

Тези доповідей 54-ої конференції молодих дослідників ОНПУ-магістрантів “Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі” //Одеса: ОНПУ, 2019, вип.53

Аналіз впливу ксенонових коливань на виникнення повторної критичності при підживленні парогенератора від мобільної насосної установки в умовах повного знеструмлення енергоблоку АЕС

Анализ влияния ксеноновых колебаний на возникновение повторной критичности при подпитке парогенератора от мобильной насосной установки в условиях полного обесточения энергоблока АЭС

Analysis of the influence of the influence of xenon oscillations on the temperature of repeated criticality when recharging the steam generator from mobile pump unit in condition of a blackout of the nuclear power unit

Науковий керівник – професор кафедри «Атомних електростанцій», доктор технічних наук Герліга В. А., Герліга В. А., Gerliga V. A.

Наконечнюк В. В., Наконечнюк В. В., Nakonechniuk V. V.

Анотація: Розглянуто динаміку перехідних ксенонових процесів та їх вплив на виникнення повторної критичності реактора. Розрахована величина реактивності, яку вносить ксенон, з урахуванням зміни густини нейтронного потоку. Приведені результати розрахунку аварії з повним довготривалим знеструмленням енергоблоку АЕС та втратою технічної води.

Ключові слова: ксенон, реактивність, критичність

Аннотация: Рассмотрена динамика переходных ксеноновых процессов и их влияние на возникновение повторной критики реактора. Рассчитано изменение реактивности, вносимое ксеноном, с учетом изменения плотности нейтронного потока. Приведены результаты расчета аварии с полным длительным обесточением энергоблока АЭС и потерей технической воды.

Ключевые слова: ксенон, реактивность, критичность

Abstract: Reviewed the dynamics of transient xenon processes and their influence on the occurrence of reactor repeated criticality. The change in reactivity introduced by xenon was calculated taking into account the change in the neutron flux density. The results of the

calculation of the accident with a complete long blackout of the nuclear power unit and loss of process water are given.

Key word: xenon, reactivity, criticality

Мета роботи

розробка модифікації для існуючої моделі РУ в розрахунковому коді RELAP, що використовується для аналізу аварій з виникненням повторної критичності, в частині врахування ксенонових коливань.

Вступ

Після подій у 2011 році на АЕС «Фукусіма-1» всі АЕС світу почали розробляти та впроваджувати заходи, ціллю яких є попередження та мінімізація негативних наслідків аварії з повним знеструмленням блоку та неможливістю відновлення живлення протягом тривалого часу [1, 2, 3]. Одним із рішень є те, що кожна АЕС повинна мати автономні мобільні установки для підживлення водою та електроенергією найбільш важливих споживачів. У залежності від призначення існують наступні установки: мобільна насосна установка (МНУ) ПГ – для подачі води в парогенератор, МНУ БВ – для подачі води до басейну витримки, МНУ ББ – для заповнення водою бризкальних басейнів у разі втрати води в них та мобільна дизельна електростанція (МДГС) для подачі живлення системам безпеки, насосам САОЗ та найбільш важливим супутнім системам (БЦУ, освітлення, вентиляція). Попередній аналіз зазначеної аварії (стрес-тести), описаний в національному звіті України [4], показав, що використання мобільного обладнання (МНУ і МДГС) дозволяє перевести та підтримувати енергоблок в безпечному стані на протязі 3-х діб. Слід зазначити, що крім позитивних ефектів є і недоліки. Одним із таких є виникнення повторної критичності при розхолодженні першого контуру через другий за допомогою МНУ ПГ за умов неможливості впорскування бору у перший контур. Для аналізу аварій з умовами, описаними вище, використовується моделювання за допомогою спеціалізованого тепло-гідравлічного коду RELAP [5]. Даний код розроблено для детерміністичного аналізу процесів в реакторних установках. У даному випадку для дослідження використовувалась готова 4-х секційна модель РУ ВВЕР-1000. Одним із недоліків коду є відсутність повноцінного розрахунку процесів ксенонових коливань в модулі нейтронної кінетики, тому слід доповнювати модель додатковим зворотнім зв'язком по реактивності. Дана робота пропонує доповнити модель енергоблоку

алгоритмом розрахунку впливу ксенону на реактивність, що дозволяє значно зменшити похибку, пов'язану із відсутністю повноцінної нейтронно-фізичної моделі.

Постановка задачі

Розробити модель поведінки ксенону в активній зоні реактора з можливістю врахування динамічної зміни густини нейтронного потоку після виходу на повторну критичність реактору. Зазначимо, що для виконання поставленої задачі необхідно врахування поведінки двох основних нуклідів – йоду-135 та, власне, ксенону-135.

