

В. І. Борисенко, В. В. Горанчук*Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна*

Визначення консервативних умов моделі реактивнісної аварії на РБМК-1000

Ключові слова:

РБМК-1000,
реактивність,
коефіцієнт реактивності
за температурою палива,
коефіцієнт реактивності
за густиною теплоносія,
ентальпія палива,
«кінцевий» ефект,
графітовий витіснювач

Представлено результати аналітичного моделювання реактивнісної аварії на РБМК-1000 енергоблока № 4 Чорнобильської АЕС. Модель РБМК-1000 розроблена на основі рівнянь кінетики ядерного реактора. Реактивність у моделі змінюється як унаслідок зовнішнього впливу (переміщення органів регулювання, зміни температури теплоносія на вході в реактор), так і внаслідок дії зворотних зв'язків за параметрами активної зони (зміни температури палива, температури графіту, густини теплоносія, концентрації ^{135}Xe). Зміна густини теплоносія враховує утворення пари в активній зоні реактора, а тиск теплоносія вводиться в модель як зовнішній фактор за результатами зареєстрованих даних під час аварії 26.04.1986 р. В умовах ефектів реактивності, що склалися в РБМК-1000 напередодні аварії (від'ємний коефіцієнт реактивності за температурою палива, позитивний паровий коефіцієнт реактивності), у реактивнісній моделі РБМК-1000 спостерігається висока чутливість до абсолютних значень, згаданих коефіцієнтів реактивності. У зв'язку з цим проведено дослідження для різних комбінацій значень ефективності органів регулювання, коефіцієнтів реактивності, а також інших факторів, що впливають на хід аварійного процесу — час спрацювання аварійного захисту, рівень потужності реактора напередодні аварії. Враховуючи, що основний етап аварії тривав менше 10 с, руйнація палива можлива за умов досягнення критичних значень величини його ентальпії, за яких починається процес диспергування палива. Представлено результати моделювання реактивнісної аварії РБМК-1000 при значеннях параметрів реактивнісних ефектів, які найкраще відповідають хронології зафіксованих подій, а також зафіксованим значенням технологічних параметрів.

Вступ

Професійний інтерес до з'ясування причин реактивнісної аварії 26.04.1986 р. на РБМК-1000 не зменшується [1–4], хоча з часу аварії на Чорнобильській АЕС пройшло вже більше 36 років. У наукових публікаціях і в дискусіях спеціалістів [5–10] часто виникають питання, на які ще не надано обґрунтованих відповідей.

У нашій попередній статті [4] представлено модель реактивнісної аварії на РБМК-1000 з урахуван-

ням тільки підігріву теплоносія в технологічному каналі (ТК) без його пароутворення. У моделі реактивнісної аварії [4] зворотний зв'язок за реактивністю враховується через температуру теплоносія, температуру палива, концентрацію ^{135}Xe та інші ефекти. Важливу роль у формуванні зворотних зв'язків за ефектами реактивності РБМК-1000 відіграє процес пароутворення теплоносія у ТК, відомий як паровий ефект реактивності або ефект реактивності за густиною теплоносія.

© В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, 2022

На номінальному рівні потужності половина енерговиділення в активній зоні РБМК-1000 йде на підігрів теплоносія в ТК до температури насичення — приблизно на $\sim 15^\circ\text{C}$, а друга половина енерговиділення йде на пароутворення теплоносія в ТК, яке становить $\sim 14\%$ за масою.

У представленій статті надано опис удосконаленої моделі реактивнісної аварії на РБМК-1000, у якій вже враховано не тільки підігрів теплоносія, а й пароутворення теплоносія в ТК. Удосконалення стосуються коректного визначення й інших важливих параметрів моделі: насамперед, цифрових значень коефіцієнтів реактивності за температурою палива (КРТП) і за густиною теплоносія (КРГТ) з урахуванням його пароутворення, а також відповідних постійних часу, згаданих ефектів реактивності.

На основі використання удосконаленої моделі реактивнісної аварії у статті представлено ймовірний перебіг подій аварії, який відповідає хронології основних зафіксованих подій, у тому числі й зафіксованим значенням технологічних параметрів.

У статті розглянуто дві найбільш поширені основні версії реактивнісної природи аварії на РБМК-1000.

1. Реактивнісна аварія, спричинена введенням позитивної реактивності за умов спрацювання АЗ-5 (аварійний захист). Введення позитивної реактивності при спрацюванні органів регулювання системи управління й захисту (ОР СУЗ) з верхнього положення є наслідком помилкової конструкції графітового витіснювача [11–13]. Подальше зростання потужності відбувається за рахунок дії зворотного зв'язку, а саме введення додаткової позитивної реактивності при інтенсифікації пароутворення внаслідок позитивного парового ефекту реактивності. Позитивний паровий ефект реактивності був характерним для РБМК-1000 в режимі стаціонарних перевантажень палива за практичної відсутності додаткових поглиначів в активній зоні [11, 12].

2. Реактивнісна аварія, зумовлена тільки введенням позитивної реактивності при інтенсифікації пароутворення внаслідок дії позитивного парового ефекту реактивності. Інтенсифікація пароутворення може бути спричинена зменшенням витрати теплоносія через реактор під час проведення випробувань із відключенням турбогенератора (ТГ).

