

В. М. Павлович<sup>1</sup>, В. А. Бабенко<sup>2,\*</sup><sup>1</sup> Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна<sup>2</sup> Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова НАН України, Київ, Україна

\*Відповідальний автор: pet2@ukr.net

ПРО МОЖЛИВІСТЬ САМОПІДТРИМНОЇ ЛАНЦЮГОВОЇ РЕАКЦІЇ ПОДІЛУ  
В ОБ'ЄКТІ «УКРИТТЯ» НА ТЕПЕРІШНІЙ ЧАС<sup>a</sup>

На основі нових сучасних даних відносно стану паливовмісних мас (ПВМ) об'єкта «Укриття», а також беручи до уваги нейтронний інцидент 1990 р. і фізичні властивості ПВМ об'єкта «Укриття», розглянуто можливість виникнення та розвитку самопідтримної ланцюгової ядерної реакції поділу у ПВМ. Показано, що осушення ПВМ може призвести до виникнення одинарного нейтронного сплеску з амплітудою, порівняною з амплітудою нейтронних осциляцій 1990 р. Показано також, що амплітуда сплеску може бути зменшена, якщо збільшити швидкість осушення ПВМ. Оцінки показують, що такий сплеск не вплине на навколишнє середовище.

*Ключові слова:* самопідтримна ланцюгова ядерна реакція, паливовмісні маси, потік нейтронів.

## 1. Вступ

У 1990 р. всередині об'єкта «Укриття» стався нейтронний інцидент. Суть його полягала у збільшенні густини потоку нейтронів усередині підреакторних приміщень з подальшим переходом у режим коливань потоку нейтронів. Відповіді на питання про кінцеву точку цього інциденту немає, тому що детектори нейтронів були штучно екрановані примусовим zalиванням приміщення 304/3 розчином гадолінію. Тепер зрозуміло, що початок і розвиток самопідтримної ланцюгової ядерної реакції (СЛР) могли відбуватися тільки всередині приміщення 305/2, оскільки основні скупчення ядерного палива розташовані всередині цього приміщення. Зауважимо, що в той час у районі Чорнобиля спостерігалися великі опади.

Оскільки всі чисельні розрахунки критичних властивостей чорнобильських паливовмісних мас (ПВМ) об'єкта «Укриття» (ОУ) показують суттєву залежність реактивності системи від кількості води в ПВМ, то весь первинний приріст відліку детектора нейтронів протягом перших трьох днів інциденту, а отже, і зростання густини нейтронного потоку в приміщенні 305/2 має бути викликаний зростанням реактивності від деякого великого негативного оціночного значення  $\rho_0 \cong -(3 \div 4)$  до майже нульового значення. Незабаром після цього почався режим коливань потоку нейтронів. І саме наявність режиму коливань дає змогу припустити перехід системи в надкритичний стан безпосередньо після початку нейтронного інцидента.

Приблизно в цей же час, хоч і з незначною затримкою, спрацьовують механізми придушення ланцюгової реакції. Існують два природних механізми, що призводять до зменшення кількості води всередині системи в міру зростання потоку нейтронів, а саме, випаровування води та радіоліз води. Обидва механізми продовжують працювати одночасно і призводять до однакових наслідків, тобто до видалення води із системи. Нижче ми розглянемо лише перший механізм зменшення об'єму води, а саме – випаровування води з підвищенням температури системи. Вплив механізму радіолізу раніше розглядався в наших роботах для аналізу аварії на заводі з виробництва ядерного палива у Токаймура (Японія).

Варто відзначити, що залежність реактивності від кількості води має виражений максимум, так що із зростанням кількості води система послідовно проходить три стани: підкритичний з малою кількістю води, надкритичний та підкритичний з великою кількістю води, який можна назвати «закритичним».

Останнім часом після остаточного зведення нового безпечного конфайнменту (НБК) всередині ОУ спостерігається поступове повільне підвищення густини потоку нейтронів. У той же час, із свердловин, пробурених у безпосередньому околі ПВМ з найбільшим вмістом палива, припинився витік води. Для того, щоб зрозуміти можливий подальший розвиток подій, необхідно проаналізувати результати моніторингу ПВМ за весь час інструментального спостереження за фізичними властивостями ПВМ.

© В. М. Павлович, В. А. Бабенко, 2023

<sup>a</sup> Представлено на XXIX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України, Київ, 26 - 30 вересня 2022 р.