Початковими умовами аварії, що досліджувалась, обрано наступне: повне довготривале знеструмлення енергоблоку АЕС з втратою технічної води. Вважається, що перед настанням вихідної події реактор пропрацював досить довго, щоб концентрації важливих нуклідів були на стаціонарному рівні. Для розрахунку приймається, що реактор знаходиться в стані напередодні планово-попереджувального ремонту (ППР), тобто наприкінці кампанії паливного завантаження, що означає відсутність бору в теплоносії першого контуру. Також, передбачається відмова (зупинка в поточному положенні) ШРУ-А через 3600 секунд в наслідок того, що система надійного електроживлення 1-ї категорії гарантовано виконує свої функції протягом однієї години з моменту знеструмлення.

Опис процесів в РУ при протіканні аварії

Сценарій 1. «Довготривале повне знеструмлення та втрата кінцевого теплоносія без врахування дій оперативного персоналу»

Повне знеструмлення енергоблоку призводить до спрацювання аварійного захисту, відключення систем нормальної експлуатації: ГЦН, ТПН, ТЕН КТ, насосів системи підживлення та продувки першого контуру. Потужність РУ швидко зменшується до рівня залишкового енерговиділення. Після вибігу ГЦН у 1 контурі встановлюється природна циркуляція теплоносія.

Закриття стопорних клапанів турбіни призводить до різкого зростання тиску у другому контурі РУ. В наслідок підвищення тиску у паропроводах до 73 кгс/см^2 відкриваються ШРУ-А. Тиск у 2-му контурі підтримується всіма ШРУ-А близько $68-71 \text{ кгс/см}^2$. Оскільки в даному сценарії враховується виснаження акумуляторів після перших 3600 секунд, що призводить до втрати живлення споживачів 1 категорії, то регулятори ШРУ-А зупиняються в поточному положенні.

Через відсутність подачі живильної води починається осушення ПГ, в результаті якого знижується ефективність відведення теплоти, що спричиняє зростання температури 1-го контуру. Зі збільшенням температури теплоносія спостерігається зростання тиску

першого контуру в результаті «температурного розширення» теплоносія. При досягненні значення тиску першого контуру 185 кгс/см^2 відбувається відкриття контрольного ПК КТ, а в подальшому – його періодичне спрацювання.

Розрахунок аварії закінчується при досягненні максимальної температури зовнішньої оболонки ТВЕЛ 1200°C (Рис. 1), що означає їх пошкодження та розгерметизацію.