Випробування з відключення ТГ

На енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС 26.04.1986 р. проводилися випробування для переві-

рки можливості електроживлення основного обладнання енергоблока — головного циркуляційного насоса (ГЦН) і живильного електронасоса (ЖЕН) — при імітації умов максимальної проектної аварії (МПА) та умов знеструмлення АЕС [11–13]. Знеструмлення АЕС було імітовано підключенням двох із чотирьох працюючих ГЦН на кожній петлі реактора, а також ЖЕН до вибігаючого ТГ.

Також враховуючи, що на сьогодні практично відсутня інформація про дослідження щодо деяких питань можливого перебігу реактивнісної аварії в разі іншої послідовності подій і початкових значень важливих технологічних параметрів РБМК-1000, у статті представлено результати проведених досліджень при:

зміні значень КРТП і КРГТ у діапазоні проектних значень, у тому числі й уточнених після аварії;

різному рівні теплової потужності РБМК-1000 перед проведенням випробувань із відключенням ТГ;

різній ефективності, так званого «кінцевого ефекту» під час спрацювання ОР СУЗ із верхніх кінцевиків;

різному часі спрацювання АЗ-5 після відключення ТГ.

Опис моделі реактора

Для повноти викладення наведемо основні рівняння моделі з роботи [4] з деякими скороченнями. Основні параметри моделі РБМК-1000 отримані та представлені в [4]. Проектні значення геометричних і матеріальних характеристик ТК, тепловидільної збірки (ТВЗ) і твела є стандартними для 2-го покоління РБМК-1000, до якого належить і енергоблок № 4 Чорнобильської АЕС.

Нейтронна потужність реактора визначається з рівнянь точкової кінетики нейтронів у реакторі [2–4]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta}{l} N(t) + \sum_i \lambda_i c_i(t), \quad (1)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{l} N(t) - \lambda_i c_i(t), \quad (2)$$

де всі позначення загальноприйняті [2, 3].

Зміна реактивності $\Delta\rho(t)$ у моделі реактора враховує переміщення ОР СУЗ, зміну температури та густини теплоносія на вході в реактор, а також реактивності, що виділяється внаслідок дії зворотних зв'язків: зміни температури палива; зміни густини те-

плоносія; зміни концентрації ^{135}Xe ; зміни температури графітової кладки реактора та інших параметрів:

$$\Delta\rho(t) = \Delta\rho_{\text{СУЗ}}(t) + \frac{\partial\rho}{\partial\gamma_T} \Delta\gamma_T(t) + \frac{\partial\rho}{\partial T} \Delta T(t) + \frac{\partial\rho}{\partial X_{\text{e}}} \Delta X_{\text{e}}(t) + \frac{\partial\rho}{\partial T_{\text{c}}} \Delta T_{\text{c}}(t) \dots, \quad (3)$$

де $\Delta\rho_{\text{СУЗ}}(t)$ — реактивність, введена за рахунок переміщення ОР СУЗ;

$\frac{\partial\rho}{\partial\gamma_T}$ — коефіцієнт реактивності за густиною теплоносія;

$\frac{\partial\rho}{\partial T}$ — коефіцієнт реактивності за температурою палива;

$\frac{\partial\rho}{\partial X_{\text{e}}}$ — коефіцієнт реактивності за концентрацією ^{135}Xe ;

$\frac{\partial\rho}{\partial T_{\text{c}}}$ — коефіцієнт реактивності за температурою графіту;

$\Delta\gamma_T(t)$, $\Delta T(t)$, $\Delta X_{\text{e}}(t)$, $\Delta T_{\text{c}}(t)$ — зміна середньої густини теплоносія, середньої температури палива, концентрації ^{135}Xe і середньої температури графітової кладки відповідно.

Вплив зміни температури графіту й концентрації ^{135}Xe на реактивність є несуттєвим — у тисячі разів менше в порівнянні з впливом від ефекту Доплера і парового ефекту реактивності, які під час реактивнісного процесу вносять у значення реактивності до $\sim -2\beta$ і $+2\beta$ відповідно. Так, наприклад, для умов моделювання, визначених далі, при зменшенні концентрації ^{135}Xe протягом 0–60 с, позитивний внесок у реактивність збільшується з 0 до 0,00004 β , що в порівнянні з внеском від основних зворотних реактивнісних ефектів є несуттєвим. Причинами цього є те, що:

концентрація ^{135}Xe за час аварійного процесу практично не змінюється;

температура графіту за час реактивнісного процесу (~ 10 с) не встигає суттєво змінитися внаслідок того, що постійна часу нагріву графіту значно більша за тривалість аварійного процесу.