Отже, історія починається у 1990 р., коли вперше з 1986 р. в одному з підреакторних приміщень ОУ почали спостерігати підвищення густини потоку нейтронів (рис. 1) [1, 2]. Детектор було розташовано у приміщенні 304/3 на поверхні застиглої лави. Це приміщення є паророзпо-

дільчим коридором, що знаходиться поряд (через бетонну стінку) з безпосередньо підреакторним приміщенням 305/2, де знаходяться основні небезпечні скупчення паливних мас (схему розташування приміщень ОУ і паливних мас можна подивитись, наприклад, у [3]).

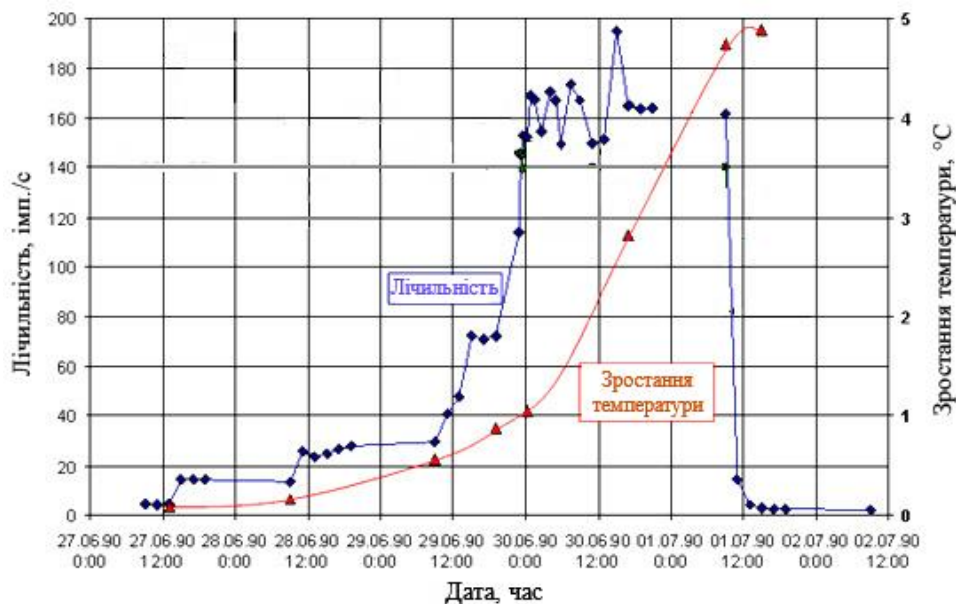


Рис. 1. Часова залежність кількості відліків детектора нейтронів (ромби) і зростання температури системи (трикутники) протягом п'яти діб 1990 р. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Розглянемо детальніше показники детектора нейтронів. Перші три доби спостерігалось поступове монотонне підвищення кількості відліків детектора, після чого почалися коливання кількості відліків зі змінною зростаючою амплітудою. Далі, після добової перерви, показники детектора швидко впали практично до значень, що спостерігалися до інциденту. Як відомо, ця перерва була зумовлена тим, що персонал ОУ вилив у приміщення 304/3, де був розташований детектор, велику кількість розчину гадолінію, що фактично заекранувало детектор нейтронів. Таким чином, нам невідомо чим закінчився нейтронний інцидент.

Найбільшу увагу на рис. 1 привертають коливання кількості відліків нейтронного детектора. Сама наявність коливань густини потоку нейтронів вказує на те, що система знаходиться поблизу критичного стану – під час переходу в надкритичний стан завдяки зростанню реактивності виникає СЛР, і з деякою затримкою виникає механізм, що гасить ланцюгову реакцію. Система переходить у підкритичний стан, де механізм гасіння СЛР зникає, але продовжують працювати механізми, що ведуть до збільшення реактивності і система знову переходить у надкритичний стан і т.д.

На рис. 1 наведено також значення змін температури. Покази температурного датчика не є

досить інформативними з точки зору розуміння процесу, хоча запізнення максимуму температури по відношенню до осциляцій на декілька діб вказує на значну віддаленість місця розташування датчика температури від області виникнення СЛР.

Зазначимо також, що значення реактивності системи, які були розраховані за точковою моделлю реактора з постійною реактивністю, нами було вилучено з первісного варіанту рис. 1, взятого з роботи [1], оскільки вони, з нашої точки зору, є невірними і на них можна не зважати.