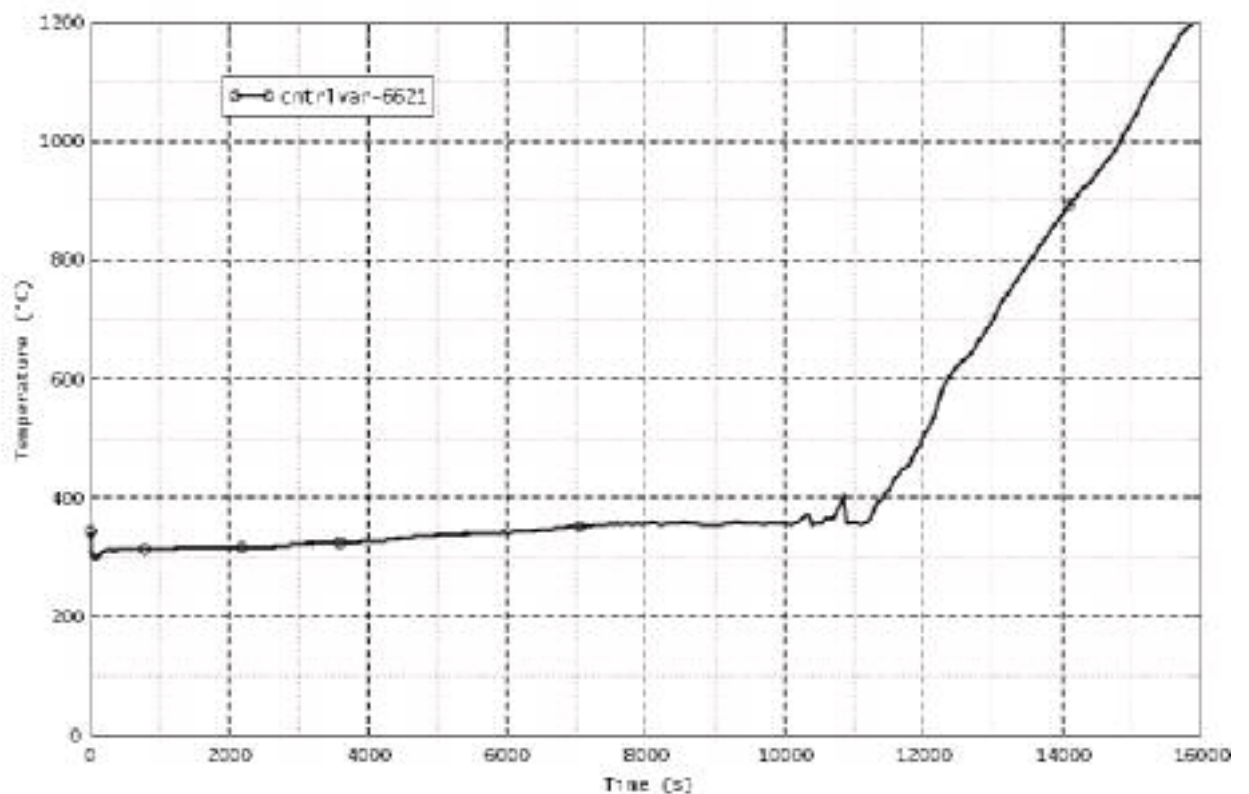


Рис. 1 Максимальна температура зовнішньої поверхні оболонки твेल

Сценарій 2. «Довготривале повне знеструмлення та втрата кінцевого теплоносія з врахуванням дій персоналу з підживлення ПГ від МНУ на ранній стадії аварії»

Проходження перехідного процесу аналогічно попередньому сценарію до моменту початку дій з декомпресії другого контуру (повне відкриття ШРУ-А4) для подальшому підживлення від МНУ ПГ (четвертий парогенератор обраний випадково і подібні дії можуть бути виконані на будь-якому іншому парогенераторі).

Підживлення ПГ-4 від МНУ починається на 5400 секунді, по факту зниження тиску в ПГ-4 до умов нормальної роботи насосу.

Подача холодної води в ПГ-4 від МНУ створює умови для відведення тепла від першого контуру, що, відповідно, забезпечує зниження параметрів першого контуру (Рис. 2). В результаті відбувається розхолодження першого контуру, що призводить до виходу РУ на повторну критичність (Рис. 3). Це відбувається в першу чергу як наслідок того, що при зниженні температури теплоносія збільшується його густина, що, відповідно призводить до зростання реактивності. Зазначимо, що в реакторах типу ВВЕР вода є сповільнювачем нейтронів і збільшення її густини вносить позитивну складову реактивності. До зростання загальної реактивності активної зони призводить також зниження температури палива. Перехід в критичний стан обумовлює зростання потужності реактора та як наслідок підвищення температури палива і теплоносія. Збільшення температури призводить до зворотних ефектів і загальна реактивність зменшується. У підсумку, наслідком вище описаних процесів є те, що реактивність стабілізується (Рис. 3). Оскільки РУ є досить інерційною системою, то зміни відбуваються з затримкою і для стабілізації параметрів потрібен певний час.