Зміна температури палива та густини теплоносія (з урахуванням пароутворення) в активній зоні реактора визначається з рівнянь теплового балансу для палива й теплоносія [4, 14]:

$$\frac{dT}{dt} V c \gamma = q_v V - q_s S, \quad (4)$$

$$\frac{d\theta}{dt} c_T M_T = q_s S - \gamma_T c_T G_T (\theta_{\text{out}} - \theta_{\text{in}}) - P \gamma_T G_T (h'' - h'), \quad (5)$$

де V — об'єм палива; S — площа бічної поверхні твелів в активній зоні; c — теплоємність палива; γ — густина

палива; c_T — теплоємність теплоносія; γ_T — густина теплоносія; M_T — маса теплоносія в активній зоні; G_T — об'ємна витрата теплоносія; θ_{in} — температура теплоносія на вході в активну зону; θ_{out} — температура теплоносія на виході з активної зони; q_v — об'ємне енерговиділення в паливі; q_s — тепловий потік із поверхні твела; P — частка пари у теплоносії активної зони; h'' — ентальпія пари при температурі насичення, h' — ентальпія води при температурі насичення.

У моделі досліджено нижчезазначені діапазони зміни КРТП, КРТГ, а також «ефективності» так званого «кінцевого ефекту» — ефекту витіснювачів ОР СУЗ [11, 15]:

КРТП залежить від температури палива [15] і змінюється в діапазоні від $-1,8 \cdot 10^{-5}$ до $-0,75 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ при зміні температури палива від 300 до 2000 $^\circ\text{C}$;

Значення КРТГ, відновлене Генеральним конструктором РБМК Науково-дослідницького та конструкторського інституту енерготехніки імені М. А. Доллежалева [16] вже після аналізу аварії, становить $-0,028 \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^3$;

Досліджено зміну «ефективності» ОР СУЗ у нижній частині активної зони («кінцевий ефект») при переміщенні ОР СУЗ униз на 1,25 м (на всю висоту водяного стовпа в каналі СУЗ) у діапазоні від $+0,1\beta$ до $\sim +1\beta$.

Значення параметра «ефективності» ОР СУЗ суттєво впливає на результати моделювання, і в моделі реактивнісної аварії може бути визначено діапазон фактичної на момент аварії «ефективності» ОР СУЗ, за якої досягаються умови руйнації палива, узгоджені в часі з зафіксованим моментом руйнації активної зони, а саме — зупинка ОР СУЗ на половині активної зони по висоті.

Спрощена модель урахування пароутворення в моделі реактора штучно доповнена відповідною постійною часу пароутворення, за аналогією з постійною часу твела та постійною часу теплоносія, які можна отримати безпосередньо з рівнянь теплового балансу (4, 5) [4, 17].

Теплова постійна часу твела РБМК для енергетичних рівнів потужності РБМК змінюється в діапазоні 9–10 с [17, 18]. Постійна часу твела визначається відповідно до [17] через значення термічних опорів елементів твела (паливної таблетки, газового зазору, оболонки твела), які, у свою чергу, визначаються коефіцієнтами теплопровідності UO_2 , He, Zr і їхньою залежністю від температури, а також коефіцієнтом тепловіддачі з поверхні оболонки твела.

Теплова постійна часу теплоносія РБМК для номінального рівня потужності РБМК визначається згідно з [17] і змінюється в діапазоні 10–11 с. Постійна

часу теплоносія залежить від маси теплоносія в активній зоні реактора [17], тому її значення суттєво змінюється під час роботи РБМК-1000 на різних рівнях потужності: від ~17 с при 10 % номінального рівня потужності ($N_{\text{ном}}$) і до ~10 с при 100 % $N_{\text{ном}}$. У разі аварійного пароутворення в ТК, наприклад до 50 % за масою, постійна часу теплоносія зменшується до ~8 с.

Порівнюючи значення постійних часу теплоносія і твела реакторів РБМК-1000 і ВВЕР-1000, можна відмітити, що в ВВЕР-1000 постійна часу твела ~4 с менша постійної часу теплоносія ~13 с, а в реакторі РБМК-1000 співвідношення значень постійних часу теплоносія і твела змінюються залежно від потужності реактора, а також і за аварійного пароутворення в ТК. Відповідно в ВВЕР-1000 швидкодія ефекту Доплера переважає відповідні ефекти реактивності в теплоносії. У РБМК-1000 динамічні характеристики ефектів реактивності в паливі співмірні з ефектами реактивності в теплоносії. А за умов потужності більше ~50 % або аварійного пароутворення більше ~20 % за масою теплоносія швидкодія ефекту Доплера в паливі поступається швидкодії ефектів реактивності в теплоносії. Враховуючи можливі різні знаки ефектів реактивності за температурою палива й температурою теплоносія в РБМК-1000, цей факт може визначати динамічну нестійкість аварійних процесів у РБМК-1000. Тому для РБМК-1000 загальноприйнятий факт про високу швидкодію ефекту Доплера в порівнянні зі швидкодією інших ефектів реактивності не є достовірним, а, відповідно, і реактивнісні процеси в РБМК-1000 можуть розвиватися без швидкого «самогасіння».

Теплова постійна часу пароутворення теплоносія РБМК для енергетичних рівнів потужності РБМК прийнята рівною постійній часу теплоносія. Такий підхід враховує фізичну ідентичність відповідних процесів розповсюдження температури теплоносія та пару по об'єму теплоносія в ТК РБМК-1000.

У моделі реактивнісної аварії на основі рівнянь (1–5) реалізовано ітераційну процедуру розрахунку нейтронної потужності реактора й інших параметрів за умов зовнішніх впливів на реактивність реактора [4, 17].

