КМЗ не мають ні експериментальних, ні теоретичних фактів того, що така подія може залишитися непоміченою десятками вимірювальних каналів нейтронного потоку і ПЕД, розташованих навколо КМЗ. Більш того, ними припускається, що додаткова потужність КМЗ від вимушеного поділу ядерного палива призводила до

періодичного переведення КМЗ у надкритичний і підкритичний стани. Саме осциляції надкритичного і підкритичного станів КМЗ, які виникають за рахунок потрапляння сторонньої води в КМЗ і «виходу» води з КМЗ за рахунок її кипіння при переході КМЗ у надкритичний стан, лягли в основу досліджень «закритичного» стану КМЗ [1 - 5].

Розглянемо інші експериментальні факти на підтвердження малої ймовірності процесів можливого потрапляння води в КМЗ приміщення 305/2, а, відповідно, і можливості переведення КМЗ у критичний і надкритичний стани.

Першим розглянемо фактичні дані щодо температури ЛВПМ у КМЗ.

Для визначення максимальної температури ЛПВМ у КМЗ скористаємося такою моделлю: будемо вважати, що перепад температур між зовнішньою поверхнею КМЗ і її центральною частиною (де максимум температури) прямо пропорційний питомому енерговиділенню. Аналогічна модель є коректною і при визначенні середньої температури ядерного палива в твелах ядерних реакторів залежно від температури теплоносія (зовнішня поверхня твела) і питомого енерговиділення у самому твелі [16].

У роботі [8] представлено зведені на листопад 1988 р. дані експериментально вимірюваних температур у майбутніх вимірювальних каналах, при бурінні свердловини максимальна температура в ЛПВМ становила 200 °С. Питоме енерговиділення на 30 листопада 1988 р. (949 доба після аварії) становило ~1620 Вт/т U, а на 30 червня 1990 р. (1536 доба після аварії) – ~790 Вт/т U [7]. Приймаючи зовнішню температуру повітря навколо КМЗ ~40 °С, результат модельного обчислення максимальної температури у середині КМЗ на червень 1990 р. дає ~120 °С. Такий результат свідчить про неможливість потрапляння води в середину КМЗ. У запропонованій моделі температура в центрі КМЗ упаде до 100 °С у серпні 1991 р. – через 1950 діб з моменту аварії.

До того ж можна відзначити, що і самі прибічники моделі «НІ», у роботі [11] на с. 78 визнають, що: «Температура скупчення знизилася і перевищувала 100 °С тільки в ядрі скупчення».

Таким чином, при неможливості потрапляння води у центральну частину КМЗ, точніше у частину КМЗ з максимальним вмістом палива, а відповідно і максимальною потужністю залишкових енерговиділень, фізично неможливо досягти умов критичності у 1990 р.

Додатково наведемо фактичні дані щодо фізичної можливості води «проникати» у пори ЛПВМ, враховуючи, що експериментальне визначення загального об'єму пор є складною задачею, а для практичного застосування важливим є показник доступної пористості ЛПВМ [10].

У моделях прибічників «НІ» для досягнення критичності в КМЗ необхідно, щоб вода займала ~25 - 30 % загального об'єму ЛПВМ [5 - 9]. У роботі [10] наведено результати експериментального визначення доступної вологості коричневих і чорних лавоподібних матеріалів – керамік. Коричневі ЛПВМ мають більш доступний об'єм пор для води, до 10 %, порівнюючи з чорними ЛПВМ, для яких доступний об'єм пор для води становить ~4 %. Також необхідно відзначити, що процес водопоглинання у кераміці відбувається дуже повільно, за ~0,2 год заповнюється ~20 % доступного об'єму пор, а за наступні ~1000 год заповнюється ~90 - 95 % доступного об'єму пор [10].

Таким чином, експериментальні дані щодо доступної вологості коричневих ЛПВМ, які складають основу КМЗ з найбільшим вмістом урану, також свідчать про додаткові фізичні перешкоди для створення умов, за яких у вільний об'єм ЛПВМ (об'єм, який займають пори) може потрапити вода у достатній кількості, більше ~25 %, для створення умов для ефективного сповільнення нейтронів і досягнення умов критичності у КМЗ.

І, наостанок, один з основних фактів, що перешкоджає реалізації умов для досягнення критичності в КМЗ, це дані експериментально визначеного хімічного складу коричневих і чорних ЛПВМ, що наведено у табл. 2 [7].

Таблиця 2. Елементний склад ЛПВМ [7]

Кераміка	Елементний склад ЛПВМ у вигляді кераміки, %									
	Si	U	Ca	Zr	Al	Na	Mg	Mn	Cr	B
Коричнева	30,0	10,9	4,9	4,8	4,2	4,0	3,6	0,9	0,41	0,065
Чорна	28,0	6,4	4,5	4,0	4,0	3,9	3,0	0,31	0,26	0,045

Досягнення критичності у реальній геометрії КМЗ для коричневої ЛПВМ з максимальним вмістом урану до 10 % мас. і оптимальної кількості води можливо тільки у «чистій» суміші ядерного палива і води. Додавання ж у розмножуючу систему тільки SiO<sub>2</sub> у відповідній кількості (див. табл. 2) не дає змоги досягти умов критичності. Зрозуміло, що включення у модель фактичного складу коричневої кераміки (кальцію, магнію, марганцю тощо) переведе розмножувальну систему в гарантовано підкритичний стан. Для того, щоб обійти таку «перешкоду», висунуто гіпотезу про можливість утворення у середині КМЗ достатнього об'єму з підвищеним вмістом урану більше ~40 - 50 %. І саме така «серцевина» КМЗ, що оточена коричневими ЛПВМ, дає змогу досягти умов критичності [1 - 5]. Однак, станом на 2024 р. відсутні дані експериментальних вимірювань, в яких вміст урану становить більше 10 %.

Додатково можна оцінити радіаційні наслідки гіпотетичного «НІ».

При загальній кількості актів вимушеного поділу у КМЗ, яка оцінена у 10<sup>18</sup>, буде утворена велика кількість продуктів поділу, серед яких і критично-важливі радіоактивні благородні гази, ізотопи йоду, цезію. Для оцінки приймемо, що вихід кожного з ізотопів становить ~1 % (в дійсності, для деяких більше у рази). Перелічені продукти поділу є газоподібними і легколетючими, тому вони можуть легко вийти з ЛПВМ, пронизаних порами. Таким чином, протягом декількох годин «НІ» в ОУ додатково утворилося тисячі кюри

газоподібної активності, яку не помітили системи радіаційного контролю ні ОУ, ні ЧАЕС, ні зони спостереження при чутливості систем контролю ~1 Бк/м<sup>3</sup>.

Додатково розглянемо інші припущення прибічників самої гіпотези «НІ», а також модельного дослідження «НІ», які є сумнівними або потребують додаткового обґрунтування.

1) У моделі [1 - 3] запропоновано визначати макропереріз поділу розмножуючого середовища лінійною залежністю від кількості води у ЛПВМ [1], формула (7), без обґрунтовуючих пояснень. Для моделей ЛПВМ досягнення критичності теоретично можливе тільки при досягненні теплового спектра нейтронів у ЛПВМ. За таких умов  $\Sigma_f$  – макропереріз поділу ЛПВМ буде визначатися тільки  $\sigma_f$  – мікроперерізами поділу і  $N$  – концентрацією подільних елементів <sup>235</sup>U і <sup>239</sup>Pu, при відповідній температурі середовища. Відповідно до класичного визначення макроперерізу  $\Sigma_f = \sigma_f \cdot N$ .

2) У роботі [4] запропоновано модель визначення ЩПН –  $\phi$  і потужності вимушеного поділу –  $Q$  у підкритичній системі, на прикладі КМЗ з ЛПВМ. У підкритичній системі з  $K < 1$  можна визначити ЩПН, якщо відомо потужність внутрішніх джерел нейтронів  $S$ . Для ЛПВМ це будуть нейтрони спонтанного поділу паливних ізотопів, а також нейтрони, утворені у результаті ( $\alpha, n$ )-реакцій на легких ядрах (див. табл. 2).

Таким чином,  $\phi = n \cdot v = S \cdot l \cdot v / (1 - K_{\text{eff}})$ , де  $n$  – щільність нейтронів;  $v$  – швидкість нейтрона;  $l$  – час життя миттєвих нейтронів, а не ефективний час життя всіх нейтронів – миттєвих нейтронів і нейтронів, що запізнюються, як запропоновано у

[4]. Нейтрон, що запізнюється, бере участь у створенні ЩПН тільки після вильоту нейтрона з ядра-попередника, і нейтрон, досягнувши теплової енергії з  $v = 2,2 \cdot 10^5$  см/с, буде взаємодіяти з ядрами середовища практично протягом того ж часу, що і миттєві нейтрони. Відповідно потужність вимушеного поділу можна визначити як  $Q = q \cdot \Phi \cdot \Sigma_f$ , де  $q$  – енерговиділення при поділі одного ядра – 200 МеВ. При  $l = 10^{-3}$  с і вихідних даних, використаних вище, а саме  $S = 13$  н/с·г U,  $K_{\text{эф}} = 0,9999$ , отримуємо, що  $Q = 1,4$  мкВт/см<sup>3</sup> ПВМ або  $Q = 4,2$  мкВт/г U. Така оцінка потужності вимушеного поділу корелює з оцінкою, отриманою вище, що підтверджує коректність запропонованих моделей оцінки потужності вимушеного поділу у підкритичному реакторі.

Аналогічне припущення щодо часу життя нейтронів прийнято і в моделі [1 - 3]: так у формулі (1) наведено залежність від часу життя нейтронів з урахуванням нейтронів, що запізнюються, а при визначенні початкових умов (формула (4)) – тільки миттєвих. Також необхідно зазначити обмеженість застосування формули (1) у [1] для визначення динамічної поведінки нейтронів у точковій моделі ядерного реактора. Таке наближення застосовується для незначних відхилень від критичного стану точкової моделі ядерного реактора при  $|\rho| < \beta$ , де  $\beta$  – частка нейтронів, що запізнюються.

При значному відхиленні від критичного стану  $\rho < -10\beta$  похибка суттєво збільшується – більше 20 % [17]. А використання формули (1) у стані ядерного реактора з  $|\rho| < \beta$  без урахування доданків від нейтронів, що запізнюються – є взагалі неприйнятним, навіть для якісних оцінок.

Припущення у формулі (3) з [1] – про однакову зміну температури ЛПВМ і води теж необхідно обґрунтувати. Важливим питанням до застосовності запропонованої моделі є підтвердження її адекватності і можливості застосування для аналізу нейтронно-фізичних процесів у розмножуючих середовищах, або в ядерних реакторах. Основні обмеження моделі є наслідком не включення в модель нейтронно-фізичних процесів у ЛПВМ: нейтронів, що запізнюються; зворотного зв'язку за температурою палива; зворотного зв'язку за температурою (густиною) води; зворотного зв'язку за концентрацією <sup>135</sup>Xe, перелічені найбільш важливі для моделі.

Наприклад, накопичення <sup>135</sup>Xe при довготривалій роботі об'єкта моделювання у критичному (надкритичному) стані при ЩПН у діапазоні  $10^{12}$  -  $10^{18}$  н/см<sup>2</sup>·с (див. рис. 9, 10 з [1]) призведе до накопичення <sup>135</sup>Xe у кількості, що суттєво вплине на розмножуючі властивості ЛПВМ, а саме зміна в значенні  $K_{\text{эф}}$  буде більше  $\sim 2$  %. Відповідно, результати, отримані для випадків з  $\rho_{\text{max}} < 0,005$

(див. рис. 8, 9 з [1]), будуть нерепрезентативними і помилковими. Аналогічне зауваження стосується і результатів, представлених у [1] (рис. 2 - 7) або на аналогічних рисунках у [2, 3].

Також до недоліків моделі можна віднести нефізичні результати моделювання, наведені на рис. 5 - 7, 10 з [1]. Діапазон модельних значень ЩПН  $10^{15}$  -  $10^{30}$  н/см<sup>2</sup>·с. Друга половина зазначеного діапазону навіть перевищує значення ЩПН в епіцентрі ядерного вибуху. При таких значеннях ЩПН визначальним для моделі буде зміна ізотопного складу палива в ЛПВМ, яка не включена в модель. Так наприклад, для коричневої кераміки з вмістом урану  $\sim 10$  %, за 1 с поділиться половина <sup>235</sup>U при ЩПН  $\sim 8,6 \cdot 10^{20}$  н/см<sup>2</sup>·с, а для переведення в підкритичний стан достатньо зменшити концентрацію <sup>235</sup>U на  $\sim 10$  %. При збагаченні ядерного палива за <sup>235</sup>U менше 1 % критичність у водному сповільнювачі не досягається в оптимальному гетерогенному реакторі. Таким чином, у процесах, які тривають більше 100 - 1000 с (рис. 5 - 7 з [5]), і при вказаних потоках нейтронів можна констатувати не тільки неможливість досягнення критичного стану, а і взагалі наявність ядер <sup>235</sup>U в моделі, концентрація яких зменшується у рази за декілька секунд.