Повернемося до показів детектора нейтронів і спробуємо з'ясувати, чим може бути викликане збільшення реактивності ПВМ. Численні розрахунки розмножуючих властивостей ПВМ (див., наприклад, [3 - 8]) вказують на те, що реактивність лавоподібних поруватих паливних мас ОУ суттєво залежить від кількості води в системі, причому ця залежність є немонотонною з вираженим максимумом в околі 25 - 30 об. % води всередині ПВМ [5]. Цю залежність поблизу максимуму можна апроксимувати квадратичною залежністю, чим ми і будемо користуватися надалі. Квадратична залежність поряд з фактом переходу у надкритичний стан, зафіксованим на рис. 1, означає, що існують два значення вмісту води у системі, які відповідають реактивності  $\rho = 0$ , а саме  $m_1$  і  $m_2$  (будемо вважати  $m_1 < m_2$ , де  $m$

– відносна кількість води в одиниці об'єму ПВМ). Така залежність також означає, що існують дві підкритичні області відносно кількості води у ПВМ: з малою кількістю води  $m < m_1$  і з великою кількістю води у системі  $m > m_2$ . Другу область можна назвати «закритичною», оскільки між двома підкритичними областями знаходиться область надкритичності з  $m_1 < m < m_2$ .

Зважаючи на те, що у 1990 р., через 4 роки після аварії, температура ПВМ уже була нижче 100 °С, а також згадуючи, що в районі Чорнобиля перед інцидентом спостерігалися великі опади, а також беручи до уваги, що покрівля ОУ містила велику кількість отворів (навіть після численних ремонтів перед зведенням НБК у покрівлі ОУ було близько 1000 м<sup>2</sup> отворів) можна стверджувати, що первинне збільшення реактивності було зумовлене надходженням води всередину ПВМ. Після досягнення критичного значення  $m = m_1$  всередині ПВМ починається СЛР, яка призводить до двох ефектів, що гасять ланцюгову реакцію, а саме випаровування води і радіолізу води. Пара і продукти радіолізу швидко видаляються з ПВМ, реактивність падає до підкритичних значень і ланцюгова реакція припиняється. Але не припиняється надходження води, і чергове зростання реактивності призводить до чергового нейтронного сплеску.

При сталому надходженні води такі процеси можуть повторюватися нескінченно довго. Але експеримент показує, що коливання густини нейтронного потоку припинилися приблизно через добу, причому за минулі роки (більше 30 років) такі коливання не спостерігалися. Принципово можливі два шляхи закінчення інциденту. Перший шлях, коли надходження води припиняється, і система переходить у підкритичну область з малою кількістю води, тобто система повертається практично у початковий стан. У такому разі можливим є повторення інциденту, оскільки дощі у районі Чорнобиля є доволі частими. Другий шлях, навпаки, полягає у збільшенні надходження води, яка не встигає випаровуватися, і система переходить у закритичний стан, тобто у підкритичний стан з великою кількістю води. У цьому стані система може знаходитися нескінченно довго, якщо забезпечити хоча б незначне підживлення водою. У ОУ таке підживлення забезпечувалося як дощами, так і конденсацією вологи під час періодичних змін температури. Треба зазначити також, що всі ці роки із свердловин, які пробурені у багатьох місцях навколо найбільш небезпечних скупчень ПВМ, витікала тепла вода. Через деякий час після зведення НБК витікання води із свердловин припинилося.

З рис. 1 видно, що кількість відліків детектора (що пропорційна густині потоку нейтронів у місці розташування детектора) за три доби збільшилася приблизно на два порядки. В той же час, з наших попередніх розрахунків (див., наприклад, [6, 7], а також рис. 2 - 4 даної статті) видно, що з початку заливання системи водою до виникнення СЛР густина потоку нейтронів збільшується приблизно на 7 - 8 порядків. Зауважимо, що СЛР виникає у ПВМ, які розташовані в приміщенні 305/2 у пропаленій підреакторній плиті під шаром свіжого бетону. Разом із цим детектор нейтронів розташований у приміщенні 304/3 на поверхні тонкого шару ПВМ. За оцінками потік нейтронів на шляху від максимуму розподілу, що розташований в центрі «зони критичності» (а саме цю величину дає моделювання), ослаблюється до приміщення 304/3 на 8 - 10 порядків. Іншими словами, зростання густини потоку нейтронів у центрі «зони критичності» на 8 порядків ніяк не може вплинути на покази нейтронного детектора. І тільки кінцеве зростання нейтронного потоку на приблизно два порядки призводить до зростання відліків детектора нейтронів. Зауважимо також, що точних кількісних розрахунків густини потоку нейтронів у місці розташування детектора зробити практично неможливо, оскільки невідомою залишається величезна кількість параметрів, як геометричних, так і фізичних, які визначають перебіг СЛР.

Таким чином, найбільш імовірним станом, у якому ПВМ перебували всі роки після інциденту 1990 р., є закритичний стан, або підкритичний стан з великою кількістю води. І для того, щоб спрогнозувати нейтронну поведінку паливних мас у нових умовах після зведення НБК, необхідно розробити математичну модель, здатну хоча б якісно описати нейтронний інцидент 1990 р., і зрозуміти чим нинішні умови відрізняються від тих, у яких ОУ перебував усі роки після нейтронного інциденту 1990 р.

## 2. Математична модель

Нейтронна кінетика ПВМ в умовах надходження води досліджувалася нами в роботах [4, 5, 7, 9], де була розроблена математична модель для опису цих процесів. Основою цієї моделі є система кінетичних рівнянь, які описують зміну у часі кількості нейтронів, температури, реактивності й кількості води у системі. Зміна густини нейтронів у часі описується за допомогою рівняння точкової моделі реактора із змінною у часі реактивністю з урахуванням зовнішнього джерела нейтронів. В якості зовнішнього (по відношенню до процесів поділу ядер палива) джерела нейтронів у ПВМ можна вважати нейтрони спонтанного

поділу деяких трансуранових елементів, а також нейтрони від  $(\alpha, n)$ -реакції, що дають приблизно однакову кількість. Нейтрони, які запізнюються, було враховано зміною ефективного часу життя нейтронів.

Рівняння для зміни температури є рівнянням енергетичного балансу – енергія, що виділяється під час поділу ядер палива, витрачається на нагрівання ПВМ і води з урахуванням процесів теплопередачі, а також на випаровування води, причому ми вважаємо, що випаровування відбувається виключно за рахунок кипіння при температурі вище  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . Процесів радіолізу води у даній роботі ми не враховуємо, тому що якісно вони призводять до тих же ефектів, що і кипіння води.

Кількість води у системі змінюється за рахунок надходження води із зовнішнього середовища з постійною або змінною швидкістю  $v$  і за рахунок випаровування води під час кипіння. Швидкість випаровування  $(dm/dt)_{ev}$  вважається постійною, хоча зрозуміло, що вона зростає з температурою. Це зростання якісно не впливає на протікання СЛР, але тільки пришвидшує повернення у підкритичний стан під час осциляцій. Швидкість надходження води  $v$  із зовнішнього середовища за рахунок дощів не може бути постійною протягом декількох діб, хоча враховуючи те, що основні скупчення ПВМ знаходяться під завалами і шарами бетону, у деякому наближенні її можна вважати постійною, оскільки довгий шлях від покрівлі до ПВМ може згладжувати зміни в інтенсивності дощів. Тим не менш, варто також розглянути і зміну швидкості надходження води під час процесу розвитку СЛР. Тому в деяких розрахунках ми вважали, що швидкість надходження води змінюється стрибкоподібно у деякий момент часу від одного постійного значення  $v_1$  до іншого  $v_2$ .

Зміна реактивності у часі відбувається за рахунок зміни кількості води у системі, причому ця залежність є квадратичною, як ми вже зазначали. Крива залежності  $\rho(m)$  перетинає вісь  $\rho = 0$  у двох точках  $m_1$  і  $m_2$ . Величини  $m_1$  і  $m_2$  визначити з експерименту неможливо, також неможливим є їхнє достовірне обчислення, оскільки моделі ПВМ, за допомогою яких проводиться обчислення їх розмножуючих параметрів, містять велику кількість невідомих характеристик (геометрія, нуклідний склад, розташування і кількість палива у ПВМ і таке інше (див., наприклад, [3, 4]). Але з достатньою ймовірністю з обчислень можна визначити кількість води, з якою реактивність ПВМ є максимальною (25 - 30 об. %), оскільки вона є прибли-

зно однаковою для різних моделей. Це дає нам орієнтир для визначення  $m_1$  і  $m_2$ .

Взагалі, якісно результати обчислень слабо змінюються під час зміни більшості параметрів, що входять у рівняння математичної моделі [7, 9]. Основні якісні зміни відбуваються під час зміни параметрів  $v$ ,  $(dm/dt)_{ev}$ ,  $m_1$  і  $m_2$ , і залежать від співвідношення між ними. Наприклад, зрозуміло, що коливання густини потоку нейтронів можуть виникнути тоді, коли швидкість випаровування є більшою, ніж швидкість надходження води. Також, при фіксованій початковій реактивності, збільшення  $m_2$  відносно  $m_1$  призводить до збільшення  $\rho_{max}$ , а отже до пришвидшення розвитку СЛР.

### 3. Результати розрахунків

Розрахунки показують, що залежно від значень параметрів моделі можливі різні режими (моди) розвитку ланцюгової реакції у ПВМ. Це – одинарний нейтронний імпульс (спалах), послідовність нейтронних імпульсів, нейтронні осциляції з постійною або змінною амплітудою. Розглянемо більш детально кожний з цих режимів.

Одинарний нейтронний імпульс за наявності постійного надходження води у систему ( $v = \text{const}$ ) можливий тільки у випадку, коли швидкість заливання водою є настільки великою (або запас реактивності  $\rho_{max}$  є настільки малим), що за час перебування у надкритичному стані вода не встигає випаровуватись, і система переходить у закритичний стан. Іншими словами, швидкість надходження води в систему повинна бути більшою, ніж швидкість випаровування. У закритичному стані, тобто підкритичному стані з великою кількістю води, система може перебувати безмірно довго, поки є надходження води. Скоріше за все, ПВМ перебували у такому стані увесь час після інциденту 1990 р., оскільки із свердловин, які були пробурені у місця розташування ПВМ, увесь час витікала вода. Типовий приклад одинарного нейтронного імпульсу наведено на рис. 2.

Якщо розглядати чисельні розв'язки системи рівнянь при інших значеннях параметрів, зокрема при малих швидкостях заливу, то також можна побачити залежності, схожі на одинарний нейтронний спалах. Але такий випадок не є реальним одинарним спалахом, а являє собою окремий імпульс із послідовності нейтронних імпульсів. Дійсно, за наявності постійного надходження води навіть з малою швидкістю після випаровування води у первинному імпульсі і переходу у сухий підкритичний стан вода знову буде накопичуватись у системі до переходу в надкритичний стан із наступним нейтронним

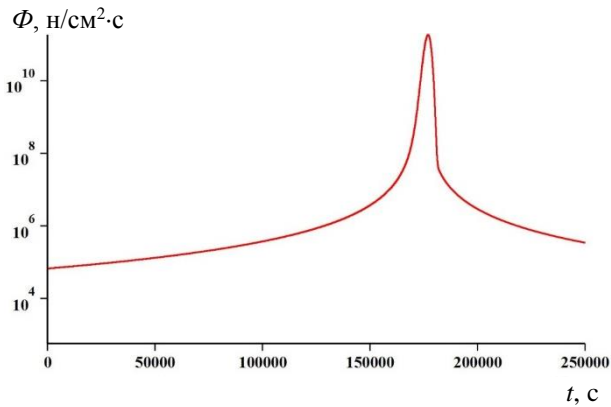


Рис. 2. Залежність густини потоку нейтронів від часу для випадку одинарного нейтронного спалаху. Величини фізичних параметрів системи:  $m_1 = 0,34 \text{ г/см}^3$ ,  $m_2 = 0,354 \text{ г/см}^3$ ,  $v = 2 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3 \cdot \text{с}$ ,  $(dm/dt)_{ev} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ г/см}^3 \cdot \text{с}$ . (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

спалахом. Тобто ми будемо мати картину послідовності нейтронних імпульсів з великими проміжками часу між імпульсами, що залежать від швидкості заливання води у систему. Реальний одинарний імпульс може виникнути тільки, якщо

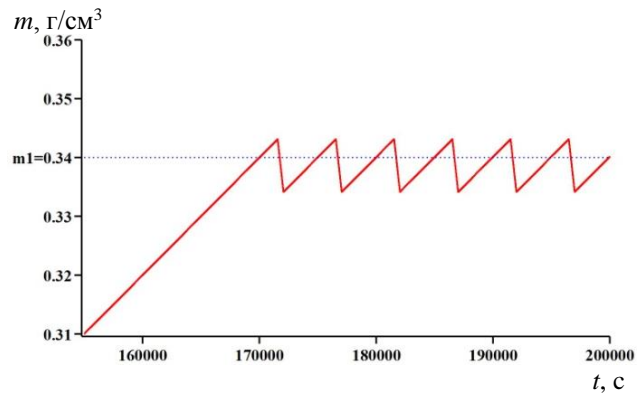
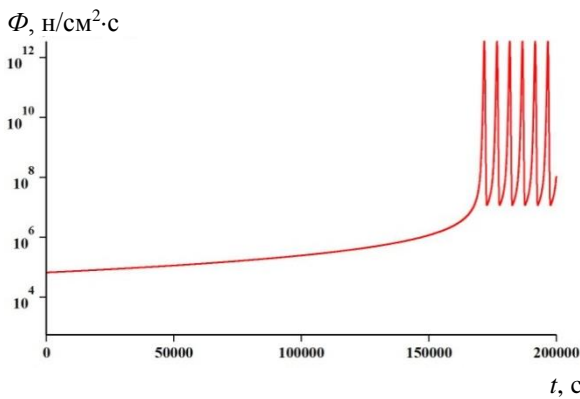


Рис. 3. Типова картина нейтронних осциляцій і осциляцій кількості води у системі. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Коли швидкість надходження води у систему є постійною, то і коливання відбуваються з постійною амплітудою і частотою. Збільшення швидкості заливання дає збільшення амплітуди і частоти коливань, відповідно, зменшення  $v$  призводить до зменшення амплітуди і частоти коливань. У свою чергу, збільшення  $\rho_{\text{max}}$  може призвести до суттєвого збільшення амплітуди коливань, але варто відзначити, що наш розгляд є справедливим для незначної додатної величини реактивності.

Із рис. 1 видно, що амплітуда коливань нейтронного потоку збільшується з часом. Це може бути можливим, якщо швидкість надходження води збільшується. В умовах Чорнобиля, коли швидкість надходження води визначалася інтенсивністю опадів, а її кількість – площею отворів у покрівлі ОУ, така ситуація є цілком можливою. Нагадаємо, що перед зведенням «Укриття-2» у покрівлі ОУ було нараховано близько  $1000 \text{ м}^2$

припиниться надходження води, але з формальної точки зору, це вже випадок із змінною швидкістю надходження води у систему, який вимагає окремого розгляду.

Картина серії послідовних імпульсів є частковим випадком режиму нейтронних осциляцій. Нагадаємо, що саме наявність нейтронних осциляцій вказує на те, що система переходить у надкритичний стан з виникненням СЛР. Тому саме аналіз нейтронних осциляцій, що спостерігалися в ОУ, може дати змогу зрозуміти шляхи можливої поведінки ПВМ в «Укритті-2».

Типову картину нейтронних осциляцій у системі з постійним надходженням води ( $v = \text{const}$ ) показано на рис. 3. Поряд з нейтронними осциляціями показано осциляції кількості води в системі, звідки видно, що кількість води коливається навколо першого критичного значення  $m_1$  залежності реактивності системи від кількості води. Такі ж коливання можна спостерігати і для температури системи.

отворів, навіть після численних ремонтів. Отже для опису даної картини нам необхідно розв'язати систему рівнянь із змінною в часі швидкістю заливання. Як ми вже згадували, ми будемо вважати цю зміну стрибкоподібною, тобто у деякий момент часу  $t_1$  швидкість  $v$  збільшується від деякого значення  $v_1$  до  $v_2$ . Розрахунки показують, що таке збільшення може призвести або до збільшення амплітуди коливань, або до більш кардинальних змін – після збільшення амплітуди система переходить у закритичний стан, і густина потоку нейтронів падає до фонових значень. Типову картину такого переходу наведено на рис. 4.

Такий стан за наявності постійного надходження води у систему може зберігатися нескінченно довго. Вода надходить за рахунок опадів і конденсату з вологого повітря, а витікає крізь свердловину, пробурені до місць розташування ПВМ, а також іншими багаточисельними шляха-

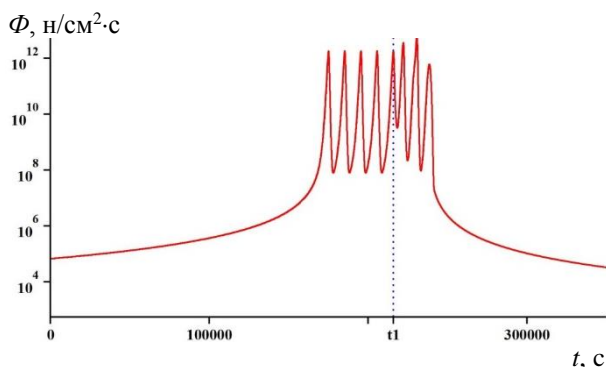


Рис. 4. Перехід до закритичного стану при збільшенні швидкості надходження води у процесі коливань нейтронного потоку. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

ми і накопичується у басейнах-барботерах на нижніх поверхах ОУ. Проходячи крізь поруваті ПВМ, вода частково розчиняє ядерне паливо, що показують численні аналізи проб води з басейнів-барботерів на нуклідний склад. Звичайно, цей процес може призвести до зменшення кількості палива в ПВМ до значень, нижчих критичного, але за багатьма оцінками суттєвого зменшення концентрації палива у ПВМ завдяки розчиненню можна очікувати сторіччями.

Значно більш імовірною є ситуація, коли завдяки зведенню НБК навколо ОУ, герметичного для проникнення води іззовні, ПВМ почнуть висихати. Саме це спостерігається зараз в ОУ: вода припинила витікати із свердловин, а густина потоку нейтронів почала поступово дуже повільно збільшуватися. Хоча процес конденсації води з повітря сповільнився, завдяки зменшенню амплітуди коливань температури повітря всередині НБК, скоріше за все повністю уникнути цього процесу без застосування спеціальних засобів не вдасться. Тобто конденсація буде сповільнювати процес осушення ПВМ.

Для опису процесу осушення ПВМ за допомогою нашої моделі варто провести розрахунки із швидкістю  $v$ , що є від'ємною і описує зменшення кількості води у системі, а в якості початкового стану вибрати закритичний стан. Зрозуміло, що густина потоку нейтронів повинна поступово зростати, поки реактивність не досягне другого критичного значення  $m_2$ , далі перехід через надкритичний стан буде супроводжуватися нейтронним сплеском з подальшим затуханням до сухого глибоко підкритичного стану. Результат розрахунків наведено на рис. 5, де перша крива зліва відповідає більш високій швидкості витікання води.

Таким чином, усередині ОУ у матеріалах, що містять паливо у високій концентрації (нижні відмітки приміщення 305/2), унаслідок і під час осушення ПВМ можливе виникнення нейтронного спалаху. Амплітуда цього спалаху за-

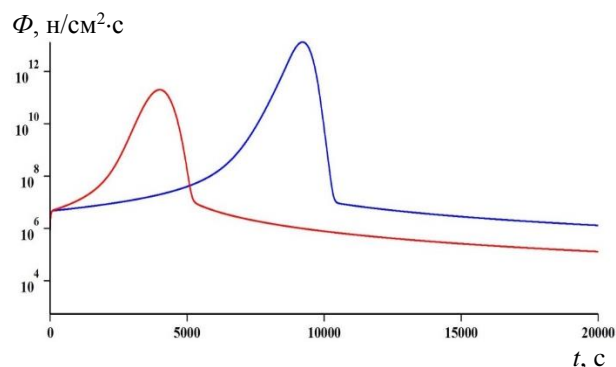


Рис. 5. Нейтронні імпульси при витіканні води із системи з квадратичною залежністю реактивності від маси води. Крива зліва відповідає більш високій швидкості витікання води. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

лежить від швидкості осушення ПВМ і зменшується при збільшенні швидкості витікання води (швидкості осушення). Останнє твердження є справедливим, якщо швидкість осушення є порівняною за величиною із швидкістю випаровування води під час кипіння при переході через надкритичний стан. Усі наші розрахунки процесу осушення при різних параметрах показують, що амплітуда нейтронного спалаху не перевищує амплітуди коливань при надходженні води у систему. Такий нейтронний спалах, скоріше за все, не несе безпосередньої загрози для навколишнього середовища, але може становити деяку небезпеку для персоналу ОУ, який повинен мати на увазі цю можливість.

#### 4. Висновки

З моменту нейтронного інциденту 1990 р. пройшло вже більше 30 років, а він і досі, на нашу думку, визначає поведінку ПВМ. За ці роки і персоналом ОУ, і дослідниками (в основному співробітниками Інституту проблем безпеки АЕС НАН України, але також багатьох інших організацій) проведено величезну роботу із стабілізації ОУ, створення системи моніторингу ОУ і ПВМ і дослідження властивостей усіх матеріалів і конструкцій, які знаходяться всередині ОУ. Зокрема, знайдено майже все паливо 4-го блока, у місця розташування паливних мас пробурено свердловини, де розміщена система моніторингу ПВМ, визначено фізичні властивості майже всіх ПВМ, визначено всі місця розташування ПВМ та їх скупчень, визначено найбільш небезпечні скупчення ПВМ з підозрою на можливу критичність з великою концентрацією урану, на основі експериментальних даних розраховано розмножуючі властивості ПВМ для великої кількості моделей ПВМ (для деяких з цих моделей розрахунки потоків нейтронів збігаються з експериментальними

даними), розраховано залежності реактивності та нейтронних перерізів від кількості води у ПВМ і багато іншого.

Усі ці роботи дали можливість проаналізувати поведінку ПВМ за минулі роки і визначити ймовірний розвиток подій. Результати цього аналізу і наведено в даній роботі. Цей аналіз дає можливість відповісти на питання, яке міститься у назві роботи: чи можливе виникнення СЛР поділу в об'єкті «Укриття-2» у сучасних умовах після зведення НБК. Відповідь є такою: так, подібна можливість існує, але без небезпечних наслідків для навколишнього середовища.

Варто зауважити, що висновки, наведені в даній роботі, носять виключно якісний характер. Незважаючи на величезний масив інформації про розташування, геометричні параметри, нуклідний склад, збагачення палива у ПВМ, цих даних є недостатньо для проведення кількісних розрахунків з достатньою точністю, на яку здатні сучасні реакторні програми розрахунків.

На завершення автори висловлюють щире подяку Є. Д. Висотському за надану інформацію та за цінні плідні обговорення питань, пов'язаних із темою статті.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Е.Д. Высотский и др. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля* 12 (2009) 93.
2. Е.Д. Высотский и др. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС. *Радиохимия* 53(2) (2011) 178.
3. А.А. Боровой и др. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации. Отчет о НИР. МНТЦ «Укрытие» НАН Украины. Арх. № 3836. (Чернобыль, 2001) 337 с.
4. V.A. Babenko et al. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics. *Nucl. Sci. Eng.* 133(3) (1999) 301.
5. В.А. Бабенко и др. Исследование размножающих свойств топливосодержащих масс 4-го блока ЧАЭС. *Препринт ИЯИ НАН Украины. КИЯИ-97-1 (Киев, 1997) 30 с.*
6. 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.
7. 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.
8. В.А. Бабенко, Л.Л. Енковский, В.Н. Павлович. Ядерная энергетика. Тенденции в мире и особенности Украины. *ЭЧАЯ* 38(6) (2007) 1517.
9. 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. M. Pavlovych<sup>1</sup>, V. A. Babenko<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Bogolyubov Institute for Theoretical Physics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

\*Corresponding author: pet2@ukr.net

#### ON THE POSSIBILITY OF THE SELF-SUSTAINING NUCLEAR CHAIN REACTION INSIDE THE “SHELTER” OBJECT AT THE PRESENT TIME

Based on new modern data regarding the state of the fuel-containing masses (FCM) of the “Shelter”, as well as taking into account the neutron incident of 1990 and the physical properties of the FCM of the “Shelter”, the possibility of the occurrence and development of a self-sustaining chain nuclear fission reaction was considered in the FCM. It is shown that the drying of the FCM can lead to the occurrence of a single neutron burst with an amplitude comparable to the amplitude of neutron oscillations in 1990. It is also shown that the amplitude of the burst can be reduced if the rate of drying of the FCM is increased. The evaluations show that such a burst would have no impact on the environment.

*Keywords:* self-sustaining nuclear chain reaction, fuel-containing masses, neutron flux.

#### REFERENCES

1. E.D. Vysotskiy et al. Neutron-physical characteristics of nuclear dangerous accumulations of fuel contained materials. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsii i Chornobylya* 12 (2009) 93. (Rus)
2. E.D. Vysotskii et al. Nuclear-hazardous accumulations of fuel-containing materials in the destroyed fourth Unit of the Chernobyl NPP. *Radiochemistry* 53(2) (2011) 206.

3. A.A. Borovoy et al. Analysis of the current safety of the “Shelter” object and predictive assessments of the development of the situation. Research report. ISTC “Shelter” of the National Academy of Sciences of Ukraine. Arch. No. 3836. (Chornobyl, 2001) 337 p. (Rus)
4. V.A. Babenko et al. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics. *Nucl. Sci. Eng.* 133(3) (1999) 301.
5. V.A. Babenko et al. Investigation of multiplying properties of the fuel-containing masses in the 4-th unit of Chernobyl NPP. *Preprint KIYI-97-1 (Kyiv, Institute for Nuclear Research of NASU, 1997)* 30 p. (Rus)
6. 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. *Problemy Bezpeky Atomnykh Elektrostantsii i Chornobylya* 9 (2008) 36. (Rus)
7. 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”. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 18(3) (2017) 254. (Rus)
8. V.A. Babenko, L.L. Jenkovszky, V.N. Pavlovych. Nuclear power industry: Tendencies in the world and Ukraine. *Phys. Part. Nucl.* 38(6) (2007) 795.
9. 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. *Yaderna Fyzyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 19(1) (2018) 21. (Rus)

Надійшла/Received 10.01.2023