Досліджено вплив на можливий хід аварії значень основних технологічних параметрів реактора перед проведенням випробувань у широкому діапазоні:

теплова потужність 1–30 % $N_{\text{ном}}$;

температура теплоносія на вході в реактор 270–280 °C;

тиск у контурі циркуляції теплоносія задавався як зовнішній параметр відповідно до зафіксованих напередодні аварії значень.

Модель дозволяє дослідити вплив різних чинників на хід аварії — перш за все, на рівень досягнутої нейтронної потужності під час реактивнісної аварії.

Результати моделювання реактивнісної аварії

Визначення ефективності «кінцевого» ефекту, при якому досягаються умови руйнації палива. У першу чергу були проведені дослідження на моделі реактивнісної аварії в умовах зафіксованих напередодні аварії значень основних технологічних параметрів: теплова потужність реактора ~200 МВт, запас до температури насичення теплоносія на вході в реактор ~1 °C.

Зовнішні впливи, введені в модель відповідно до зафіксованої хронології подій аварії (табл. 1), [11–13] наведено нижче.

З моменту натискання кнопки АЗ-5 (тривалість 3 с, з 36 по 39 секунду) графітові витіснювачі в каналах СУЗ починають рухатися вниз зі швидкістю 40 см/с і повністю витісняють стовпи води висотою ~1,25 м у нижній частині активної зони.

Умови, що склалися під час проведення випробувань із відключенням ТГ, а саме: низька теплова потужність РБМК-1000; слабкий зв'язок між різними критичними об'ємами активної зони (яких може налічуватися декілька десятків), зумовлений у тому числі й двогорбим розподілом енерговиділення за висотою активної зони, який є характерним на низьких рівнях потужності РБМК-1000, призвели до формування в активній зоні РБМК-1000 окремих критичних об'ємів, що практично не взаємодіють. Таким чином, при переміщенні ОР СУЗ у верхній частині активної зони вводиться нейтронний поглинач, а відповідно й від'ємна реактивність, а в нижній частині активної зони спрацьовує «ефект витіснювача». Зокрема, графітовий витіснювач витискає воду з каналів СУЗ на висоті 1,25 м, поглинання нейтронів зменшується, а, відповідно, вводиться позитивна реактивність.

У таких умовах може спостерігатися ситуація, коли окремі критичні об'єми активної зони можуть поводити себе як «незалежні» критичні об'єми. За низької потужності реактора менше 10 % від номінальної працездатною є тільки інтегрована система контролю за потужністю, детектори якої розташовано у відбивачі реактора, тому факт зростання нейтронної потужності в окремих критичних об'ємах активної зони не може бути своєчасно зафіксовано.

Найбільш імовірно, що саме в нижній частині активної зони реактора в умовах дії «ефекту витіс-

Таблиця 1. Хронологія подій аварії

Астрономічний час, 26.04.1986 р.	Час у моделі, с	Зовнішня подія
01:23:04	0,0	Закриття СК ТГ і початок вибігу ГЦН
01:23:10,6	6,6	Підключення живлення чотирьох ГЦН до вибігаючого ТГ
01:23:40	36,0	Натискання кнопки АЗ-5 і введення ОР СУЗ з ефективністю $\Delta\rho_{\text{суз}}$ в активну зону зі швидкістю 40 см/с;
01:23:10,6–01:23:47	6,6–43,0	Зменшення витрати теплоносія за рахунок зменшення обертів чотирьох ГЦН, що підключені до вибігаючого ТГ, з 1,0 до 0,75 номінальної витрати теплоносія через ГЦН, внаслідок чого в активній зоні збільшується температура теплоносія і, відповідно, зменшується густина
01:23:47	43,0	Падіння витрати теплоносія через реактор на ~40 % по ГЦН, підключених до надійного живлення, і до 0 м³/г по ГЦН, підключених до вибігаючого ТГ
01:23:49	45	Сигнал АЗ — підвищення тиску в реакторному просторі. Руйнація ТК

нювача» ОР СУЗ при спрацюванні АЗ-5 і відбулися основні реактивні процеси, що визначили хід і наслідки аварії [11–13, 15, 16]. Тому для з'ясування можливості досягнення умов руйнації палива і ТК хоча б у одній будь-якій частині реактора, у моделі реактивні аварії саме розглядається мінімальний критичний об'єм на рівні нижньої частини активної зони РБМК-1000. В умовах, що склалися 26.04.1986 р., мінімальний критичний об'єм активної зони в РБМК-1000 складається з ~64 ТК висотою ~1,7 м [4]. Досягнення умов руйнації палива (за параметром ентальпії палива), ТВЗ і ТК призведе до додаткового введення позитивної реактивності. А, відповідно, умови руйнації палива, ТВЗ і ТК лавиноподібно поширяться на інші ділянки активної зони РБМК-1000 [4]. Критичне значення ентальпії палива, за якої досягаються умови його диспергування, становить ~1 000 Дж/г [13]. У моделі такі умови досягаються за більше ніж десятикратного підвищення

нейтронної потужності в порівнянні з номінальною потужністю критичного об'єму, що моделюється.