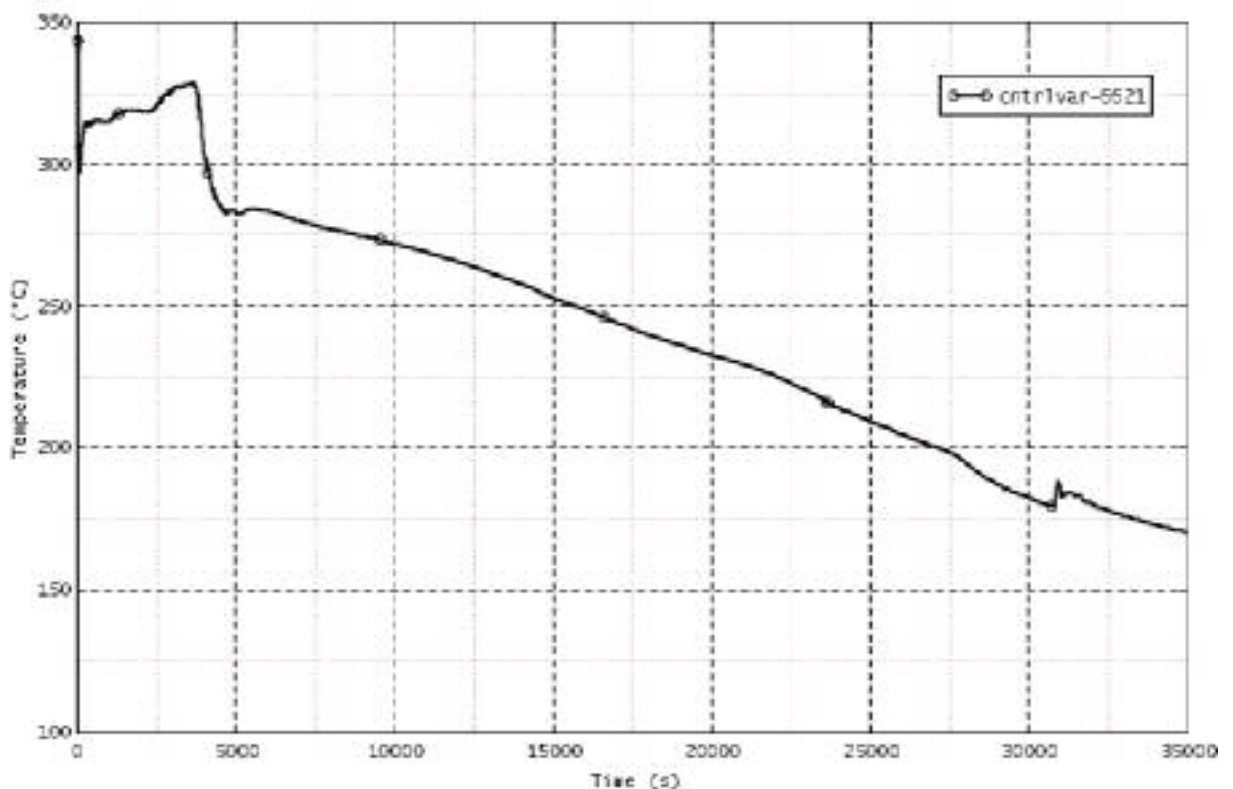


Рис. 2 Максимальна температура зовнішньої поверхні оболонки твел

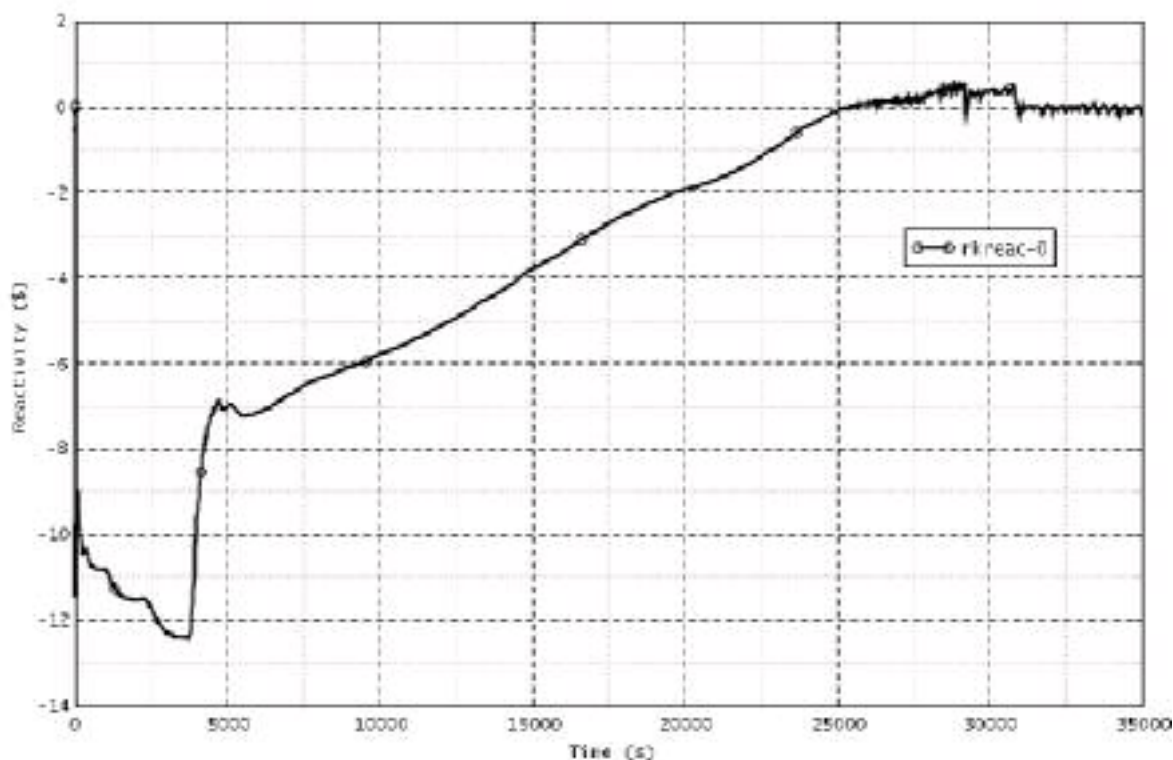


Рис. 3 Загальна реактивність активної зони

Математична модель

1. Розробка моделі розрахунку складової реактивності, що вносить ксенон, з урахуванням динаміки зміни концентрацій нуклідів.

Для реалізації цієї моделі використовується диференціальне рівняння балансу ядер ксенону в активній зоні. Воно складається з 4 частин та має наступний вигляд[6, 7]:

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \Phi \Sigma_f + \lambda_I N_I(t) - \lambda_{Xe} N_{Xe}(t) - \Phi \sigma_{Xe} N_{Xe}(t);$$

де: $\frac{dN_{Xe}}{dt}$ – зміна концентрації ксенону в одиницю часу;

$\gamma_{Xe} \Phi \Sigma_f$ – накопичення шляхом ділення ядер урану з прямим отриманням ядер ксенону;

$\lambda_I N_I(t)$ – накопичення ксенону шляхом розпаду ядер йоду;

$-\lambda_{Xe} N_{Xe}(t)$ – зменшення концентрації ксенону у зв'язку із радіоактивним розпадом;

$-\Phi \sigma_{Xe} N_{Xe}(t)$ – вигорання ксенону.