З наведених фактів можна констатувати, що для обґрунтування коректності моделі нейтронно-фізичних процесів у ПВМ, необхідно надати аргументи, що підтверджують не тільки простоту моделі, а, перш за все, що показують можливість моделі адекватно описувати фізичні процеси, і що отримані результати не протирічають фізичному сенсу.

3) Наведемо ілюстрацію важливості врахування в моделях критичності ядерного реактора зворотних зв'язків: обмежимося тільки температурними ефектами за температурою води і палива. Моделювання проведемо на моделі [18], яка підтвердила свою коректність для опису, у тому числі, і швидкоплинних реактивнісних процесів в ядерних реакторах.

На рис. 3 представлено залежності зміни потужності ядерного реактора при введенні позитивної реактивності зі швидкістю  $10^{-4}$  β/с для трьох різних комбінацій у значеннях коефіцієнта реактивності за температурою води (КРТВ) і коефіцієнта реактивності за температурою палива (КРТП).

На рис. 4 представлено залежності зміни потужності ядерного реактора при введенні негативної реактивності зі швидкістю  $-10^{-4}$  β/с, також для трьох різних комбінацій у значеннях КРТВ і КРТП. Значення КРТВ і КРТП наведено у підписах до рисунків.

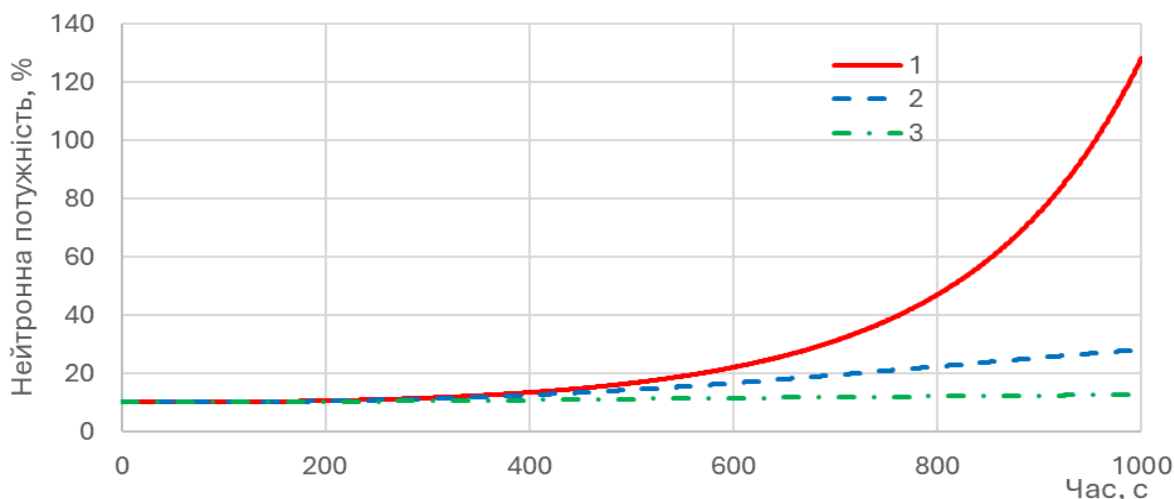


Рис. 3. Зміна нейтронної потужності ядерного реактора при введенні реактивності зі швидкістю  $+10^{-4} \beta/s$ . 1 – КРТВ=0, КРТП = 0; 2 – КРТВ= $+10^{-5} \%/K$ , КРТП= $-10^{-4} \%/K$ ; 3 – КРТВ= $-10^{-5} \%/K$ , КРТП= $-10^{-4} \%/K$  (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

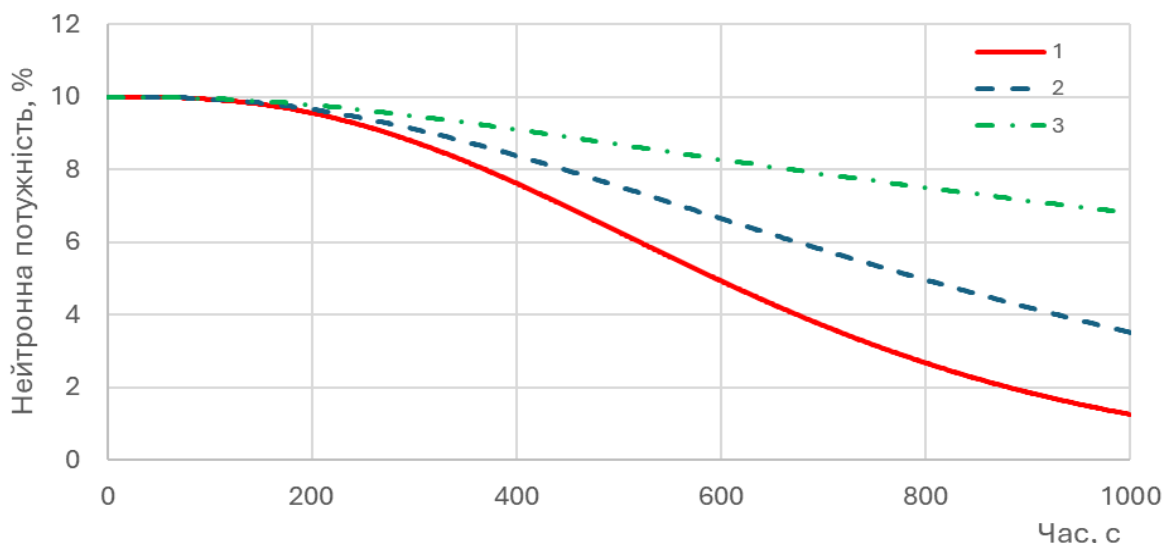


Рис. 4. Зміна нейтронної потужності ядерного реактора при введенні реактивності зі швидкістю  $-10^{-4} \beta/s$ . 1 – КРТВ=0, КРТП = 0; 2 – КРТВ= $+10^{-5} \%/K$ , КРТП= $-10^{-4} \%/K$ ; 3 – КРТВ= $-10^{-5} \%/K$ , КРТП= $-10^{-4} \%/K$  (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Значення КРТВ і КРТП обрано на їхніх практично мінімальних за абсолютною величиною значеннях. Навіть у цьому випадку відмінності у нейтронній потужності у моделі без зворотних зв'язків і у моделі зі зворотними зв'язками відрізняється у приблизно 3 - 12 разів тільки за перші 1000 с процесу, що моделюється.

Таким чином, показано, що використання моделей для опису зміни нейтронно-фізичних характеристик ПВМ без зворотних зв'язків є необґрунтованим.

### 5. Висновки

Отже, можна зробити такі висновки щодо фактів, які не підтверджують гіпотезу про «НІ» 29 - 30 червня 1990 р.:

1. Гіпотеза «НІ» базується на даних реєстрації тільки з одного вимірювального каналу 50 ІВС

«Фініш». Для більш ніж 10 детекторів нейтронного потоку і ПЕД, що розташовані навколо КМЗ, подія «НІ» залишилася без будь-якого відгуку, що є неможливим при збільшенні витоку нейтронів і гамма-квантів з КМЗ у мільйони разів. Відповідно, сигнал каналу 50 не може свідчити про досягнення критичності у КМЗ як за рівнем сигналу, так і за його динамікою.

2. Температура ЛПВМ у центральній частині КМЗ на червень 1990 р. була більше  $100^\circ C$ , що перешкоджає потраплянню води в центральну частину КМЗ, а відповідно відсутнє ефективне сповільнення нейтронів і неможливо досягти умов критичності.

3. Вологоємність ЛПВМ становить до 10 % від загального об'єму коричневих ЛПВМ, а для ефективного сповільнення необхідно більше 25 %, тому умови критичності у КМЗ не досягаються.



4. Фактичний хімічний склад ЛПВМ «вимагає» для досягнення критичності у КМЗ, щоб вміст урану був більше, ніж приблизно 40 - 50 %, однак, відсутні дані експериментальних вимірювань для ЛПВМ, в яких вміст урану становить більше 10 %.

5. У моделях критичності [1 - 5] не враховано нейтрони, що запізнюються, а також зворотні ефекти за температурою палива і води; ефект за концентрацією  $^{135}\text{Xe}$ , що суттєво впливає на результати моделювання, а відповідно, отримані у [1 - 5] результати є не обґрунтованими.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. В.А. Бабенко, В.Н. Павлович. Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие». *Ядерна фізика та енергетика* 18(3) (2017) 254. / V.A. Babenko, V.N. Pavlovych. Study of ignition possibility, development and properties of self-sustaining nuclear chain reaction in the fuel-containing masses of the object “Ukryttya”. *Nucl. Phys. At. Energy* 18(3) (2017) 254. (Rus)
2. В.А. Бабенко, В.Н. Павлович. Изучение свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие» в случае переменной скорости поступления воды. *Ядерна фізика та енергетика* 19(1) (2018) 21. / V.A. Babenko, V.N. Pavlovych. Study of the properties of self-sustaining nuclear chain reaction in the fuel-containing masses of the “Ukryttya” object for the case of varying velocity of water inflow. *Nucl. Phys. At. Energy* 19(1) (2018) 21. (Rus)
3. В.А. Бабенко, В.Н. Павлович. Про можливість самопідтримної ланцюгової реакції поділу в об'єкті «Укриття» на теперішній час. *Ядерна фізика та енергетика* 24(3) (2023) 239. / V.M. Pavlovych, V.A. Babenko. On the possibility of the self-sustaining nuclear chain reaction inside the “Shelter” object at the present time. *Nucl. Phys. At. Energy* 24(3) (2023) 239. (Ukr)
4. Е.Д. Высотский, Р.Л. Годун. Нейтронная активность скоплений лавообразных топливосодержащих материалов на 4-м блоке ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 25 (2015) 108. / E.D. Vysotsky, R.L. Godun. Neutron activity of lava-like clusters of fuel-containing materials on the fourth Chernobyl unit. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl* 25 (2015) 108. (Rus)
5. В.А. Бабенко и др. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 9 (2008) 36. / V.A. Babenko et al. Modelling of mass and geometrical parameters of a aggregation of fuel containing materials in the southeast part of a premise 305/2 destroyed 4-th unit Chernobyl NPP. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl* 9 (2008) 36. (Rus)
6. Отчет по этапу 1 договора № 19-М ОС/95 от 07.07.95 «Состояние ядерной, радиационной и экологической безопасности объекта «Укрытие» (Москва: «Курчатовский институт», 1995) 232 с. / Report on the 1st stage of the contract No. 19-М ОС/95 dated 07.07.95 “The state of nuclear, radiation and environmental safety of the facility “Shelter” (Moskva: “Kurchatov Institute”, 1995) 232 p. (Rus)
7. Р.В. Арутюнян и др. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС (Москва: Наука, 2010) 241 с. / R.V. Arutyunyan et al. Nuclear Fuel in the “Shelter” Object of the Chernobyl NPP (Moskva: Nauka, 2010) 241 p. (Rus)
8. А.А. Боровой, Е.П. Велихов. *Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»)*. Ч. 1 (Москва: «Курчатовский институт», 2012) 168 с. / A.A. Borovoi, E.P. Velikhov. *The Experience of Chernobyl (Work at the “Shelter” Object)*. Part 1 (Moskva: “Kurchatov Institute”, 2012) 168 p. (Rus)
9. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации: Отчет МНТЦ «Укрытие». Арх. № 3836 (Чернобыль, 2001) 337 с. / Analysis of the current safety of the “Shelter” object and predictive assessments of the development of the situation: Report of the ISTC “Shelter”. Archival No. 3836 (Chornobyl, 2001) 337 p. (Rus)
10. *Объект «Укрытие» – 10 лет. Основные результаты научных исследований* (Чернобыль: МНТЦ «Укрытие», 1996) 188 с. / “Shelter” Object – 10 years. *Main Results of Scientific Research* (Chornobyl: ISTC “Shelter”, 1996) 188 p. (Rus)
11. А.А. Ключников и др. *Объект «Укрытие» 1986 - 2011. На пути к преобразованию* (Чернобыль: Институт проблем безопасности АЭС, 2011) 288 с. / A.A. Klyuchnikov et al. “Shelter” Object: 1986 - 2011. *On the Way to Transformation* (Chornobyl: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, 2011) 288 p. (Rus)
12. А.А. Ключников и др. *Объект «Укрытие» 1986 - 2006* (Чернобыль: Институт проблем безопасности АЭС, 2006) 168 с. / A.A. Klyuchnikov et al. “Shelter” Object: 1986 - 2006 (Chornobyl: Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, 2006) 168 p. (Rus)
13. А.М. Березовец и др. О пространственном распределении нейтронов в каналах ионизационных камер реакторов типа ВВЭР. Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика и техника атомных реакторов» 8 (1987) 74. / A.M. Berезovets et al. Neutron space distribution in VVER ionization chamber channels. *Problems of Atomic Science and Technology. Series “Physics and Technology of Nuclear Reactors”* 8 (1987) 74. (Rus)
14. Е.Д. Высотский и др. Нейтронно-физические характеристики ядерно опасных скоплений топливосодержащих материалов. *Проблеми безпеки*

- атомних електростанцій і Чорнобиля 12 (2009) 93. / E.D. Vysotsky et al. Neutron-physical characteristics of nuclear dangerous accumulations of fuel contained materials. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl* 12 (2009) 93. (Rus)
15. O.V. Mykhailov et al. Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter object after the new safe confinement commissioning. *Nuclear Power and the Environment* 2(27) 2023 44.
  16. В.І. Борисенко. Коментар до статті: В. І. Скалозубов, І. Л. Козлов, Ю. О. Комаров, О. О. Чулкін, О. І. Піонтковський. Аналіз ядерної безпеки при диверсифікації паливних збірок Westinghouse на ВВЕР-1000. *Ядерна фізика та енергетика* 21(2) (2020) 210. / V.I. Borysenko. Comment on the article: V. I. Skalozubov, I. L. Kozlov, Yu. A. Komarov, O. A. Chulkin, O. I. Piontkovskyi. Analysis of nuclear safety in diversification of Westinghouse fuel assemblies at WWER-1000. *Nucl. Phys. At. Energy* 21(2) (2020) 210. (Ukr)
  17. В.И. Борисенко. Что необходимо определять: период или реактивность реактора? *Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля* 13 (2010) 8. / V.I. Borysenko. That is it necessary: to determine period or reactivity of reactor? *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl* 13 (2010) 8. (Rus)
  18. В.И. Борисенко, В.В. Горанчук. Определение консервативных параметров модели реактора для исследования переходных режимов работы ВВЭР-1000. *Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля* 20 (2013) 28. / V.I. Borysenko, V.V. Goranchuk. Determination of conservative parameters of model of reactor for research of transient of VVER-1000. *Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl* 20 (2013) 28. (Rus)

**V. I. Borysenko\*, V. V. Goranchuk, D. I. Khvalin**

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: vborysenko@ispnpp.kiev.ua

#### **CRITICALITY OF FUEL-CONTAINING MATERIALS IN THE “SHELTER” OBJECT**

The article presents the results of the analysis of the validity of simplifications and assumptions accepted by researchers in the models of neutron-physical characteristics of fuel-containing materials (FCM) in the “Shelter” object (SO). The analysis and substantiation of the FCM nuclear safety will be one of the important issues during the SO operation for a long time, until the moment of retrieval and disposal of nuclear materials from the ChNPP Unit 4 destroyed in 1986. A significant number of nuclear materials in the SO are uncontrolled, and the geometry of their location is also little known. Therefore, the use of traditional methods of nuclear safety analysis to determine the conditions for reaching criticality in the volume of FCM can lead to significant uncertainties, depending on the assumptions and simplifications made in FCM models. In contrast to traditional nuclear facilities with design characteristics and control systems, there is no possibility to deterministically influence the FCM, and accordingly to determine their dynamic characteristics in the SO. In such conditions, it is necessary to take a responsible approach to obtain and interpret the values of FCM parameters by control systems of the SO. For example, in 1990, one of the neutron flux detectors recorded an abnormal change in the neutron pulse count rate for about 100 hours. This event is often called a “neutron incident”, and it formed the basis of some models, in which the possibility of reaching criticality in one of the FCM clusters is assumed. The article presents the results of the study on the physical possibility of the anomalous event in 1990, as well as the results of the analysis of simplifications and assumptions made in models of FCM criticality. An important result of the conducted research is the justification of the need to include in the FCM criticality model the effects of reactivity on fuel and water temperature, as well as to take into account delayed neutrons.

*Keywords:* fuel-containing materials, “Shelter” object, effective neutron multiplication factor, reactivity, reactivity effects, neutron incident, delayed neutrons.

Надійшла / Received 20.01.2024