На рис. 1 представлено результати зміни нейтронної потужності за різних значень ефективності «кінцевого ефекту» ОР СУЗ. Значення КРТП залежить від температури палива відповідно до [15], значення КГРТ — відповідно до [16] і дорівнює $-0,028 \text{ г}^{-1} \cdot \text{см}^3$.

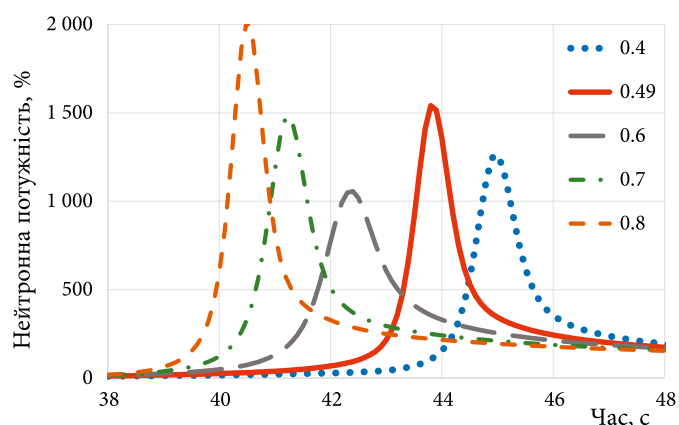


Рис. 1. Зміна нейтронної потужності залежно від значень ефективності «кінцевого ефекту» ОР СУЗ.

Легенда — значення ефективності «кінцевого ефекту» ОР СУЗ, β

В умовах наведених значень коефіцієнтів реактивності різкий стрибок нейтронної потужності перевищує $13 N_{\text{ном}}$ і відповідає зафіксованим даним щодо положення ОР СУЗ до моменту «руйнації» реактора за ефективності «кінцевого ефекту» в моделі в діапазоні $+(0,47 \pm 0,07) \beta$. Найбільше значення стрибку нейтронної потужності у $\sim 15 N_{\text{ном}}$ досягається на 43,8 с. Критичність реактора на миттєвих нейтронах досягається на 43 с, у момент припинення витрати теплоносія через ГЦН, що підключені до вибігаючого ТГ (див. табл. 1), і досягає максимального значення $1,22 \beta$ на 43,5 с. У роботі [19] представлено результати моделювання реактивнісної аварії на моделі, в якій консервативно прийнято:

КРТП дорівнює $-0,000015 \text{ C}^{-1}$ і не залежить від температури палива; постійна часу пароутворення дорівнює 18 с і не залежить від вмісту води у ТК.

За таких умов моделювання максимальний стрибок нейтронної потужності становить $31 N_{\text{ном}}$ при ефективності «кінцевого ефекту» $+0,41 \beta$, а максимальне значення реактивності $+0,997 \beta$ у моделі досягається на 44-й с. Таким чином, можлива ситуація досягнення умов руйнації палива і без виходу реактора в стан надкритичності на миттєвих нейтронах.

Отже, порівняння наведених результатів моделювання дозволяє зробити обґрунтований висновок щодо

вибору консервативних умов моделювання, зокрема тих, що дають найбільш консервативні результати моделювання (параметри реактивнісних ефектів, за яких досягаються умови руйнації палива, але які призводять до меншого введення реактивності у реактор):

значення КРТП відповідно до залежності [15];

постійна часу пароутворення 18 с і не залежить від вмісту теплоносія у ТК;

постійна часу твела приймає максимальне значення у 12 с.

Відповідно, якщо в моделі досягаються умови руйнації палива за згаданих параметрів реактивнісних ефектів, то й за інших комбінацій значень параметрів реактивнісних ефектів умови руйнації палива також будуть досягатися.

Результати моделювання в умовах рівнів теплової потужності від 1 до 30 % $N_{ном}$. На рис. 2 представлені результати моделювання щодо вибігу нейтронної потужності (за умов моделювання, обраних вище) залежно від рівня теплової потужності реактора перед проведенням випробувань з вибігом ТГ.

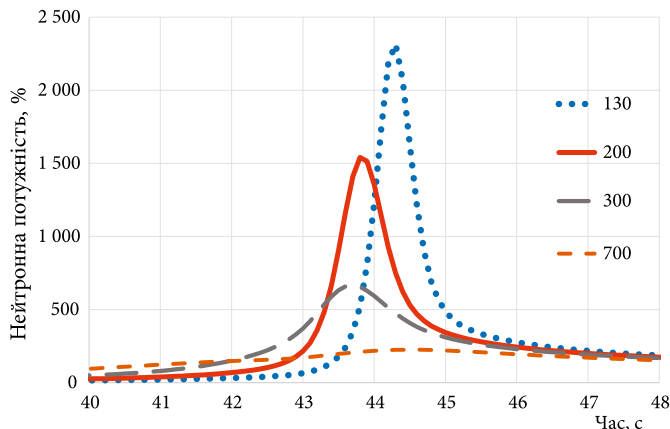


Рис. 2. Зміна нейтронної потужності залежно від рівня теплової потужності реактора перед випробуваннями з вибігом ТГ. Легенда — значення теплової потужності реактора, МВт

Результати подібних досліджень, проведених для інших типів РУ, свідчать, що найбільший стрибок нейтронної потужності за умов стрибка реактивності буде спостерігатися за меншої потужності реактора.

Відомо [13], що відповідно до програми випробувань з вибігом ТГ, рівень теплової потужності реактора перед початком випробувань мав бути на рівні 700 МВт.

Для досягнення умов руйнації палива ($13 N_{ном}$) при рівні теплової потужності 700 МВт ефективність «кінцевого ефекту» має становити $\sim +1,1 \beta$.

У разі проведення випробувань на рівні теплової потужності 700 МВт і за умов, обраних вище, максимальний стрибок нейтронної потужності становить $\sim 220\%$ від номіналу, що гарантує відсутність руйнації палива.

Результати моделювання залежно від часу спрацювання АЗ-5. У моделях реактивнісної аварії РБМК-1000, в яких основна «провина» введення позитивної реактивності покладається тільки на ефективність «кінцевого ефекту» ОР СУЗ [1, 13, 15], наголошується, що в умовах, які склалися в реакторі напередодні випробувань з вибігу ТГ, починаючи з 01:23:00 спрацювання АЗ-5 у будь-який момент часу призвело б до аналогічних катастрофічних наслідків.

На рис. 3 представлені результати моделювання щодо вибігу нейтронної потужності та зміни реактивності у випадку спрацювання АЗ-5 у різні моменти часу після закриття СК ТГ. За умов значень параметрів реактивнісних ефектів, відповідно до умов, обраних вище, умови руйнації палива досягаються при спрацюванні АЗ-5 після 35 с з моменту початку вибігу ТГ. Умови руйнації досягаються в разі практично одночасного введення позитивної реактивності за рахунок ОР СУЗ і позитивної реактивності за рахунок парового ефекту реактивності, який значною мірою проявився при різкому зменшенні витрати теплоносія через реактор (на 43 с у моделі). При рознесенні в часі дії цих ефектів на $\sim 3-4$ с умови руйнації палива в моделі не досягаються. У програмі випробувань із вибігом ТГ 26.04.1986 р. на енергоблоці № 4 Чорнобильської АЕС спрацювання АЗ-5 мало бути обов'язковою умовою при відключенні ТГ, тому що відбулося не тільки відключення останнього працюючого ТГ на рівні електричної потужності менше 100 МВт [20], а й була проведена

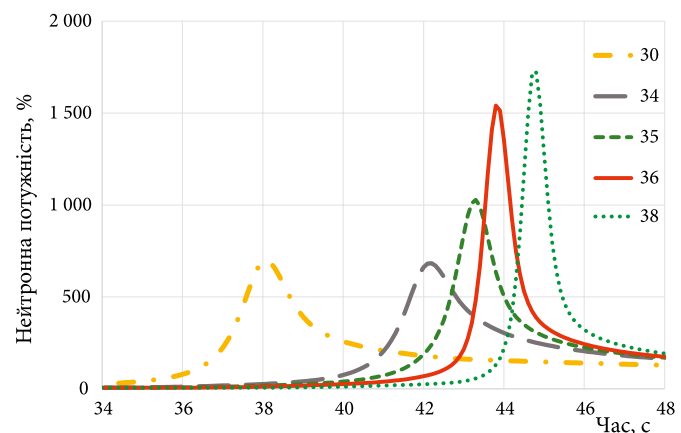


Рис. 3. Зміна нейтронної потужності залежно від часу спрацювання АЗ-5. Легенда — час спрацювання АЗ-5, с

«імітація» знеструмлення енергоблока для половини важливого обладнання (чотирьох ГЦН і ЖЕН), яке забезпечує відведення тепла від палива активної зони. Тому блокування персоналом захисту АЗ-5 є невиправданим: «О 00:43:37 виведено захист АЗ-5 при відключенні двох ТГ» [13].

Таким чином, за умов спрацювання АЗ-5 протягом 0÷34 с після закриття СК ТГ (за 2–3 с до фактичного натискання оператором кнопки АЗ-5) не досягаються умови руйнації палива — максимальний стрибок нейтронної потужності становить $\sim 7 N_{\text{ном}}$ (див. рис. 3).

Висновки

1. Визначено консервативні умови моделі реактивнісної аварії на РБМК-1000, за яких досягаються умови руйнації палива. Зокрема, визначено значення параметрів реактивнісних ефектів, які призводять до меншого введення реактивності в реактор, але умови руйнації палива досягаються.

2. Визначені параметри моделі дозволяють досягнути умов руйнації палива, які узгоджуються із зареєстрованими параметрами та подіями під час аварії.

3. Спрацювання АЗ-5 мало бути обов'язковою умовою у Програмі випробувань із вибігом ТГ, тому що відбулося не тільки відключення останнього працюючого ТГ, а була проведена «імітація» знеструмлення енергоблока для половини важливого обладнання, яке забезпечує відведення тепла від палива активної зони. Очевидно, що під час знеструмлення спрацювання АЗ-5 є обов'язковим. Час спрацювання АЗ-5 суттєво впливає на хід реактивнісної аварії. Спрацювання АЗ-5 у будь-який час до ~ 34 с після закриття СК ТГ не призводить до руйнації палива.