Зазначене вище рівняння використовує величини концентрацій йоду та ксенону. У якості початкових значень використовуються стаціонарні концентрації нуклідів. Зміна з

часом концентрації йоду також розраховується за допомогою диференційного рівняння балансу ядер, яке має наступний вигляд:

$$dN_I/dt = \gamma_I \Phi \Sigma_f - \lambda_I N_I(t);$$

де: dN_I/dt – зміна концентрації йоду в одиницю часу;

$\gamma_I \Phi \Sigma_f$ – зростання концентрації шляхом прямого ділення ядер урану (оскільки періоди піврозпаду ядер-попередників значно менші за період піврозпаду йоду, для спрощення можна вважати, що уран ділиться з прямим утворенням ядер йоду);

$-\lambda_I N_I(t)$ – зменшення концентрації шляхом радіоактивного розпаду йоду.

Величина від’ємної реактивності, що вносить ксенон визначається рівнянням:

$$\Delta\rho = -\frac{\Sigma_{aXe}}{\Sigma_{a5}} \cdot \frac{\theta_{f5}^0}{K_{эф}^0}; \quad \theta_{f5}^0 = \frac{\Sigma_{f5}}{\Sigma_{a5} + \Sigma \Sigma_a}$$

де: Σ_{aXe} та Σ_{a5} – макроскопічні січення поглинання ксенону-135 та урану-235 відповідно;

θ_{f5}^0 – коефіцієнт використання теплових нейтронів;

$K_{эф}^0$ – ефективний коефіцієнт розмноження неотруєного реактора;

Σ_{f5} – макроскопічне січення ділення урану-235;

$\Sigma \Sigma_a$ – сума макроскопічних січень поглинання всіх нуклідів в активній зоні, окрім урану-235.

Аналіз аварії «Довготривале повне знеструмлення та втрата кінцевого теплоносія з врахуванням дій персоналу з підживлення ПГ від МНУ з регулюванням по рівню води в ПГ з використанням моделі ксенонових коливань».

Для вирішення поставленої задачі були виконані два порівняльні розрахунки. Різниця між ними була в тому, що в першому ефект реактивності, що вносить ксенон не враховувався повністю, а в другому був використаний розроблений алгоритм розрахунку.

Сценарій передбачає, що через 5400 секунд з моменту знеструмлення буде завершено під’єднання МНУ до четвертого ПГ та відбудеться її запуск. Зазначимо, що в даному сценарії подача води регулюється згідно з рівнем у парогенераторі: припиняється при досягненні відмітки 2,75 метрів та відновлюється при зниженні рівня до 2 метрів.

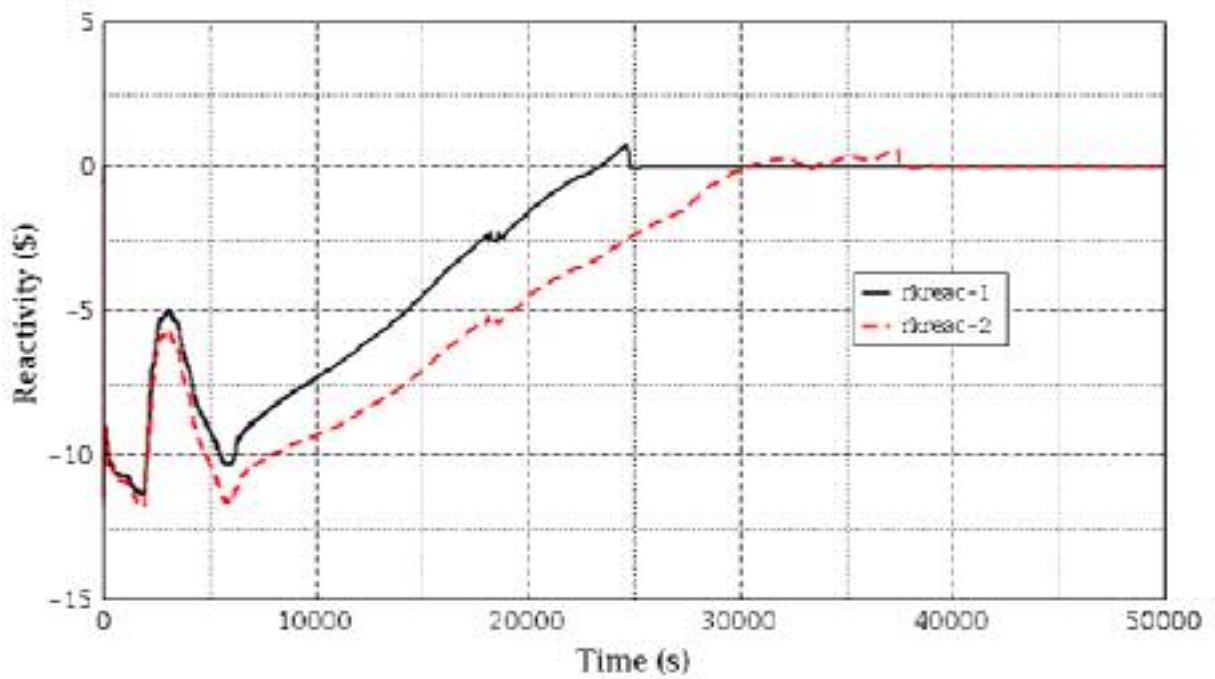


Рис. 4 Загальна реактивність активної зони без врахування ксенонових коливань (rkreact-1) та з використанням алгоритму розрахунку (rkreact 2)

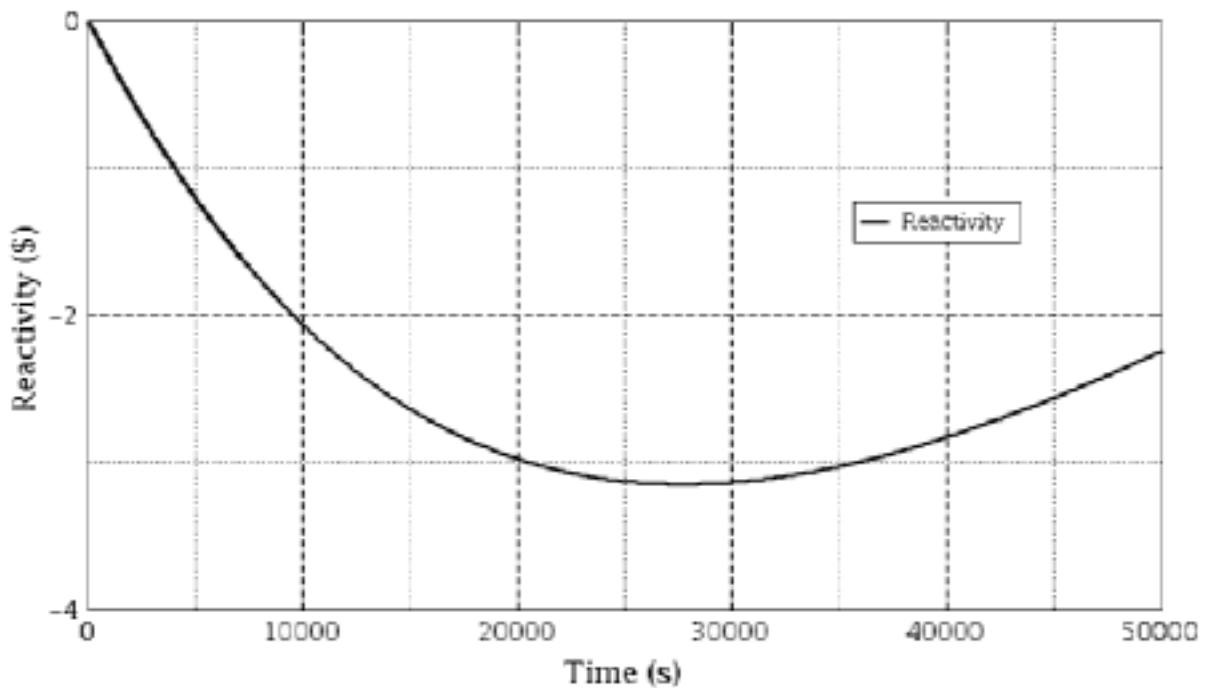


Рис. 5 Вплив Хе на реактивність згідно з розрахунком із врахуванням β_{ef}

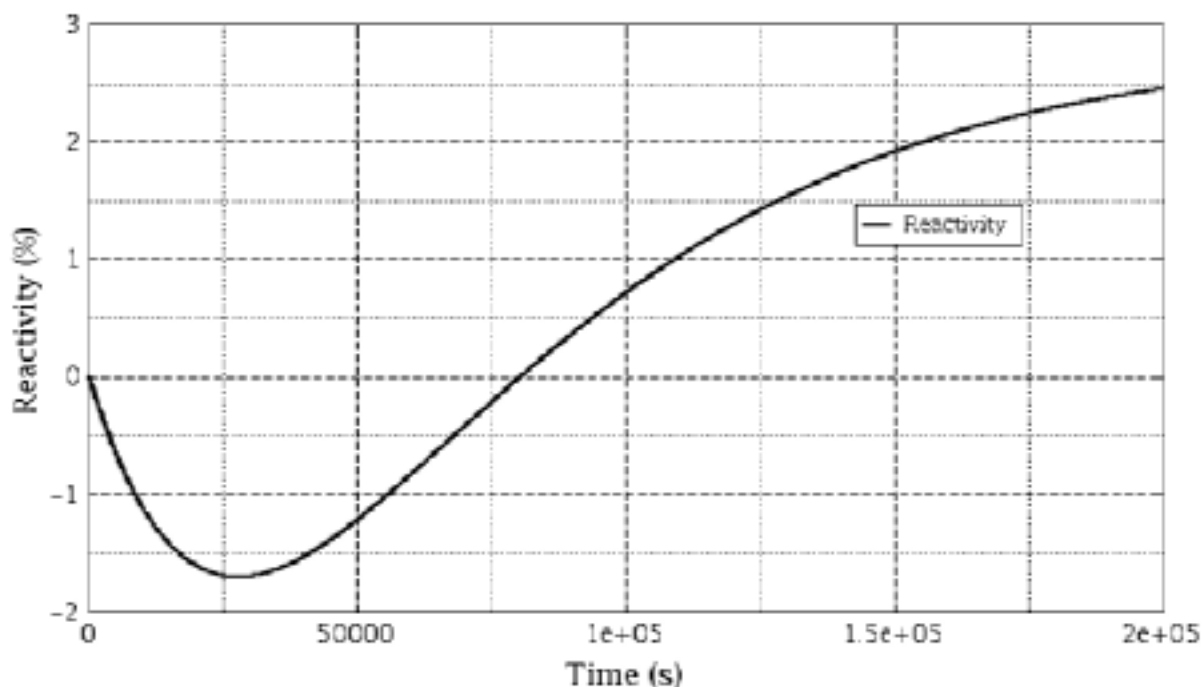


Рис. 6 Вплив Хе на реактивність згідно з розрахунком

На Рис. 4 представлено динаміку зміни загальної реактивності без врахування Хе ($\rho_{\text{кеас-1}}$) та з врахуванням Хе ($\rho_{\text{кеас-2}}$). На графіку можна побачити момент виходу реактору на повторну критичність. У першому випадку вихід на повторну критичність відбувається на 23350 секунді розрахунку, а для другого на 30350 секунді. Порівнюючи ці значення можна зробити висновок, що врахування ксенонових коливань для процесів, пов'язаних із повторною критичністю, дійсно важливе. Різниця в часі моменту виходу на повторну критичність склала близько 7000 секунд (≈ 2 годин).

На Рис. 6 представлено зміну реактивності по Хе, яка збігається з даними наведеними в альбомі нейтронно-фізичних характеристик активної зони реактора енергоблоку №1 ЗАЕС [8], які представлені на Рис. 7.

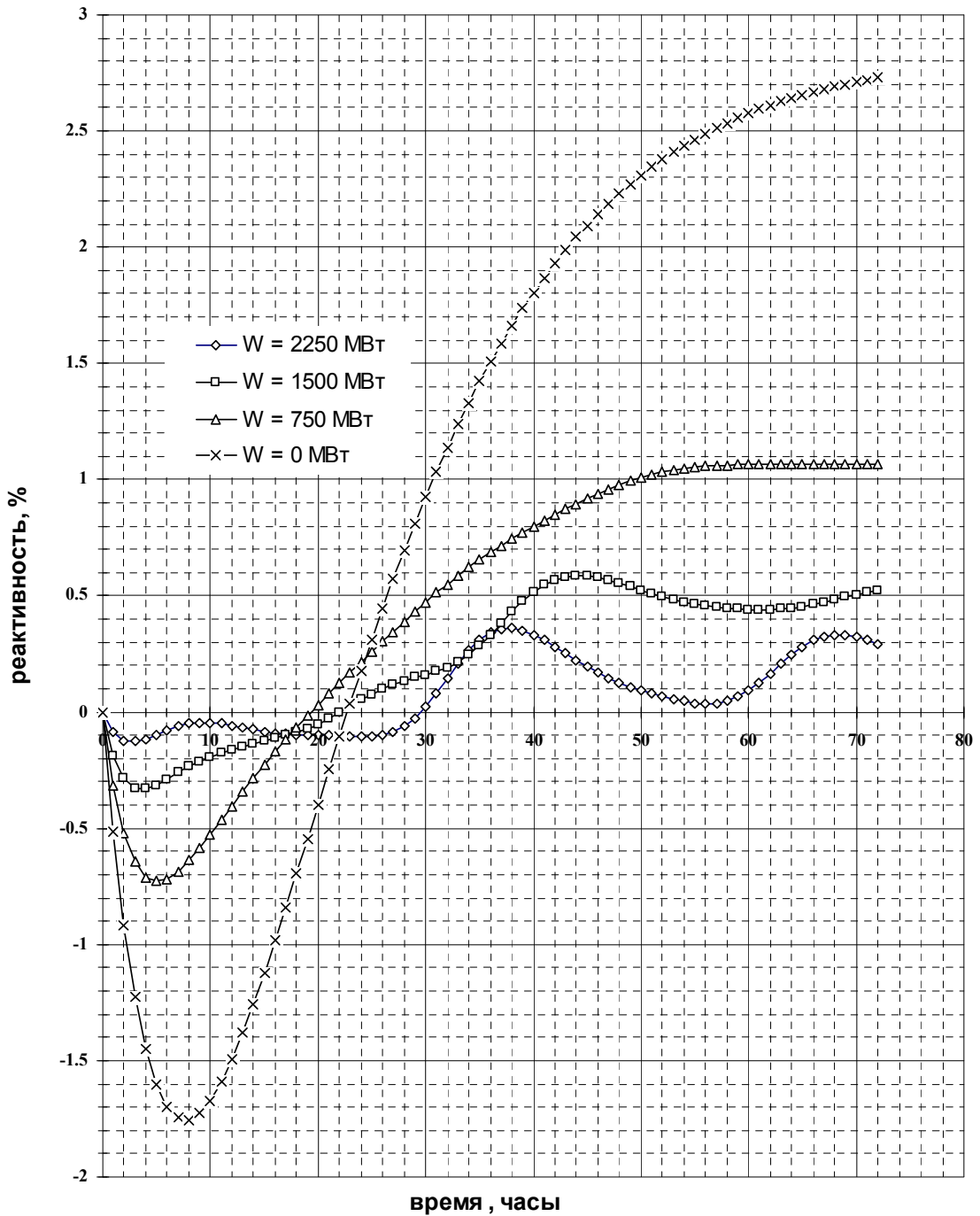


Рис. 7 Зміна реактивності, що пов'язана з перехідним процесом на Хе-135 після різкого зниження потужності з 3000 МВт до 2250 МВт, 1500 МВт, 750 МВт, 0 МВт на кінець кампанії

Висновки

Внесення до моделі РУ в коді RELAP алгоритму розрахунку ксенонових коливань дозволяє уникнути значної похибки при розрахунках процесів пов'язаних із виходом

Тези доповідей 54-ої конференції молодих дослідників ОНПУ-магістрантів “Сучасні інформаційні технології та телекомунікаційні мережі” //Одеса: ОНПУ, 2019, вип.53

реактора на повторну критичність. Одним із головних факторів виникнення такої похибки є те, що існуюча модель реакторної установки не здатна враховувати вплив густини нейтронного потоку на динаміку зміни концентрацій продуктів ділення. Особливо значний внесок це має при розрахунках довготривалих процесів.

Список використаних джерел

1. Симптомно-ориентированный подход обоснования стратегий управления тяжелыми ядерными авариями для минимизации катастрофических экологических последствий / В. И. Скалозубов, В. Н. Ващенко, А. А. Гудима, И. Л. Козлов // Проблемы безопасности атом. электростанций і Чернобиля. - 2014. - Вип. 22. - С. 13–16. - <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6607>
2. Ключников, А. А. Комментарии к комплексной (сводной) программе повышения безопасности энергоблоков АЭС Украины / А. А. Ключников, В. И. Скалозубов, А. В. Шавлаков // Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобиля. - 2011. - Вип. 16. - С. 49–52. - <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/6630>
3. Ключников А. А. Комментарии к проекту основных требований безопасности атомных станций с учетом уроков аварии на АЭС Fukushima-Daiichi / А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. И. Скалозубов [и др.] // Проблемы безопасности атом. электростанций і Чернобиля. - 2014. - Вип. 22. - С. 51–56. - <http://dspace.opu.ua/jspui/handle/123456789/7074>
4. Національний звіт України: Результати проведення «стрес-тестів» / Державна інспекція ядерного регулювання України – 2014. - <http://www.ensreg.eu/sites/default/files/Country%20Report%20UA%20Final.pdf>
5. RELAP5/MOD3 Руководство по коду / С. D. Fletcher, R. R. Schultz – Национальная лаборатория штата Айдахо, 1997.
6. Ганев И. Х. Физика и расчет реактора: учебное пособие для вузов / Под общ. ред. Н. А. Доллежала. – М.: Энергоиздат, 1981. – 368 с.
7. Фізика ядерних реакторів: навчальний посібник / В. М. Павлович; НАН України, Ін-т проблем безпеки АЕС. – Чернобиль (Київ. обл.) : Ін-т проблем безпеки АЕС, 2009. – 224 с.
8. 01.ОБ.УН.АЛ.29 Альбом нейтронно-фізичеких характеристик активной зоны реактора энергоблока №1 ЗАЭС кампания №29 – ГП НАЭК «Энергоатом». – 103 с.