УДК 524.882

С. С. Нечипорук
В. В. Мартинюк

ФІЗИКА ЙОДНОЇ ЯМИ: ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ ТА ВТРАТА КЕРОВАНОСТІ ЯДЕРНИМ РЕАКТОРОМ

Вінницький національний технічний університет

Анотація.

Робота присвячена дослідженню феномену «йодної ями» — критичного перехідного процесу в ядерному реакторі, що виникає внаслідок накопичення ізотопу ^{135}Xe. Розглядаються механізми утворення та розпаду йоду-135 і ксенону-135, їхній вплив на реактивність активної зони та ризики втрати керованості. Значну увагу приділено аналізу аварійних ситуацій, пов'язаних із передчасним підйомом потужності під час йодного отруєння. Дослідження підкреслює важливість дотримання регламентів експлуатації для гарантування ядерної безпеки.

Ключові слова: йодна яма; ксенонове отруєння; реактивність; ^{135}I; ^{135}Xe; перехідні процеси; ядерна безпека; запізнілі нейтрони.

Abstract.

The work focuses on the "iodine pit" phenomenon — a critical transient process in a nuclear reactor resulting from the accumulation of the ^{135}Xe isotope. The mechanisms of formation and decay of iodine-135 and xenon-135, their impact on core reactivity, and the risks of losing control are considered. Special attention is given to the analysis of emergency situations associated with premature power increase during xenon poisoning. The study emphasizes the importance of following operational regulations to ensure nuclear safety.

Keywords: iodine pit; xenon poisoning; reactivity; ^{135}I; ^{135}Xe; transient processes; nuclear safety; delayed neutrons. Ключові слова: йодна яма; отруєння ксеноном; реакційна здатність; ^{135}I; ^{135}Xe; перехідні процеси; ядерна безпека; запізнілі нейтрони.

Вступ

Експлуатація ядерних реакторів базується на підтримці точного балансу нейтронів, проте цей процес суттєво ускладнюється явищем «йодної ями». Це критичний перехідний стан, що виникає внаслідок накопичення ізотопу ^{135}Xe — потужного поглинача нейтронів, який утворюється в результаті розпаду йоду-135 після зниження потужності або зупинки установки. Оскільки генерація ксенону триває навіть після припинення ланцюгової реакції, утворюється дефіцит реактивності, який створює фізичний бар'єр для повторного пуску реактора. Спроби операторів примусово «пересилити» цей ефект часто призводили до втрати керованості та важких аварій, що робить вивчення кінетики йодної ями фундаментальною умовою забезпечення ядерної безпеки та стабільності енергосистем.

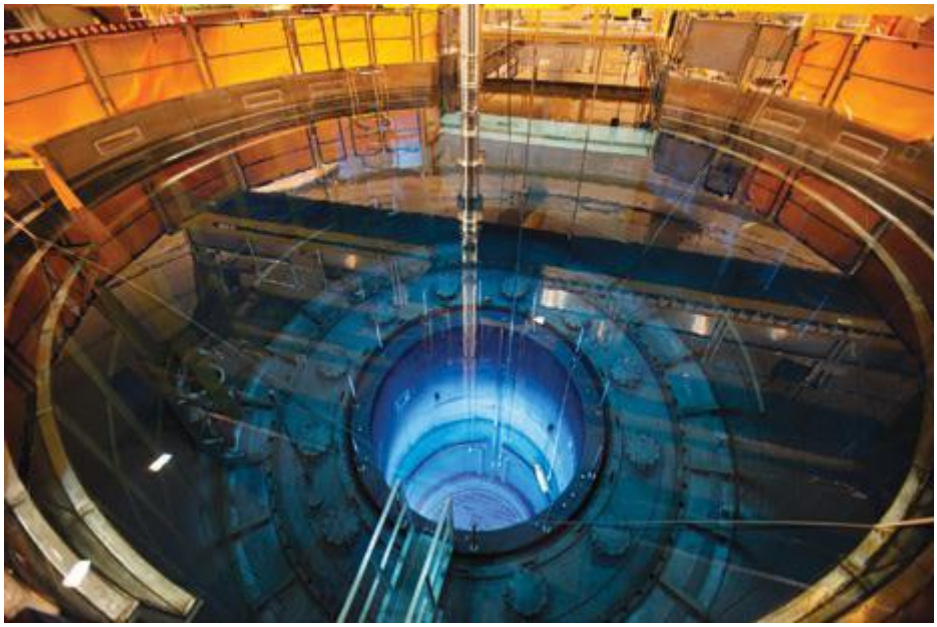


Рис. 1. Світіння Черенкова в активній зоні ядерного реактора під час перехідних процесів