Список використаної літератури

1. Халімончук В. А. Моделювання Чорнобильської аварії / В. А. Халімончук, О. В. Кучін // Ядерна та радіаційна безпека. — 2011. — Вип. 3 (51). — С. 20–28.
2. Халімончук В. А. Дослідження нейтронно-фізичних характеристик реактора РБМК-1000 Чорнобильської АЕС в Інституті ядерних досліджень АН УРСР в до- та післяаварійний період: ретроспективний аналіз / В. А. Халімончук, О. В. Кучін, В. В. Токаревський // Ядерна та радіаційна безпека. — 2016. — Вип. 1 (69). — С. 14–19.
3. Mercier B. A simplified analysis of the Chernobyl accident / Bertrand Mercier, Di Yang, Ziyue Zhuang, Jiajie

- Liang // EPJ Nuclear Sci. Technol. — 2021. — Vol. 7 (1). — P. 1–12.
4. Борисенко В. І. Модель реактивнісної аварії РБМК-1000 енергоблока № 4 Чорнобильської АЕС / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук // Ядерна енергетика та довкілля. — 2021. — Вип. 21 (2). — С. 39–48.
5. Борисенко В. І. О некоторых параметрах ядерной безопасности уран-графитовых реакторов / В. И. Борисенко // Атомная стратегия XXI. — 2017. — Вип. 122. — С. 18–21.
6. Штейнберг Н. А. Пока еще живы очевидцы / Н. А. Штейнберг // Атомная стратегия XXI. — 2020. — Вип. 162. — С. 9–11.
7. Нигматулин Б. И. В развитие темы / Б. И. Нигматулин // Атомная стратегия XXI. — 2020. — Вип. 162. — С. 12.
8. Копчинский Г. Чернобыль. Причины / Г. Копчинский, Н. Штейнберг // Атомная стратегия XXI. — 2020. — Вип. 163. — С. 20–22.
9. Копчинский Г. Чернобыль. Вместо заключения / Г. Копчинский, Н. Штейнберг // Атомная стратегия XXI. — 2020. — Вип. 164. — С. 21–23.
10. Борисенко В. И. Модель реактивностной аварии РБМК-1000 / В. И. Борисенко // Атомная стратегия XXI. — 2021. — Вип. 174. — С. 6–9.
11. Карпан Н. В. Чернобыль. Месть мирного атома / Н. В. Карпан. — 2006. — Режим доступа: www.twirpx.com/file/121267.
12. Дмитриев В. М. Причины Чернобыльской аварии известны / В. М. Дмитриев. — Режим доступа: www.accident.ru.
13. INSAG-7. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group / IAEA. — Vienna : International Atomic Energy Agency, 1992. — 135 p.
14. Кузнецов И. А. Аварийные и переходные процессы в быстрых реакторах / И. А. Кузнецов. — Москва : Энергоатомиздат, 1987. — 176 с. — (Б-ка эксплуатационника АЭС, вып. 17).
15. Роль отдельных факторов в развитии аварии на Чернобыльской АЭС / Е. О. Адамов, А. Е. Доморадов, Ю. В. Миронов и др. // Атомная энергия. — 1993. — Т. 75, вып. 5. — С. 336–341.
16. Канальный ядерный энергетический реактор РБМК / М. А. Абрамов, В. И. Авдеев, Е. О. Адамов и др.; под общей ред. Ю. М. Черкашова. — Москва : ГУП НИКИЭТ, 2006. — 632 с.
17. Борисенко В. И. Определение консервативных параметров модели реактора для исследования переходных режимов работы ВВЭР-1000 / В. И. Борисенко,

- В. В. Горанчук // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. — 2013. — Вип. 20. — С. 28–36.
18. Румянцев А. Н. Чернобыль в 2009 году / А. Н. Румянцев // Proatom: веб-сайт. — Режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&thold=1&mode=flat&order=1&sid=2842>
 19. Борисенко В. І. Модель реактивнісної аварії на РБМК-1000 / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук // Ядерна фізика та енергетика. — 2022. — Т. 23, № 2. — С. 99–106.
 20. Технологический регламент по эксплуатации 3 и 4 энергоблоков Чернобыльской АЭС с реакторами РБМК-1000. IЭ-С-II. — Введен в действие на основании приказа № 953 от 15.12.1983 г. — Чернобыль : ЧАЭС, 1983. — 98 с.

V. I. Borysenko, V. V. Goranchuk

*Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants,
NAS of Ukraine, 12, Lysogirska st., Kyiv, 03028, Ukraine*

Determination of Conservative Conditions of the Model of Reactivity Accident at RBMK-1000

Analytical studies have been performed on the model of a reactivity accident at the 4th Unit of the Chornobyl NPP with an RBMK-1000-type reactor. The model of the RBMK-1000 reactor was developed based on the equations of nuclear reactor kinetics. In the model, the reactivity changes as a result of external influences (the movement of control rods; changes in the coolant temperature at the reactor inlet), as well as a result of feedback on reactivity effects (changes in fuel temperature, coolant density, ¹³⁵Xe concentration).

The change in the coolant density takes into account the formation of steam in the reactor core, and the coolant pressure is introduced into the model as an external factor, according to the results of the registered data during the accident on 26.04.1986.

There is a high sensitivity of the RBMK-1000 reactivity model to the absolute values of reactivity coefficients that have occurred on the eve of the accident (negative reactivity coefficient by fuel temperature, positive steam coefficient of reactivity). Therefore, the study is conducted for different combinations of values of the efficiency of the control rods, reactivity coefficients, as well as other factors affecting the course of the accident — emergency protection triggering time, and reactor power level before the accident. Considering that the main stage of the acci-

dent lasted less than 10 s, fuel destruction is possible when the critical value of fuel enthalpy is reached, at which the fuel dispersion process begins. The results of modeling of reactivity accident on RBMK-1000 with the values of parameters of reactivity effects, which best correspond to the chronology of recorded events as well as to the recorded values of technological parameters, are presented.

Keywords: RBMK-1000, reactivity, reactivity coefficient by fuel temperature, reactivity coefficient by coolant density, fuel enthalpy, end effect, graphite displacer.

References

1. Khalimonchuk V. A., Kuchin A. V. (2011). [Simulation of the Chornobyl accident]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 51, no. 3, pp. 20–28. (in Rus.)
2. Khalimonchuk V. A., Kuchin A. V., Tokarevskiy V. V. (2016). [Research of neutron characteristics of ChNPP RBMK-1000 in the Institute for Nuclear Research in pre- and post-emergency period: retrospective analysis]. *Nuclear and Radiation Safety*, vol. 69, no. 1, pp. 14–19. (in Rus.)
1. Bertrand Mercier, Di Yang, Ziyue Zhuang, Jiajie Liang (2021). A simplified analysis of the Chernobyl accident. *EPJ Nuclear Sci. Technol*, vol. 7, 1, pp. 1–12.
2. Borysenko V. I., Goranchuk V. V. (2021). [Model of reactivity accident of the RBMK-1000 of the Chornobyl NPP 4th power unit]. *Nuclear Power and the Environment*, vol. 21, no. 2, pp. 39–48. (in Ukr.)
3. Borysenko V. I. (2017). [On some parameters of nuclear safety of uranium-graphite reactors]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 122, pp. 18–21. (in Rus.)
4. Steinberg N. A. (2020). [While witnesses are still alive]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 162, pp. 9–11. (in Rus.)
5. Nigmatulin B. I. (2020). [In the development of the theme]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 162, p. 12. (in Rus.)
6. Kopchinski G., Steinberg N. (2020). [Chornobyl. Reasons]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 163, pp. 20–22. (in Rus.)
7. Kopchinski G., Steinberg N. (2020). [Chornobyl. Instead of conclusion]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 164, pp. 21–23. (in Rus.)
8. Borysenko V. I. (2021). [Model of reactivity accident of RBMK-1000]. *Atomic strategy of XXI*, vol. 174, pp. 6–9. (in Rus.)
9. Karpan N. V. (2006). *Chernobyl. Mest mirnogo atoma*. [Chornobyl. Revenge of the Peaceful Atom]. Available at: <http://www.twirpx.com/file/121267/> (in Rus.)
10. Dmitriev V. M. *Prichiny Chernobylskoy avarii izvestny*. [The causes of the Chornobyl accident are known]. Available at: <http://www.accident.ru> (in Rus.)

11. INSAG-7. The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1. A report by the International Nuclear Safety Advisory Group. Vienna: International Atomic Energy Agency, 1992, 135 p.
12. Kuznetsov I. A. (1987). *Avariynnye i perekhodnyye protsessy v bystrykh reaktorakh. Biblioteka ekspluatatsionnika AES* [Emergency and Transient Processes in Fast Reactors]. Moscow: Energoatomizdat, 176 p. (in Russ.)
13. Adamov E. O., Domoradov A. E., Mironov Yu. V., Nikitin Yu. M. (1993). [Role of individual factors in the development of the Chornobyl accident]. *Atomic Energy*, vol. 75, no. 5, pp. 336–341. (in Rus.)
14. Abramov M. A., Avdeev V. I., Adamov E. O. (2006). *Kanalnyi yadernyi energeticheskiy reaktor RBMK*. [Channel-type nuclear power reactor RBMK]. Moscow: SUE NIKIET, 632 p. (in Rus.)
15. Borysenko V. I., Goranchuk V. V. (2013). [Determination of conservative parameters of model of reactor for research of transient of VVER-1000]. *Problems of Nuclear Power Plants Safety and of Chornobyl*, vol. 20, pp. 28–36. (in Rus.)
16. Rumyantsev A. N. (2011). *Chernobyl v 2009 godu*. [Chornobyl in 2009]. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&thold=1&mode=flat&order=1&sid=2842> (in Rus.)
17. Borysenko V. I., Goranchuk V. V. (2022). [Model of reactivity accident of the RBMK-1000 reactor]. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 99–106. (in Ukr.)
18. 1E-C-II. Technological regulations for operation of Units 3 and 4 of Chornobyl NPP with RBMK-1000 reactors. Came into force by the Order no. 953 dated 15.12.1983. Chornobyl. 98 p. (in Rus.)

Надійшла 18.09.2022

Received 18.09.2022