Мета роботи

Спостережувальні та експлуатаційні дані. Основним джерелом даних є показники внутрішньореакторного контролю (датчики нейтронного потоку) та системи моніторингу енерговиділення. Дані автоматизованих систем керування дозволяють фіксувати зміну концентрації поглиначів та визначати динаміку реактивності в реальному часі

Матеріали та методи

Телеметричні та експлуатаційні дані**.** Основним джерелом інформації є показники систем внутрішньореакторного контролю (СВРК), що фіксують щільність нейтронного потоку в реальному часі. Дані дозволяють відстежувати зміну концентрації продуктів поділу та визначати поточний запас реактивності під час перехідних процесів.

Кінетика концентрації йоду -135 (основного попередника ксенону):

$$\frac{dI}{dt} = \gamma_1 \Sigma_f \Phi - \lambda_1 I \quad (1)$$

де I — концентрація йоду-135; γ_1 — вихід йоду при поділі; Σ_f — макроскопічний переріз поділу; Φ — щільність нейтронного потоку; λ_1— стала розпаду йоду.

Зміна реактивності за рахунок отруєння ксеноном:

$$\rho_{Xe} = -\frac{\sigma_X X}{\nu \Sigma_f} \quad (2)$$

Де ρ_{Xe} — від’ємна реактивність; σ_X — мікроскопічний переріз поглинання ксенону-135; X — поточна концентрація ксенону; ν — середнє число нейтронів на один акт поділу.

Спостереження акреції поглиначів. Процес "отруєння" активної зони аналізується через інтенсивність поглинання теплових нейтронів, що дозволяє визначити глибину йодної ями та час, необхідний для відновлення критичного стану реактора.

Комп’ютерне моделювання та симуляції. Чисельне розв’язання рівнянь балансу ізотопів дозволяє прогнозувати динаміку реактивності після зупинки, розраховувати час досягнення максимуму отруєння та моделювати "ксенонові хвилі" в об'ємі активної зони.

Результати дослідження

Дослідження динаміки концентрації ізотопів після зниження потужності реактора показало стрімке зростання концентрації ксенону-135, що зумовлено розпадом йоду-135, період напіврозпаду якого складає приблизно 6,57 години. Встановлено, що максимум отруєння активної зони, відомий як «дно» йодної ями, досягається в інтервалі від 8 до 11 годин після зупинки установки. Глибина цього процесу прямо пропорційна стаціонарній щільності нейтронного потоку перед початком перехідного режиму: для реакторів типу ВВЕР-1000 при повній зупинці введена від’ємна реактивність може значно перевищувати наявний робочий запас, що унеможливлює повторний пуск на термін до 24–30 годин. Аналіз процесу «вигоряння» ксенону під час спроб підйому потужності на фоні отруєння виявив ризик виникнення небезпечного позитивного зворотного зв’язку, коли швидке поглинання ксенону нейтронами вивільняє додаткову реактивність, спричиняючи неконтрольоване зростання потужності. Крім того, у великих активних зонах зафіксовано просторову нерівномірність розподілу поглиначів, що провокує появу «ксенонових хвиль», які вимагають безперервного контролю з боку систем автоматики та операторського персоналу для запобігання локальним перегрівам палива.

Висновки

Проведене дослідження йодної ями демонструє її критичну значущість для безпеки ядерної енергетики. Спостереження за динамікою ксенонового отруєння підтвердили необхідність суворого дотримання часових регламентів при маневруванні потужністю. Аналіз математичних моделей дозволяє краще розуміти межі стабільності активної зони та запобігати аварійним ситуаціям. Вивчення цих процесів сприяє розвитку нових технологій автоматизованого керування та розширює наше розуміння фізики перехідних процесів у складних енергетичних системах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Дементьєв Б. А. Кінетика та регулювання ядерних реакторів. – 2024.
2. Xenon poisoning [Електронний ресурс] // Wikipedia. – 2026.
3. Міжнародне агентство з атомної енергії (IAEA). Nuclear Reactor Physics. – 2022.

Нечипорук Софія Сергіївна — студент групи 2ПІ-25б, факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: sonaneciporuk@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Nechyporuk Sofia Sergiivna — student of group 2PI-25b, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: sonaneciporuk@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia