

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України

Інститут проблем безпеки атомних електростанцій
Національної академії наук України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Сущенко Костянтин Олександрович

УДК 621.039.58

ДИСЕРТАЦІЯ

Моделювання ефекту повторної і зворотної критичності в неорганізованих водородних системах з низькозбагаченим розмножуючим середовищем

143 Атомна енергетика

14 Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Наукові керівники

Клевцов Сергій Валерійович, кандидат технічних наук, доцент

Носовський Анатолій Володимирович, академік НАН України, доктор
технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Сущенко К.О. Моделювання ефекту повторної і зворотної критичності в неорганізованих водо-уранових системах з низькозбагаченим розмножуючим середовищем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктор філософії за спеціальністю 143 – Атомна енергетика – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2023.

Підготовка здійснювалась на кафедрі атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки та в Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню проблеми, пов'язаної із забезпеченням ядерної безпеки системи Новий Безпечний Конфайнмент – Об'єкт «Укриття» (НБК-ОУ) при довготривалому зберіганні паливовмісних матеріалів (ПВМ), що утворилися в результаті аварії на 4-му енергоблоці ЧАЕС у 1986 р. Ризики виникнення самопідтримної ланцюгової реакції (СЛР) існують після встановлення НБК у зв'язку зі зміною режиму температури та вологості в ОУ і фактом існування скупчення ПВМ з критичною масою урану в зоні проплавлення двохметрового моноліту залізобетону опорної плити (ОП) шахти реактора. Ядерна небезпека цього скупчення пов'язана зі специфікою водо-уранових систем з низькозбагаченим розмножувальним середовищем. Для таких систем характерна наявність двох значень критичності в діапазоні оптимальної об'ємної густини води. При надходженні води в ядерно-небезпечне скупчення (ЯНС) досягається перше значення критичності. При переході другого значення критичності подальше зростання концентрації води призводить до перезволоження та переходу ЯНС у підкритичний стан. Втрата води перезволоженим розмножувальним середовищем ЯНС також створює ризики критичності. Для того щоб розділяти ці два процеси, надалі в дисертації введено терміни: повторна критичність – досягнення першого значення критичності при надходженні води в сухе ЯНС; та «зворотна» критичність – досягнення другого

значення критичності при виході води з перезволоженого середовища ЯНС.

У червні 1990 року потужна нейтронна аномалія була ідентифікована як СЛР при повторній критичності, що виникла в процесі надходження води в скупчення ПВМ, що остигає. Гасіння СЛР відбулося в результаті перезволоження розмножувального середовища ЯНС та переході в підкритичний стан за другим значенням критичності. До встановлення НБК (29.11.2016) повне зволоження розмножувального середовища ЯНС утримувалося за рахунок регулярних надходжень атмосферних опадів та конденсату, що й забезпечувало стабільний стан підкритичності ЯНС. Після встановлення НБК та припинення доступу до об'єкта «Укриття» атмосферних опадів спостерігається постійне зростання ЩПН на периферії ЯНС.

В *першому розділі* представлено огляд результатів модельних та експериментальних досліджень, присвячених вивченню продуктів взаємодії ядерного палива з конструкційними матеріалами ядерних енергетичних установок утворених внаслідок важких аварій на АЕС з розплавленням активної зони реактора. Виділено результати досліджень, найважливіші для забезпечення ядерної безпеки продуктів взаємодії розплаву палива з бетоном (ВРБ). Результати досліджень продуктів ВРБ дозволили сформулювати уявлення щодо можливого хімічного складу, структури та геометричних параметрів ЯНС ПВМ в ОУ. Визначено основні проблеми, пов'язані з отриманням даних, щодо продуктів ВРБ, які можуть бути утворені внаслідок важких аварій на АЕС.

Наведено результати оцінки нейтронно-фізичних параметрів U-Si версії фізичної моделі, яка раніше використовувалась у дослідженнях ЯНС та умов досягнення її критичного стану. Хімічний склад фізичної моделі формувався за хімічним складом чорних лавоподібних ПВМ (ЛПВМ), визначеним за відбором проб у зоні проплавлення ОП, з додаванням паливних таблеток. Показано, що існує нова версія хімічного складу ЯНС коріумного походження, яка не застосовувалась раніше в розрахунках нейтронно-фізичних характеристик ЯНС. Вона ґрунтується на тому, що коріум утворився в штатному положенні активної зони (АЗ), а ПВМ в зоні проплавлення ОП утворились в результаті взаємодії коріуму з бетоном.

У *другому розділі* проведено аналіз багаторічного моніторингу динаміки щільності потоку нейтронів (ЩПН) у приміщенні 305/2 комплексу НБК-ОУ за період 1988 – 2023 рр. Показано, що в червні 1990 р. могла бути зареєстрована потужна нейтронна аномалія, ідентифікована як СЛР при повторній критичності ЯНС. Гасіння СЛР відбулось в результаті досягнення другого значення критичності. Динаміка ЩПН у приміщенні 305/2 стабілізувалася до встановлення НБК. Після встановлення НБК спостерігається постійне зростання ЩПН в приміщенні 305/2, яке може бути пов'язане з процесом втрати води та підвищенням ризику виникнення «зворотної» критичності.

Визначено вихідні дані для фізичної моделі ЯНС. Уточнена локалізація в ОП та геометрія ЯНС по пробах у вибоях свердловин на відм. 9,1 м та температурним полям у бетоні ОП. Кількість палива в ЯНС оцінено за результатами вимірювань температури бетону ОП та гарячої плями на стелі паророзподільного коридору (ПРК) у прим. 210/7.

В *третьому розділі* запропоновано версію послідовності аварійних процесів на активній стадії аварії реактору 4-го енергоблоку ЧАЕС за сценарієм утворення розплаву палива і цирконію оболонок перегрітих твелів (коріуму) ще в штатному положенні АЗ, його виходом на ОП та утворенням ЯНС як продукту взаємодії розплаву (коріуму) з бетоном (ВРБ). Для формування вихідних даних для розрахунку нейтронно-фізичних параметрів уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС ПВМ як продуктів ВРБ коріумного походження були використані результати зведення матеріально-енергетичного балансу для так званої «доменної» версії утворення ЯНС та чорних ЛПВМ у приміщенні 305/2.

Змодельовано динаміку ЩПН при повторній критичності 1990 року та «зворотній» критичності з використанням системи диференційних рівнянь для основних параметрів, що визначають динаміку СЛР в середовищі ЯНС. Показано, що максимальне значення реактивності при «зворотній» критичності більше, ніж при повторній (1990 р.), що визначається позитивним температурним коефіцієнтом реактивності при «зворотній» критичності, при цьому стримуючим фактором є тільки ефект Доплера. Проаналізовано результати моделювання ефекту повторної

критичності 1990 року. Показано, що в моделі не враховуються процеси, пов'язані з механізмом надходження води в гаряче скупчення. Недоліки моделювання пов'язані з неможливістю врахування в точковій моделі таких просторових процесів як надходження води з периферії гарячого (понад 100 °С) скупчення ПВМ та випаровування води по фронту змочування.

Вдосконалено фізичну модель ЯНС ПВМ. Розроблено структуру еквівалентної гетерогенної комірки розмножувального середовища ЯНС. На основі запропонованої версії утворення ЯНС коріумного походження визначено актуальні вихідні дані для уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС.

Розроблено алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС, що використовує результати розрахунку нейтронно-фізичних характеристик уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС, отримані в програмному коді MCNP6.

В *четвертому розділі* наводяться можливі способи рішення проблем, пов'язаних із гарантованим забезпеченням ядерної безпеки НБК-ОУ шляхом виключення ризику досягнення аварійних рівнів підкритичності ЯНС.

Проведено розрахункові дослідження діапазону параметрів фізичної моделі ЯНС ПВМ, що забезпечують два значення критичності у програмному коді MCNP6: геометричні параметри ЯНС, маса та об'ємна густина урану, збагачення ПВМ по ^{235}U та ^{239}Pu , хімічний склад та густина ПВМ, доступна для води пористість розмножувального середовища, гетерогенність ПВМ. Наведено залежність ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів (K_{eff}) від об'ємної густини води та гетерогенності розмножувального середовища.

Для U-Zr версії фізичної моделі ЯНС отримані консервативні оцінки швидкості введення позитивної реактивності та часу досягнення аварійних значень підкритичності при втраті води розмножувальним середовищем.

Розглянуто методи оперативного та превентивного запобігання досягнення аварійних рівнів підкритичності ЯНС.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

– розроблено алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівнів

підкритичності ЯНС ПВМ в зоні проплавлення опорної плити шахти реактора у південно-східній частині приміщення 305/2 комплексу НБК-ОУ за допомогою ретроспективного аналізу результатів моніторингу ЩПН СКЯБ за період від встановлення НБК, що враховує вплив сезонних коливань температури і вологості в підреакторних приміщеннях;

- виконано розрахунки в програмному коді MCNP6 уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС, яка, у порівнянні з існуючою уран-силікатною моделлю дозволяє більш точно оцінити нейтронно-фізичні характеристики ЯНС.

Вдосконалено:

- математичну модель для дослідження можливості виникнення, розвитку та властивостей СЛР в ПВМ об'єкту «Укриття». Враховано температурний ефект реактивності, що дає змогу отримати кращу точність розрахунку характеристик СЛР. В рамках даної моделі проведено порівняння характеру розвитку СЛР при повторній та зворотній критичності в ЯНС ПВМ.

Знайшли подальший розвиток:

- підходи до вибору діапазону параметрів критичності фізичної моделі ЯНС, що забезпечують реалізацію ефектів повторної та зворотної критичності, шляхом оптимізації вхідних даних для розрахунків;
- уран-цирконієва фізична модель ЯНС. Використано ширший набір вихідних даних для розрахунку хімічного складу ЯНС.

Ключові слова: *Новий Безпечний Конфайнмент, ядерна безпека, реактивність, повторна критичність, «зворотна» критичність, моделювання, коріум, ядерне паливо, паливовмісні матеріали, самопідтримна ланцюгова ядерна реакція.*

ANNOTATION

Sushchenko K.O. Modeling of the effects of re-criticality and "recurrent" criticality in water-uranium systems with low-enriched breeding medium. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Ph.D. thesis in the field of knowledge 143 «Nuclear power engineering». – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2023.

The postgraduate training was carried out at the Department of Atomic Energy of the National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute" of the Ministry of Education and Science and at the Institute of Safety Problems of Nuclear Power Plants of the National Academy of Sciences of Ukraine.

The dissertation is devoted to the solution of the problem related to ensuring the nuclear safety of the New Safe Confinement (NSC) during the long-term storage of fuel-containing materials (FCM) resulting from the accident at the 4th power unit of the Chornobyl NPP in 1986. Risks of occurrence of a self-sustaining chain reaction (SCR) exist after the installation of the NSC due to changes in the Shelter temperature and humidity conditions. The reason for this is the presence of FCM cluster with a critical mass of fuel in the penetration zone of the two-meter reinforced concrete base plate (BP) of the reactor shaft. The nuclear danger of this cluster is determined by the specificity of water-uranium systems with a low-enriched breeding medium. Such systems are characterized by the presence of two criticality values in the range of optimal volume density of water. The first critical value is reached when water enters the nuclear-dangerous cluster (NDC). When the second criticality value is passed, the further increase in water concentration leads to overwetting and the transition of the NDC to a subcritical state. The loss of water from the overmoistened NDC breeding medium also creates risks of criticality. In order to separate these two processes, the following terms are introduced in the dissertation: re-criticality – reaching the first criticality value when water enters the dry NDC; and recurrent criticality – the achievement of the second criticality value when water exits the overmoistened NDC medium.

In June 1990, a powerful neutron anomaly was identified as a re-criticality caused by

the inflow of water into the cooling FCM cluster. Extinction of SCR occurred as a result of overmoistening of the breeding medium of the NDC and transition to a subcritical state after the second value of criticality. Before the NSC installation (November 29, 2016), the complete humidification of the breeding medium of the NDC was maintained due to regular precipitation and condensate, which ensured a stable subcritical state of the NDC. After the NSC installation and the termination of precipitation access to the "Shelter", there is a constant increase in the NFD on the periphery of the NDC. Currently, the loss of water by the overmoistened breeding environment of the NDC creates risks of "recurrent" criticality.

In the *First chapter* an overview of models and experimental studies devoted to the study of the products of the interaction of nuclear fuel with structural materials of nuclear power plants formed as a result of severe accidents at nuclear power plants with melting of the reactor core is presented. The research results most important for ensuring the nuclear safety of molten corium-concrete interaction (MCCI) products are highlighted. The results of studies of MCCI products made it possible to form an idea about the possible chemical composition, structure, and geometric parameters of NDC in the object "Shelter". The main problems associated with obtaining data on the composition and structure of MCCI products, which may be formed as a result of severe accidents at nuclear power plants, have been identified.

The results of the estimation of the U-Si version parameters of the physical model, which was previously used in the research of the NDC and the conditions for reaching its critical state, are given. The chemical composition of the physical model was formed according to the chemical composition of black lava-like fuel containing materials (LFCM), determined by sampling in the BP melting zone, with the addition of fuel tablets. It is shown that there is a new version of the chemical composition of corium-derived NDC, which was not previously used in the calculations of the neutron-physical characteristics of NDC. It is based on the fact that corium was formed in the state position of the reactor core, and FCM in the zone of BP penetration was formed as a result of the corium-concrete interaction.

In the *second chapter*, an analysis of the long-term monitoring of the dynamics of the neutron flux density (NFD) in room 305/2 of the NSC-SO complex for the period 1988-2023 was carried out. It is shown that in June 1990, a powerful neutron anomaly identified

as SCR, could have been registered during the re-criticality of the NDC. SCR extinguishing occurred as a result of reaching the second critical value. NFD dynamics in room 305/2 stabilized before the NSC was installed. After NSC installation, there is a constant increase in NFD in room 305/2, which is may be related to the process of water loss and increase in the risk of "recurrent" criticality.

The initial data for the physical model of the NDC were determined. Geometry of NDC in BP and its localization were refined based on samples in well boreholes on mark 9.1 m and temperature fields in BP concrete. The amount of fuel in the NDC was estimated based on the results of the temperature measurement of the BP concrete and the hot spot on the ceiling of the steam distribution corridor (SDC) in room 210/7.

In the *third chapter* a version of emergency processes sequence at the active stage of the accident at the 4th power unit of the Chornobyl NPP with the formation of corium according to the scenario of the formation of fuel melt and zirconium of superheated fuel assemblies' shells (corium) in the regular position of the reactor core is proposed. As a result, the output of corium on the BP and the formation of NDC as a MCCI product. To form the initial data for calculating the neutron-physical parameters of the uranium-zirconium physical model of corium origin, proposed in the work, the results of the material-energy balance for the so-called "domain" version of the formation of NDC and black LFCM in room 305/2 were used.

The dynamics of NFD at re-criticality in 1990 and "recurrent" criticality were simulated using a system of differential equations for the main parameters that determine the dynamics of SCR in the NDC breeding medium. It is shown that the maximum value of reactivity at "recurrent" criticality is greater than at re-criticality (1990), which is determined by the positive temperature reactivity factor at "recurrent" criticality, while the restraining factor is only the Doppler effect. The results of modeling the kinetics of the re-criticality in 1990 are analyzed. It is shown that the model does not take into account processes related to the mechanism of water entering the hot cluster. Modeling drawbacks are associated with the impossibility of taking into account in a point model such spatial processes as the inflow of water from the periphery of hot (over 100 °C) FCM cluster and water evaporation along the wetting front.

The physical model of the NDC of FCM was improved. The structure of the equivalent heterogeneous cell of the NDC breeding medium was developed. On the basis of the proposed version of the corium origin of NDC, the relevant initial data for the uranium-zirconium physical model of NDC have been determined.

A new algorithm for estimating the current and forecasted level of the NDC subcriticality has been developed, which uses the results of calculating the neutron-physical characteristics of the uranium-zirconium physical model of the NDC obtained in the MCNP6 software code.

In the *fourth chapter*, possible ways of solving problems associated with the guaranteed nuclear safety of the NSC-SO by eliminating the risk of reaching emergency levels of subcriticality of the NDC are given.

Calculation studies of the NDC physical model were carried out of the range of parameters that provide two criticality values in the MCNP6 program code such as: geometric parameters of the NDC, mass and mass content of uranium, enrichment of FCM with ^{235}U and ^{239}Pu , chemical composition and density of FCM, porosity of the breeding medium accessible to water, heterogeneity of FCM. The dependence of the effective neutron multiplication factor (K_{ef}) on water concentration, heterogeneity, and temperature of the breeding medium is presented.

For the U-Zr version of the NDC physical model, conservative estimates of the introduction rate of positive reactivity and the time to reach emergency subcritical values in the case of water loss by the breeding medium were obtained.

The methods of operational and preventive suppression of emergency subcritical levels of the NDC are considered.

Scientific novelty of the obtained results:

For the first time:

- an algorithm was developed to estimate the current and forecasted subcriticality levels of the NDC of FCM in the BP melting zone in southeastern part of room 305/2 of the NSC-OU complex by means of a retrospective analysis of the Nuclear Safety Monitoring System NFD monitoring results for the period from the installation of the NSC, which takes into account the

influence of seasonal fluctuations in temperature and humidity in the sub-reactor premises;

- calculations of the uranium-zirconium physical model of the NDC were performed in the MCNP6, which, in comparison with the existing uranium-silicate model, provides a more accurate assessment of the neutronic characteristics of the NDC.

Improved:

- the mathematical model for studying the possibility of occurrence, development and properties of SCR in the FCM of the object "Shelter". The temperature effect of reactivity is taken into account, which makes it possible to obtain better accuracy in calculating the characteristics of SCR. Within the framework of this model, a comparison of the nature of the development of SCR in case of re-criticality and "recurrent" criticality in NDC of FCM was carried out.

Found further development:

- approaches to selecting the range of criticality parameters of the NDC physical model, which ensure the implementation of the effects of re-criticality and "recurrent" criticality, by optimizing the input data for calculations;
- uranium-zirconium physical model of the NDC. A wider set of input data was used to calculate the chemical composition of the NDC.

Keywords: *New Safe Confinement, nuclear safety, reactivity, re-criticality, "recurrent" criticality, modelling, corium, nuclear fuel, fuel-containing materials, self-sustaining nuclear chain reaction.*

Наукові праці, у яких висвітлено основні теоретичні та практичні результати дослідження:

- 1) Висотський Є. Д., Сущенко К. О., Годун Р. Л. Експертна оцінка поточного рівня підкритичності скупчень паливовмісних матеріалів після встановлення Нового

Безпечного Конфайнмента / Ядерна енергетика та довкілля, 2020, Вип. 16, С. 49 – 56.

URL: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.20.1.6>

Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму оцінки поточного рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення. Оцінка параметрів критичності ядерно-небезпечного скупчення. Створення графіків, діаграм, таблиць та малюнків.

Висотський Є. Д.: Визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

Годун Р. Л.: Аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Аналіз результатів розрахунку. Формулювання висновків.

2) M. V. Saveliev, R. L. Godun, M. A. Pantin, I. S. Skiter, K. O. Sushchenko. The Nuclear Safety Monitoring System for fuel-containing materials located in destroyed unit no. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization / Nuclear Physics and Atomic Energy 2022, volume 23, issue 3, pages 172 – 181.

URL: <https://doi.org/10.15407/jnpae2022.03.172> (Scopus Q4)

Особистий внесок здобувача: виконано огляд системи контролю ядерної безпеки, проводився аналіз показів щільності потоку нейтронів, зареєстрованих блоками детектування системи контролю ядерної безпеки. Висловлено пропозиції щодо модернізації системи контролю ядерної безпеки.

M. V. Saveliev (М. В. Савельєв): написання вступу та літературного огляду. Виконано огляд системи контролю ядерної безпеки. Моніторинг щільності потоку нейтронів за допомогою аналізу кореляції сигналів, зареєстрованих групами детекторів. Створення або адаптація комп'ютерного коду, алгоритмів для обробки даних.

M. A. Pantin (М. А. Пантін): ідентифікація нейтронної аномалії з використанням нечіткої логіки. Проведення статистичних та математичних розрахунків. Створення графіків, діаграм, таблиць та малюнків.

R. L. Godun (Р. Л. Годун): створення першого варіанту тексту статті. Створення ідей або формулювання цілей дослідження. Опис модернізації системи контролю ядерної безпеки. Формулювання висновків.

I. S. Skiter (І. С. Скітер): статистична ідентифікація аномалій у зареєстрованих сигналах. Моніторинг щільності потоку нейтронів за допомогою нейтронно-шумової діагностики.

3) Сущенко К. О., Носовський А. В. Стан наукової проблеми щодо дослідження характеристик продуктів взаємодії розплаву ядерного палива з бетоном. / Ядерна енергетика та довкілля, 2023, Вип. 27, С. 30 – 43.

URL: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.4>

Особистий внесок здобувача: виконано літературний огляд міжнародних та вітчизняних досліджень характеристик продуктів взаємодії розплаву ядерного палива з бетоном. Виокремлено основні проблеми під час дослідження нейтронно-фізичних характеристик продуктів взаємодії розплаву ядерного палива з бетоном.

Носовський А. В.: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Керівництво, координація та планування дослідницької діяльності. Критичний аналіз, коректура та покращення тексту статті. Загальний нагляд за ходом виконання наукової роботи.

4) O. V. Mykhailov, M. V. Saveliev, K. O. Sushchenko, V. V. Dmytryshyn. 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, 2023, № 27, С. 44 – 55.

URL: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.5>

Особистий внесок здобувача: розрахунок та побудова рівнянь регресії для динаміки щільності потоку нейтронів та потужності експозиційної дози, зареєстрованих блоками детектування СКЯБ ІАСК комплексу НБК-ОУ.

О. V. Mykhailov (О. В. Михайлов): визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Регресійний аналіз та оцінка середньорічного темпу зміни щільності потоку нейтронів та експозиційної дози випромінювання. Аналіз отриманих результатів. Формулювання висновків.

М. V. Saveliev (М. В. Савельєв): створення або адаптація комп'ютерного коду, алгоритмів для обробки даних. Загальний опис вимірювального обладнання та використаного програмного забезпечення.

V. V. Dmytryshyn (В. В. Дмитришин): створення рисунків, графіків та таблиць. Упорядкування, збереження та підтримка первинних даних. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

5) R. L. Godun, S. V. Kupriianchuk, K. O. Sushchenko, A. Iatsyshyn, A. Lahoiko. Neutron Incident at the Chornobyl NPP Shelter Object: Study of the Causes and Impacts of Safety in the New Confinement / Systems, Decision and Control in Energy IV, 2023, p. 91 – 111.

URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-22500-0_6 (Scopus Q4)

Особистий внесок здобувача: складено хронологію нейтронного інциденту 1990-го року в об'єкті «Укриття». Визначення щільності потоку нейтронів, реактивності, максимального K_{ef} впродовж нейтронного інциденту.

R. L. Godun (Р. Л. Годун): визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Опис причин нейтронного інциденту 1990-го року в об'єкті «Укриття». Висунуто гіпотези щодо найбільш імовірних процесів при нейтронному інциденті.

S. V. Kupriianchuk (С. В. Купріяничук): літературний огляд наукової проблеми. Оцінка впливу рідких поглиначів нейтронів на покази детекторів. Аналіз динаміки швидкості рахунку блоків детектування.

A. V. Iatsyshyn (А. В. Яцишин): відновлення динаміки щільності потоку нейтронів у скупченні паливовмісних матеріалів. Опис найбільш імовірних процесів при нейтронному інциденті.

A. M. Lahoiko (А.М. Лахойко): критичний аналіз, коректура, переклад та покращення тексту статті. Створення графіків, діаграм, таблиць та малюнків для статті. Написання висновків.

6) Сущенко К. О. Оцінка можливості виникнення критичності в великому вертикальному потоці ПВМ на об'єкті Укриття / К. О. Сущенко, Є. Д. Висотський, К. Веттер, М. В. Савельєв // Ядерна та радіаційна безпека – 2025. – № 2(106). – С. 40 – 49.

URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).04) (Scopus Q3)

Особистий внесок здобувача: створення фізичної моделі скупчення паливовмісних матеріалів в четвертому пароскидному клапані комплексу НБК-ОУ. Розрахунок

нейтронно-фізичних характеристик цієї моделі в програмному коді MCNP 6. Створення графіків, діаграм, таблиць та малюнків для статті.

Kai Vetter (К. Веттер): надання комп'ютерного коду, алгоритмів для обробки даних. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів. Формулювання висновків.

Ye. D. Vysotskiy (Є. Д. Висотський): визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Інтерпретація результатів розрахунку. Критичний аналіз. Формулювання висновків.

M. V. Saveliev (М. В. Савельєв): написання вступу та літературного огляду статті. Інтерпретація результатів розрахунку. Коректура та покращення тексту статті. Формулювання висновків.

Публікації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7) Є. Д. Висотський, А. А. Дорошенко, Р. Л. Годун, А. Д. Скорбун, К. О. Сущенко. Statistical analysis of neutron activity, registered by the nuclear safety monitoring system (NSMS IAMS) NSC-SO // Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018. С. 87.

Особистий внесок здобувача: аналіз можливих причин зростання щільності потоку нейтронів, що реєструється системою контролю ядерної безпеки.

Є. Д. Висотський: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Критичний аналіз, коректура та покращення тексту. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

А. Д. Скорбун: розробка або створення методів дослідження. Проведення статистичних та математичних розрахунків.

Р. Л. Годун: аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованої системою контролю ядерної безпеки.

А. А. Дорошенко: виконання експериментів та збір даних. Обробка динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованої системою контролю ядерної безпеки. Формулювання висновків.

8) Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, К. О. Сущенко. The dynamics of neutron activity and subcriticality of a nuclear-dangerous cluster in the conditions of NSC-SO complex // Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018. С. 64 – 67.

Особистий внесок здобувача: опис ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів. Ретроспективний аналіз динаміки щільності потоку нейтронів на периферії ядерно-небезпечного скупчення.

Є. Д. Висотський: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Критичний аналіз, коректура та покращення тексту. Опис ефектів повторної та зворотної критичності.

Р. Л. Годун: написання вступу. Опис фізичної моделі ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів. Формулювання висновків.

А. А. Дорошенко: виконання експериментів та збір даних. Обробка динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованої системою контролю ядерної безпеки.

9) Р. Л. Годун, К. О. Сущенко. The level of nuclear safety of fuel-containing materials inside the NSC “Arka” // Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018. С. 70 – 71.

Особистий внесок здобувача: літературний огляд розрахункових і експериментальних досліджень ядерно-небезпечного скупчення.

Р. Л. Годун: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Критичний аналіз, коректура та покращення тексту доповіді. Формулювання висновків.

10) Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, К. О. Сущенко. Оцінка поточного і прогностичного рівня підкритичності потенційно ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів // Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2019. С. 38 – 42.

Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму оцінки поточного рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення. Оцінка швидкості введення

позитивної реактивності в розмножувальне середовище ядерно-небезпечного скупчення.

Висотський Є. Д.: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

Годун Р. Л.: аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Аналіз результатів розрахунку. Формулювання висновків.

11) Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, К. О. Суценко. Експертна оцінка поточного і прогнозного рівня підкритичності потенційно ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів // XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 8-12 квітня 2019 року). – Тези доповідей. – С. 77 – 78.

Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму оцінки поточного рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення. Оцінка швидкості введення позитивної реактивності в розмножувальне середовище ядерно-небезпечного скупчення.

Висотський Є. Д.: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

Годун Р. Л.: аналіз динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованих Системою контролю ядерної безпеки. Аналіз результатів розрахунку. Формулювання висновків.

12) R. L. Godun, S. V. Kupriianchuk, K. O. Sushchenko. Assessment of the Existing Safety Barriers and the Effectiveness of the Subcriticality Operational Control of Fissile Materials Clusters Localized Inside the Shelter Object / Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, September 7 –10, 2020, 7 p.

Особистий внесок здобувача: Оцінка ефективності введення розчинів нейтронопоглинаючих матеріалів в зону локалізації ядерно-небезпечного скупчення.

R. L. Godun (Р. Л. Годун): визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження.

Оцінка ефективності оперативного контролю поточного рівня підкритичності скупчень паливовмісних матеріалів.

S. V. Kupriianchuk (С. В. Купріяничук): літературний огляд наукової проблеми. Опис бар'єрів ядерної безпеки комплексу «НБК-ОУ». Оцінка впливу рідких поглиначів нейтронів на покази детекторів. Формулювання висновків.

13) Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, М.В. Савельєв, А. А. Дорошенко, К. О. Сущенко. Ядерна безпека системи ОУ-НБК // Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDESCO 2020. С. 60 – 63

Особистий внесок здобувача: аналіз ядерної безпеки Нового Безпечного Конфайнменту. Створення фізичної моделі ядерно-небезпечного скупчення в програмному коді MCNP6.

Є. Д. Висотський: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Аналіз фізичних процесів при протіканні ефектів повторної та зворотної критичності в паливовмісних матеріалах.

М. В. Савельєв: критичний аналіз, коректура та покращення тексту. Формулювання висновків. Створення програмного забезпечення для обробки даних, зареєстрованих системою контролю ядерної безпеки.

Р. Л. Годун: написання вступу. Опис фізичної моделі ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів. Формулювання пропозицій щодо ефективного моніторингу параметрів скупчень паливовмісних матеріалів у підреакторних приміщеннях комплексу НБК-ОУ.

А. А. Дорошенко: літературний огляд наукової проблеми. Обробка динаміки щільності потоку нейтронів, зареєстрованої системою контролю ядерної безпеки.

14) Р. Л. Годун, М. В. Савельєв, Є. Д. Висотський, К. О. Сущенко, І. С. Скітер Аналіз нейтронної активності на периферії локалізованих в НБК-ОУ накопичень паливовмісних матеріалів // Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2020 : тези доповідей П'ятнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції). – Чернігів : ЧНТУ, 2020. – С. 103 – 107.

Особистий внесок здобувача: аналіз динаміки щільності потоку нейтронів на периферії ядерно-небезпечного скупчення.

Є. Д. Висотський: визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Загальний нагляд за ходом виконання наукової роботи. Написання вступної частини. Формулювання висновків.

М. В. Савельєв: створення або адаптація комп'ютерного коду, алгоритмів для обробки даних. Загальний опис вимірювального обладнання та використаного програмного забезпечення

Р. Л. Годун: критичний аналіз, коректура, переклад та покращення тексту статті. Перевірка достовірності та точності отриманих результатів.

І. С. Скітер: проведення статистичних розрахунків. Створення графіків, діаграм, таблиць та малюнків для статті.

15) Sushchenko K.O., Godun, R.L., Comprehensive analysis and interpretation of a neutron incident registered at the peripherals of nuclear dangerous fissile materials cluster in june 1990. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2021 (м. Славутич). С. 278 – 279.

Особистий внесок здобувача: аналіз фізичних процесів під час критичного інциденту 1990 року в об'єкті «Укриття». Формулювання висновків

R. L. Godun (Р. Л. Годун): визначення загальної ідеї, цілей та завдань дослідження. Опис причин нейтронного інциденту 1990-го року в об'єкті «Укриття». Висунуто гіпотези щодо найбільш імовірних процесів при нейтронному інциденті.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	23
ВСТУП.....	25
1. СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ	
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТІВ ВЗАЄМОДІЇ РОЗПЛАВУ ЯДЕРНОГО	
ПАЛИВА З БЕТОНОМ	33
1.1 Перелік міжнародних робіт, присвячених дослідженню процесів взаємодії	
ядерного палива з конструкційними матеріалами при запроектних аваріях	33
1.2 Результати досліджень структури продуктів ВРБ	38
1.3 Дослідження параметрів критичності продуктів ВРБ на об'єкті «Укриття»	41
1.4 Уточнюючі дослідження щодо матеріального складу та структури ЯНС.....	47
1.5 Висновки до розділу 1	48
2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ ЯК	
ОБ'ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ	51
2.1 Локалізація ЯНС	51
2.1.1 Дослідження меж зони проплавлення за допомогою свердловин в ОП	51
2.1.2 Дослідження температурних полів в ОП.....	53
2.2 Інструментальний контроль стану скупчень ПВМ в Об'єкті «Укриття».	55
2.2.1 Система Контролю Ядерної Безпеки Об'єкту «Укриття»	55
2.2.2 Експертно-дослідницька система ІПБ АЕС	59
2.3 Методи аналізу динаміки ЩПН, зареєстрованої СКЯБ	61
2.3.1 Статистична ідентифікація аномалій сигналу.....	61
2.3.2 Методи нейтронно-шумової діагностики	64
2.4 Аналіз динаміки ЩПН в підреакторному приміщенні 305/2.....	66
2.4.1 Аналіз динаміки ЩПН до встановлення НБК	66
2.4.2 Аналіз динаміки ЩПН після встановлення НБК	72
2.5 Висновки до розділу 2.....	80

3. РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛЕЙ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ ЯК ПРОДУКТУ ВЗАЄМОДІЇ КОРИУМУ З БЕТОНОМ.....	83
3.1 Технологічні процеси утворення скупчень ПВМ у підреакторному приміщенні 305/2	83
3.2 Концептуальна модель ЯНС	86
3.3 Розробка фізичної моделі ЯНС. Вхідні дані для фізичної моделі	87
3.3.1 Масова частка урану, вигоряння палива	87
3.3.2 Елементний склад ЯНС	88
3.3.3 Крок решітки	89
3.3.4 Відбивачі	89
3.4 Алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС	90
3.4.1 Вихідні дані для алгоритму	91
3.4.2 Результат розрахунку	92
3.4.3 Опис алгоритму	92
3.4.3.1 Підготовка вихідних даних	92
3.4.3.2 Розрахунок	95
3.4.3.3 Представлення результатів.....	101
3.5 Висновки до розділу	101
4. ЯДЕРНА НЕБЕЗПЕКА ПРИ ПОВТОРНІЙ І «ЗВОРОТНІЙ» КРИТИЧНОСТІ	103
4.1 Результати оцінки нейтронно-фізичних характеристик ЯНС	103
4.2 Оцінка поточного та прогнозованого рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення	109
4.2.1 Підготовка вхідних даних	109
4.2.2 Математичне моделювання.....	112
4.2.3 Результати розрахунків.....	122
4.3 Моделювання повторної критичності 1990 року та зворотної критичності в розмножувальному середовищі ЯНС	127
4.3.1 Моделювання повторної критичності 1990 року.....	127

	22
4.3.2 Моделювання зворотної критичності	129
4.4 Моделювання нейтронно-фізичних характеристик низькозбагачених підкритичних скупчень ПВМ.....	132
4.4.1 Параметри фізичної моделі	133
4.4.2 Результати розрахунків у коді MCNP. Верифікація фізичної моделі.....	137
4.5 Запобігання досягнення аварійних значень підкритичності	139
4.6 Висновки до розділу	141
ВИСНОВКИ.....	142
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	144
ДОДАТОК А. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТОЧНОГО І ПРОГНОЗОВАНОГО РІВНЯ ПІДКРИТИЧНОСТІ ЯДЕРНО- НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ.....	158
ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ	169
ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВТОРНОЇ КРИТИЧНОСТІ 1990 РОКУ	181
ДОДАТОК Г. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ	183

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

$K_{\text{эф}}$	ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів
MCNP	Monte Carlo N-Particle Transport Code
SIP	Shelter Implementation Plan
WIMS	Winfrith Improved Multigroup Scheme
АЕС	атомна електростанція
АЗ	активна зона
БД	блок детектування
БЗД	блок збору даних
ВВЕР	водо-водяний енергетичний реактор
ВДС	відношення дисперсії до середнього значення
ВК	вимірювальний канал
ВРБ	взаємодія розплаву палива з бетоном
ГЦН	головний циркуляційний насос
ЕДС	експертна дослідницька система
ЖМ	жертвні матеріали
ЗТВ	залишкове тепловиділення
ІАСК	інтегрована автоматизована система контролю
КБПЦ	контур багаторазової примусової циркуляції
КМ	критична маса
ЛМІ	людино-машинний інтерфейс
ЛПВМ	лавоподібні паливовмісні матеріали
МД	матеріали, що діляться
НАНУ	Національна академія наук України
НБК	Новий Безпечний Конфайнмент
НПМ	нейтронпоглинаючі матеріали
ОЗР	оперативний запас реактивності
ОП	опорна плита

ОУ	Об'єкт «Укриття»
ПВМ	паливовмісні матеріали
ПЕД	потужність експозиційної дози
ПЗД	пристрій збору даних
ПЛР	пристрій локалізації розплаву
ПРК	паророзподільний коридор
РВПК	реактор великої потужності канальний
РР	стрижні ручного регулювання
СКБК	система контролю будівельних конструкцій
СКЯБ	система контролю ядерної безпеки
СЛР	самопідтримна ланцюгова реакція
ССК	система сейсмічного контролю
ССРК	стаціонарна система радіаційного контролю
СУЗ	система управління та захисту
ТВЕЛ	тепловиділяючі елементи
ТВЗ	тепловиділяюча збірка
ТК	технологічні канали
ФАЗ	фрагменти активної зони
ЧАЕС	Чорнобильська атомна електростанція
ШР	швидкість рахунку
ЩПН	щільність потоку нейтронів
ЯБ	ядерна безпека
ЯНС	ядерно-небезпечне скупчення
ЯП	ядерне паливо

ВСТУП

Актуальність теми. Ядерна безпека кожного скупчення паливовмісних матеріалів (ПВМ) в об'єкті «Укриття» (ОУ) визначається лише як доведена гарантія відсутності (або можливість оперативного виключення) умов виникнення самопідтримної ланцюгової реакції поділу (СЛР). В умовах комплексу Новий Безпечний Конфайнмент – Об'єкт «Укриття» (НБК-ОУ) ядерна безпека забезпечується системою моніторингу нейтронної активності та засобами запобігання виникнення критичності в ПВМ.

Моніторинг нейтронної активності забезпечується системою контролю ядерної безпеки (СКЯБ). Вона включає 19 блоків детектування, які контролюють динаміку щільності потоку нейтронів (ЩПН) в центральному залі, басейні витримки, шахті реактора і підреакторних приміщеннях 304/3 і 305/2. До встановлення НБК ЩПН у підреакторних приміщеннях була незмінною, крім сезонних коливань, пов'язаних із зміною температури та вологості [1,2,3].

Після встановлення НБК та припинення доступу до ОУ атмосферних опадів спостерігається постійне зростання ЩПН тільки у підреакторному приміщенні 305/2 [1]. У південно-східній частині приміщення 305/2 зростання нейтронів визначається ядерно-небезпечним скупченням (ЯНС) ПВМ, у південно-західній – скупченням з підкритичною масою коричневої кераміки.

Більшість приміщень в яких виявлені скупчення паливовмісних матеріалів можуть бути визнані ядерно-безпечними, за винятком південно-східної частини підреакторного приміщення 305/2 – місця утворення та виходу потоків чорних лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ). Тут у зоні проплавлення 2-х метрового моноліту залізобетону опорної плити (ОП) знаходиться ЯНС, ймовірність виникнення СЛР в якому не може бути виключена [1].

Моніторинг нейтронної активності у підреакторних приміщеннях було встановлено в 1988 році. З 1988 по 1990 рік система «Фініш» реєструвала поступове падіння нейтронної активності, яке визначалося зменшенням активності внутрішнього джерела при розпаді ^{242}Cm . У червні 1990 р. була зафіксована потужна

нейтронна аномалія [4,5], яка могла бути ідентифікована тільки як СЛР при повторній критичності скупчення ПВМ у південно-східному квадранті підреакторного приміщення 305/2 [6]. СЛР тривала 32 години в режимі осциляцій, і була викликана процесом надходження води в ЯНС, що остигало до температури менше 100 градусів Цельсія [6,7]. Гасіння СЛР відбулося в результаті перезволоження розмножувального середовища [7,8]. З червня 1990 по грудень 2016 р. ЩПН у приміщенні 305/2 була незмінною [1,9], за рахунок утримання води в зоні проплавлення ОП, яке забезпечувалося регулярним надходженням атмосферних опадів та конденсату.

Після встановлення НБК в проектне положення зареєстровано стабільне зростання ЩПН на периферії ЯНС в підреакторному приміщенні 305/2. Станом на січень 2022 року день система ІАСК зареєструвала більш ніж двократне зростання ЩПН.

ЯНС з масою палива від 15 до 20 т урану є водо-урановою розмножувальною системою з низькозбагаченим паливом [8]. Специфіка таких систем – наявність оптимального водо-уранового відношення, при якому ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів (K_{ef}) є максимальним, а подальше зростання об'ємної густини води призводить до переходу за друге значення критичності та падіння K_{ef} до значень, які визначаються вологоємністю середовища. Втрата води перезволоженою критичною системою призведе до зростання K_{ef} та виникнення СЛР при «зворотній» критичності.

Таким чином, неможливо науково виключити консервативну гіпотезу, що причиною зростання ЩПН, що спостерігається з 2016 року в підреакторному приміщенні 305/2, є процес зміни рівня підкритичності ЯНС внаслідок втрати води розмножувальним середовищем після насування НБК, при якому ризик виникнення СЛР при «зворотній» критичності не може бути виключений.

Для запобігання можливості виникнення СЛР у процесі втрати води основним завданням є раннє виявлення аварійних значень підкритичності ($K_{\text{ef}} = 0,95 - 0,98$) та визначення часу їх досягнення. В умовах відсутності доступу безпосередньо до розмножувального середовища ЯНС оцінку початкового, поточного і прогнозованого рівня підкритичності можливо реалізувати тільки за результатами модельних

досліджень нейтронно-фізичних характеристик ЯНС.

Раніше оцінки нейтронно-фізичних характеристик проводилися для уран-силікатної версії фізичної моделі ЯНС [10,11]. Хімічний склад фізичної моделі формувався за хімічним складом чорних ЛПВМ, визначеним за відбором проб у зоні проплавлення ОП, з додаванням паливних таблеток.

Для формування вихідних даних для розрахунку нейтронно-фізичних параметрів запропонованої у роботі уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС ПВМ, як продуктів ВРБ коріумного походження повинні бути використані результати зведення матеріально-енергетичного балансу для так званої «доменної» версії утворення ЯНС та чорних лавоподібних ПВМ – ЛПВМ у приміщенні 305/2 [12]. При цьому буде запропонована версія утворення в штатному положенні активної зони (АЗ) уран-цирконієвої евтектики, коричневої кераміки та коріуму на активній стадії аварії.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Обраний напрямок досліджень виконувався в рамках пріоритетного напрямку «Енергетика та енергоефективність» розвитку науки та техніки Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки» [13]; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України “Дослідження теплопередачі в моделях тепловидільних пучків і систем пасивного тепловідведення для підсилення бар’єрів безпеки в атомній енергетиці”, реєстраційний номер 0216U004806, яка була виконана на кафедрі атомної енергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України "Дослідження теплогідравлічних процесів в елементах систем тепловідведення для перспективних об'єктів атомної енергетики", реєстраційний номер 0119U001065, яка була виконана на кафедрі атомної енергетики Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"; плану держбюджетної науково-дослідної роботи НАН України «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації НБК-ОУ (аспекти ядерної та радіаційної безпеки)» (№ Держ.реєстр.

0118U001405, період виконання 2018 р.), яка була виконана у Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів)» (№ Держ.реєстр. 0121U112458, період виконання 2021 – 2022 рр.), яка була виконана у Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів)» (№ Держ.реєстр. 0122U200956, період виконання 08.2022 – 12.2022 рр.), яка була виконана у Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Розрахунково – експериментальні дослідження основних параметрів потенційно ядерно небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» на основі результатів вимірювання дослідницької системи Інституту проблем безпеки АЕС НАН України» (№ Держ.реєстр. 0122U000795, період виконання 2022 р.), яка була виконана у Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України; плану держбюджетної науково-дослідної роботи МОН України «Дослідження та прогностні оцінки стану ядерної безпеки комплексу «Новий безпечний конфайнмент – об'єкт «Укриття»» на етапі його експлуатації» (№ Держ.реєстр. 0121U109338, період виконання 2021 – 2023 рр.), яка була виконана у Інституті проблем безпеки атомних електростанцій Національної академії наук України.

Мета та завдання дослідження. Розробка алгоритму оцінки поточного та прогнозного рівня підкритичності ЯНС ПВМ по динаміці ЩПН в точках детектування на периферії об'єкта спостереження за допомогою фізичної та математичної моделей, та їх впровадження в практичну діяльність по підтримці підкритичного стану ЯНС об'єкта НБК-ОУ.

Для досягнення мети дослідження було поставлено та вирішено такі завдання:

1. Аналіз конфігурації, хімічного складу та структури ЯНС для версії коріумного походження силікатної матриці розмножувального середовища.
2. Аналіз і інтерпретація динаміки ЩПН за періоди 1988 – 1990 р.р., під час повторної критичності, 1990 – 2016 р.р., після встановлення НБК в 2016 р.
3. Визначення параметрів фізичної моделі ЯНС з критичною композицією коріумного походження (маса та масова частка палива, геометричні параметри, відбивачі).
4. Модельні дослідження нейтронно-фізичних характеристик фізичної моделі ЯНС коріумного походження в програмному коді MCNP6.
5. Моделювання кінетики виникнення і розвитку СЛР з використанням чисельного аналізу і розрахунків на основі диференціальних рівнянь для головних характеристик розмножувальної системи.
6. Математичне моделювання «зворотної» критичності. Оцінка швидкості введення позитивної реактивності при зневодненні перезволоженого розмножувального середовища ЯНС. Оцінка поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС.

Об'єктом дослідження є процес зміни нейтронно-фізичних характеристик скупчення паливовмісних матеріалів з високою концентрацією низькозбагаченого палива (ЯНС), що утворилося в зоні проплавлення опорної плити шахти реактору як продукт взаємодії коріуму з бетоном внаслідок аварії на 4-му енергоблоці ЧАЕС.

Предметом дослідження є ефекти повторної та «зворотної» критичності в водо-урановій системі з низькозбагаченим розмножувальним середовищем.

Методи дослідження.

Аналіз результатів відбору проб та експериментальних даних, отриманих в результаті безперервного моніторингу ЩПН та температури.

Моделювання розмножувального середовища ЯНС та верифікація моделі на основі експериментальних даних, отриманих на периферії зони локалізації ЯНС (зона проплавлення опорної плити шахти реактора) (включаючи температуру, вибір

свердловин в ОП, результати каротажу ЩПН, повторну критичність 1990р.).

Розрахунково-експериментальний метод оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше:

- розроблено алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС ПВМ в зоні проплавлення опорної плити шахти реактора у південно-східній частині приміщення 305/2 комплексу НБК-ОУ за допомогою ретроспективного аналізу результатів моніторингу ЩПН СКЯБ за період від встановлення НБК, що враховує вплив сезонних коливань температури і вологості в підреакторних приміщеннях;
- виконано розрахунки в програмному коді MCNP6 уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС, яка, у порівнянні з існуючою уран-силікатною моделлю дозволяє більш точно оцінити нейтронно-фізичні характеристики ЯНС.

Вдосконалено:

- математичну модель для дослідження можливості виникнення, розвитку та властивостей СЛР в ПВМ об'єкту «Укриття». Враховано температурний ефект реактивності, що дає змогу отримати кращу точність розрахунку характеристик СЛР. В рамках даної моделі проведено порівняння характеру розвитку СЛР при повторній та зворотній критичності в ЯНС ПВМ.

Знайшли подальший розвиток:

- підходи до вибору діапазону параметрів критичності фізичної моделі ЯНС, що забезпечують реалізацію ефектів повторної та зворотної критичності, шляхом оптимізації вхідних даних для розрахунків;
- уран-цирконієва фізична модель ЯНС. Використано ширший набір вихідних даних для розрахунку хімічного складу ЯНС.

Практична значимість одержаних результатів. Отримані наукові результати надали можливість інтерпретувати результати безперервного моніторингу ЩПН на периферії ЯНС з метою визначення поточного стану підкритичності в умовах

відсутності безпосереднього доступу до розмножувального середовища ЯНС.

Розроблені моделі, методи та програмно-методичне забезпечення доведено до практичного застосування при реалізації моніторингу ЩПН СКЯБ на 4-му енергоблоці ДСП Чорнобильська АЕС. Результати роботи впроваджені в практичну діяльність в ІПБ АЕС та ДСП Чорнобильська АЕС (див. Додаток Г).

Особистий внесок здобувача.

Основні результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. У роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належить особисто: розробка процедури експертної розрахунково-експериментальної оцінки по динаміці ЩПН поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС [15,16,17]; аналіз причин росту нейтронної активності в підреакторних приміщеннях після встановлення НБК та вплив цього явища на рівень ядерної безпеки ОУ [9,18,19,20]; опис СКЯБ: перелік обладнання, структурна схема, розташування блоків детектування [2]; аналіз та інтерпретація експериментальних даних щодо нейтронного інциденту в ОУ в 1990 р., хронологія розвитку подій [7,21]; огляд результатів актуальних досліджень продуктів взаємодії розплаву ядерного палива з бетоном та врахування цього досвіду при розробці фізичної моделі ЯНС [22]; статистичний аналіз динаміки ЩПН в підреакторних приміщеннях ОУ після встановлення НБК за допомогою методу нейтронно-шумової діагностики [23]; обчислення вихідних даних для консервативної уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС ПВМ [24] та обчислення її нейтронно-фізичних характеристик в програмному коді MCNP6; створення фізичної моделі скупчення коричневих ЛПВМ у 4-му пароскидному клапані та розрахунок її нейтронно-фізичних характеристик в програмному коді MCNP6 [25].

Апробація результатів досліджень.

Основні результати даної роботи були апробовані та доповідались на наступних конференціях: Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018 (25 – 27 квітня, м. Славутич); Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO

2019 (25-27 квітня, м. Славутич); XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 8 – 12 квітня 2019 року); Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2020 (27 – 29 квітня, м. Славутич); П'ятнадцята міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2020» (29 червня – 01 липня, м. Чернігів); 29th international conference “Nuclear Energy for New Europe” (Portoroz, Slovenia September 7 – 10, 2020); Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2021 (м. Славутич, 27 – 29 квітня).

Публікації.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 15 наукових роботах, серед яких: 5 статей у наукових фахових виданнях України [2,3,15,22,25]; 1 стаття у міжнародному виданні [7]; 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій [9,16,17,18,19,20,21,23,24]. Роботи [2,7,18,25] індексуються в наукометричних базах даних Scopus або Web of Science.

1. СТАН НАУКОВОЇ ПРОБЛЕМИ ЩОДО ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОДУКТІВ ВЗАЄМОДІЇ РОЗПЛАВУ ЯДЕРНОГО ПАЛИВА З БЕТОНОМ

1.1 Перелік міжнародних робіт, присвячених дослідженню процесів взаємодії ядерного палива з конструкційними матеріалами при запроектних аваріях

При важких запроектних аваріях з втратою теплоносія можливе руйнування, розплавлення активної зони реактору і вихід розплаву палива з конструкційними матеріалами (коріуму) за межі корпусу на бетонну основу шахти реактора. Для таких сценаріїв протікання аварії основною задачею управління є вирішення проблеми локалізації, охолодження і утримання коріуму в межах бетонної основи шахти реактору. При цьому характерною особливістю даної проблеми є значна невизначеність у розподілі маси ядерного палива в продуктах взаємодії розплаву палива з бетоном (ВРБ). Аналіз результатів розрахунків та модельних експериментів показує можливі варіанти неорганізованих композицій з критичною масою палива та наявністю води як рухомої і неконтрольованої компоненти. В таких системах існує ймовірність виникнення самопідтримної ланцюгової реакції (СЛР), а значить актуальними є науково-дослідні роботи щодо зниження рівня невизначеності основних параметрів таких потенційно небезпечних розмножувальних систем. Нижче наведено результати світових широкомасштабних розрахунково-експериментальних досліджень процесів утворення коріуму та продуктів ВРБ.

Інформаційний пошук та аналіз результатів модельних та експериментальних досліджень, присвячених вивченню процесів високотемпературної взаємодії ядерного палива з конструкційними матеріалами ядерної енергетичної установки, був проведений на основі більш ніж 30 публікацій і 6 дисертаційних робіт, опублікованих у відкритих джерелах.

Для цілей детального аналізу відібрано матеріали відомих в світі наукових і науково-виробничих організаціях. В тому числі:

- Інститут проблем безпеки АЕС НАНУ (Чорнобиль), Україна;

- Міжгалузевий науково-технічний центр «Укриття» НАНУ (Чорнобиль), Україна;
- Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна;
- РНЦ «Курчатовський інститут» (Москва), Росія;
- ДНЦ РФ «Фізико-енергетичний інститут» (Обнінськ), Росія;
- Інститут атомної енергії НЯЦ РК - Національний ядерний центр РК (Курчатов), Казахстан;
- CEA/DTN (Grenoble), Франція;
- Technical Research Centre of Finland, Фінляндія;
- Argonne National Laboratory, США;

З точки зору забезпечення контролю ПВМ при важких запроектних аваріях проводяться дослідження імовірності виникнення СЛР в двох основних випадках: в об'ємі розплаву активної зони (коріуму) на днищі корпусу реактора; в об'ємі скупчень продуктів ВРБ.

Реальні зразки коріуму були отримані при відборі проб розплаву палива на днищі корпусу реактора після аварії на Трі-Майл-Айленд. Елементний склад зразків становив від 70% урану, 14% цирконію, 13% кисню, 3% металевих включень. Залишкове тепловиділення через 4 години після зупинки реактора оцінювалося на рівні 0,13 Вт/г, через 10 годин зменшилося до 0,1 Вт/г. Об'ємна густина зразків становила від 7,45 до 9,4 г/см³, пористість до 30%. Враховуючи температури плавлення Zr та UO₂ (1855 °C та 2850 °C відповідно), співвідношення фаз (Zr,U)O₂ та (U,Zr)O₂ у твердому розчині зразків визначає максимальну температуру розплаву 2600 – 2850 °C [26].

За результатами розрахунків та експериментів існує діапазон маси, масового вмісту урану та збагачення по ²³⁵U пошкодженого палива, що створює ризики досягнення критичності в корпусі реактора при охолодженні водою. Наприклад, критична маса палива реактора ВВЕР-440 (збагаченого до 4,4%) близько 60-70 кг урану, що відповідає 70-80 кг UO₂. Однак основною умовою досягнення критичності є наявність води як рухомої компоненти ПВМ яка може бути подана в результаті дій

персоналу для утримання коріуму всередині корпусу реактора і для забезпечення його охолодження [27].

В ході ліквідації запроектованих аварій за умови аварійного охолодження водою з нейтронними поглиначами можливість виникнення критичності в корпусі практично виключена. Більш актуальна проблема - ймовірність виникнення СЛР в об'ємі продуктів ВРБ [28].

У табл. 1.1 представлено перелік провідних світових наукових організацій, з початку 1980 років проводять експериментальні і модельні дослідження в рамках загальної програми з вивчення процесів деградації активної зони реакторів. Метою таких досліджень є отримання даних про процеси і параметри взаємодії елементів активної зони з конструкційними матеріалами реактора на різних стадіях перебігу аварії:

- розігрів тепловиділяючих збірок в осушеній активній зоні;
- окислення оболонок тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) в широкому діапазоні температур;
- формування басейну розплаву;
- взаємодія розплаву з корпусом реактора;
- взаємодія розплаву з бетоном захисної оболонки.

Дослідження поведінки розплаву коріуму також проводилися: Японським дослідним інститутом атомної енергії (JAERI), Корейським науково-дослідним інститутом атомної енергії (KAERI), Угорським дослідним інститутом атомної енергії (AEKI) і багатьма іншими: CORA, QUENCH; CODEX (AEKI/KFKI); ALPHA/MUSE (JAERI); PHEBUS (IPSN); ПАРАМЕТР (ІБРАЕ).

Найбільш серйозними проблемами, що виникають в процесі важкої аварії є [29, 30]: розтікання розплаву по підлозі контейнмента; ступінь абляції бетону внаслідок його прямого контакту з високотемпературним розплавом коріуму; охолодження розплаву (і часток палива після їх затвердіння в результаті охолодження розплаву водою); стабілізація і припинення аварії; забезпечення роботи систем вентиляції (фільтрації).

Таблиця 1.1 – Перелік організацій і експериментальних установок, де проводилося моделювання окремих процесів важких аварій

Установка	Процеси, що досліджуються	Організація	Країна
VULCANO	Розтікання розплаву і його охолодження	CEA	Франція
SULTAN	Утримання розплаву в корпусі за допомогою зовнішнього охолодження	CEA	Франція
ACE	Взаємодія розплавлених матеріалів активної зони з бетоном шахти реактора	ANL	США
BETA	Взаємодія розплавлених матеріалів активної зони з бетоном шахти реактора	FZK	Німеччина
ЛАВА	Взаємодія розплаву коріуму з теплоносієм і бетоном шахти реактора	IAE НЯЦ РК	Казахстан
РАССПЛАВ	Взаємодія розплаву коріуму з бетоном шахти реактора	РНЦ КІ	Росія
MASCA	Термічний вплив басейну розплавлених матеріалів на корпус реактора	РНЦ КІ	Росія

Пасивні системи захисту, направлені на вирішення цих проблем були розглянуті в статті [31]. Процеси в паливному розплаві при важкій аварії реактора управляються за допомогою так званих жертвних матеріалів (ЖМ), які використовуються в пристроях локалізації розплаву (ПЛР).

Взаємодія ЖМ з коріумом досліджувалася в роботі [32]. За своїм складом ЖМ багато в чому схожі з матеріалами серпентинітової засипки плити нижньої основи реактора (схеми «ОР») РВПК-1000, однак існують суттєві відмінності в хімічному складі, які в кінцевому підсумку і визначають умови локалізації та подальшого охолодження розплавленого коріуму. Оптимальний склад ЖМ для утримання розплаву в ПЛР досягається на стадії проектування шляхом математичного моделювання умов важкої аварії з розплавленням активної зони, проплавленням корпусу реактора і виходом коріуму в ПЛР.

Модельні експерименти динамічного процесу взаємодії коріуму з ЖМ і утворення ванни розплаву з гарантованим відведенням тепла проводилися в роботі [33]. У ній були показані ефективні заходи запобігання вибухової концентрації водню на реакторах, основним джерелом якої на внутрішньокорпусній стадії аварії є пароцирконієва і паросталева реакції, що виникають внаслідок взаємодії елементів (фрагментів) активної зони і внутрішньокорпусних пристроїв з теплоносієм. Також було визначено, що параметри інверсії розплавів оксидного і сталєвого коріуму у ванні розплаву і їх структура (пошарова) визначаються кількістю жертвового матеріалу і його розміщенням по відношенню до первинних потоків коріуму в ПЛР з пошкодженого корпусу реактора. Також це визначає рівень залишкових енерговиділень в нижній частині теплообмінника, і необхідний запас (за часом) до кризи на всій поверхні теплообмінника. Енергія, що виділяється в ході реакції взаємодії недоокисленого оксидного коріуму з жертвовим матеріалом, не приводить до значного перегріву розплаву, а в основному витрачається на підтримання самої реакції [34].

В роботі [35] були представлені: методичні питання і рішення щодо вибору ЖМ при конструюванні ПЛР для ВВЕР; методика розрахунку екстракції урану і цирконію з розплаву субокисленого коріуму розплавом сталі. Також розглядалися теоретичні положення про взаємодію розплаву оксидів і сталі, що містять недоокислений цирконій, з окремими ЖМ і питання оцінки підкритичності розплаву в процесі і після взаємодії з бетоном.

В роботі [36] були сформовані уявлення про структуру, що утворилася в результаті взаємодії коріуму з ЖМ. Так, після зливу розплавленого коріуму в бетонну пастку, заповнену ЖМ, жертвовий матеріал плавиться і його розплав переміщується з оксидними компонентами коріуму. В результаті густина суміші оксидних компонент зменшується. Відбувається інверсія зі стратифікацією шарів розплаву: якщо спочатку розплав металів (сталі і цирконію) розташовується на поверхні басейну, то після інверсії розплавлені метали опиняються внизу, під шаром оксидних компонент коріуму. Також в роботі представлений приклад моделі теплової взаємодії коріуму з крупнопористим наповнювачем бетону. Модель передбачає визначення

розподілу потоків тепла і нестационарних профілів температури взаємодіючих компонентів коріуму і наповнювача аж до формування інверсно стратифікованого басейну розплаву.

Проведені дослідження щодо взаємодії ЖМ з коріумом дали можливість розробити і впровадити нові технічні рішення в проектуванні і спорудженні атомних електростанцій, що дозволяє підвищити їх ядерну безпеку та надійність експлуатації. Такі рішення знайшли своє місце на реакторних установках "нового покоління", в проект яких введено ряд додаткових систем безпеки. Серед них система для локалізації розплаву в разі запроектої аварії, яка представляє собою контейнер, заповнений спеціальним ЖМ.

Питання ядерної безпеки та підкритичності коріуму при потраплянні в ПЛР були досліджені в статті [37]. Тут була отримана залежність коефіцієнту розмноження нейтронів від маси ЖМ та його типу. В якості коріуму, що потрапляв в ПЛР було прийняте свіже паливо на основі UO_2 . Взаємодію розплаву активної зони з матеріалами реакторної установки в проблемі важкої аварії ВВЕР було розглянуто в роботі [38].

1.2 Результати досліджень структури продуктів ВРБ

Розрахунково-експериментальні дослідження [39] (рис. 1.1) показали, що при взаємодії коріуму з бетоном формується керамічна кірка та проміжний шар дегідрованого бетону (шлак). На рис. 1.2 показані перерізи результатів експериментів на початковій (COMET L2) та заключній (COMET L3) стадії взаємодії коріуму з бетоном [40]. Експериментальні роботи вказують на те, що після охолодження по фронту взаємодії сформувалася водонепроникна кірка і шар термічно зруйнованого бетону. На рис. 1.3 показано версію розподілу продуктів ВРБ у зоні проплавлення ОП шахти реактора 4-го енергоблоку ЧАЕС, сформовану на основі результатів експерименту VULCANO [41]. Такі модельні уявлення про двошарову структуру скупчення, що утворилася в зоні проплавлення плити шахти реактора, як і можливість розшарування розплаву в процесі взаємодії коріуму з бетоном підтверджуються

результатами експериментів, проведених в рамках міжнародного проекту CORPHAD.2 [41].

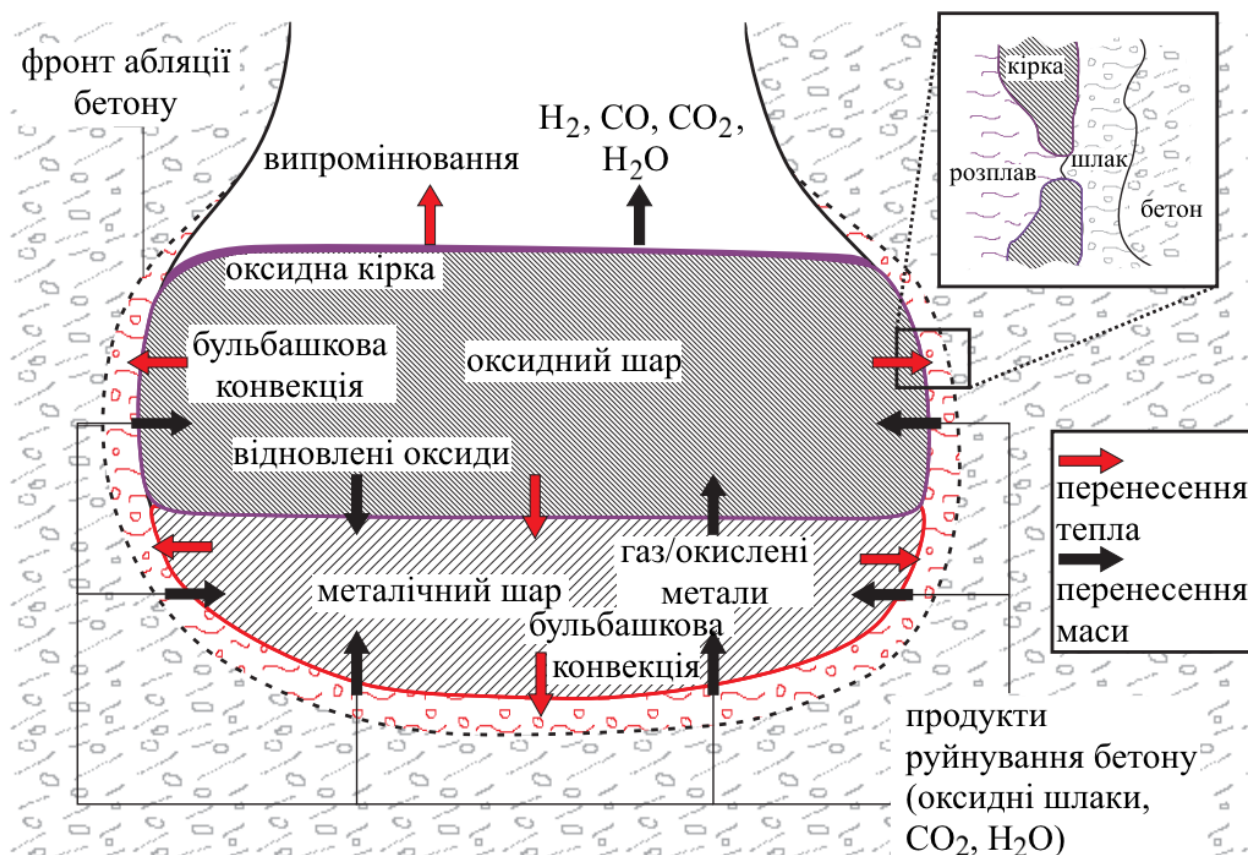


Рисунок 1.1 – Схема формування багатошарової структури матеріального середовища ПВМ, що утворюються в результаті взаємодії коріуму з бетоном (моделювання за допомогою інтегрального коду ASTEC)



Рисунок 1.2 – Переріз продуктів ВРБ (експерименти COMET L2 та L3)

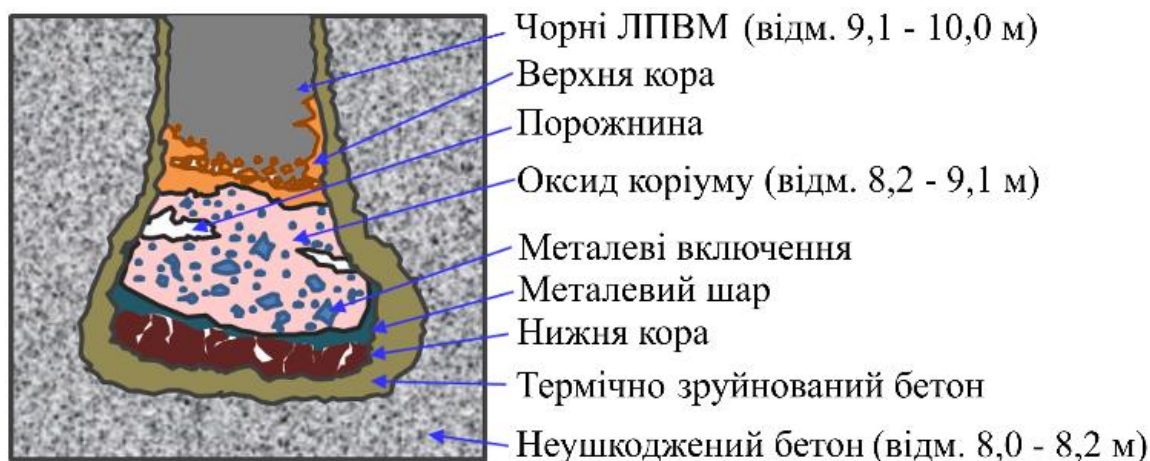


Рисунок 1.3 – Результати експериментів VULCANO по дослідженню продуктів ВРБ

По результатам аналізу науково-дослідних робіт також з'ясовано, що на поточний момент часу недостатньо вивчені можливі варіанти складу та структури продуктів взаємодії коріуму з бетоном в зоні проплавлення ОП в об'єкті «Укриття», відповідно неможливо достовірно оцінити ризики виникнення СЛР в об'ємі ПВМ. Цю проблему можна вирішити шляхом виконання додаткових експериментальних та розрахункових досліджень, однак при цьому існують наступні складнощі:

1. Коректність вихідних даних для фізичної моделі ЯНС залежить від сценарію розвитку запроектої аварії.
2. При відсутності доступу до розмножувального середовища ЯНС виникає проблема з великим діапазоном вихідних даних для фізичної моделі.
3. Проблема експериментальних досліджень полягає в тому, що при їх проведенні отримується недостатня кількість продуктів ВРБ (максимум сотні кілограм). Не можна вважати, що їх склад та структура повністю відповідає скупченню ПВМ, утвореним при повномасштабній аварії, в результаті якої утворюватимуться тони таких матеріалів. Умови протікання модельних експериментів не відповідають умовам та характеристикам аварії на ЧАЕС, їх масштаби на кілька порядків більше, що вносить додаткову невизначеність при формуванні фізичної моделі ЯНС.

Ці проблеми вирішуються шляхом натурних досліджень продуктів ВРБ, що утворилися на реальних об'єктах протікання важкої запроектої аварії. Лише після

отримання результатів аналізу реальних ПВМ, вилучених з пошкоджених енергоблоків АЕС (на яких відбулася важка запроектна аварія), можна буде отримати дані щодо складу та структури продуктів ВРБ, що дасть змогу виконати валідацію розроблених моделей та запропонованих алгоритмів розрахунків.

На даний час продукти ВРБ існують тільки всередині ОУ-НБК і на АЕС Фукусіма-Дайічі [42,43]. Враховуючи постійне зростання нейтронної активності продуктів ВРБ в зоні проплавлення ОП колодязя шахти реактору 4-го енергоблоку ЧАЕС після встановлення НБК, для повномасштабної оцінки основних параметрів реальних продуктів ВРБ найбільший інтерес представляє дослідження ПВМ, локалізованих всередині ОУ [15].

1.3 Дослідження параметрів критичності продуктів ВРБ на об'єкті «Укриття»

Після аварії на ЧАЕС, в міру накопичення інформації про ПВМ, проводилися роботи по розрахункових оцінках ядерної безпеки (ЯБ) об'єкту «Укриття» (ОУ). Перші розрахунки були виконані Курчатовським інститутом ще в травні 1986 р. Потім стали залучатися все більш складні програми для моделювання переносу нейтронів з використанням методу Монте-Карло такі як: WIMS, КРАБ-1, РИТМ, КРАТЕР, MCNP і інші. Загалом, в період з 1986 по 1996 р. був виконаний величезний обсяг розрахункових і експериментальних досліджень скупчень ПВМ. Цю роботу виконували 4 інститути (Інститут ім. Курчатова в Москві, Фізико-Енергетичний інститут в Обнінську, Академічний інститут ядерної фізики в Мінську і німецька науково-технічна дослідно-експертна організація Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) gGmbH в Гамбурзі).

Згідно з результатами дослідження ядерного палива (ЯП) з вигоранням $11,5 \text{ МВт} \cdot \text{добу/кг U}$ проводилися розрахунки (в 69 групах в області енергій від 0 до 10 MeV) сферичної геометрії суміші типу "лава + фрагменти активної зони + вода" з відбивачем з бетону в програмі WIMS. За результатами розрахунків при масовій частці ЯП 50% радіус, при якому забезпечується критичність дорівнює від 2,8 м. [44].

Оціночні розрахунки для однорідної гетерогенної композиції (що складається з паливних таблеток, ЛПВМ і води в геометрії рівновеликого циліндра з бетонним відбивачем товщиною 50 см) виконані також в ДНЦ РФ ФЕІ [45]. В якості програмного засобу використаний попередньо верифікований комплекс РЕДУТ. Діапазон критичного радіуса для композицій з об'ємною часткою води від 15 до 60% дорівнює від 50 до 137 см. Результати розрахунків [46] сферичних композицій, які включають свіже паливо, показують, що критичний радіус при об'ємному вмісті води від 30 до 50% становить всього від 0,35 до 0,4 м.

Згідно з розрахунковими даними [44,47,48,49] залив водою може привести до виникнення СЛР в наступних гіпотетичних скупченнях ПВМ (геометрія яких дозволяє вписати їх в підреакторне прим. 305/2 у відповідність з наявними даними):

- Гетерогенна структура (ЛПВМ + фрагменти активної зони (ФАЗ) + вода) при великій об'ємній густині води.
- Гомогенна композиція (свіже паливо + графіт + вода), яка може стати критичною для складу з об'ємними частками 20% UO_2 , 40% H_2O , 40% С і мінімальним діаметром $D_{\text{кр}}=0,93$ м.
- Гомогенна композиція (свіже паливо + вода), яка може стати критичною для складу з об'ємними частками 30% UO_2 , 70% H_2O і мінімальним діаметром $D_{\text{кр}}=0,69$ м.
- Гомогенна композиція (паливо з вигоранням 5,4 МВт·добу/кг(U) + вода), яка може стати критичною для складу з об'ємними частками 30% UO_2 , 70% H_2O і мінімальним діаметром $D_{\text{кр}}=0,98$ м.

За результатами розрахунків [50] в прим. 305/2 ядерну небезпеку можуть представляти кілька варіантів композицій. Але найбільш небезпечними є гетерогенні композиції, до складу яких входить ЯП і вода. Особлива увага приділялася гетерогенним системам зі структурою «ЛПВМ + ФАЗ + вода». Раніше така фізична модель вважалась такою, яка найбільш точно описує скупчення ПВМ в приміщенні 305/2. Її досліджували в ряді робіт, наприклад в [51] і [52].

Відомо, що $K_{\text{эф}}$ для ядерно-небезпечного скупчення (ЯНС) ПВМ залежить від маси і масового вмісту урану, елементного складу суміші, геометричних розмірів,

відбивачів, температури, об'ємної густини води, як рухомої компоненти. Однак одним з найважливіших параметрів є масовий вміст матеріалів, що діляться (МД). Всі вищенаведені розрахунки проводилися тільки для ПВМ з масовим вмістом палива $5 \div 15\%$, так як тоді (до початку двохтисячних років) не передбачалася наявність скупчень ПВМ з великим вмістом палива (не було сценарію утворення таких скупчень).

На початку 2000х років були проведені додаткові розрахунки, які враховували нові експериментальні дані (зокрема, більш високу концентрацію МД, від якої сильно залежить можливість виникнення СЛР). Розрахунки нейтронно-фізичних параметрів гомогенних сумішей ПВМ при зволоженні дозволили дати оцінку діапазону параметрів палива, при яких можливе виникнення СЛР в процесі надходження води. При вигорянні палива $11,5 \div 12,5$ МВт·добу/кг U критична маса, розмножувального середовища ПВМ повинна складати $15 \div 30$ т з масовою часткою урану (U) $45 \div 60\%$ і вологоємністю не менше 40% за об'ємом (див. рис. 1.4) [53].

Для коректного дослідження розподілу ЩПН в скупченні ПВМ з підвищеною концентрацією МД були використані можливості багатофункціональної програми вирішення завдань перенесення нейтронів в тривимірних матеріальних системах методом Монте-Карло (MCNP). Була побудована фізична модель локалізації ЯНС ПВМ в зоні проплавлення ОП в підреакторному приміщенні 305/2. Весь об'єм ПВМ був розбитий на однорідні матеріальні комірки з основою 2×2 м і висотою, яка визначається поперечним перерізом профілю ЛПВМ. Для кожної з 84 комірок визначалися обсяг, елементний склад і масова частка хімічних елементів, густина і вміст урану. Просторовий розподіл внутрішніх джерел нейтронів вибирався рівномірно по всьому об'єму ПВМ і їх активність бралася в діапазоні від 4 - 15 нейтрон/(с·г) урану. В енергетичному спектрі внутрішніх джерел враховувався рівномірно розподілений внесок від нейтронів спонтанного ділення ^{244}Cm , $^{240,242}\text{Pu}$ і нейтронів від (α, n) -реакції при розпаді ^{241}Am на легких ядрах домішок. Результати розрахунків були одного порядку зі значеннями експериментальних вимірювань ЩПН [54].

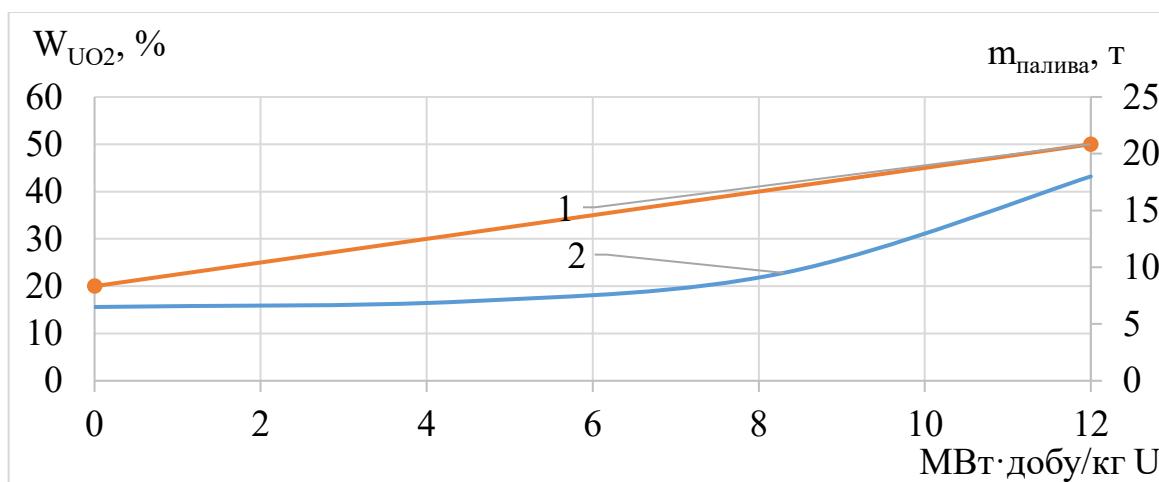


Рисунок 1.4 – Залежність від вигорання масової частки палива $W_{UO_2}, \%$ в нескінченній геометрії (1) і маси палива $m_t, \text{т}$ в критичній композиції (2) [53]

Наступна версія розрахункової моделі вже охоплювала весь об'єм приміщень 305/2 і 304/3 і складалася з тришарової структури з матеріальними комірками з основами $1 \times 1 \text{ м}$. Така структура дозволила виконати модель з урахуванням стін, перекриттів і вільних просторів, а також розмістити в ній масив зони ЯНС і визначити її мінімальні параметри критичності, такі як маса, геометрія, об'ємні відношення води і палива [55]. Було виконано розрахунок нейтронного поля для скупчень ПВМ південної частини підреакторного приміщення 305/2 4-го зруйнованого блоку ЧАЕС. Обчислення проводилися на основі програмних кодів SCALE-4.4A і MCNP-4C.

Для попередніх оцінок інформаційних параметрів реальних геометрій була побудована тривимірна графічна модель південно-східного і південно-західного квадранта прим. 305/2. У модель були внесені об'ємні зображення свердловин, що використовуються для встановлення нейтронних детекторів. Була здійснена можливість розміщення і переміщення детекторів і умовного ЯНС. Для різних цілей досліджень побудовані моделі також надавали такі можливості:

- відтворювати реальну геометрію спостереження зі збереженням усіх масштабів розміщення детекторів щодо ЯНС в районах «пролomu» і клапана;
- моделювати і розраховувати очікуване ослаблення відгуків детекторів на нейтронну активність ЯНС з урахуванням їх віддалення від джерела і поглинаючих властивостей середовища на межі розділу джерело-приймач;

- змінювати і коригувати геометрію спостереження при переміщенні детекторів уздовж стовбура свердловин з метою оцінки їх чутливості;
- визначати розташування умовного центру ЯНС за допомогою зіставлення розрахункових і експериментальних даних, отриманих за результатами зондування свердловин;
- виділяти і оцінювати складову нейтронного фону для кожного детектора, а також моделювати імітацію метрологічних відмов, пов'язаних зі зміною просторової орієнтації детектора і термалізації спектрального складу реєстрованого потоку нейтронів.

При побудові моделі використовувалася система автоматизованого проектування AutoCAD 2000. Рисунки зрізів виконані за допомогою функції рендерингу тривимірних тіл AutoCAD 2000. Остаточне доведення і оформлення рисунків здійснювалося в програмі Corel Draw 10. Наочність об'ємного зображення досягалася можливістю задавати різні рівні прозорості елементів моделі і виділяти тим самим основні деталі.

Результати досліджень нейтронно-фізичних характеристик виявлених скупчень ПВМ в приміщеннях ОУ увійшли до звітів ІПБ АЕС [56,57]. Показано, що всі скупчення ПВМ, що локалізовані всередині ОУ, є ядерно-безпечними (в них неможливе виникнення СЛР), окрім ЯНС в прим. 305/2. ЯНС представляє собою водо-уранову систему з низькозбагаченим паливом. Результати оцінки маси палива в зоні проплавлення бетону ОП по теплотричним вимірюванням, а також визначення (по забоям дослідницьких свердловин) його геометрії дозволяють стверджувати, що в обмеженому об'ємі знаходиться 18 - 20 т палива [56].

Специфікою розмножувальних систем з низькозбагаченим паливом є існування двох значень критичності. В червні 1990 року при надходженні води в остигаюче ЯНС мала місце повторна критичність (холодний критичний інцидент) [6,9,58,59,60]. Самогасіння СЛР відбулося за рахунок перезволоження розмножувального середовища [19,56] (рис. 1.5). До встановлення НБК “АРКА” ЯНС (листопад 2016 року) перебувало в перезволоженому стані (за другим значенням критичності) за рахунок надходження атмосферних опадів в розмножувальне середовище ЯНС. Вода

була стабілізуючим фактором. Після встановлення НБК і припинення доступу води в зону локалізації ЯНС спостерігається постійне зростання нейтронної активності, що може бути пов'язане лише з процесами втрати води пористим розмножувальним середовищем ЯНС. Зменшення концентрації води у розмножувальному середовищі може призвести до «зворотної» критичності.

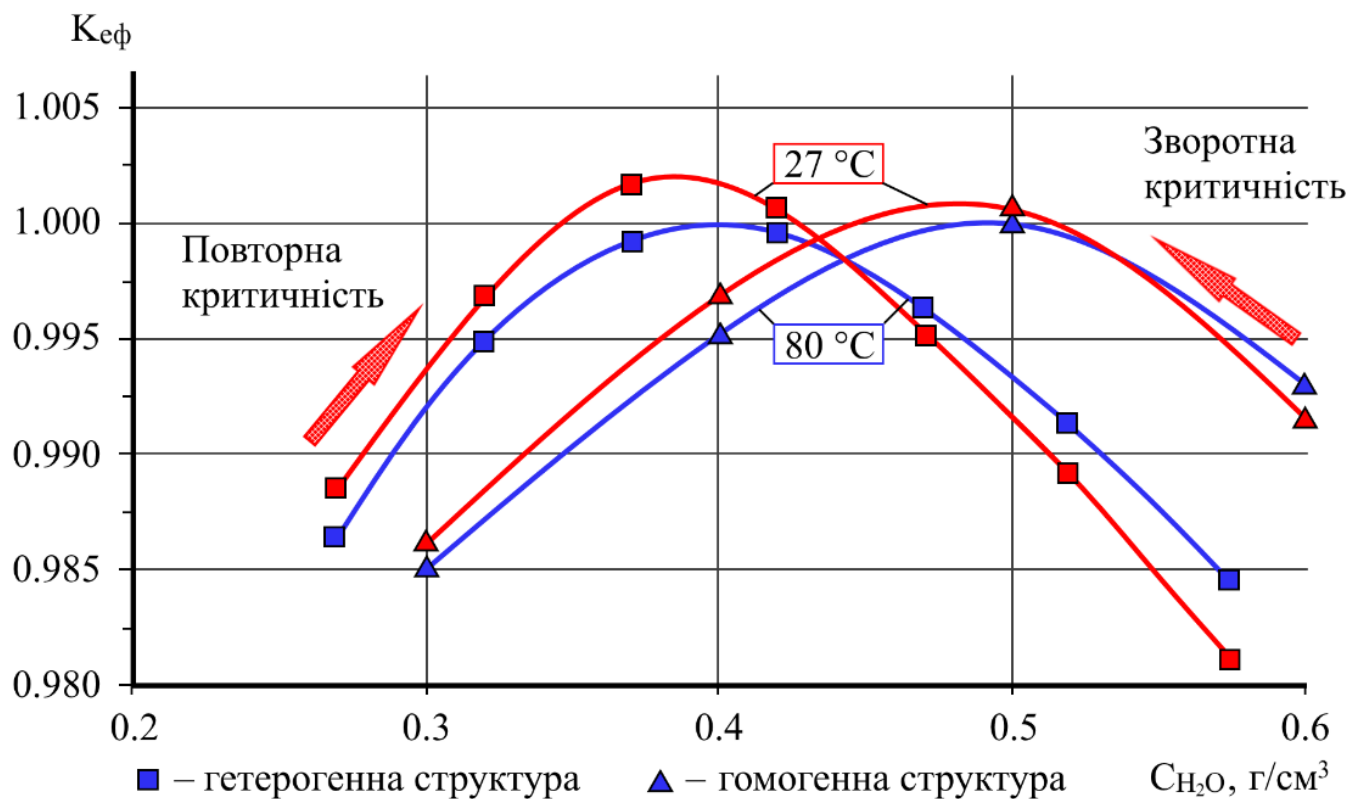


Рисунок 1.5 – Розрахункові залежності K_{eff} від концентрації води в розмножувальному середовищі ЯНС з урахуванням температури та гетерогенності структури

Подальша оцінка [10,59,61] нейтронно-фізичних характеристик цього скупчення ПВМ була проведена на основі розрахункового моделювання різноманітних версій критичних композицій. Масові і геометричні параметри цих збірок максимально відповідають реальним умовам існування критичної композиції, зокрема геометрії розміщення, об'єму і структурі середовища наповнення зони проплавлення опорної плити. Розрахунки ефективного коефіцієнта розмноження (K_{eff}) проводилися в програмному коді MCNP-4A. При цьому модельні розрахунки проводилися для гомогенної і гетерогенної структури розмножувального середовища

з доступною для води пористістю до 60% від загального об'єму ЯНС. Передбачається, що в реальності гетерогенна структура скупчення забезпечує наявність широкого спектра макропор, доступних для заповнення водою через нескінченний кластер мікротріщин і порових каналів (через мікропори реалізується система макропор, яку утворює газові порожнечі). Така гетерогенна структура моделювалася у вигляді регулярної просторової решітки з комірками кубічної форми. У цій решітці комірки в шаховому порядку були заповнені гомогенною сумішшю силікатного розчину палива та водою з об'ємною густиною $0,04 \text{ г/см}^3$ (за рахунок доступної мікропористості). Об'ємна частка води в порожніх комірках (що моделюють доступну для води пористість) одночасно і рівномірно варіювалася від нуля до повного заповнення всієї пористості, що моделювало процес зволоження ЯНС. Розмір газових пустот оцінювався значеннями до 5 см в діаметрі.

Розрахунки величини $K_{\text{сф}}$ були виконані при варіації значень наступних параметрів збірки: масової частки ЯП в ЯНС; збагачення (з урахуванням напрацювання ^{239}Pu) по ^{235}U від 1,15% (що відповідало середньому експериментально отриманому значенню вигорання $12,5 \text{ МВт} \cdot \text{добу/кг урану}$) до 1,4%; геометрії і об'єму моделі; частки пустот в об'ємі моделі (до 60% від загального об'єму), що доступні для заповнення водою і визначають об'ємний вміст води; кроку регулярної решітки; температури розмножувального середовища; елементного складу; структури збірки і відбивачів.

По результатам проведених розрахунків було отримано діапазон основних параметрів моделі ЯНС, що забезпечують наявність двох значень критичності в процесі надходження води в розмножувальне середовище і не протирічають доступним експериментальним даним [15].

1.4 Уточнюючі дослідження щодо матеріального складу та структури ЯНС

В літературі пропонується два основних варіанти утворення ЛПВМ. Перший – як результат взаємодії уран-цирконієвої евтектики та силікатвмісних матеріалів [62].

Другий – розчинення ФАЗ в силікатному розплаві з утворенням кремній-цирконієвого розплаву з наступним розчиненням в ньому оксидів урану[63,64].

Враховуючи неможливість утворення ЯНС за рахунок домішування палива в силікатну матрицю (оскільки при домішуванні концентрація урану досягає не більше ніж 15% [65,66]), було запропоновано концептуальну модель «доменної» версії процесів на заключній стадії аварії. Утворення ЯНС і чорних ЛПВМ розглядається як результат двох взаємопов'язаних процесів: процесу взаємодії розплаву палива (коріуму) з бетоном (ВРБ) і процесу плавлення ФАЗ, аналогічного процесу плавлення шихти в металургічній печі – домні [67]. Ця модель дозволила більш повно звести матеріально-енергетичний баланс процесів на заключній стадії аварії 4-го блоку ЧАЕС [68]. В результаті було отримано елементний склад ЯНС ПВМ та чорних ЛПВМ [12], який значно відрізняється від хімічного складу, отриманого при домішуванні паливних таблеток в уран-силікатну матрицю, що використовувався в усіх розрахунках нейтронно-фізичних характеристик ЯНС до 2015 року. Зокрема отримано значне збільшення вмісту Zr та зменшення концентрації Si, що значно вплине як на нейтронно-фізичні характеристики моделі ЯНС, так і на параметри, необхідні для досягнення критичності. Таким чином, враховуючи зростання ЩПН, що реєструється в приміщенні 305/2, і припускаючи можливість виникнення «зворотної критичності» (Рис. 1.5) в розмножувальному середовищі ЯНС, необхідно переглянути сценарій аварійних процесів з утворенням коріуму та продуктів ВРБ, а також розрахунки нейтронно-фізичних характеристик [65], сформулювати та дослідити уран-цирконієву фізичну модель ЯНС. Це дозволить оцінити ризики виникнення «зворотної критичності», а в разі наближення до аварійних значень підкритичності завчасно вжити заходи щодо запобігання виникнення СЛР.

1.5 Висновки до розділу 1

В першому розділі виконано інформаційний пошук та аналіз результатів модельних та експериментальних досліджень, присвячених вивченню процесів високотемпературної взаємодії ядерного палива з конструкційними матеріалами

ядерної енергетичної установки. В ході ліквідації запроектованих аварій за умов аварійного охолодження водою з нейтронними поглиначами можливість виникнення критичності в корпусі практично виключена. Більш актуальна проблема - ймовірність виникнення СЛР в об'ємі продуктів ВРБ. Найбільш серйозними проблемами, що виникають в процесі важкої аварії є: розтікання розплаву по підлозі контейнмента; ступінь абляції бетону внаслідок його прямого контакту з високотемпературним розплавом коріуму; охолодження розплаву (і часток палива після їх затвердіння в результаті охолодження розплаву водою); стабілізація і припинення аварії; забезпечення систем вентиляції (фільтрації) [34].

Продукти ВРБ мають наступні характеристики: розшарування структури; наявність пористості, доступної для заповнення водою; присутність водонепроникної кірки по фронту взаємодії розплаву палива з бетоном і шару термічно зруйнованого бетону, що дозволяє утримувати воду в цій розмножувальній системі.

Основними проблемами при дослідженні нейтронно-фізичних характеристик продуктів ВРБ в зоні проплавлення ОП в об'єкті «Укриття» є: висока невизначеність результатів розрахунків на основі комп'ютерних моделей, по причині відсутності доступу до розмножувального середовища ЯНС; при експериментальних дослідженнях отримується недостатня кількість продуктів ВРБ, щоб стверджувати, що їх склад та структура повністю відповідає ПВМ, утвореним при повномасштабній аварії; коректність вихідних даних для фізичної моделі ЯНС залежить від сценарію розвитку запроектованої аварії.

Ці наукові проблеми вирішуються лише шляхом натурних досліджень продуктів ВРБ, що утворилися на реальних об'єктах протікання важкої запроектованої аварії, після чого можна буде отримати дані щодо складу та структури продуктів ВРБ. Це дасть змогу оцінити реальні ризики та виконати надійну валідацію розроблених моделей та запропонованих алгоритмів розрахунків. Представлено результати досліджень основних параметрів цих ПВМ, отриманих в умовах відсутності прямого доступу до скупчення.

Ядерно-небезпечне скупчення паливовмісних матеріалів що утворилося в результаті аварії на 4-му енергоблоці ЧАЕС у 1986 р. є унікальним продуктом ВРБ з низькозбагаченим паливом. Специфікою розмножувальних систем з

низькозбагаченим паливом є існування двох значень критичності. Враховуючи зростання нейтронної активності в південно-східній частині приміщення 305/2, та допускаючи можливість виникнення «зворотної критичності» в розмножувальному середовищі ЯНС, необхідно переглянути розрахунки нейтронно-фізичних характеристик ЯНС, сформулювати і дослідити нову уран-цирконієву фізичну модель ЯНС як продукту взаємодії коріуму з бетоном ОП.

На основі літературного огляду сформовано мету дисертаційної роботи, а саме: розробка моделей для оцінки аварійного рівня підкритичності по динаміці ЩПН в точках детектування на периферії об'єкта спостереження при наближенні до аварійних значень K_{eff} та їх впровадження в практичну діяльність по підтримці підкритичного стану ЯНС об'єкта НБК-ОУ. Для досягнення мети дослідження було поставлено та вирішено такі завдання: аналіз конфігурації, хімічного складу та структури ЯНС для версії коріумного походження силікатної матриці розмножувального середовища; аналіз і інтерпретація динаміки ЩПН за періоди 1988 – 1990 р.р., під час повторної критичності, 1990 – 2016 р.р., після встановлення НБК в 2016 р.; визначення параметрів фізичної моделі ЯНС з критичною композицією коріумного походження (маса та масова частка палива, геометричні параметри, відбивачі); модельні дослідження нейтронно-фізичних характеристик фізичної моделі ЯНС коріумного походження в програмному коді MCNP6; моделювання кінетики виникнення і розвитку СЛР на основі чисельного аналізу і розрахунків на основі диференціальних рівнянь для головних характеристик розмножувальної системи; математичне моделювання «зворотної» критичності. Оцінка швидкості введення позитивної реактивності при зневодненні перезволоженого розмножувального середовища ЯНС. Оцінка поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС.

Основні результати розділу викладені автором у публікаціях [9,19,22].

2. МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ ЯК ОБ'ЄКТУ МОДЕЛЮВАННЯ

2.1 Локалізація ЯНС

2.1.1 Дослідження меж зони проплавлення за допомогою свердловин в ОП

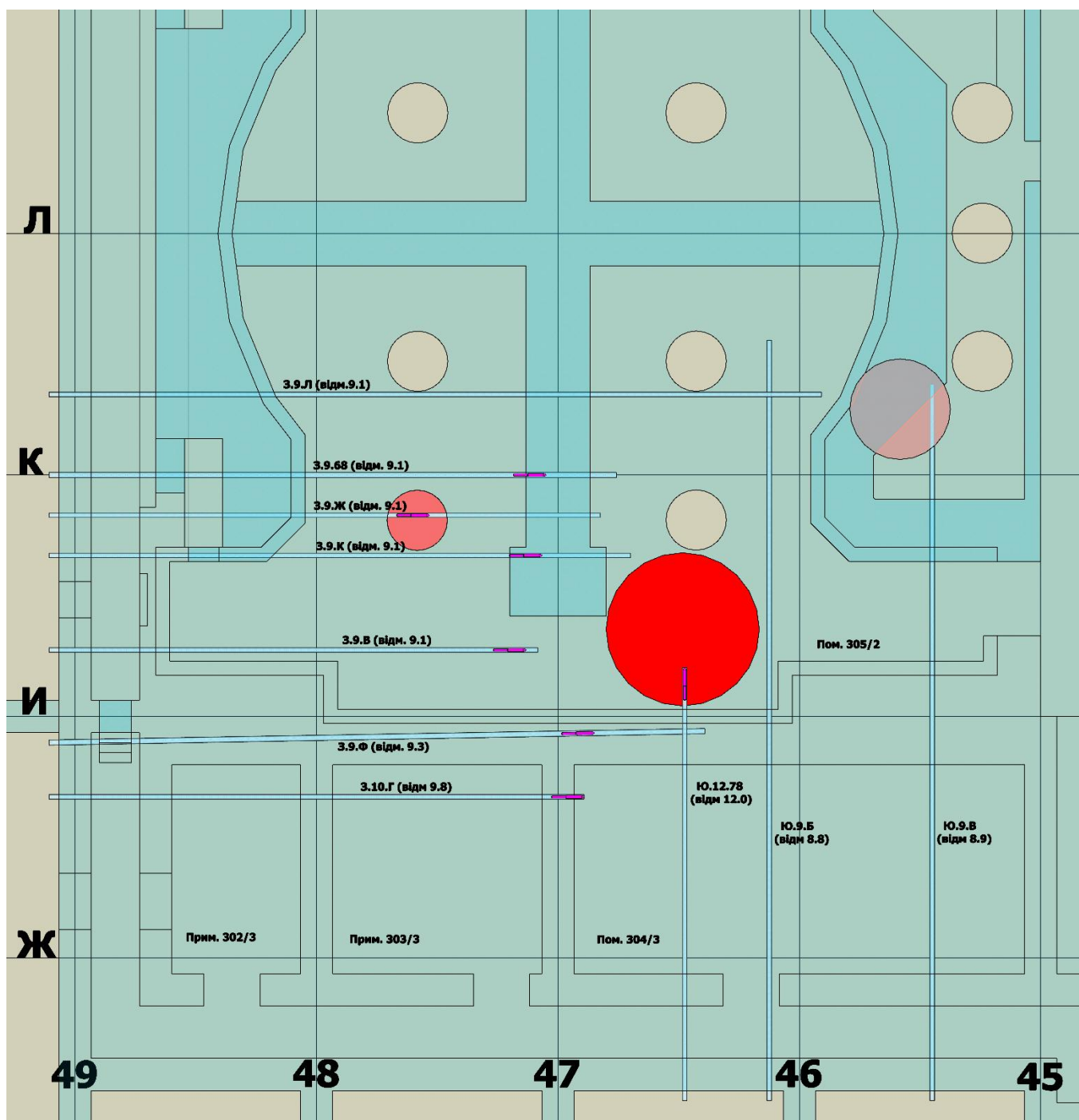
З метою проведення вимірювань ЩПН, потужності експозиційної дози (ПЕД), гамма випромінювання та температури в бетоні ОП, в 1988 р. було розпочато буріння дослідницьких свердловин [69].

На рисунку 2.1 наведена схема розташування проходок свердловин, що виходять у південно-східну частину ОП із західної та південної сторін у приміщення 305/2.

Найбільш інформативними є точки контролю, розташовані на поверхні ПВМ або безпосередньо в їх глибині. На конфігурації свердловин (рис. 2.1) видно, що найближче до ЯНС підходять свердловини, пробурені в ОП (на позначці 9.000). Це свердловини: З-9-В, З-9-Е, З-9-Ж, З-9-К, З-9-Л, З-9-М, З-9-Н, З-9-Р, З-9-Ф, З-9-68, З-9-107, Ю-9-А, Ю-9-Б и Ю-9-В. Тому особливу увагу було приділено даним, що були отримані для цих свердловин [56].

Межі розповсюдження ПВМ з високим вмістом урану в зоні проплавлення ОП визначались в роботі [65]. Координати меж зони проплавлення визначались за даними, отриманими у свердловинах: із заходу - З-9-Ж, З-9-К, З-9-Е, З-9-В, З-9-68; зі сходу - Ю-9-Б; з півдня - З-9-Ф та З-9-107, пробурених у стіні приміщення 304/3 та на позначках 9.100, 9.300.

Епіцентр зони проплавлення розташовується у відкритій частині південно-східного квадранта приміщення 305/2, навпроти південних відкотних воріт [65]. Різке збільшення ЩПН до $1000 \text{ см}^{-2} \cdot \text{сек}^{-1}$ і більше [56] (див. табл. 2.1), при одночасному посиленні жорсткості спектру (зменшенні кадмієвого відношення), спостерігалось у всіх західних свердловинах у ОП при подальшому русі датчиків нейтронів у напрямку вибою [56]. Таким чином було визначено межі ЯНС як потужного джерела нейтронів.



ЯНС ПВМ
 Коричневі ЛПВМ
 Скупчення ПВМ з 5 т урану

Рисунок 2.1 – Схема розташування свердловин в підреакторних приміщеннях ОУ

Межі ЯНС визначалися за даними, отриманими глибиною проходок 14 свердловин на основі наступних показників:

- максимальний рівень ЩПН та ПЕД;
- максимальний градієнт температури;

- матеріал кернів, що містить деструктований бетон та/або склоподібну масу;
- вміст урану від 4% до 5% у пробах кернів.

Наявність деструктованого бетону та склоподібної маси в кернах визначають розташування в примежевому шарі водонепроникної кірки та зруйнованого бетону.

Глибина проплавлення ОП була визначена до рівня плитного настилу верхнього перекриття, тобто шару важкого бетону, який міг затримати просування фронту ВРБ в аксіальному напрямку.

2.1.2 Дослідження температурних полів в ОП

Кількість палива в зоні проплавлення ОП шахти реактора прим. 305/2 оцінено за допомогою теплотричних вимірювань [56]. Температурні поля, побудовані за даними каротажу свердловин, показані на рисунках 2.2 (1988 р.) та 2.3 (2007 р.) [56,70,71]. Теплофізичні розрахунки проводилися з урахуванням збігу розрахункових температур, обумовлених потоком тепла від ЯНС із зареєстрованими температурами [5,56].

При припущенні, що кількість тепла, що виділяється джерелом в одиницю часу і передається в навколишнє теплопровідне середовище через одиницю площі його поверхні, однаково у всіх напрямках і пропорційно об'ємної густини матеріалу, що ділиться в джерелі тепла, були отримані оцінки кількості урану в ЯНС, що утворює джерело тепла.

За результатами проведених оцінок встановлено [56]:

- скупчення ПВМ у ОП є джерелом тепла, потужність якого еквівалентна ЗТВ до 20 т палива з питомим тепловиділенням 0,27 кВт/т урану;
- теплофізичні дослідження підтверджують, що форма джерела тепла задовільно збігається з плоским циліндром, що має геометричні розміри, прийняті у нейтронно-фізичних розрахунках;
- ПВМ відокремлені від незруйнованої частини ОП «примежевим» шаром з товщиною в горизонтальній площині від 10 см до 12 см, знизу – від 15,0

см до 16,5 см. «Примежевий» шар складається з деструктованого бетону, теплопровідність якого відповідає шлакобетону пористої структури, заповненої водою;

- ПВМ знаходиться постійно у воді, рівень якої не нижче за відмітку 8.800 свердл. Ю-9-Б та Ю-9-В.

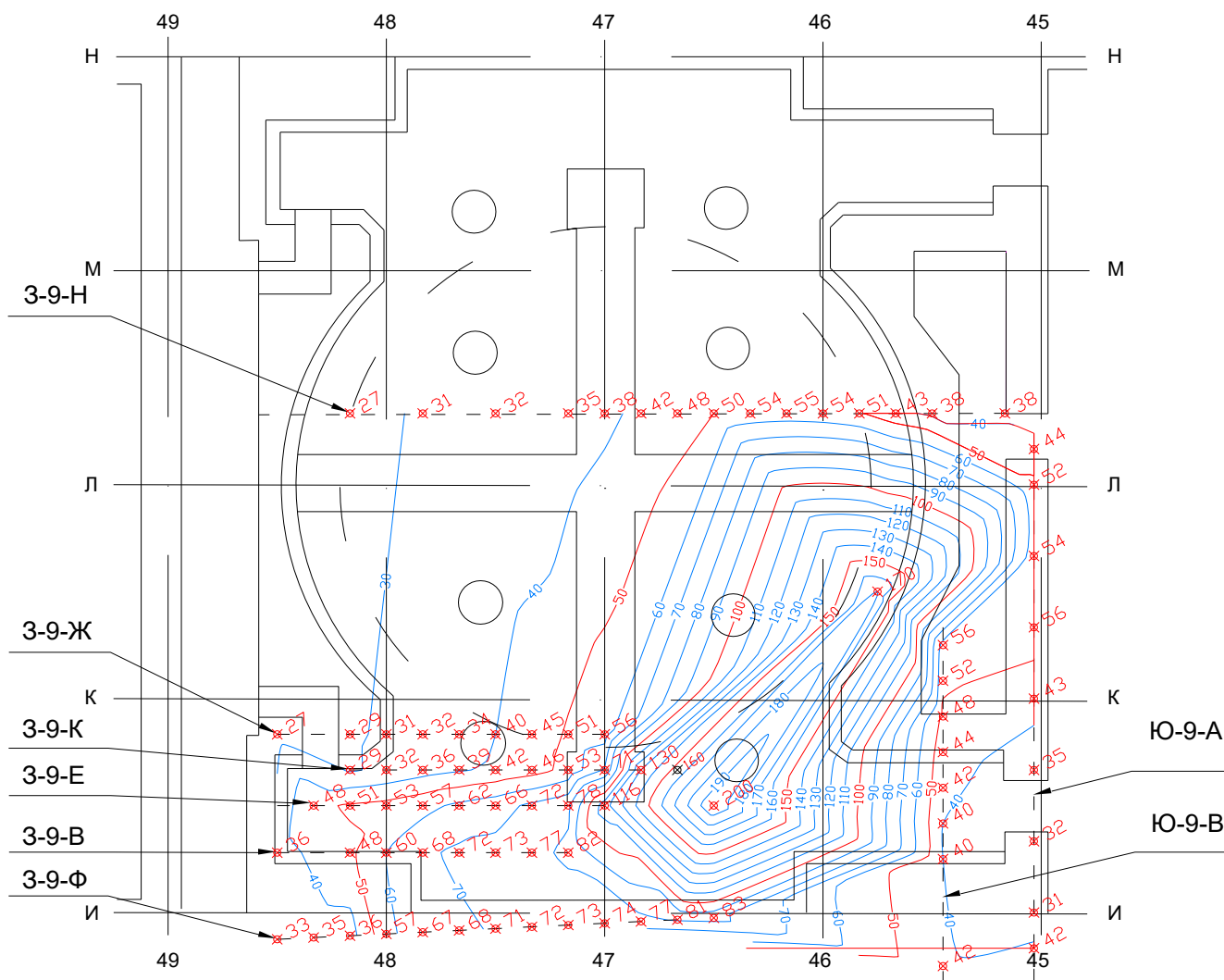


Рисунок 2.2 – Розподіл температури в опорній плиті (листопад 1988, позначка 9.100)

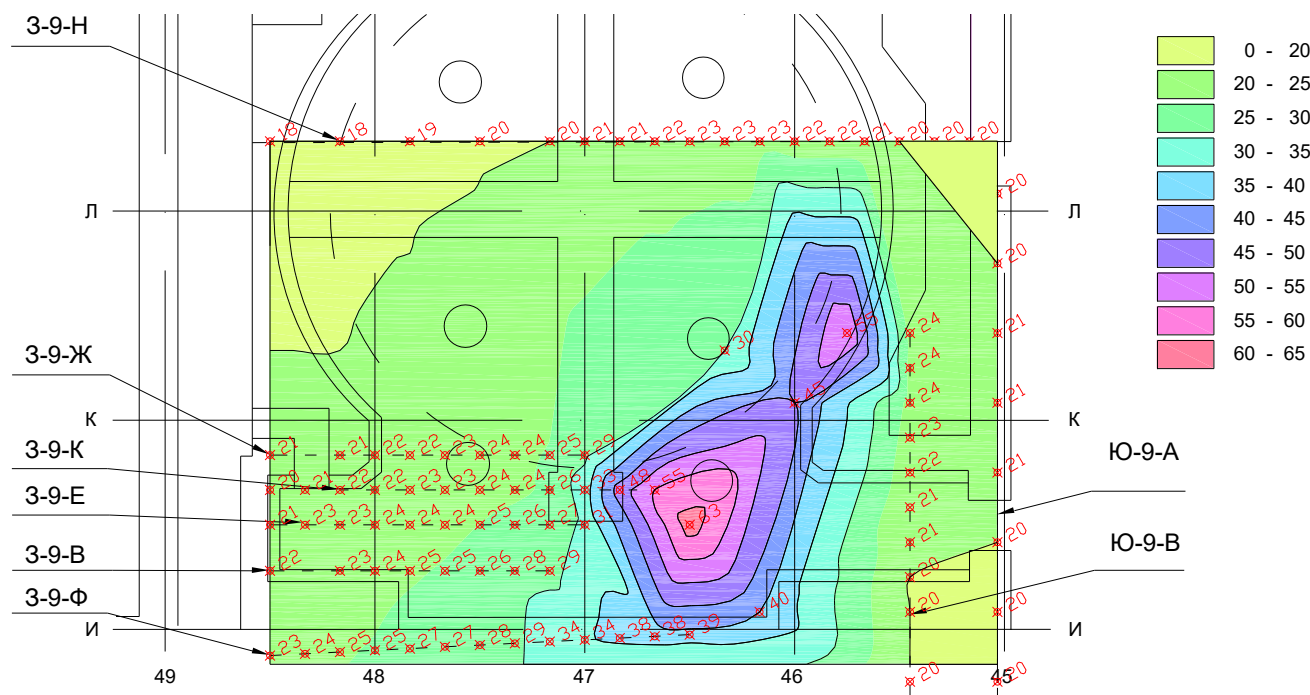


Рисунок 2.3 – Картограма ізотерм в бетоні ОП південно-східної частини прим. 305/2 (листопад 2007 р., відм. 9.100)

2.2 Інструментальний контроль стану скупчень ПВМ в Об'єкті «Укриття».

2.2.1 Система Контролю Ядерної Безпеки Об'єкту «Укриття»

У 1997 році було впроваджено міжнародний план здійснення заходів на об'єкті «Укриття» (SIP з англійської «Shelter Implementation Plan»), для перетворення місця аварії на ЧАЕС 1986 року в безпечний для екології стан [72,73]. Ця масштабна програма включала різноманітні підготовчі проекти, такі як завершення критичної інфраструктури, доріг, інженерних мереж та інших об'єктів, які були передумовами для безпечної роботи на Чорнобильській АЕС. Одним із важливих етапів цієї програми стало встановлення унікальної системи з 4 систем моніторингу. Вони включають систему вимірювання та моніторингу ЩПН та ПЕД від ПВМ – Системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) та інших систем, які надають інформацію про структурну цілісність ОУ, вимірювання сейсмічної активності на Чорнобильському майданчику та 30-км зоні відчуження та систему контролю радіаційної безпеки [2].

Система контролю ядерної безпеки об'єкта «Укриття» (СКЯБ) є частиною інтегрованої автоматизованої системи контролю (ІАСК) ОУ, який був розроблений та встановлений в рамках Завдання 17 Плану здійснення заходів на об'єкті «Укриття». [73] – міжнародний проект по переведенню в безпечний стан майданчика ЧАЕС. Завдання щодо створення ІАСК було поставлено ще в 2001 році [74]. У 2002 році консорціум NUTECO розробив вимоги до системи. Наприкінці 2003 року було проведено тендер на детальне проектування та створення ІАСК, включаючи СКЯБ, який виграв консорціум у складі ANSALDO Energia SpA, ENEL HYDRO SpA (пізніше CESI), LABEN SpA (пізніше Tales Alenia Space) та підрозділ НАЕК "Енергоатом" – відокремлений підрозділ "Атомремонтсервіс". Проектування системи було завершено в 2005 році. Через важку радіаційну обстановку та складність завдань, роботи зі створення системи, її розгортання на ОУ та введення в експлуатацію були завершені лише у 2011 році, а дослідно-промислова експлуатація почалася у 2012 році. У 2014 році система успішно пройшла метрологічну атестацію і з 2016 року отримала дозвіл Державної Інспекції Ядерного Регулювання України на промислову експлуатацію.

ІАСК призначена для комплексної інформаційної підтримки персоналу ОУ у доступній для сприйняття та аналізу формі. Оперативний аналіз отриманої інформації дозволяє виявити негативні тенденції у зміні стану небезпечних джерел на об'єкті «Укриття» та завчасно передбачити та здійснити попереджувальні заходи щодо розвитку зазначених тенденцій [75].

ІАСК – це багаторівнева система моніторингу (інформаційно-вимірювальна система). Верхній рівень системи – комунікаційне обладнання, сервери та робочі станції. Цей рівень забезпечує інтеграцію підсистем, представлення інформації оператору в узагальненому вигляді та зберігання до 1 року всіх даних з 4 незалежних та автономних систем - Системи Контролю Ядерної Безпеки (СКЯБ), Стаціонарної Системи Радіаційного Контролю (ССРК), Системи Контролю Будівельних Конструкцій (СКБК) та Системи Сейсмічного Контролю (ССК). Кожна з цих систем має архітектуру, засновану на принципі уніфікації, і являє собою на середньому рівні пристрій збору даних (ПЗД), який виконує роль як консолі оператора з людино-

машинним інтерфейсом (ЛМІ), так і сервера для обробки і зберігання даних з нижчого рівня. Нижній рівень представлений резервованою мережею блоків збору даних (БЗД) - комп'ютеризовані пристрої, розподілені по ОУ, до яких безпосередньо підключені детектори системи.

Відмінність між нижнім рівнем СКЯБ, ССРК, СКБК, та ССК полягає в тому що кожен БЗД ССК встановлений на об'єкті сейсмостережень, розташованому в Чорнобильській зоні відчуження, і зв'язок здійснюється по радіоканалу, за виключенням БЗД розташованого безпосередньо на майданчику ЧАЕС. Кожен БЗД має свій власний ЛМІ, забезпечений джерелом безперебійного живлення та здатний автономно працювати протягом 72 годин.

На рис. 2.4 представлена принципова схема СКЯБ [2].

Апаратне забезпечення СКЯБ складається з:

- 19 блоків детектування (детектори ЩПН і ПЕД, об'єднаних в один блок);
- Нормалізуючого підсилювача, включаючи попередній підсилювач;
- 6 БЗД;
- Резервної оптоволоконної кільцевої мережі між БЗД та ПЗД;
- 1 ПЗД;
- Консолі оператора (монітор, клавіатура та трекбол) ПЗД;
- Інтерфейсу ІАСК.

Детектором гамма-випромінювання є іонізаційна камера IG34 Centronic, Великобританія, яка забезпечує вимірювання від 100 мР/год до 104 Р/год в діапазоні енергій від 0,1 MeV до 4 MeV.

Детектор нейтронного потоку – високочутлива коаксіальна імпульсна камера поділу FC216A/2000/U235 виробництва компанії Centronic, Великобританія. Він оточений поліетиленом високого тиску товщиною 23,6 мм, щоб отримати найбільш плоску спектральну характеристику в діапазоні енергії нейтронів від теплової до 1 MeV. Товщина сповільнювача була обмежена максимальним діаметром свердловин, доступних для встановлення детекторних збірок.

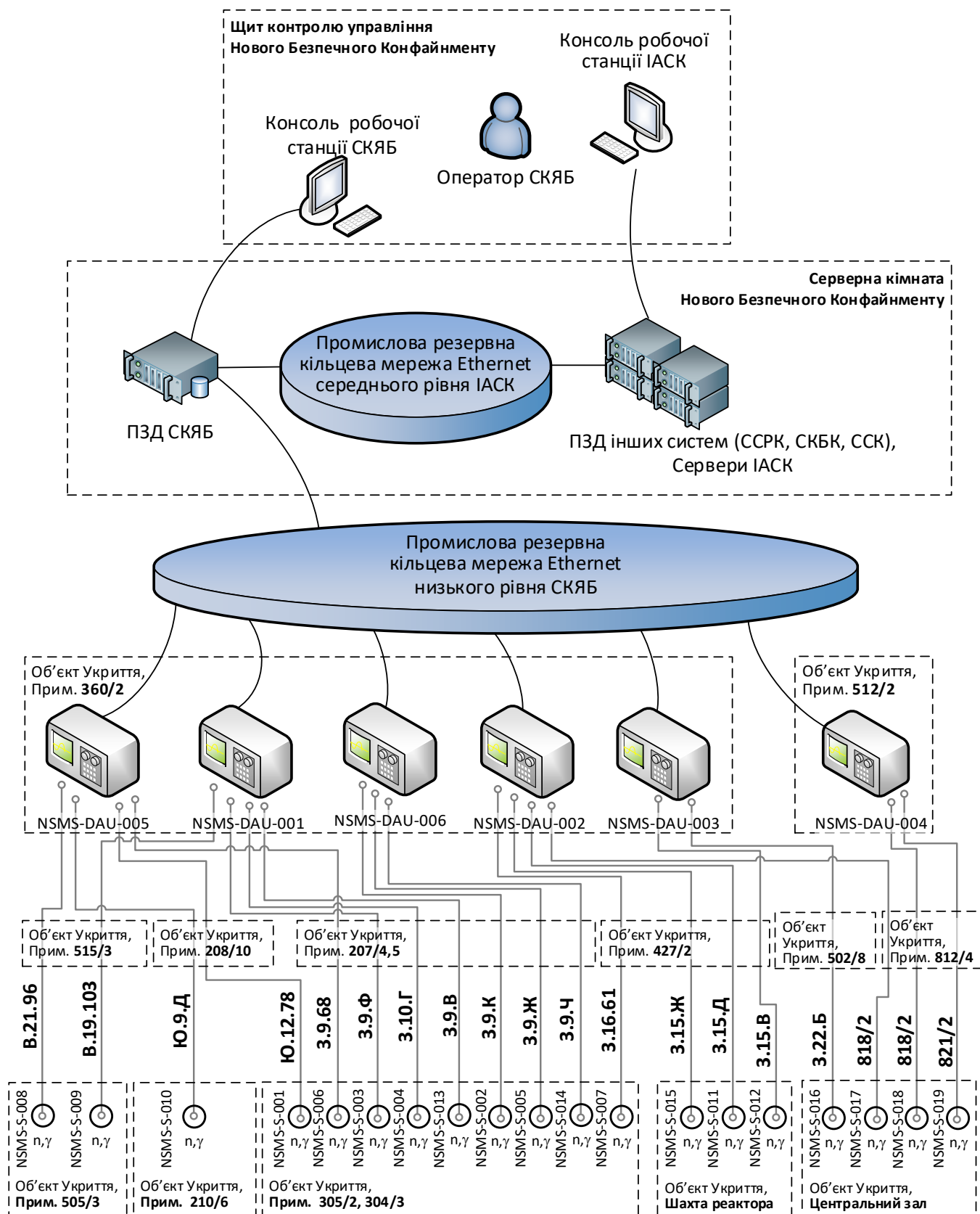


Рисунок 2.4 – Принципова схема СКЯБ (попередні підсилювачі та підсилювачі ядерних детекторів не показані)

Кожен вимірювальний канал для кожного детектора розроблений як повністю незалежний, щоб виключити вплив один на одного.

Проектні координати (розташування точок моніторингу) блоків детектування СКЯБ були обрані виходячи з умови максимально можливого наближення до скупчень ПВМ у свердловинах, в яких було отримано максимальні значення ЩПН і ПЕД за результатами вимірювань, проведених протягом 1989 – 1990 років та оновлених у 2001 році [76]. Блоки детектування, що контролюють певну зону розташування ПВМ, підключені до декількох БЗД. Це виключає втрату всього обсягу зони моніторингу в разі будь-якого збою БЗД [77].

2.2.2 Експертно-дослідницька система ІПБ АЕС

«Експертно Дослідницька Система» (ЕДС) ІПБ АЕС – автоматизований комплекс технічних і програмних засобів, на якому виконується довготривалий та постійний моніторинг ЩПН, ПЕД і температури скупчень ПВМ, локалізованих всередині комплексу НБК-ОУ. ЕДС забезпечує вимір, обробку, відображення і можливість зберігання сигналів/даних від детекторів гамма-випромінювання, нейтронного потоку і датчиків температури [78].

Сферою застосування ЕДС є моніторинг ЩПН і температури для підвищення ефективності контролю рівня підкритичності ПВМ, що здійснюється штатною СКЯБ ІАСК НБК-ОУ в підреакторному приміщенні 305/2 [79].

Першочергове призначення ЕДС – це забезпечення ядерної та радіаційної безпеки об'єкта "Укриття" за рахунок раннього виявлення та ідентифікації можливих аномалій (стійких відхилень у значеннях контрольованих параметрів), що можуть вказувати на небезпечну зміну стану ЯНС ПВМ [80].

ЕДС створена на основі мережі дослідницьких вимірювальних каналів (ВК) моніторингу температури з підключенням апаратури і блоків детектування системи «Фініш-І», а також деякого обладнання системи «Фініш-Р», виведених з експлуатації в ході побудови нової системи контролю – СКЯБ ІАСК [80]

Загальна структура ВК ЕДС приведена на рисунку 2.5 у вигляді блок-схеми [81].

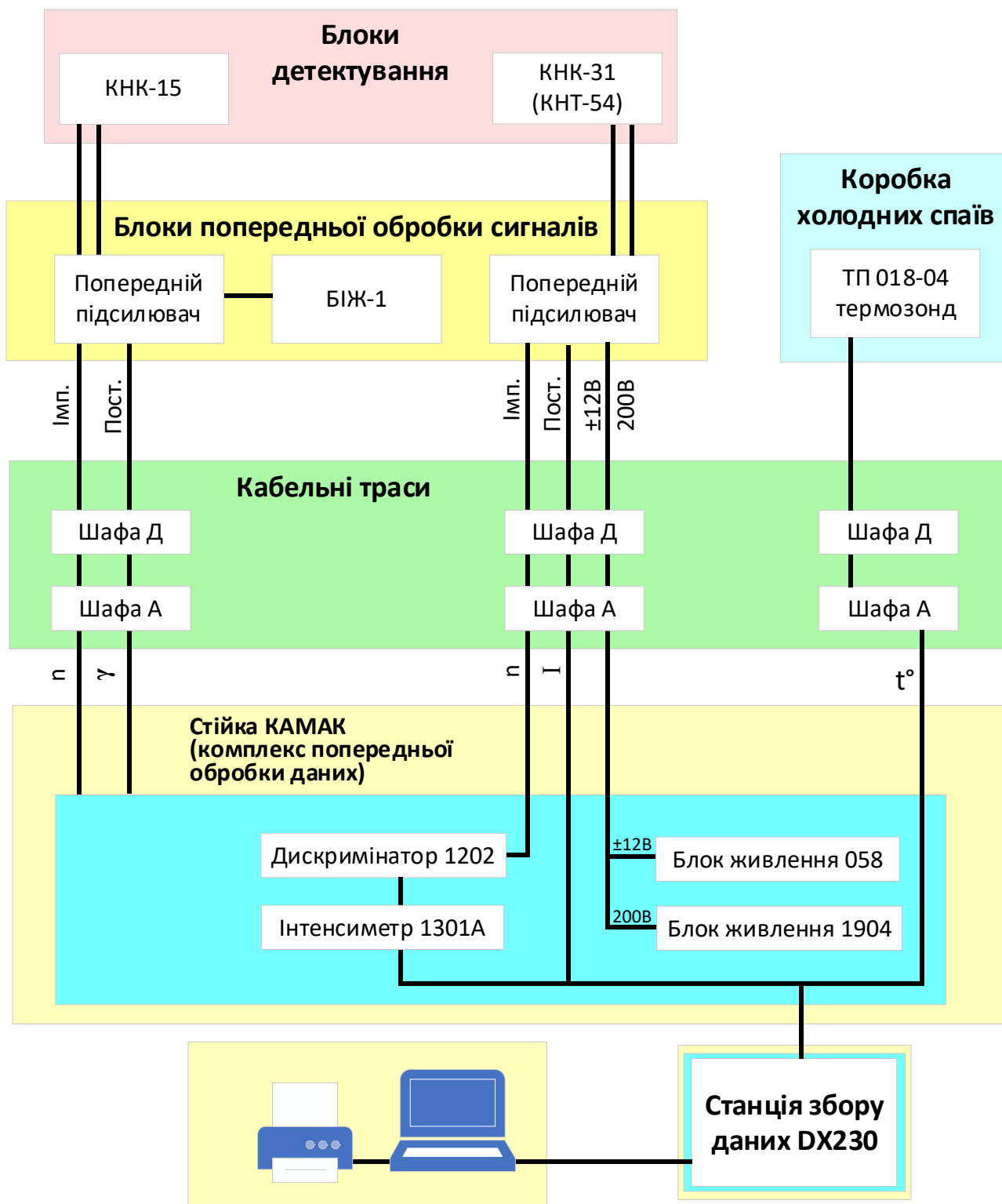


Рисунок 2.5 – Структура ВК ЕДС

ЕДС складається з наступних ВК [78]:

- 4 ВК дослідження динаміки ЩПН, основна відносна похибка вимірювань яких повинна не перевищувати $\pm 40\%$ в діапазоні від 10 до $5 \cdot 10^3 \text{ н/}(\text{см}^2 \cdot \text{с})$;

- 2 ВК дослідження ПЕД гамма-випромінювання в діапазоні від 10^{-1} до 10^4 Р/ч при основній відносній похибці вимірювання менше $\pm 40\%$;
- 16 ВК дослідження динаміки температури з діапазоном вимірювань від -200 до $+600$ °C і похибкою менше $\pm 5\%$.

ЕДС складається з наступних основних вузлів:

1. Станція збору даних, що включає блоки високовольтного живлення, підсилювач дискримінатор, інтенсиметри аналогові, Yokogawa DX230;
2. Пристрої детектування, що складається з блоку детектування нейтронів з імпульсними підсилювачами сигналу;
3. Пристрої реєстрації вимірювань температури.

ЕДС забезпечує вимір наступних величин, які подаються безпосередньо на обчислювач DX-230: напруги, постійного струму і активного опору. Імпульсні сигнали, що надходять з виходів детекторів нейтронів, попередньо перетворюються апаратурою КАМАК в аналогові сигнали (постійний струм), а потім подаються на вимірювально обчислювальні канали DX-230. Кожен імпульсний канал має показуючий пристрій і перемикач діапазонів вимірів. Наявність автономної індикації результатів вимірів в імпульсних каналах підвищує надійність контролю ядерно-фізичних параметрів стану ПВМ в разі відмови DX-230 [80].

2.3 Методи аналізу динаміки ЩПН, зареєстрованої СКЯБ

2.3.1 Статистична ідентифікація аномалій сигналу

На даний момент основним методом аналізу динаміки нейтронної активності, що реєструється СКЯБ є статистичний метод. Приклад статистичного аналізу динаміки ЩПН наведений в роботі [82]. Даний метод дозволяє: фільтрувати аномальні результати вимірювань; виявляти наявність однакових трендів в динаміці ЩПН різних ВК СКЯБ, що може свідчити про реєстрацію певного фізичного процесу у різних точках контролю на окремому відрізку спостереження; прогнозувати динаміку ЩПН за допомогою регресійного рівняння.

Специфікою такого підходу є необхідність попередньої обробки даних перед

аналізом з метою виключення дефектів вимірювань, спричинених метрологічними відмовами обладнання, а також необхідність оновлювати регресійне рівняння, адже воно описане статистично, і не прив'язане до фізичних процесів, що відбуваються в скупченнях ПВМ. Так, при повільному введенні позитивної реактивності в ЯНС, що знаходиться в глибоко підкритичному стані, функція зростання кількості нейтронів, що генерується, буде близькою до лінійної. При наближенні до аварійних значень підкритичності ($K_{\text{эф}} > 0.98$) функція росту ЩПН буде експоненційною, що призведе до необхідності зміни регресійного рівняння.

Статистична теорія оцінки та ідентифікації аномалій вимірювань базується на параметричних методах [2]. Для їх використання необхідні два види інформації: характер розподілу вимірюваного процесу та його параметри. Перевагами статистичних методів оцінки аномалій є їх простота, достатня потужність і низька ймовірність помилок першого і другого типів. Крім того, оцінка аномалій у динамічному ряді даних може проводитися як щодо окремих значень у масиві, так і для серійних вимірювань [2].

Оцінку, класифікацію та прийняття рішень щодо окремих вимірювань можна зробити на основі аналізу компонентів динамічного ряду вимірювань, представлених у формі (2.1):

$$Y(t_k) = S(t_k) + e(t_k) + A(t_k) \quad (2.1)$$

де:

$Y(t_k)$ – динамічний ряд вимірювань;

$S(t_k)$ – корисна складова сигналу;

$e(t_k)$ – стохастична складова рівня білого шуму (значення стохастичної складової некорельовані, мають нульове математичне очікування та представляють реалізацію ергодичного випадкового процесу);

$A(t_k)$ – аномальна компонента.

При оцінці аномалії окремих вимірювань у сигналах, що підкоряються експоненціальному розподілу (наприклад, Пуассона і Вейбулла) можуть бути

використані критерії Смоляка-Титаренко [83] і Бродського-Бицаня-Власенко [84]. Для аномалій, які з'являються в масиві спостережень з певною частотою (а не поодиноким, серійним аномалій), доцільно використовувати критерій Кімбера [85].

Розрахункове значення критерію Смоляка-Титаренко для k -го вимірювання у вибірці об'ємом n визначається за формулою (2.2):

$$C_k = \frac{x_{k(n)}}{\bar{x}(n)} \quad (2.2)$$

де $x_{k(n)}$ – максимальне (або «потенційно аномальне») значення елемента рядка у вибірці; $\bar{x}(n)$ – середнє значення вибірки. Тоді значення $x_{k(n)}$ вважається аномальним, якщо стан $C_k > C_{cr}(\alpha)$, де $C_{cr}(\alpha)$ – критичне значення критерію для даного рівня значущості.

Критерій Бродського-Бицаня-Власенко використовується для експоненціального розподілу $f(x) = \lambda e^{-\lambda x}$, де λ – параметр розподілу. Статистика критерію для оцінки аномальності (максимального або «підозрілого») x_k (максимального або «підозрілого») значення з вибірки з невідомим значенням λ визначається за формулою (2.3) [84]:

$$z_k = \frac{x_k - x_{k-1}}{x_k - x_1} \quad (2.3)$$

Щоб перевірити на аномальність показник x_k ймовірність розраховується наступним чином (2.4) [84]:

$$P(z \geq z_k) = (n-1)! (1-z_k)^{n-2} \prod_{j=1}^{n-2} \frac{1}{1+j(1-z_k)} \quad (2.4)$$

Тоді, якщо розрахована ймовірність перевищує прийнятий рівень значущості α – гіпотеза щодо аномальності x_k відкидається.

Перевірка зразка, в якому є декілька аномальних значень, здійснюється за допомогою тесту Кімбера [85], розрахункове значення якого визначається за формулою (2.5):

$$S_j = \frac{x_{n-j+1}}{\sum_{i=1}^{n-j+1} x_i}, \quad j = 1, 2, \dots, n-1 \quad (2.5)$$

Перевірка аномалій у рядах спостережень здійснюється за таким алгоритмом:

1. Якщо для $S_j(\alpha)$ – критичне статистичне значення – тоді для $i=1, 2, \dots, k$ умова $S_j < S_j(\alpha)$ задовольняється, тоді із заданим рівнем значущості α гіпотеза, що максимальні або «підозрілі» значення k будуть аномальними, відхиляється.
2. Якщо умова $S_i > S_i(\alpha)$ задовольняється для $i=k, k-1, \dots, j-1$ та $S_j > S_j(\alpha)$, тоді із заданим рівнем значущості α гіпотеза, що максимальні або «підозрілі» значення j є аномальними, приймається.
3. Якщо $S_k > S_k(\alpha)$, тоді, із заданим рівнем значущості α гіпотеза, що максимальні або «підозрілі» значення k є аномальними, приймається.

2.3.2 Методи нейтронно-шумової діагностики

Ще одним варіантом моніторингу ПВМ є методи нейтронно-шумової діагностики [23]. Ці методи засновані на встановленому Фейнманом факті [86], що збільшення коефіцієнта розмноження нейтронів може бути пов'язане зі збільшенням відношення дисперсії інтервалів відгуку детектора на зареєстрований нейтрон до середнього значення (тут і далі – відношення дисперсії до середнього значення, ВДС). У роботі [87], показана можливість переходу від аналізу статистики інтервалів відгуку детектора нейтронів до статистики значень ЩПН. Зокрема, визначено нижню межу кількості елементів вибірки у 20 тис. спостережень, за якої відхилення досліджуваних параметрів від теоретичних значень значно зменшується.

Верхня частина рисунка 2.6 ілюструє зміни показань БД 5 ЩПН, встановленого в скупченні ПВМ у 2019 році. На ній показано, що ЩПН постійно зростала у цей

період. Незабаром загальний тренд ЩПН за даними цього БД змінився на стабільний з наявністю сезонних коливань. Нижня частина рисунка 2.6 ілюструє зміну ВДС для динаміки ЩПН та показує зміну тенденції ВДС перед зміною тенденції динаміки ЩПН. Подальше моделювання зміни рівня підкритичності за зареєстрованими даними не виключає такої поведінки $K_{\text{эф}}$ у ЯНС ПВМ [2].

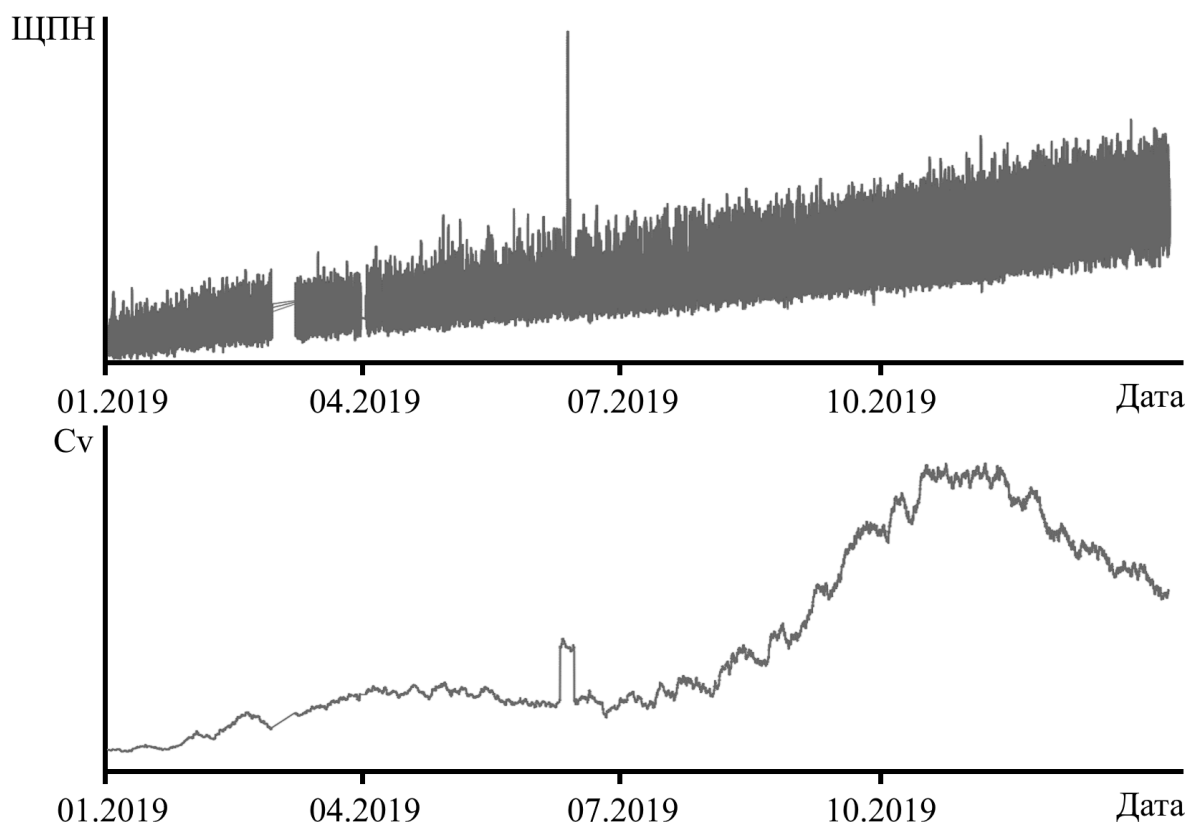


Рис. 2.6 – Динаміка ЩПН, що була зареєстрована у 2019 році (верхня крива) за допомогою БД5 СКЯБ, порівняно з його співвідношенням дисперсії до середнього (нижня крива).

Досвід експлуатації СКЯБ Чорнобильської АЕС визначає наступні рекомендовані інтервали для ретроспективного аналізу параметрів, що контролюються оператором: 1 година, 6 годин, 12 годин і 24 години. Це пов'язано з 12-годинним режимом роботи чергового персоналу. Тут слід зазначити, що сам БЗД СКЯБ зберігає у своїй внутрішній пам'яті 72-годинний архів кільцевого буфера. Беручи до уваги низькі обчислювальні вимоги для такого алгоритму, видається

доцільним розрахувати ВДС на БЗД в режимі реального часу для кожного каналу реєстрації ЩПН для ковзних часових вікон із зазначеними вище інтервалами: 1, 6, 12, 24 та 72 години. Ця інформація, доступна за запитом оператора, може бути допоміжною для аналізу у випадку відхилення сигналу від нормальної поведінки [2].

2.4 Аналіз динаміки ЩПН в підреакторному приміщенні 305/2

2.4.1 Аналіз динаміки ЩПН до встановлення НБК

Чорнобильська ядерна та радіаційна аварія, також відома як Чорнобильська катастрофа, сталася в суботу, 26 квітня 1986 року, на енергоблоці № 4 Чорнобильської атомної електростанції (ЧАЕС) на півночі України. Під час цієї аварії був повністю зруйнований ядерний реактор з графітовим сповільнювачем. Частину активної зони реактора було викинуто в атмосферу внаслідок вибуху, а решта розплавилася, утворивши різні лавоподібні скупчення ПВМ [88].

Для захисту навколишнього середовища та блокування ядерного та високорадіоактивного обладнання зруйнованого блоку №4 ЧАЕС менш ніж за рік після аварії було споруджено «Об'єкт «Укриття» (ОУ), також відомий як «Саркофаг». З погляду ядерної безпеки ОУ є об'єктом, який містить просторово розподілені кластери ПВМ. Ядерна небезпека цих кластерів полягає в імовірності існування або умов для виникнення СЛР [89].

Проведення постійного контролю ЩПН скупчень ПВМ у приміщеннях об'єкта «Укриття» було почато в 1988 році. У бетоні ОП, в районі південно-східного квадранта приміщення 305/2 у свердловинах знаходилося три детектори нейтронів системи «Фініш». Їхні покази мали стійкий характер з незначним трендом на зниження ЩПН пов'язаного з розпадом ^{242}Cm і ^{244}Cm – джерел нейтронів спонтанного поділу.

У червні 1990 р. після тривалих та інтенсивних атмосферних опадів у південно-східній частині підреакторного приміщення 305/2 у місці утворення та виходу потоків ЛПВМ було зареєстровано повторну критичність [6,90]. Як показали проведені дослідження, СЛР могла виникнути в процесі надходження води в скупчення ПВМ,

що знаходиться в зоні проплавлення бетону ОП [7,91]. За даними [15] до червня 1990 р. сухе скупчення було глибоко підкритичним ($K_{\text{эф}} < 0,7$), оскільки його температура вище $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ підтримувалася залишковим тепловиділенням. Надходження води до бетонного масиву ОП було виявлено ще у травні 1990 р., коли в результаті заливання водою відмовили детектори нейтронів, встановлені у свердловинах на відм. 9,1 м, що виходять у південно-східну частину приміщення 305/2 [6,58]. Повільне надходження води протягом травня-червня призвело до охолодження бетону на периферії скупчення та досягнення водою середовища скупчення. 19 червня у прим. 304/3 встановлено БД, який показував стрибкоподібний тренд зростання швидкості рахунку (рис. 2.7). Як стверджується у [15] в процесі надходження води від атмосферних опадів в остигаюче розмножувальне середовище скупчення при температурі менше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ досягло стану критичності. СЛР утримувалася в режимі осциляцій 32 год із запасом реактивності (ρ) порядку $10^{-3}\beta$ і інтенсивністю поділів до 10^{13} под./с. При подальшому надходженні води в розмножувальне середовище ЯНС в кількості, що перевищила діапазон оптимального зволоження, скупчення перейшло в стан підкритичності, рівень якої може бути поза аварійними значеннями $K_{\text{эф}} > 0,98$ [59,60].

Інтерпретацію інциденту проведено для критичних збірок з гомогенною та гетерогенною структурами [5,56]. Масові та геометричні характеристики збірок наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Масові та геометричні характеристики критичних збірок

Структура	Об'єм циліндра, м^3	Об'єм ПВМ, м^3	Об'єм UO_2 , м^3	ПВМ, т	UO_2 , т	U, т	^{235}U , кг	Вода, т (макс.)
Гомоген	17,7	7,07	2,10	33,6	22,9	20,2	231,8	10,6
Гетероген	17,7	8,5	2,01	35,8	21,1	18,6	213,4	8,2

Результати дослідження наростання потужності енерговиділення збірки у процесі заливання її водою у районі оптимального зволоження показано рисунку 1.5

[56]. Як стверджують автори [56] при надходженні води до розмножувального середовища ЯНС вноситься позитивна реактивність, збірка досягає першого значення критичності і стає надкритичною. При цьому ЩПН ЯНС збільшується настільки, що блок детектування (БД) у приміщенні 304/3 починає показувати перевищення ЩПН над фоном. ЩПН наростає. Енерговиділення на кожному стрибку потужності починає підігрівати весь об'єм збірки.

За сценарієм, запропонованим у [56] відбуваються наступні події. Стрибкоподібний характер зростання потужності енерговиділення визначається процесом локального пароутворення по фронту змочування та часткового виштовхування води з перегрітого за рахунок залишкового енерговиділення (ЗТВ) ядра скупчення. У той же час температура у всьому об'ємі збірки зростає, що пригнічує запас реактивності та звужує діапазон оптимального зволоження. Локальна температура на периферії розмножувального середовища ЯНС падає нижче $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і це дає можливість просуватися фронту змочування, збільшуючи об'єм води у збірці.

Зрештою в результаті перезволоження з виходом за друге значення критичності СЛР гаситься. На рисунку 2.7 наведено значення швидкості рахунку, реактивності та приросту температури в об'ємі збірки, розраховані для етапів розвитку та самогасіння інциденту за запропонованим сценарієм [59].

За даними [56] температура бетону на периферії залитого водою скупчення до початку інциденту становила від 70 до $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ і підтримувалася за рахунок ЗТВ. В даний час температура бетону на периферії скупчення знизилася до інтервалу від $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ і продовжує падати, слідуючи за падінням ЗТВ [92]. Як відомо, при перезволоженні температурний коефіцієнт реактивності працює у бік збільшення підкритичності та конкурує з Доплер-ефектом. При підкритичності (менше 2β), що оцінюються за рахунок перезволоження, лише скорочення об'єму води в скупченні і зростання температури може призвести до критичного інциденту, механізми розвитку якого будуть вже іншими, але завжди з повільною кінетикою.

Таким чином, відомі дані свідчать про те, що критичний інцидент у червні 1990 р. стався в процесі заливу водою скупчення ПВМ у зоні проплавлення ОП, а його гасіння – в результаті перезволоження (для водо-уранових систем з низькозбагаченим

паливом у надкритиці існує діапазон оптимального зволоження), вода є стабілізуючим фактором, що забезпечує підкритичність водо-уранової системи. Скупчення знаходиться за другим критичним значенням, а його підкритичність обмежується об'ємом доступної для води пористості.

У таблиці 2.2 наведено основні характеристики критичного інциденту. Отримані у роботі [5,56] значення мають оціночний характер і показують несуттєву відмінність параметрів, інтерпретованих для інциденту в гомогенній та гетерогенній збірках. Це пов'язано з тим, що показник гетерогенності (крок регулярної решітки від 0,5 см до 1,0 см) був обраний нижче за оптимальне значення [10].

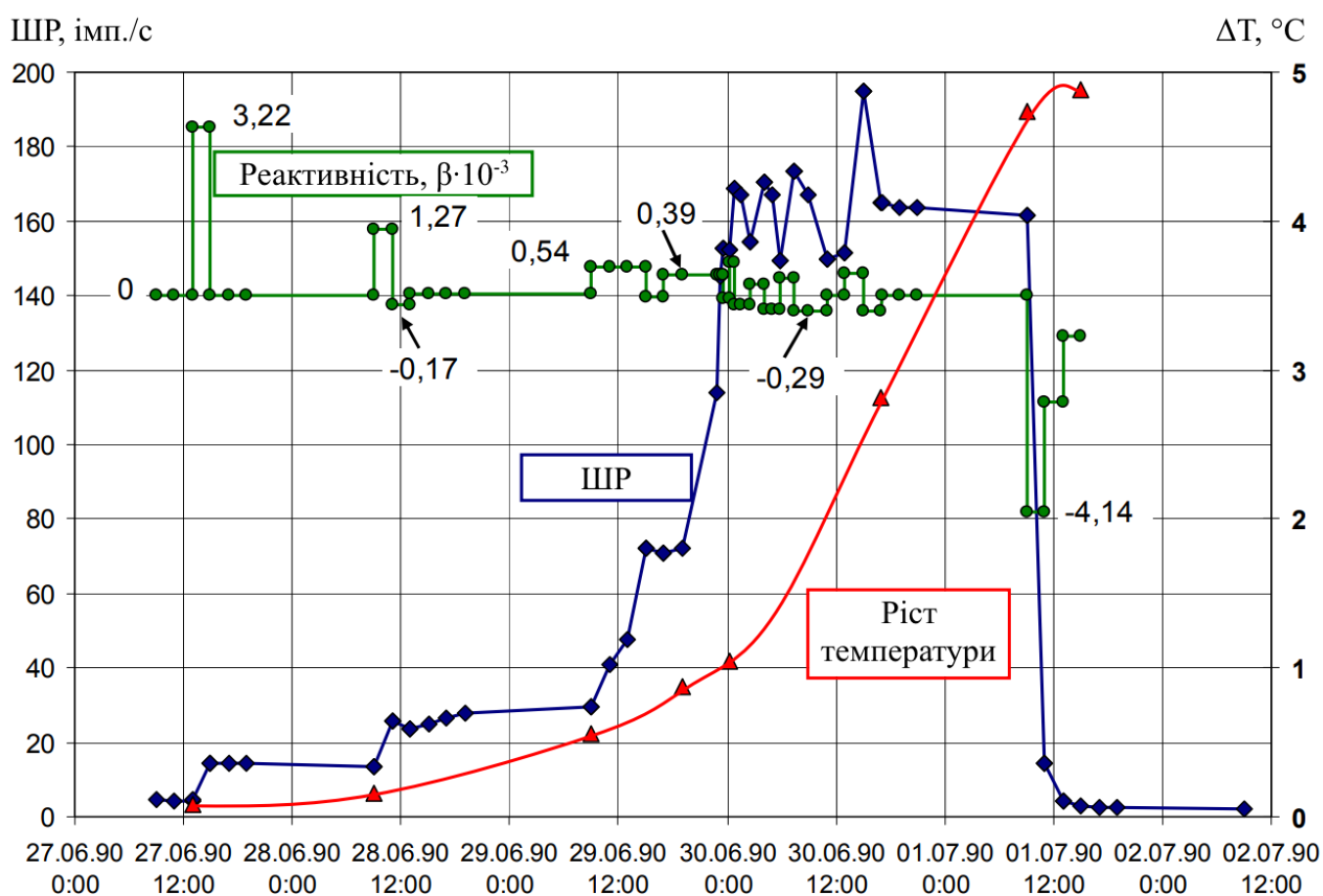


Рисунок 2.7 – Середня потужність енерговиділення (P) та зростання температури (ΔT) на етапах розвитку критичного інциденту 1990

Таблиця 2.2 – Характеристики критичного інциденту для 2-х сценаріїв: гомогенна та гетерогенна структура скупчення

Показники	Гомогенна структура	Гетерогенна структура	Примітка
ЩПН, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$5,5 \cdot 10^7$	$5,5 \cdot 10^7$	при максимальній швидкості рахунку БД
Інтенсивність поділів на етапі утримання, с^{-1}	$2,8 \cdot 10^{13}$	$3,1 \cdot 10^{13}$	на етапі утримання потужності
Сумарна кількість поділів	$4,1 \cdot 10^{18}$	$3,8 \cdot 10^{18}$	92 години
Енерговиділення, МДж	138	125	
Введена температура розігріву скупчення (ПВМ + H_2O), Δ °C	4,01	3,96	без урахування тепловіддачі
Власний фон, с^{-1}	$1,65 \cdot 10^8$	$1,52 \cdot 10^8$	
Кратність множення нейтронів	$> 10^5$	$> 10^5$	
Позитивна реактивність, що вводиться, ρ в од. $10^{-3} \beta$	$0,39 \div 3,22$	$0,39 \div 3,22$	при розгоні
Позитивна реактивність, що вводиться, в од. $- 10^{-3} \beta$	$0,17 \div 4,14$	$0,17 \div 4,14$	при самогасінні
Середня температура скупчення, °C	80	80	під час інциденту
Підкритичність скупчення, в од. β	< 1	< 1	при 80 °C

До встановлення НБК (29.11.2016) зволоження розмножувального середовища ЯНС утримувалося за рахунок регулярних надходжень атмосферних опадів та конденсату, що могло бути фактором, який забезпечував стабільний стан

підкритичності ЯНС. Нейтронна активність скупчень ЛПВМ у підкритиці визначалась наявністю внутрішнього джерела нейтронів та поточним рівнем підкритичності [93]. Контроль нейтронної активності здійснюється за допомогою ВК СКЯБ ІАСК і ЕДС.

Нейтрони внутрішнього джерела утворюються в кераміці ЯНС у результаті: спонтанного поділу актиноїдів; (α, n) - реакції на легких ядрах домішок; фото-ядерних процесів типу (γ, n) . Фотонейтрони не становлять практичного значення, оскільки в домішках відсутні ядра з пороговою енергією зв'язку нижче 6 МеВ. Нейтрони спонтанного поділу визначаються концентрацією ізоотопів ^{240}Pu та ^{244}Cm з річним спадом абсолютного виходу 2,7% [94].

Після встановлення контролю за допомогою штатної системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) ОУ було отримано дані щодо значень ЩПН (рис. 2.8) у точках контролю, що знаходяться на периферії ЯНС.

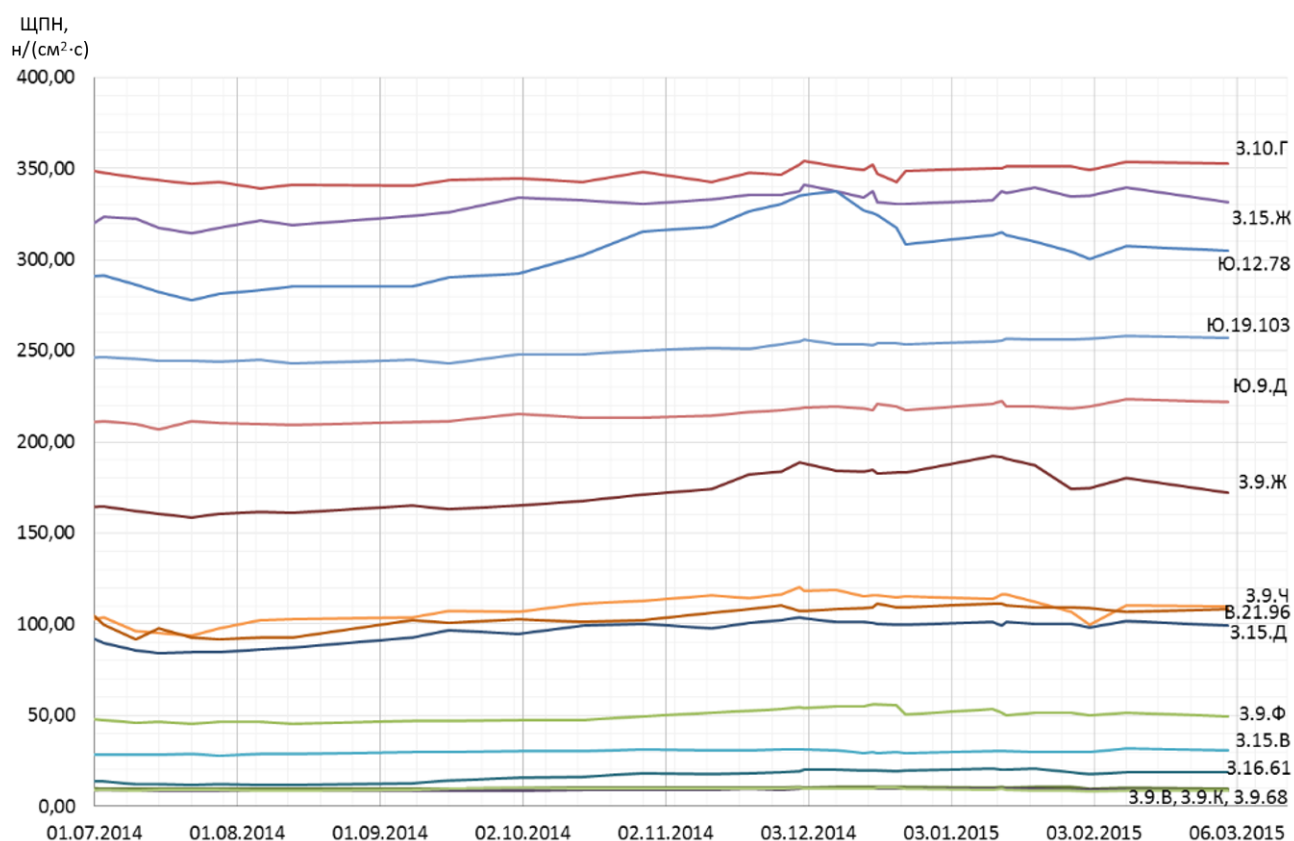


Рисунок 2.8 – Динаміка ЩПН, зареєстрована детекторами СКЯБ у дослідницьких свердловинах

На рисунку наведено статистику середньодобових значень ЩПН зареєстрованих в: коричневих ЛПВМ (свердловина З-9-Ж, четвертий клапан південно-західного квадранта прим. 305/2) та чорних ЛПВМ (свердловина З-10-Г, прим. 304/3, свердловина Ю-12-78). Наявні дані свідчать про те, що динаміка ЩПН до встановлення НБК мала лише сезонні коливання, явні тренди до зміни середньорічних значень не визначались. Як показали проведені комплексні дослідження [20], коливання значень ЩПН були пов'язані із зміною температурно-вологісного режиму ОУ, а отже зі зміною середовища розділу між БД СКЯБ та ЯНС.

2.4.2 Аналіз динаміки ЩПН після встановлення НБК

План здійснення заходів на об'єкті «Укриття» був завершений у 2020 році разом з проектуванням, будівництвом та введенням в експлуатацію великої аркоподібної споруди над ОУ під назвою Новий безпечний конфайнмент (НБК). Ця споруда була побудована біля ОУ і переведена в проектне положення в листопаді 2016 року [91].

Як показали багаторічні дослідження за програмою наукового супроводу НБК-ОУ, встановлення НБК «Арка» кардинально змінило умови зберігання ПВМ, зокрема за такими показниками контролю як температура та відносна вологість у приміщеннях ОУ. Як було підкреслено у попередньому розділі, це фактори які безпосередньо впливають на рівень ядерної безпеки (ЯБ) ЯНС ПВМ. Отже, проблема як забезпечення ЯБ, так і її переоцінки стає особливо актуальною для умов зберігання ПВМ після введення в експлуатацію НБК-ОУ.

Після встановлення НБК у регламентне положення (листопад 2016) різко зменшився об'єм води, що надходить у внутрішні приміщення ОУ від атмосферних опадів а також збільшилась температура повітря внаслідок обігріву приміщень [1]. Це призвело до того, що група вимірювальних каналів (ВК) ЩПН СКЯБ реєструють чітко виражене зростання нейтронної активності, пов'язане зі зростанням $K_{\text{эф}}$, що підтверджує версію гасіння СЛР при повторній критичності в результаті перезволоження середовища ЯНС [18,23].

Основним фактором, що визначає динаміку нейтронної активності ЯНС, є процеси зміни об'ємної густини води (сповільнювач-поглинач) в поровому просторі їх розмножувального середовища [19]. Поровий простір являє собою систему газових макро- і мікропор, об'єднаних між собою та зовнішнім середовищем нескінченним кластером мікротріщин (близько 2,5 мкм) і порових наноканалів (40 – 60 нм). Сукупність газових макропор (сферичної форми розміром до 10 см) визначає вологоємкість і гетерогенність розмножувального середовища скупчень, а мікротріщини і наноканали - механізм об'ємної сорбції та швидкість міграції води в об'ємі скупчень [95].

На сьогоднішній день при зміні концентрації вологи в силікатній матриці ЯНС існує ймовірність зворотної критичності з позитивним температурним коефіцієнтом реактивності, що прискорює розгін [91]. Найменш витратним тимчасовим заходом, що мінімізує ризик неконтрольованого виникнення зворотної критичності, є проведення постійного моніторингу ЩПН, що забезпечує своєчасне виявлення ризику досягнення аварійних рівнів підкритичності та оперативного відновлення температурно-вологісного режиму зберігання ЯНС до перезволоженого стану [1].

Моніторинг ЩПН на периферії ЯНС здійснюється за допомогою штатної СКЯБ. На рис. 2.9 наведено динаміку нормованої ЩПН відносно середньодобового значення, на момент встановлення НБК «Арка», яка була зареєстрована на периферії ЯНС після введення в експлуатацію НБК-ОУ на тлі динаміки температури і відносної вологості, що характеризує зміни температурно-вологісного режиму в нижніх приміщеннях ОУ.

Координати установки БД СКЯБ ІАСК у свердловинах комплексу НБК-ОУ в будівельних осях 4-го енергоблока ЧАЕС наведено в табл. 2.3 [3].

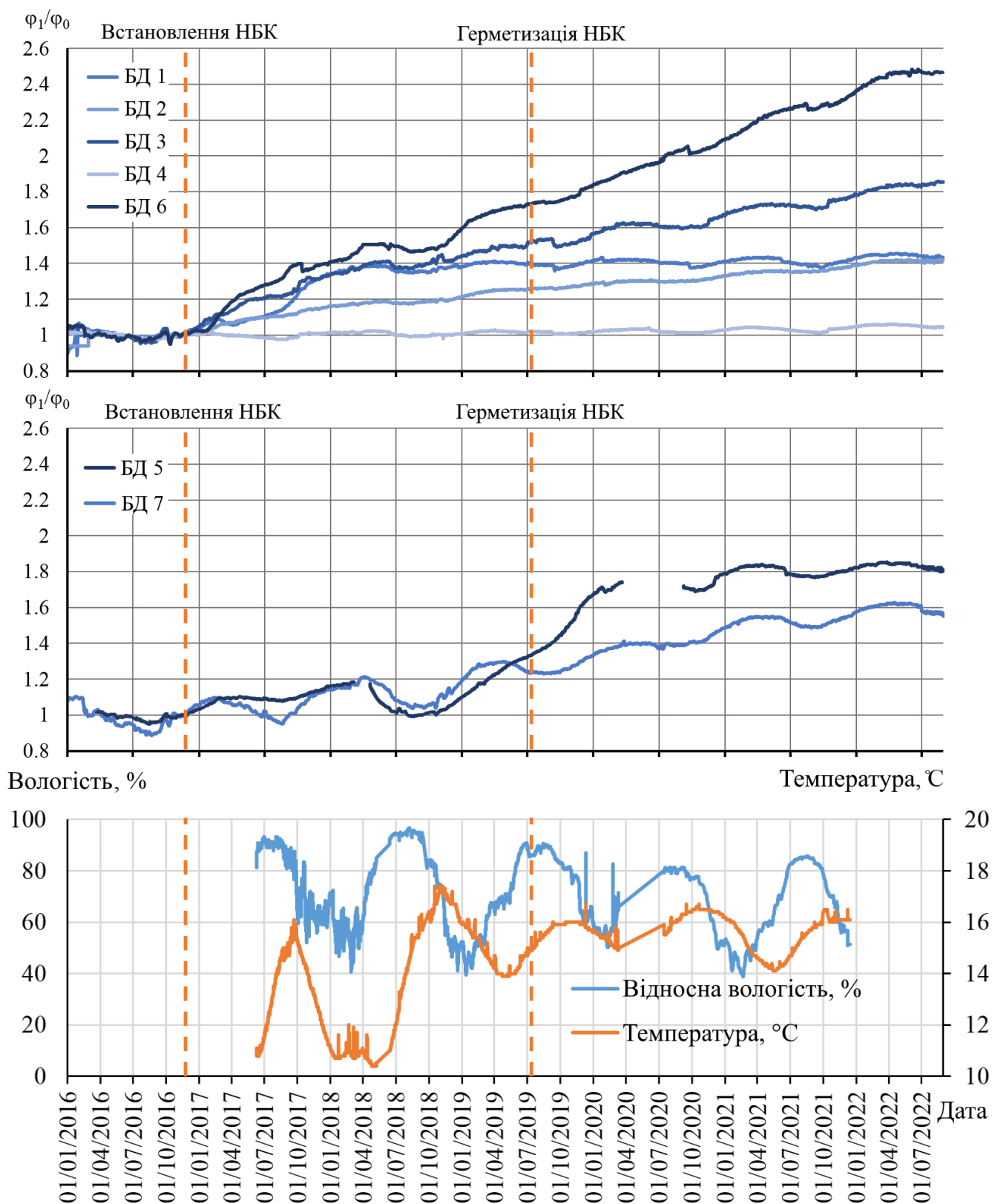


Рисунок 2.9 – Динаміка ЩПН, температури та відносної вологості у приміщеннях об'єкту «Укриття»

Таблиця 2.3 – Місця розташування точок контролю ЩПН СКЯБ ІАСК у приміщеннях комплексу НБК-ОУ

Номер ВК	Позначення ВК в експлуатаційній документації	Зона контролю	Координата центру БД - точки контролю (вісь; рядок)	Свердловина або приміщення (прим.)
01	NSMS-S-NFD-001	Прим. 305/2, +12,0 м	46+2850; И+1750	Ю.12.78
02	NSMS-S-NFD-002	Прим. 305/2, +8,95 м	47+400; К-2000	3.9.К
03	NSMS-S-NFD-003	Прим. 305/2, 304/3, +9,3 м	47-900; И-400	3.9.Ф
04	NSMS-S-NFD-004	Прим. 304/3, +9,85 м	47-1400;И-2000	3.10.Г
05	NSMS-S-NFD-005	Прим. 305/2, +9,1 м	48-2800; К-1000	3.9.Ж
06	NSMS-S-NFD-006	Прим. 305/2, +9,1 м	47+300; К	3.9.68
07	NSMS-S-NFD-007	Прим. 305/2, +11 – 11,18 м	48+3000; И+3000	3.16.61
08	NSMS-S-NFD-008	ПБВ*, прим. 505/3, +24,6 м	44+2600; И+2100	В.21.96
09	NSMS-S-NFD-009	ПБВ, прим. 505/3, +4,0 м	44+2000; К+1400	В.4.103
10	NSMS-S-NFD-010	Прим. 210/6, +6,24 – 6,32 м	47-1800; И+2400	Ю.9.Д
11	NSMS-S-NFD-011	Шахта, прим. 504/2, +15,0 м	48-1300; К-1000	3.15.Д

Продовження таблиці 2.3

Номер ВК	Позначення ВК в експлуатаційній документації	Зона контролю	Координата центру БД - точки контролю (вісь; рядок)	Свердловина або приміщення (прим.)
12	NSMS-S-NFD-012	Шахта, прим. 504/2, +15,2 м	47+500; Л+2200	3.15.В
13	NSMS-S-NFD-013	Прим. 305/2, +9,1 м	47+800; И+1650	3.9.В
14	NSMS-S-NFD-014	Прим. 305/2, +9,10 м	47-600; Л-700	3.9.Ч
15	NSMS-S-NFD-015	Прим. 305/2, 504/2, +14.7 м	47+3000; К+1500	3.15.Ж
16	NSMS-S-NFD-016	Прим. ЦЗ**, +32,1 м	48-1400; И+1600	3.22.Б
17	NSMS-S-NFD-017	Прим. під ЦЗ, +33,8 м	42-900; К+1000	Прим. 818/2
18	NSMS-S-NFD-018	Прим. під ЦЗ, +33,3 м	42-900; К+1000	Прим. 818/2
19	NSMS-S-NFD-19	Прим. під ЦЗ, +33 м	40+900; М-1500	Прим. 821/2

* Південний басейн витримки палива.

** Центральний зал.

Машинна обробка даних за допомогою розробленого прикладного програмного забезпечення дала змогу дослідити динаміку ЩПН, зареєстрованих апаратними засобами СКЯБ упродовж 2018 – 2022 рр., оцінити особливості її трендів та визначити рівняння регресії (табл. 2.4) [3].

Таблиця 2.4 – Результати регресійного аналізу та оцінки відносної середньорічної швидкості зміни (спадання або зростання) ЩПН

Номер ВК	Рівняння регресії та коефіцієнт достовірності апроксимації		Відносна середньорічна швидкість зміни ЩПН, %/рік	
	2018 - 2022 рр.	R ²	2018 - 2022 рр.	2019 - 2022 рр.
01	0,015 x + 524	0,50	1,1	0,9
02	0,0016 x+12	0,95	4,7	4,0
03	0,014 x + 61,3	0,97	7,6	7,2
04	0,009 x + 366,1	0,51	1,1	1,2
05	0,81 x + 1571	0,71	18,8	11,4
06	0,008 x + 26	0,94	9,9	12,0
07	0,028 x + 92,6	0,91	11,0	9,0
08	-0,0016 x+42,2	0,77	- 1,2	- 1,1
09	-0,034 x + 882	0,50	- 1,1	- 1,0
10	0,018 x + 314,1	0,10	1,7	1,9
11	-0,002 x + 88,1	0,42	- 0,7	- 1,4
12	0,0004 x + 26,7	0,02	0,5	0,4
13	0,0005 x + 6,6	0,17	4,3	0,5
14	0,021 x + 114,1	0,98	6,2	5,5
15	-0,003 x + 241,6	0,15	- 0,3	- 0,4
16	0,0021 x + 31	0,14	3,3	4,6

Примітка. Одиниці виміру: ЩПН - н·см⁻²·с⁻¹; x – доба

На рис. 2.10 наведено результати пошуку кореляції між середніми за тиждень значеннями параметрів контролю СКЯБ у різних ВК [3].

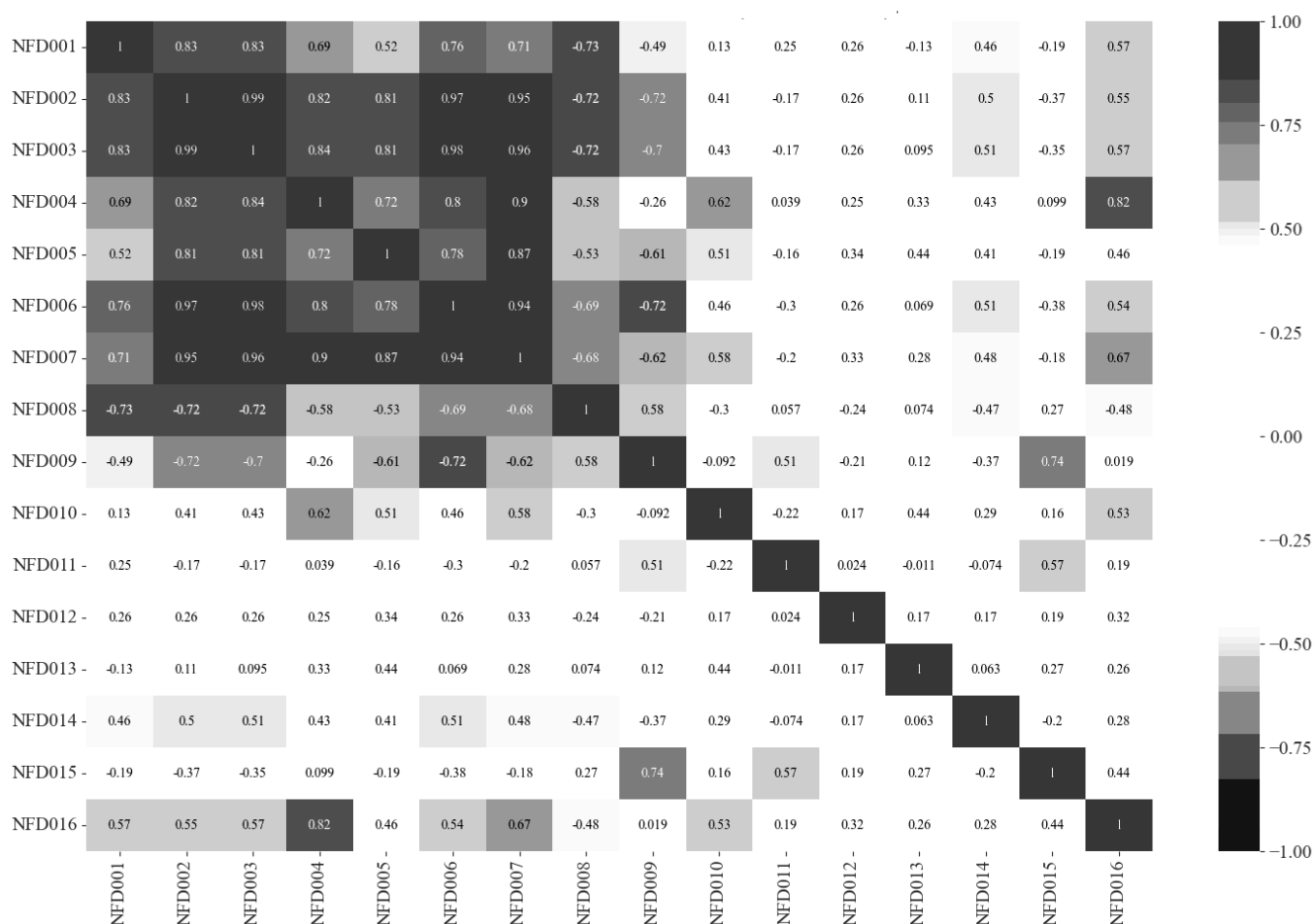


Рисунок 2.10 – Результати машинної обробки даних СКЯБ у вигляді матриці парних коефіцієнтів кореляції між середніми за тиждень значеннями ЩПН у різних ВК (2018 - 2022 pp.)

Результати кореляційного аналізу демонструють стійку кореляцію між БД, розташованими на периферії ЯНС. Як видно з Табл. 2.4 результати регресійного аналізу демонструють наявність загальної тенденції до зростання значень ЩПН для БД ВК 1 – 7 впродовж 2018 – 2022 pp [3]. БД ВК 1 – 7 СКЯБ встановлені (рис. 2.11): над зоною локалізації ЯНС ПВМ – БД ВК 1; у бетоні ОП навколо границь ЯНС ПВМ – БД ВК 3, БД ВК 6 та БД ВК 7; за межами приміщення 305/2 (у сусідньому приміщенні 304/3) на поверхні скупчення чорних ЛПВМ БД ВК 4.

Таким чином БД ВК 1, 3, 6 детектують ЩПН від двох джерел, розташованих у зоні локалізації ЯНС ПВМ: власне ЯНС ПВМ – перезволоженої кераміки з критичною масою урану та шару чорних ЛПВМ, що зверху вкриває ЯНС ПВМ – перезволоженої маси кераміки з глибоко підкритичним розмножувальним середовищем; БД ВК 1

детектує нейтрони, що з'являються з верхньої поверхні шару чорних ЛПВМ; БД ВК 3, 6 – на бічних поверхнях джерел; БД ВК 4 – на поверхні шару чорних ЛПВМ; БД ВК 7 – у шарі коричневих ЛПВМ.

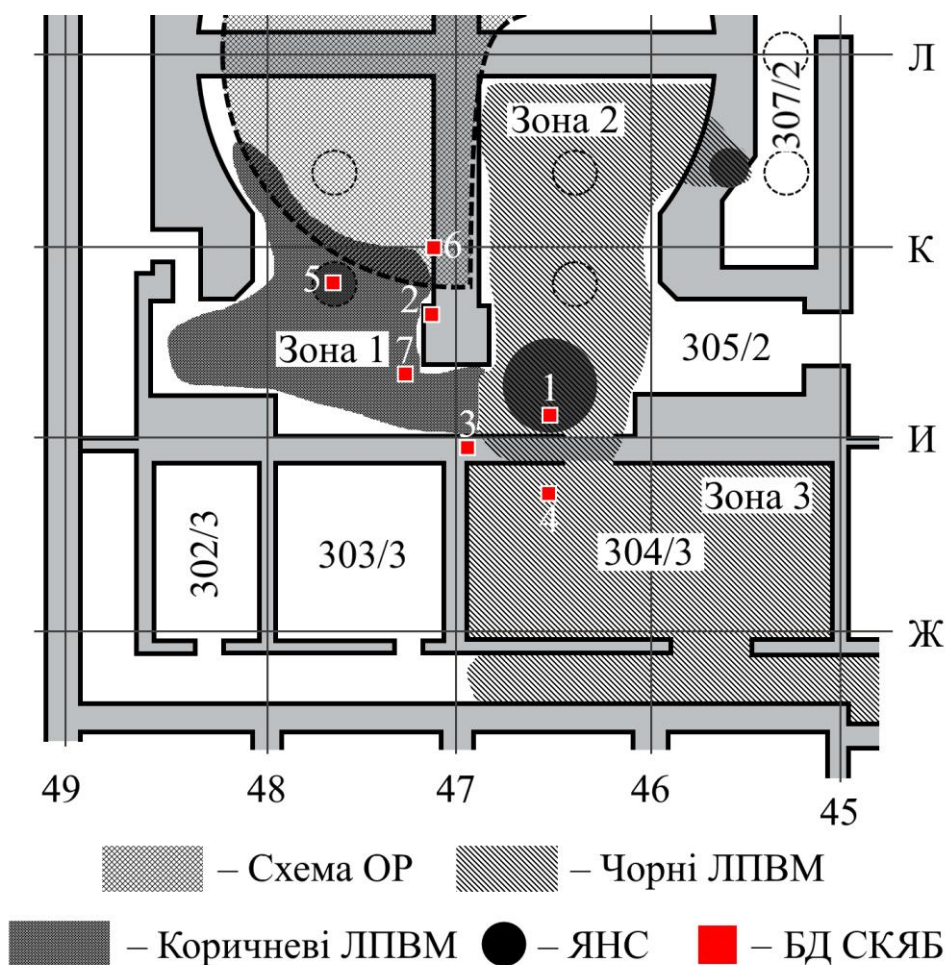


Рисунок 2.11 – Схема розташування БД ВК СКЯБ – точок контролю ЩПН навколо границь ядерно-небезпечних скупчень

Як було зазначено у попередньому розділі, до встановлення НБК динаміка ЩПН мала сезонні коливання (менше 5 % у періоди накопичення конденсату або випаровування) за рахунок регулярних надходжень до зони проплавлення ОП атмосферних опадів, але явні тренди до зміни середньорічних значень не спостерігалися. Після встановлення НБК на тлі припинення надходження води від атмосферних опадів спостерігається постійне зростання ЩПН з парним коефіцієнтом кореляції між ЩПН за показами БД ВК 3, 6 понад 0,8. Є підстави вважати, що зростання ЩПН визначається процесом втрати вологи, що супроводжується

збільшенням $K_{\text{эф}}$ в розмножувальному середовищі. В період накопичення конденсату швидкість зростання ЩПН стримується, а в період випаровування зростає. Якщо припустити, що зростання ЩПН від мінімальних значень при початковому рівні зволоження залежить від тривалості сухого періоду, можна зробити висновок про те, що зволоження ЯНС ПВМ в приміщенні 305/2 постійно підтримується на рівні, що забезпечує максимальний рівень підкритичності в закритичному стані. Відсутність явно вираженого тренду в динаміці ЩПН, що детектується в БД ВК 4, може бути свідченням того, що в приміщення 304/3 вода не надходила.

У розрахунках нейтронно-фізичних параметрів скупчення моделюються як водоуранові гетерогенні розмножувальні системи з низькозбагаченим паливом, внутрішнім джерелом нейтронів та самопоглинанням. Відомо, що для таких систем існує оптимальне водо-уранове співвідношення, тобто концентрація води, при якій $K_{\text{эф}}$ досягає максимального значення, а подальше зростання концентрації призводить до перезволоження та падіння $K_{\text{эф}}$ до значень, що визначаються вологоємністю розмножувального середовища [96]. Для систем із критичною масою палива діапазон оптимального зволоження ($K_{\text{эф}} > 1$) визначається двома значеннями водо-уранового відношення, при яких розмножувальна система є критичною [61].

З метою своєчасного виявлення ризику досягнення аварійних рівнів підкритичності необхідно створити фізичну та математичну модель ЯНС що дозволять провести оцінку нейтронно-фізичних характеристик скупчень ПВМ, спираючись на результати сучасних досліджень ЯНС а також оцінити поточний рівень підкритичності ЯНС в комплексі НБК-ОУ після встановлення Нового безпечного конфайнмента.

2.5 Висновки до розділу 2

В другому розділі розглянуто засоби та методи дослідження ЯНС ПВМ. З метою проведення вимірювань розподілу ЩПН, ПЕД, гамма випромінювання та температури в бетоні ОП, в 1988 р. було розпочато буріння дослідницьких свердловин. Це дозволило встановити межі розповсюдження ПВМ з високим вмістом

урану. Різке збільшення ЩПН, при одночасному посиленні жорсткості спектру (зменшенні кадмієвого відношення), спостерігалось у всіх західних свердловинах у ОП при подальшому русі датчиків нейтронів у напрямку вибою. Таким чином, враховуючи результати вимірів ПЕД, було визначено межі ЯНС як потужного джерела нейтронів.

Кількість палива в зоні проплавлення ОП шахти реактора прим. 305/2 оцінювали за допомогою теплотричних вимірювань. За результатами проведених оцінок встановлено, що: ЯНС ПВМ є джерелом тепла, що містить до 20 т палива; форма джерела тепла задовільно збігається з плоским циліндром; ПВМ відокремлені від незруйнованої частини ОП «примежевим» шаром, що складається з деструктованого бетону; до встановлення НБК ПВМ постійно знаходились у воді, рівень якої не нижче за відмітку 8.800.

Контроль стану ядерно-небезпечних скупчень в об'єкті «Укриття» забезпечується інтегрованою автоматизованою системою контролю (ІАСК) ОУ. Її розгортання на ОУ та введення в експлуатацію були завершені лише у 2011 році, а дослідно-промислова експлуатація почалася у 2012 році. Вона включає в себе систему вимірювання та моніторингу ядерних і радіаційних величин від ПВМ – Системи контролю ядерної безпеки (СКЯБ) та інші системи, які надають інформацію про структурну цілісність ОУ, вимірювання сейсмічної активності на Чорнобильському майданчику та 30-км зоні відчуження та систему контролю радіаційної безпеки, а саме Станіонарну Систему Радіаційного Контролю (ССРК), Систему Контролю Будівельних Конструкцій (СКБК) та Систему Сейсмічного Контролю (ССК).

З метою підвищення ефективності контролю рівня підкритичності ПВМ, що здійснюється штатною СКЯБ ІАСК НБК ОУ в підреакторному приміщенні 305/2 використовується «Експертно Дослідницька Система» (ЕДС) ІПБ АЕС. ЕДС забезпечує довготривалий і постійний моніторинг ЩПН, ПЕД і температури скупчень ПВМ, локалізованих всередині комплексу НБК-ОУ.

Для аналізу динаміки нейтронної активності, що реєструється СКЯБ використовуються статистичні методи. Застосування статистичних методів дозволяє: фільтрувати аномальні результати вимірювань; виявляти наявність однакових трендів

в динаміці ЩПН різних ВК СКЯБ, що може свідчити про реєстрацію певного фізичного процесу у різних точках контролю на окремому відрізку спостереження; прогнозувати динаміку ЩПН.

Основним фактором, що визначає багаторічну динаміку ЩПН ЯНС, є процеси надходження (1990 р.), утримання (до встановлення НБК) і втрати вологи (після встановлення НБК) в розмножувальному пористому середовищі. На сьогоднішній день при зміні об'ємної густини води в розмножувальному середовищі ЯНС існує ймовірність зворотної критичності з позитивним температурним коефіцієнтом реактивності, що прискорює розгін. Найменш витратним тимчасовим заходом, що мінімізує ризик неконтрольованого виникнення зворотної критичності, є проведення постійного моніторингу ЩПН, що забезпечує своєчасне виявлення ризику досягнення аварійних рівнів підкритичності. Для вирішення даної задачі необхідно створити фізичну та математичну модель ЯНС, що дозволить оцінити поточний рівень підкритичності ЯНС в комплексі НБК-ОУ після встановлення Нового безпечного конфайнмента.

Основні результати розділу викладені автором у публікаціях [1,2,3,7,18,20,23].

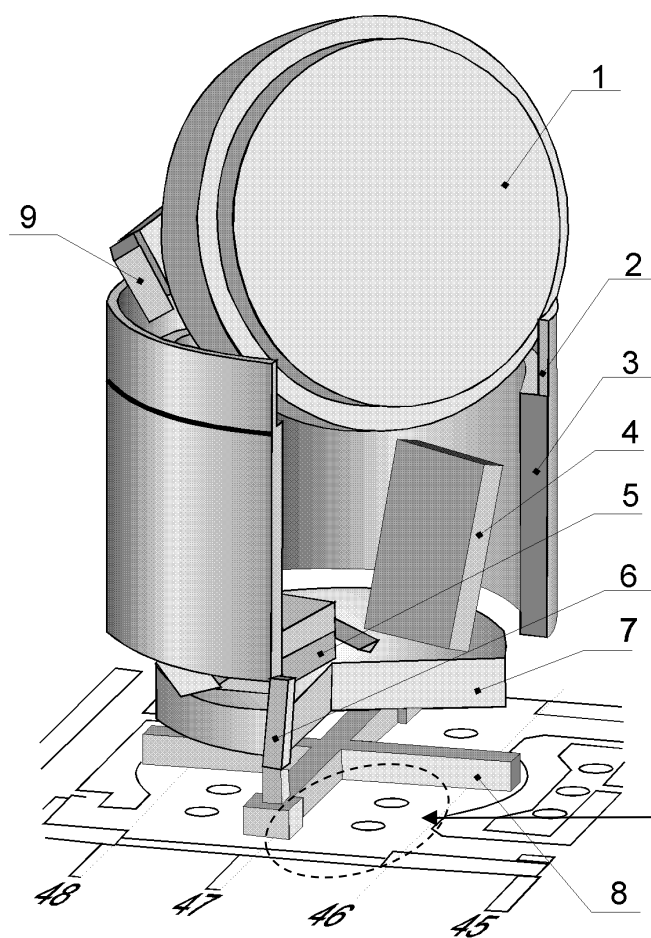
3. РОЗРОБКА ФІЗИЧНОЇ ТА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛЕЙ ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ ЯК ПРОДУКТУ ВЗАЄМОДІЇ КОРІУМУ З БЕТОНОМ

3.1 Технологічні процеси утворення скупчень ПВМ у підреакторному приміщенні 305/2

На основі результатів аналізу послідовності зареєстрованих подій, що передують руйнуванню реактора, а також результатів обстеження післяаварійного стану шахти реактора та підреакторного приміщення 305/2 пропонується концепція нової версії сценарію аварійних процесів, що враховує існування в зоні проплавлення ОП ЯНС коріумного походження з критичною масою палива.

Внаслідок швидкого зниження потужності та запуску нестационарного процесу з постійним зростанням отруєння ^{135}Xe у протяжній (понад 10 критичних об'ємів) АЗ виникла деформація нейтронного (енергетичного) поля з локальною критичністю у південно-східному секторі АЗ [97]. Потужність до 200 МВт була відновлена тільки в південно-східному секторі (110°) за практично нульового оперативного запасу реактивності (ОЗР) (від 2 до 6 стрижнів ручного регулювання (РР)). Три-чверті зони знаходилося в йодній ямі при потужності до 30 МВт, що визначається ЗТВ. Маніпуляції з витратою теплоносія при проведенні електротехнічних вимірювань вібрацій турбіни на холостому ході та подальші експерименти з вибігом турбіни призвели до практично нульового недогріву теплоносія при скороченні витрати живильної води (90 т/год у правій та 180 т/год у лівій половині АЗ [98]). Причиною початку аварійних процесів була криза теплообміну другого роду, яка виникла внаслідок нульового недогріву води (283°C у правій та 280°C у лівій половині АЗ) на всосі головних циркуляційних насосів (ГЦН). Припинення теплозйому в південно-східному секторі (що працював більш інтенсивно і забезпечував 200 МВт теплової потужності) визначило зростання температури палива в тепловиділяючих збірках (ТВЗ). При досягненні температури в ТВЕЛах 1900°C відбулось розплавлення цирконієвої оболонки, і розчинення в ній палива з утворенням уран-цирконієвої

евтектики. Опускання евтектики в нижні водяні комунікації та розплавлення серпентиніту засипки схеми «ОР» призвело до утворення коричневої кераміки. Розігрів труби технологічного каналу до 600 °С призводить до втрати його міцнісних властивостей, розпухання та заклинювання у графітовій кладці; при температурі 800 – 1200 °С відбувається руйнування графітових блоків та розрив каналів з виходом евтектики на тепловий захист верхньої плити схеми «ОР» та утворення коріуму у штатному положенні активної зони (рис. 3.1) [57].



Позначення:

- 1 – положення схеми "Е" в шахті після вибухового руйнування реактора;
- 2 та 3 – схеми "Д" і "Л", що зберегли цілісність своєї конструкції;
- 4, 5 – бетонні плити та елементи конструкцій ЦЗ, що впали в шахту при вильоті схеми «Е» після розгерметизації реакторного простору;
- 6 – пошкоджена південна опора схеми "Л";
- 7 – нерозплавлена частина (3/4) схеми "ОР", втиснута на 4 м вниз;
- 8 – бетонна опора схеми "С" у формі хреста;

Рисунок 3.1 – Схема шахти реактора та підреакторного приміщення 305/2 після аварії

Паровий вибух при тотальному руйнуванні каналів у південно-східному секторі АЗ і виходом пари в графітову кладку при тиску більше 80 атм викидає під купол центрального залу схему «Е» з технологічними каналами лівої половини АЗ, відірваними по зварному шву від труб нижніх водяних комунікацій, і графітовою кладкою, а також схемою «КЖ», відірваною по нижньому перегрітому гофру. Права

половина АЗ, з перегрітими трубками технологічних каналів (ТК), що втратили міцнісні властивості, і графітовою кладкою залишається в шахті реактора.

Повне зневоднення викинутого в центральну залу кластера активної зони при розриві водяних комунікацій контуру багаторазової примусової циркуляції а також контуру охолодження системи управління та захисту призвело до розгону на миттєвих нейтронах та теплового вибуху (ядерної природи) під стелею ЦЗ, що зруйнував будівлю реактора. Гарячі частинки, знайдені в західному сліді, що утворився на активній стадії аварії, містять характерні сліди пластичної деформації кристалів палива під дією тиску осколкових газів в результаті розвитку ланцюгової реакції з вибуховим характером. При цьому сліди високотемпературного впливу вибухового характеру в шахті реактора відсутні.

Ударна хвиля через шахту реактора опускає схему «ОР» на 4 метри, при цьому вирізає та сплющує перегрітий південно-східний сектор схеми «ОР» по групових колекторах, де внаслідок опускання уран-цирконієвої евтектики у нижні водяні комунікації утворилася коричнева кераміка. Кераміка витікає у південно-західну частину приміщення 305/2. Коріум, утворившись в результаті потрапляння уран-цирконієвої евтектики при руйнуванні ТК на верхню плиту «ОР», скидається на опорну плиту в приміщення 305/2 через відсутній сектор «ОР» і засипається ФАЗ, утворюючи структуру «доменної» печі [12].

Визначається початок пасивної стадії аварії, при якій у зоні проплавлення ОП утворюється (12 – 14 годин) ядерно-небезпечне скупчення, як продукт ВРБ, і чорна кераміка. Чорна кераміка утворюється внаслідок розчинення ФАЗ, розігрітих при горінні графіту, у силікатному розплаві. Силікатний розплав утворюється в результаті стратифікації: якщо спочатку розплав металів (сталі та цирконію) розташовується на поверхні басейну, то після інверсії розплавлені метали опиняються внизу під шаром оксидних компонентів коріуму.

3.2 Концептуальна модель ЯНС

Як було зазначено у попередньому розділі, ЯНС з масою палива до 20 т урану утворилося на заключній стадії аварії і являє собою двошарову композицію, приховану в зоні проплавлення ОП шахти реактору в південно-східному секторі підреакторного приміщення під шаром «свіжого 1986 р.» бетону. Верхній шар – чорні ЛПВМ з масовою часткою до 5% урану, що утворилися в результаті розчинення фрагментів паливних каналів в силікатному розплаві і сформували великий горизонтальний потік. Нижній шар – критична маса (КМ) кераміки з масовою часткою близько 50% урану, що є продуктом взаємодії розплаву палива з бетоном ОП.

Раніше оцінки нейтронно-фізичних характеристик проводилися для уран-силікатної (U-Si) версії фізичної моделі скупчення ЯНС ПВМ у вигляді плоского циліндра $2 \times 0,9$ м, що вписується в зону проплавлення бетону ОП (рис. 3.2) з масою урану до 20 т при збагаченні $^{235}\text{U} = 1,15 - 1,4 \%$ і пористістю 50 – 80 % від об'єму [24]. Хімічний склад моделі спирався на хімічний склад чорних ЛПВМ, визначений за відбором проб в зоні проплавлення ОП з домішуванням паливних таблеток [59].

При цьому були визначені діапазони параметрів, при яких ЯНС є ядерно-небезпечним (див табл. 3.1) [57].

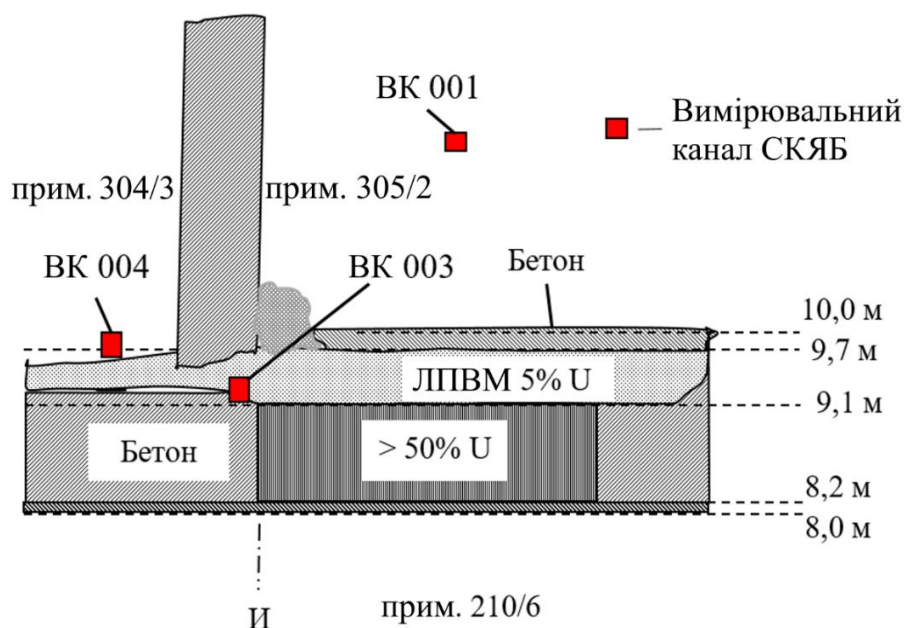


Рисунок 3.2 – Фізична модель ЯНС

Таблиця 3.1 – Оціночні діапазони параметрів, при яких ЯНС може досягати критичності

Параметри	Значення
Маса палива (U), т	15 – 20
Масова частка палива	50 – 60
Максимальний об'єм ЯНС, м ³	< 11,3
Вологоємність розмножувального середовища,	0,52
Густина ПВМ (з урахуванням пористості), г/см ³	2 – 3
Густина ЯНС (з урахуванням води), г/см ³	2,5 – 3,5
Збагачення по ²³⁵ U, %	1,15 – 1,18
Вигорання, МВт·добу/кг урану	11,5 – 12,5
Залишкове тепловиділення ЗТВ, кВт/т U	0,2 (на 2017 р.)

У 2013 році була представлена концептуальна модель «доменної» версії процесів утворення ЯНС як продукту взаємодії розплаву палива (коріуму) з бетоном ОП [67]. Ця модель дозволила більш повно звести матеріально-енергетичний баланс процесів на заключній стадії аварії 4-го блоку ЧАЕС. Для формування вихідних даних для розрахунку нейтронно-фізичних параметрів уран-цирконієвої фізичної моделі коріумного походження будуть використані результати зведення матеріально-енергетичного балансу для «доменної» версії утворення ЯНС [12].

3.3 Розробка фізичної моделі ЯНС. Вхідні дані для фізичної моделі

3.3.1 Масова частка урану, вигорання палива

Оцінки кількості палива в середовищі ЯНС, виконані на основі аналізу температури бетону на периферії скупчення показали, що кількість палива в середовищі ЯНС становить від 15 до 20 т. Оцінка проведена на основі ЗТВ опроміненого урану [12].

Оцінки збагачення палива по ²³⁵U з врахуванням ²³⁹Pu були виконані на основі середнього значення вигорання палива в ЛПВМ, отримане за більш, ніж 300 проб, і оцінювалося значенням (10 – 12,5) МВт·добу/кг U. Згідно цих оцінок збагачення палива по ²³⁵U становить від 1,1% до 1,3% [57].

У таблиці 3.2 наведено розрахункові величини масової частки ізотопів, що діляться, в ПБМ залежно від значень вигоряння, використаних у моделі критичної збірки. Для порівняння наведено результати розрахунку вигоряння за програмою GRS OREST 84.

Інтенсивність генерації нейтронів від джерела спонтанного поділу та (α, n) -реакції становить на 2014 р. для моделі $9,7 \text{ с}^{-1} \cdot \text{г}^{-1}$ [57].

Таблиця 3.2 – Збагачення палива по ^{235}U та ^{239}Pu залежно від вигоряння у % від маси

Вигоряння, МВт·добу/кг U	0	10	11	11,75	12,5
^{235}U	2,0	1,06	1,01 (1,02)	0,94	0,89
^{239}Pu	0,0	0,22	0,23 (0,30)	0,24	0,25
^{235}U з урахуванням напрацювання ^{239}Pu	2,0	1,27	1,22	1,17	1,13

Примітка. У дужках результати розрахунку за програмою GRS OREST 84.

3.3.2 Елементний склад ЯНС

В роботі [12] був оцінений елементний склад матеріального середовища ЯНС з масовою часткою урану 45 – 55% для U-Zr версії фізичної моделі. Результати цих оцінок, а також порівняння з матеріальним складом силікатної версії ЯНС і зі складом чорних ЛПБМ наведені в таблиці 3.3. В таблиці 3.3 версія «С» – це результати, отримані в рамках U-Zr версії скупчення ЯНС ПБМ; версія «L» – утворення ЯНС шляхом «домішування» урану до базового складу чорних ЛПБМ [8].

Таблиця 3.3 – Елементний склад ЯНС ПВМ і верхнього шару чорних ЛПВМ

Елемент	Вміст, мас. %		
	Версія складу ЯНС ПВМ		Версія складу чорних ЛПВМ
	<i>C</i>	<i>L</i>	[8]*
U	45,00 – 55,00	53	4,7
Zr	17,00 – 21,00	4,7	3,1
Fe	0,18 – 0,53	0,2	1,4
Si	4,85 – 5,60	10,7	29,0
Mg	0,06 – 0,07	0,7	2,3
Ca	1,15 – 1,33	1,6	5,3
Na	0,30 – 0,34	1,5	4,0
Al	0,72 – 0,83	1,2	4,8
O	21,22 – 22,54**	26,1	44,5
Інші	0,90 – 0,93	0,3	0,9

* Базовий склад ЛПВМ, який використовувався для розрахунку версії «L».

** Без урахування наявності води в порах.

3.3.3 Крок решітки

Розв'язання задачі оцінки реальної структури розмножувального середовища скупчення за умов відсутності безпосереднього доступу до неї є предметом подальших досліджень, оскільки параметри гетерогенності середовища при заданому об'ємі критичної маси будуть визначати її нейтронно-фізичні характеристики.

3.3.4 Відбивачі

Структура скупчення і його відбивачі показані на рис. 3.2. Скупчення має повний відбивач. Верхній відбивач – шар чорних ЛПВМ з середнім вмістом урану

4,7% (табл. 3.3) і товщиною 0,6 м. ЛПВМ прикриті шаром свіжого бетону (1986 р.). Нижній відбивач – залізобетон плити перекриття (табл. 3.4). Хімічний склад металу розрахований на основі оцінки типів і об'ємів конструкційних сталей, залучених до процесу лавоутворення. Бокові відбивачі – бетон з густиною 2,4 г/см³, що застосовувався при будівництві АЕС, хімічний склад якого наведено в табл. 3.5 [48].

Таблиця 3.4 – Розрахунковий елементарний склад металу

Елемент	Титан	Вуглець	Залізо	Хром	Нікель	Молібден
Масова частка, %	0,5	0,08	82,92	12,25	4	0,25

Таблиця 3.5 – Хімічний склад важкого бетону

Компонент	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Масова частка, %	69,1	10,8	0,15	0,006	2,7	8,8	1,7
Компонент	MnO	K ₂ O	CO ₂	MgO	H ₂ O віль.	H ₂ O зв.	
Масова частка, %	0,05	1,6	1,2	0,7	2,094	1,1	

3.4 Алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС

Алгоритм виконано з метою оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС ПВМ за допомогою ретроспективного аналізу результатів моніторингу ЩПН за період від встановлення НБК до сьогоднішнього дня [15].

Алгоритм призначений для визначення наступного періоду моніторингу, для якого підкритичність може (теоретично) досягти аварійних значень підкритичності ЯНС ПВМ, розташованих в південно-східній частині прим. 305/2 в зоні проплавлення опорної плити. Цей алгоритм вирішує такі задачі:

- Визначення поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС.

- Моделювання динаміки ЩПН, що реєструється СКЯБ, як функції від рівня підкритичності ЯНС в результаті надходження або виходу води з розмножувального середовища;
- Прогнозування ЩПН в точці детектування, що обрана експертом;

У додатку А дисертації представлено реалізацію алгоритму в середовищі Maple 2015.

3.4.1 Вихідні дані для алгоритму

Дані вимірювань:

$\Phi(m), \frac{n}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ – впорядкована множина значень ЩПН (масив) m для БД СКЯБ.

$\varphi_0, \frac{n}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ – початкова ЩПН в момент встановлення НБК, що реєструється БД СКЯБ.

Дані, що розраховуються:

F – частка ЩПН шару чорних лавоподібних ПВМ (ЛПВМ), що реєструється БД СКЯБ.

$k_{\text{эфч}}(C)$ – залежність $k_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ. Отримана при розрахунку нейтронно-фізичних характеристик шару чорних ЛПВМ в програмному коді MCNP. Також можуть обиратись з довідкових матеріалів [99].

$k_{\text{эфк}}(C)$ – залежність $k_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі шару ПВМ з критичною масою палива. Отримана при розрахунку нейтронно-фізичних характеристик шару ПВМ з критичною масою палива в програмному коді MCNP [10].

Довідкові матеріали:

β – доля нейтронів, що запізнюються. Залежить від вигорання палива [100].

Припущення:

$C_{\text{ч0}}, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – початкова об'ємна густина води в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ в момент встановлення НБК. Визначається по залежності $C_{\text{ч}}(t)$ ($t = 0$);

$C_q(t), \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – залежність об'ємної густини води в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ від часу. Задається експертом як функція $f(t)$. Див. розділ 3.4.3.1 (підготовка вихідних даних);

$C_{k0}, \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – початкова об'ємна густина води в розмножувальному середовищі, шару ПВМ з критичною масою палива. Припускається, що в момент встановлення НБК об'ємна густина води в шарі ПВМ з критичною масою палива є максимальною [1];

3.4.2 Результат розрахунку

$\varphi(t), \frac{\text{н}}{\text{см}^2 \cdot \text{с}}$ – прогнозована динаміка ЩПН;

$C_K(t), \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ – динаміка зміни об'ємної густини води у шарі з критичною масою палива;

$K_{\text{ефч}}(t)$ – динаміка зміни ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів у шарі чорних ЛПВМ;

$K_{\text{ефК}}(t)$ – динаміка зміни ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів у шарі з критичною масою палива;

$\frac{dk_{\text{ефК}}(t)}{dt}, [\beta/\text{с}]$ – швидкість введення позитивної реактивності в розмножувальне середовище шару з критичною масою палива.

3.4.3 Опис алгоритму

3.4.3.1 Підготовка вихідних даних

Загальна логіка цього функціонального блоку представлена на рис. 3.3.

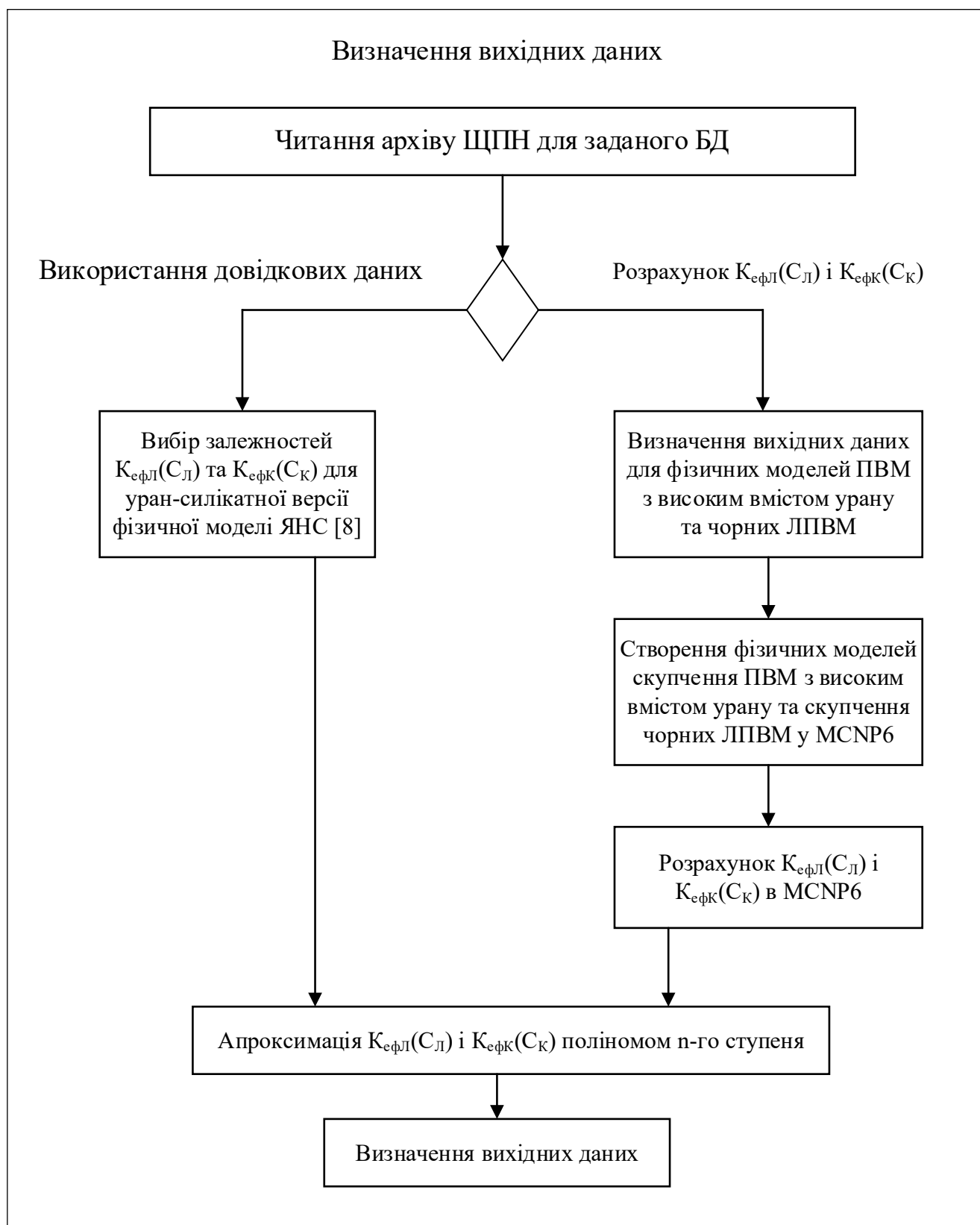


Рисунок 3.3 – Блок-схема алгоритму для визначення вхідних даних алгоритму для оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС

Фізична модель ЯНС складається з двох шарів ПВМ прихованих у зоні проплавлення опорної плити під шаром «свіжого» бетону 1986 р., які розглядаються як окремі джерела нейтронів. Верхній шар – підкритичне скупчення чорних ЛПВМ. Нижній шар – кераміка з масою палива до 20 т урану зі збагаченням 1,15 % по ^{235}U [15].

Для визначення рівнів підкритичності верхнього та нижнього шарів ПВМ необхідно задати залежності ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів від об'ємної густини води $K_{\text{ефч}}(C_{\text{ч}})$ та $K_{\text{ефк}}(C_{\text{к}})$ у розмножувальних середовищах цих систем. В даному алгоритмі можуть використовуватися залежності, отримані для уран-силікатної версії фізичної моделі ЯНС з двошаровою композицією в програмному коді MCNP4 (рис 3.4, 3.5) [10, 99].

Також як вихідні дані можуть бути обрані результати розрахунків нейтронно-фізичних характеристик уран-цирконієвої версії фізичної моделі ЯНС з двошаровою композицією в програмному коді MCNP6 (рис 4.9, 4.10).

Залежності $K_{\text{ефч}}(C)$ і $K_{\text{ефк}}(C)$ необхідно подати у табличному вигляді та апроксимувати у вигляді поліноміальної функції.

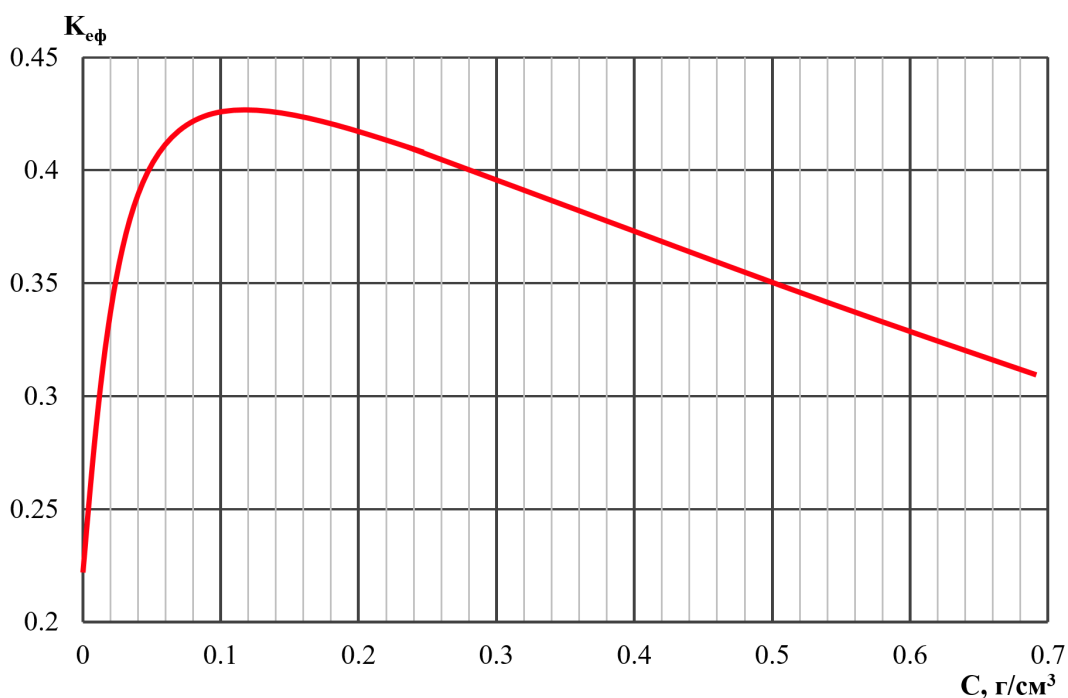


Рисунок 3.4 – Розрахункова залежність $K_{\text{ефч}}(C_{\text{ч}})$ для чорної кераміки $\rho = 2,5 \text{ г/см}^3$,
вміст $\text{UO}_2 = 5\%$;

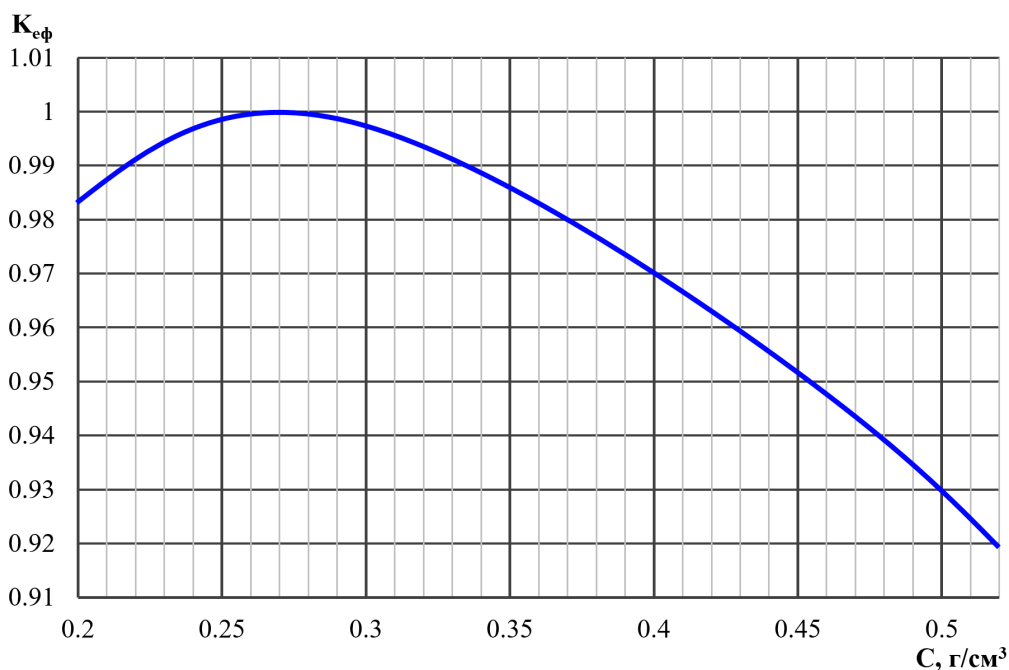


Рисунок 3.5 – Розрахункова залежність $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для шару з критичною масою палива. Крок моделюючої решітки – 5 см

3.4.3.2 Розрахунок

БД СКЯБ реєструє нейтрони від двох джерел: шару чорних ЛПВМ; шару ПВМ з критичною масою палива [15]. Визначимо значення ЩПН в початковий момент часу: $\varphi_{\text{ч0}}$ – ЩПН від шару чорних ЛПВМ, яку реєструє БД; $\varphi_{\text{к0}}$ – ЩПН від шару ПВМ з критичною масою палива. Таким чином:

$$\varphi_{\text{ч0}} = \varphi_0 \cdot F, \quad (3.1)$$

$$\varphi_{\text{к0}} = \varphi_0 \cdot (1 - F). \quad (3.2)$$

Де F – частка ЩПН шару чорних лавоподібних ПВМ (ЛПВМ), що реєструється блоком детектування. F оцінюється експертом в залежності від співвідношення масового вмісту урану в джерелах нейтронів та геометрії спостереження (розташування блоку детектування).

Динаміка зміни об'ємної густини води в шарі чорних ЛПВМ $C_{\text{ч}}(t)$ задається експертом як функція $f(t)$, яка може мати поліноміальний, лінійний вигляд, тощо.

Наприклад, припустимо, що об'ємна густина води в шарі чорних ЛПВМ після встановлення НБК зменшується з постійною швидкістю $V_{\text{ч}}$. Тоді динаміка зміни об'ємної густини води в шарі чорних ЛПВМ $C_{\text{ч}}(t)$ матиме вигляд:

$$C_{\text{ч}}(t) = C_{\text{ч}0} - t \cdot V_{\text{ч}}, \quad (3.3)$$

де $C_{\text{ч}0}$, $\left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3}\right]$ – об'ємна густина води в момент встановлення НБК, t , $[c]$ – час, $V_{\text{ч}}$, $\frac{\text{г}}{\text{см}^3 \cdot c}$ – швидкість виходу води з розмножувального середовища шару чорних ЛПВМ.

Якщо припустити, що після встановлення НБК вода в шарі чорних ЛПВМ була відсутня, формула (3.3) матиме вигляд:

$$C_{\text{ч}}(t) = 0. \quad (3.4)$$

Підставивши динаміку зміни об'ємної густини води в шарі чорних ЛПВМ $C_{\text{ч}}(t)$ в обрану розрахункову залежність $K_{\text{ефч}}(C_{\text{ч}})$, представлену у вигляді поліноміальної функції отримаємо залежність $K_{\text{ефч}}(t)$.

Використовуючи залежність (3.4), визначаємо динаміку ЩПН для шару чорних ПВМ:

$$\varphi_{\text{ч}}(t) = \frac{\varphi_{\text{ч}0} \cdot (1 - K_{\text{ефч}}(0))}{(1 - K_{\text{ефч}}(t))}, \quad (3.5)$$

де $K_{\text{ефч}}(0)$ – ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів у шарі чорних ЛПВМ в момент часу $t = 0$.

Динаміка ЩПН $\Phi(q)$, що реєструється блоком детектування q розбивається експертом на інтервали (рис. 3.6) в такий спосіб, щоб виключити коливання показань детектора, викликані сезонними змінами температурно-вологісного режиму (кінець і початок інтервалу повинні потрапляти на періоди, коли вологість в підреакторних приміщеннях зменшується (жовтень-березень), і менше впливає на покази БД). Точка

φ_0 обирається в день встановлення НБК, починається процес втрати води розмножувальним середовищем ЯНС.

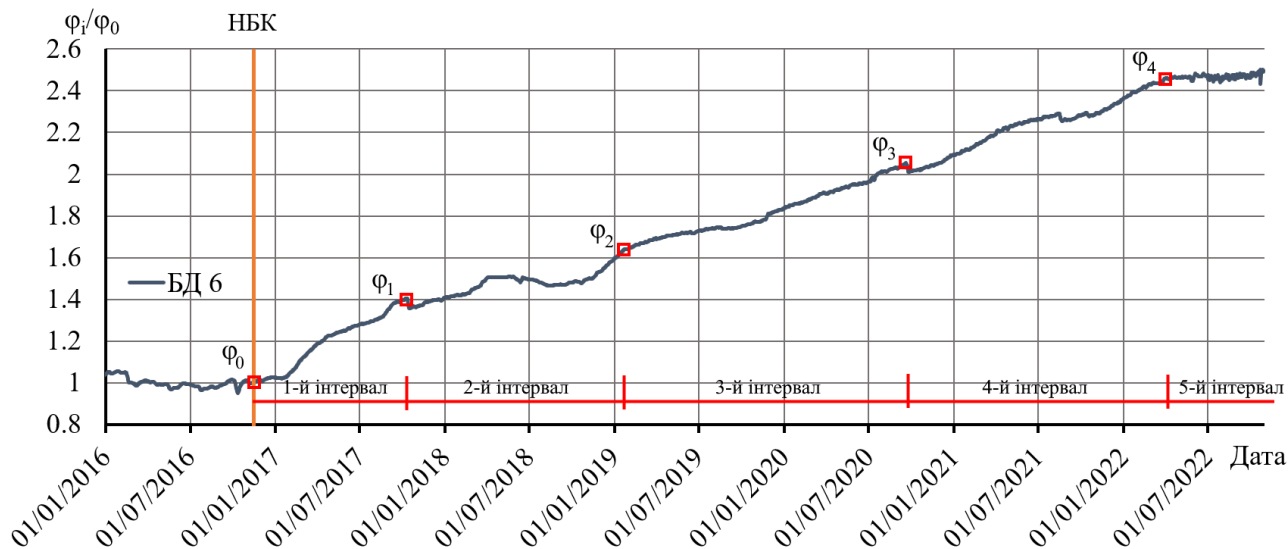


Рисунок 3.6 – Розбивка динаміки ЩПН, зареєстрованої БД6 СКЯБ на інтервали

На кожному інтервалі буде розрахована середня швидкість втрати води розмножувальним середовищем шару з критичною масою палива (V_{Ki}).

У випадку коли $\Phi(q)$ був розбитий на j інтервалів, $i \in (0; j)$, ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів для шару ПВМ з критичною масою палива в кінці i -го інтервалу $K_{ефKi}$ розраховується за формулою:

$$K_{ефKi} = 1 - \frac{\varphi_{Ki-1} \cdot (1 - K_{ефKi-1})}{\varphi_{Ki}}, \quad (3.6)$$

де φ_{Ki-1} та φ_{Ki} це ЩПН від шару ПВМ з критичною масою палива на початку i в кінці i -го інтервалу відповідно. $K_{ефKi-1}$ – ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів для шару ПВМ з критичною масою палива в кінці i -го інтервалу.

Оскільки динаміка $\varphi(t)$ є сумою $\varphi_q(t)$ та $\varphi_K(t)$, φ_{Ki-1} та φ_{Ki} розраховуються за формулами:

$$\varphi_{Ki-1} = \varphi(t_{i-1}) - \varphi_q(t_{i-1}); \quad (3.7)$$

$$\varphi_{Ki} = \varphi(t_i) - \varphi_q(t_i). \quad (3.8)$$

де $\varphi(t_{i-1})$ і $\varphi(t_i)$ – сумарна ЩПН, що реєструється БД на початку і в кінці i -го інтервалу відповідно; $\varphi_{\text{ч}}(t_{i-1})$ та $\varphi_{\text{ч}}(t_i)$ – ЩПН від шару чорних ЛПВМ на початку і в кінці i -го інтервалу відповідно.

$K_{\text{ефК}i-1}$ для i -го інтервалу розраховується в кінці $i - 1$ -го інтервалу. Для 1-го ($i = 1$) інтервалу $K_{\text{ефК}i-1}$ визначається по максимальному значенні об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива по залежності $K_{\text{ефК}}(C_K)$ (Рис. 3.4), оскільки поровий простір розмножувального середовища шару ПВМ з критичною масою палива в момент встановлення НБК був повністю заповнений водою [1].

Щоб визначити C_{Ki} , необхідно отримати функцію $C_K(K_{\text{ефК}})$. Функція $C_K(K_{\text{ефК}})$ визначається як $K_{\text{ефК}}^{\text{inv}}(C_K)$ на інтервалі $C_K \in (C_K^{\text{опт}}; C_{K0})$, де C_{K0} – об'ємна густина води в шарі ПВМ з критичною масою палива в момент встановлення НБК; $C_K^{\text{опт}}$ – об'ємна густина води в шарі ПВМ з критичною масою палива, при якій $K_{\text{ефК}}$ є максимальною; $K_{\text{ефК}}^{\text{inv}}(C_K)$ – функція зворотня до $K_{\text{ефК}}(C_K)$.

Таким чином:

$$C_{Ki} = C_K(K_{\text{ефК}i}). \quad (3.9)$$

Середня швидкість зміни об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива на i -му інтервалі розраховується за залежністю:

$$V_{Ki} = \frac{C_{Ki} - C_{Ki-1}}{t_i - t_{i-1}}, \quad (3.10)$$

де t_i – кінець i -го інтервалу, t_{i-1} – початок i -го інтервалу. Для 1-го ($i = 1$) інтервалу $C_{Ki-1} = C_{K0}$.

Частка ЩПН шару чорних лавоподібних ПВМ (ЛПВМ), що реєструється блоком детектування розраховується за залежністю:

$$F_i = \frac{\varphi_q(t_i)}{\varphi(t_i)}. \quad (3.11)$$

Таким чином отримано всі необхідні параметри в кінці i -го інтервалу. Параметри $K_{\text{ефК}i}$, $C_{\text{К}i}$, F_i є вихідними даними для наступного інтервалу. Всі наступні інтервали розраховуються аналогічно за залежностями (3.6 – 3.11).

Розрахована залежність $C_{\text{К}}(t)$ матиме вигляд:

$$C_{\text{К}}(t) = \begin{cases} C_{\text{К}0} - V_{\text{К}1} \cdot t, t \in (0; t_1) \\ C_{\text{К}1} - V_{\text{К}2} \cdot t, t \in (t_1; t_2) \\ \dots \\ C_{\text{К}j-1} - V_{\text{К}j} \cdot t, t \in (t_{j-1}; t_j) \\ C_{\text{К}j} - V_{\text{К}j} \cdot t, t \in (t_j; t_{j+1}) \end{cases} \quad (3.12)$$

де $t \in (t_j; t_{j+1})$ прогнозний відрізок тривалістю $t_{j+1} - t_j$ секунд. Для прогнозного відрізка приймається, що швидкість зміни об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива буде дорівнювати швидкості зміни об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива на останньому розрахунковому відрізку $V_{\text{К}j}$.

Динаміка зміни ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів для шару ПВМ з критичною масою палива розраховується за залежністю:

$$K_{\text{ефК}}(t) = K_{\text{ефК}}(C_{\text{К}}(t)). \quad (3.13)$$

Прогнозні значення $K_{\text{ефК}}$ знаходяться на прогнозному інтервалі $t \in (t_j; t_{j+1})$.

Враховуючи те, що з 2016 по 2023й рік спостерігається двократне збільшення ЩПН [101], швидкість введення позитивної реактивності для шару ПВМ з критичною масою палива $\frac{dk_{\text{ефК}}(t)}{dt}$, $\left[\frac{\beta}{\lambda}\right]$ досить мала, а отже динаміка її зміни визначається за формулою:

$$\frac{dK_{\text{ефк}}(t)}{dt} = \frac{k_{\text{ефк}}(t-1) - k_{\text{ефк}}(t)}{\beta \Delta t}. \quad (3.14)$$

де $\Delta t = 1\text{с}$.

Загальна логіка даного функціонального блоку представлена на рис. 3.7.

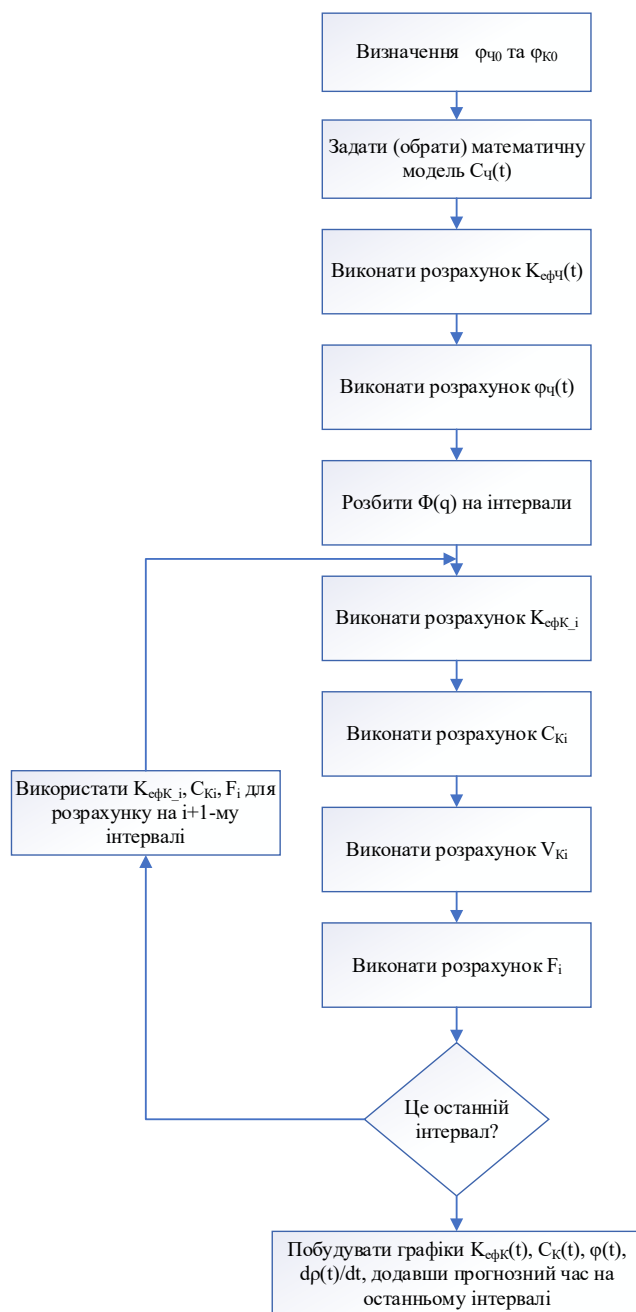


Рисунок 3.7 – Блок-схема розрахунку для алгоритму для оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС

3.4.3.3 Представлення результатів

Результатом роботи алгоритму є графіки залежностей $\varphi(t)$, $K_{\text{ефк}}(t)$, $C_K(t)$, $d\rho(t)/dt$, а також табличні дані для таких параметрів на початку і в кінці розрахункових інтервалів: ЩПН на периферії ЯНС; відношення частки ЩПН від чорних ЛПВМ, яку реєструє детектор, до сумарної ЩПН на периферії ЯНС; швидкість виходу води з розмножувального середовища чорних ЛПВМ на i -му розрахунковому інтервалі; швидкість виходу води з розмножувального середовища ПВМ з високим вмістом урану на i -му розрахунковому інтервалі; тривалість i -го розрахункового інтервалу; ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в розмножувальному середовищі ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі; ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ на i -му інтервалі; швидкість виходу води з розмножувального середовища ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі; швидкість виходу води з розмножувального середовища чорних ЛПВМ на i -му інтервалі; швидкість введення позитивної реактивності в розмножувальному середовищі ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі. Графіки дають можливість отримати якісне уявлення щодо тенденції зміни параметрів, таблиця дозволяє отримати кількісне значення. Результати роботи алгоритму, як правило, включаються в регулярні звіти ІПБ АЕС [92,101,102].

3.5 Висновки до розділу

Запропоновано концепцію нової версії сценарію (утворення) аварійних процесів, що враховує існування в зоні проплавлення ОП ЯНС з критичною масою палива. В рамках цієї концепції описано процес утворення коріуму в штатному положенні активної зони і його скидання на ОП що визначило масову частку урану 45 – 55% для U-Zr версії фізичної моделі.

Розглянуто концептуальну модель ЯНС ПВМ, в рамках якої були сформовані попередні фізичні моделі ЯНС. Для вдосконалення цих фізичних моделей розглянуто

концептуальну модель «доменної» версії процесів утворення ЯНС як продукту взаємодії розплаву палива (коріуму) з бетоном ОП. Ця модель дозволила більш повно звести матеріально-енергетичний баланс процесів на заключній стадії аварії 4-го блоку ЧАЕС. Для формування вихідних даних для розрахунку нейтронно-фізичних параметрів уран-цирконієвої фізичної моделі коріумного походження будуть використані результати зведення матеріально-енергетичного балансу для «доменної» версії утворення ЯНС.

Визначено вихідні дані уран-цирконієвої фізичної моделі ЯНС, такі як маса палива, збагачення по ^{235}U з врахуванням ^{239}Pu , елементний склад розмножувального середовища, відбивачі та геометричні параметри. В результаті досліджень фізичної моделі будуть визначені діапазони критичних параметрів, що забезпечують два значення критичності та не протирічать результатам ретроспективного аналізу динаміки ЩПН на периферії ЯНС.

Результатом оцінки нейтронно-фізичних характеристик фізичної моделі ядерно-небезпечного скупчення є залежність K_{eff} розмножувального середовища від об'ємної густини води, що буде використана в якості вихідних даних математичної моделі для оцінки поточного і прогнозованого рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення.

В програмному коді Maple реалізовано алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС ПВМ. математичну модель для рішення наступних завдань: прогнозування динаміки ЩПН, що реєструється БД ВК СКЯБ на периферії ядерно-небезпечного скупчення на 4-му енергоблоці ЧАЕС; оцінка поточного і прогнозованого рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення. Результатом роботи алгоритму є графіки залежностей $\varphi(t)$, $K_{\text{effK}}(t)$, $C_K(t)$, $d\rho(t)/dt$, а також табличні дані параметрів ЯНС на початку і в кінці розрахункових інтервалів.

Основні результати розділу викладені автором у публікаціях [15,16,17,21,24].

4. ЯДЕРНА НЕБЕЗПЕКА ПРИ ПОВТОРНІЙ І «ЗВОРОТНІЙ» КРИТИЧНОСТІ

4.1 Результати оцінки нейтронно-фізичних характеристик ЯНС

Модель являє собою шар кераміки з високим вмістом палива, виконаний у вигляді циліндра $2 \times 0,9$ м, прикритий зверху шаром чорних ЛПВМ $4 \times 0,6$ м (рис. 4.1). В якості граничних умов заданий відбивач (бічний, верхній і нижній) в вигляді бетону. Модель складається з комірок, лінійний розмір яких визначає крок моделюючої решітки (сукупну гетерогенність розмножувального середовища). Комірка містить в собі порожнечі що визначають об'єм доступної для води пористості.

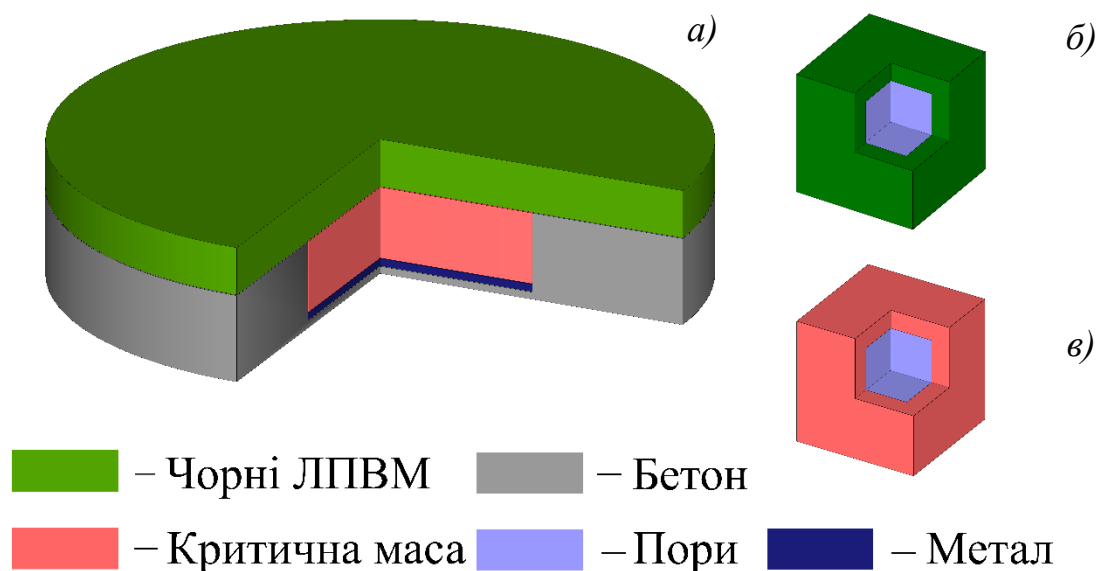


Рисунок 4.1 – Тривимірна геометрія фізичної моделі ЯНС, виконана в програмному коді MCNP 6: *а* – ЯНС; *б* – комірка чорних ЛПВМ; *в* – комірка ЛПВМ з високим вмістом урану

Відсутність безпосереднього доступу до скупчень ЛПВМ, що знаходяться в зоні проплавлення ОП обумовлює невизначеність вихідних даних для фізичної моделі. Тобто оцінки хімічного складу, кількості палива в скупченні, його вигорання, доступної для води пористості розмножувального середовища, розмірів макропор та

інших параметрів дають лише приблизні значення. Отже кінцевим результатом розрахунку нейтронно-фізичних характеристик ЯНС буде низка залежностей K_{ef} від концентрації води в розмножувальному середовищі ЯНС, серед яких потрібно буде обрати найбільш консервативну. При цьому необхідно зважати, що нейтронно-фізичні характеристики моделі не повинні суперечити поведінці розмножувального середовища ЯНС, що спостерігалась з моменту утворення скупчень по сьогоднішній день. З аналізу протікання СЛР при повторній критичності 1990-го року випливає, що розмножувальне середовище ЯНС в процесі заповнення водою має два значення критичності, а максимальне значення реактивності при оптимальному зволоженні знаходиться в інтервалі $0 < \rho_{\text{max}} < \beta$.

Були визначені діапазони параметрів фізичної моделі, а також різні варіанти залежностей K_{ef} від концентрації води в розмножувальному середовищі, які визначають нейтронно-фізичні характеристики фізичної моделі. Також в процесі розрахунків визначено вплив таких параметрів фізичної моделі на її нейтронно-фізичні характеристики:

- Діапазони пустот (пористість), %;
- Маса урану, (до 20 т);
- Масова частка урану, %;
- Збагачення палива по ^{235}U , %;
- Густина розмножувального середовища, г/см^3 ;
- Сукупна гетерогенність (крок моделюючої решітки).

На рисунку 4.2 показано вплив масової частки палива на нейтронно-фізичні характеристики фізичної моделі ЯНС.

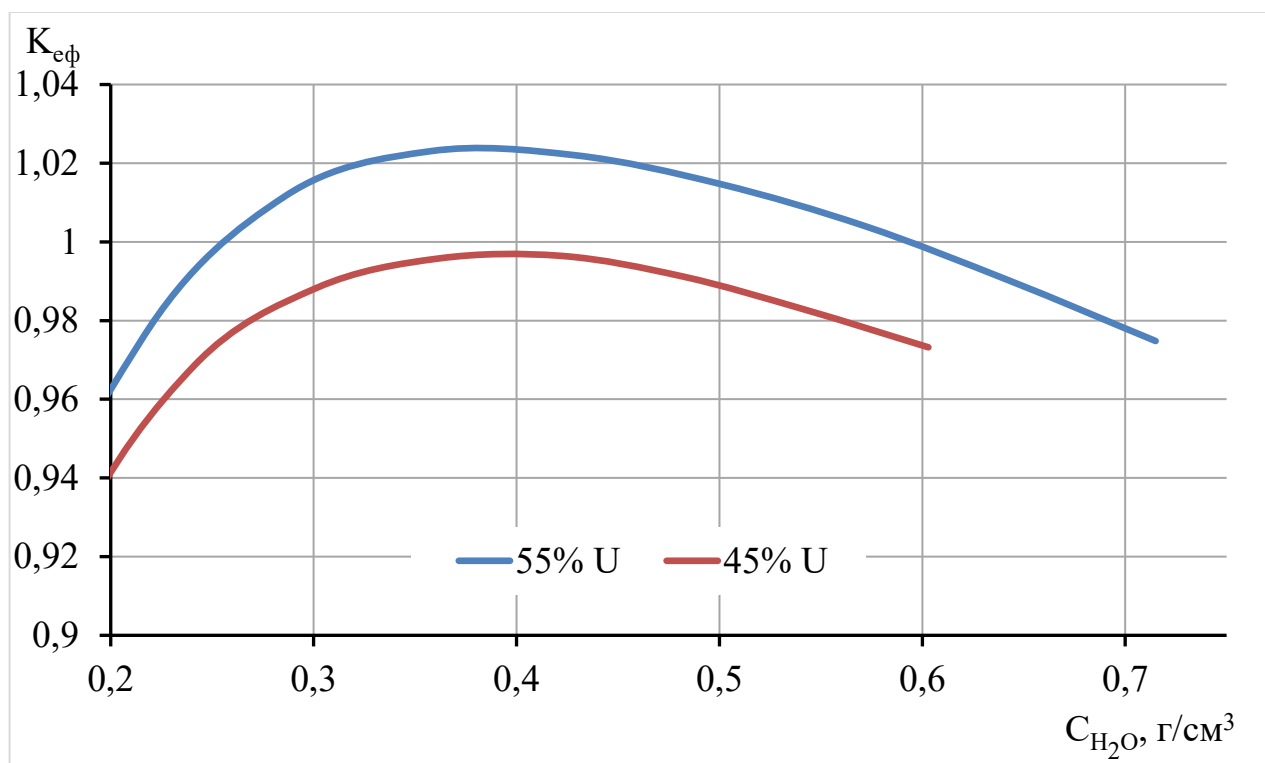


Рисунок 4.2 – Залежності K_{eff} від об’ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,28% (з урахуванням ^{239}Pu), що відповідає вигорянню 10,3 МВт·добу/кг U; крок моделюючої решітки – 3 см; пористість 71,5% при масовій частці 55% урану та 60,2% при масовій частці 45% урану

Збільшення масової частки палива призводить до збільшення макроскопічного перерізу реакції поділу ^{235}U . Фізична модель з більшою масовою часткою палива має більші значення K_{eff} при повному зволоженні та максимальне K_{eff} . Спостерігається незначний зсув максимального K_{eff} по осі X при зміні масової частки палива. Збільшення масової частки урану призводить до збільшення густини шару з високою концентрацією палива. У випадку, коли геометричні параметри фізичної моделі та маса урану незмінні, це призводить до збільшення пористості ПВМ, що свідчить про взаємозалежність пористості, густини розмножувального середовища та масової частки урану.

На рисунку 4.3 показано вплив вигорання палива на нейтронно-фізичні характеристики фізичної моделі ЯНС.

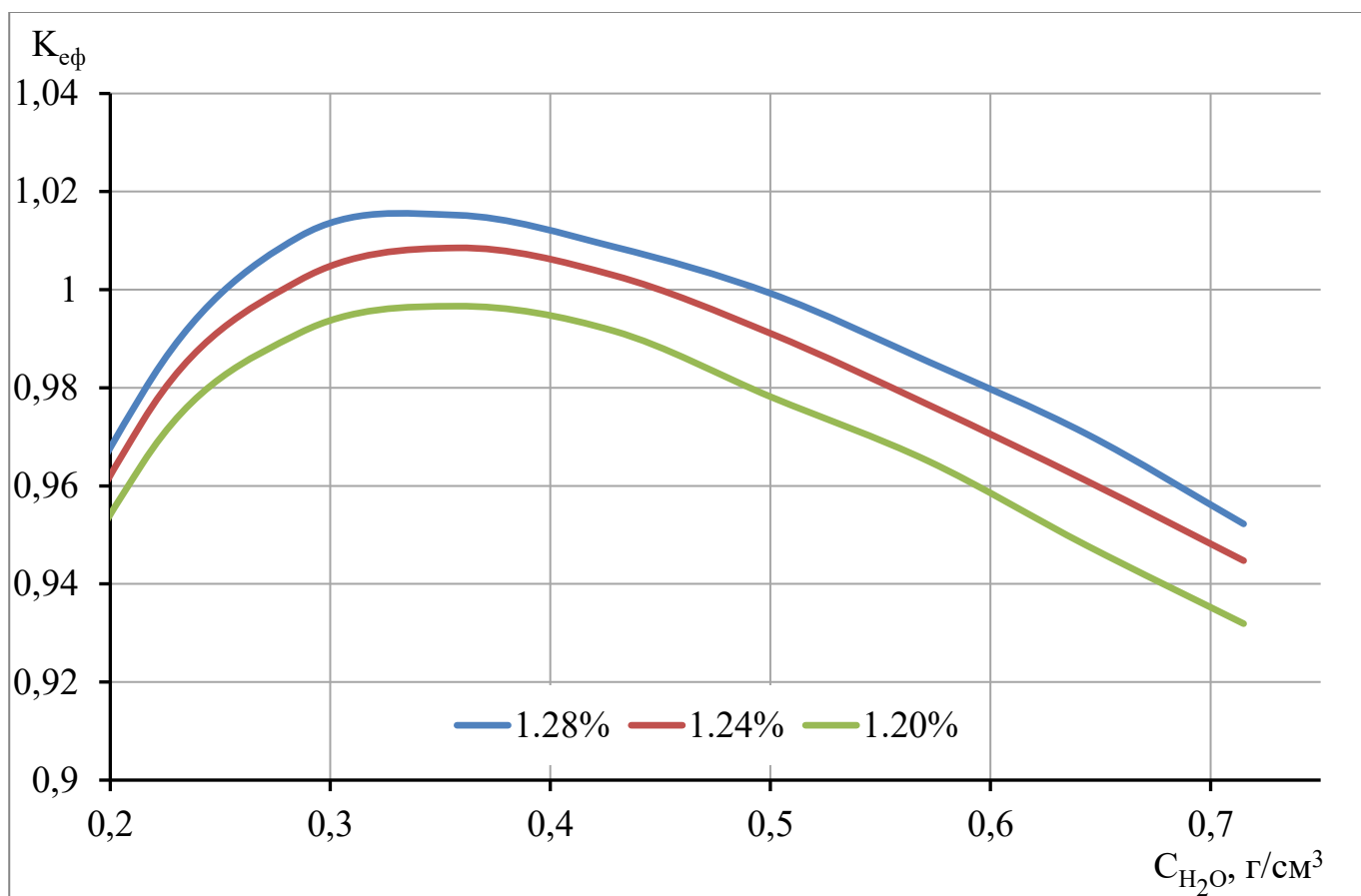


Рисунок 4.3 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: масова частка палива – 55%; крок моделюючої решітки – 5 см; пористість 71,5%; збагачення по ^{235}U – 1,28%, 1,24% та 1,20% (з урахуванням ^{239}Pu), що відповідає вигорянню 10,3 – 11,5 МВт·добу/кг U;

Зменшення вигорання палива призводить до збільшення макроскопічного перерізу реакції поділу ^{235}U . Фізична модель з меншим вигоранням палива має більші значення $K_{\text{эф}}$ при повному зволоженні та максимальне $K_{\text{эф}}$. Зсуву максимального $K_{\text{эф}}$ по осі X при зміні збагачення палива не спостерігається.

Проведено аналіз чутливості фізичної моделі до кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС. Для даної моделі крок моделюючої решітки впливає на геометричні розміри кубічної комірки. Кубічна комірка складається з трьох зон: перша – ПВМ з високим вмістом палива, друга – частина пори, що може містити воду, третя – частина пори, що може містити повітря, в залежності від ступеню заповнення пори водою. Пору розташована в центрі комірки, та для спрощення також має кубічну

форму. На рисунку 4.4 показано вплив розмірів кубічної комірки на нейтронно-фізичні характеристики фізичної моделі ЯНС.

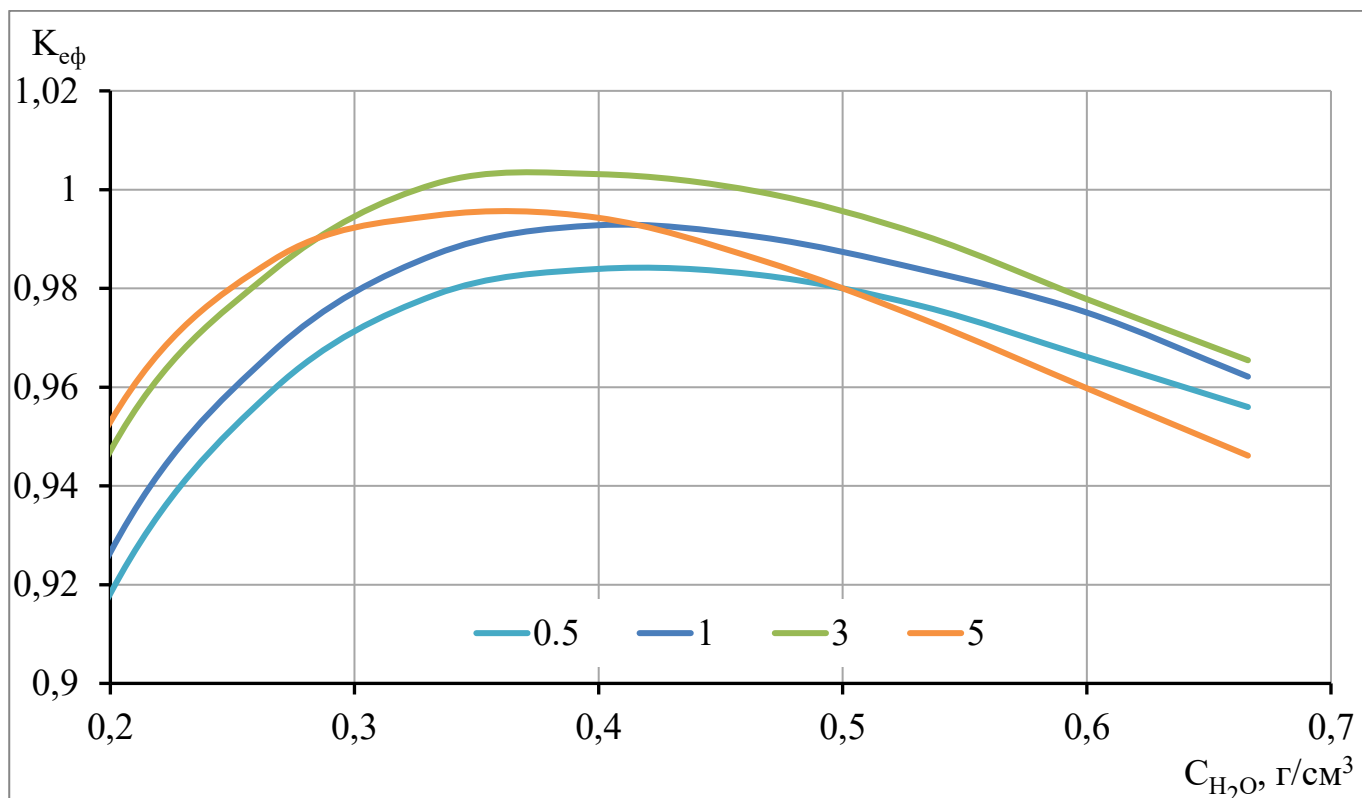


Рисунок 4.4 – Залежності $K_{эф}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,24% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,9 МВт·добу/кг U; пористість 67%; масова частка палива – 50%; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

Зміна розміру кубічної комірки фізичної моделі впливає на гетерогенність розмножувального середовища. При збільшенні розмірів кубічної комірки (збільшенні ступеню гетерогенності) спостерігається зсув вліво максимального $K_{эф}$ по осі X.

На рисунку 4.5 показано залежності $K_{эф}$ від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС. Для обраних параметрів при зменшенні кубічної комірки фізичної моделі ЯНС з 5 до 3 см спостерігається зростання максимального значення $K_{эф}$. При подальшому зменшенні ступеню гетерогенності з 3 до 0.5 см максимальне значення $K_{эф}$ зменшується. Також очевидно, що при даному наборі параметрів

фізична модель ЯНС матиме два значення критичності, якщо крок моделюючої решітки буде знаходитись в діапазоні 2 – 4 см. Розмножувальні системи з кроком моделюючої решітки більше ніж 4 см або менше 2-х будуть підкритичними [103].

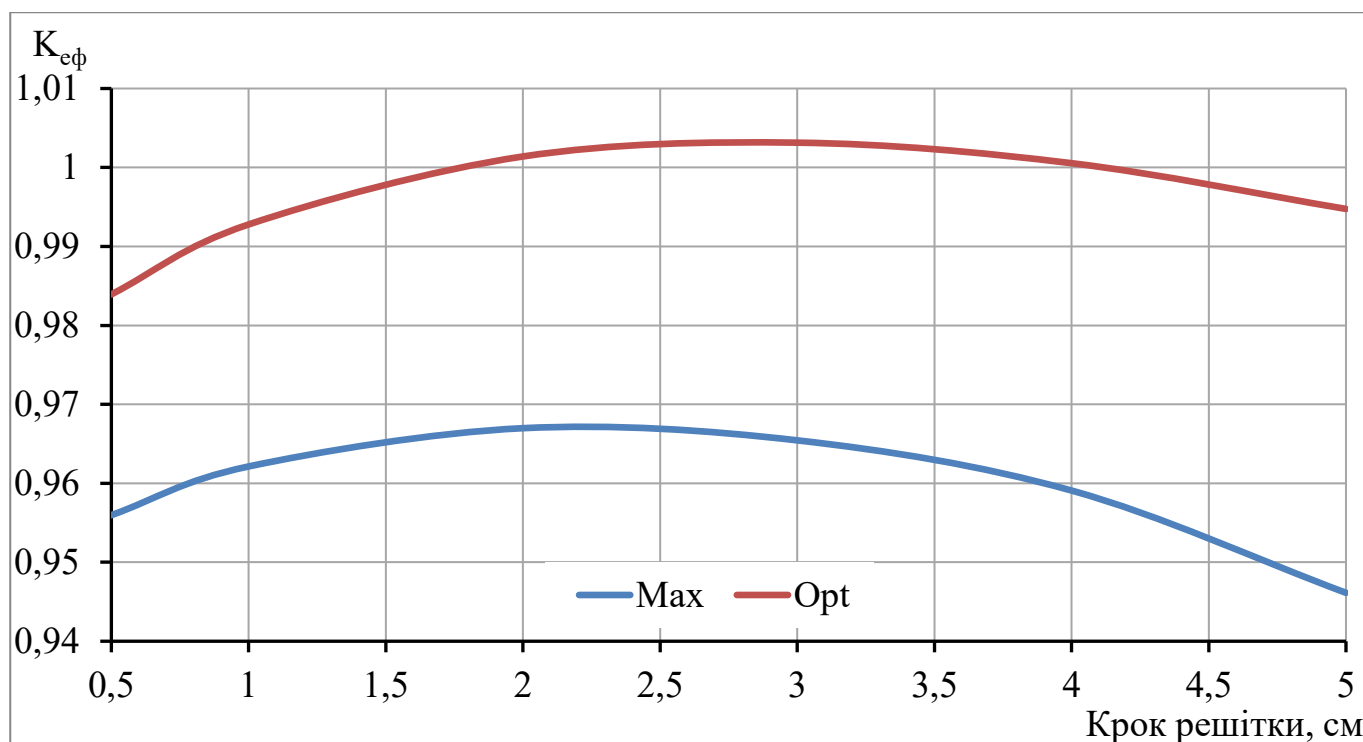


Рисунок 4.5 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об’ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,24% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,9 МВт·добу/кг U; пористість 67%; масова частка палива – 50%; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

Збільшення кількості урану при незмінних параметрах фізичної моделі призводить до зменшення пористості (рис. 4.6). При збільшенні кількості урану спостерігається зсув вправо максимального $K_{\text{эф}}$ по осі X. Фізична модель з більшою кількістю палива має більші значення $K_{\text{эф}}$ при повному зволоженні та максимальний $K_{\text{эф}}$.

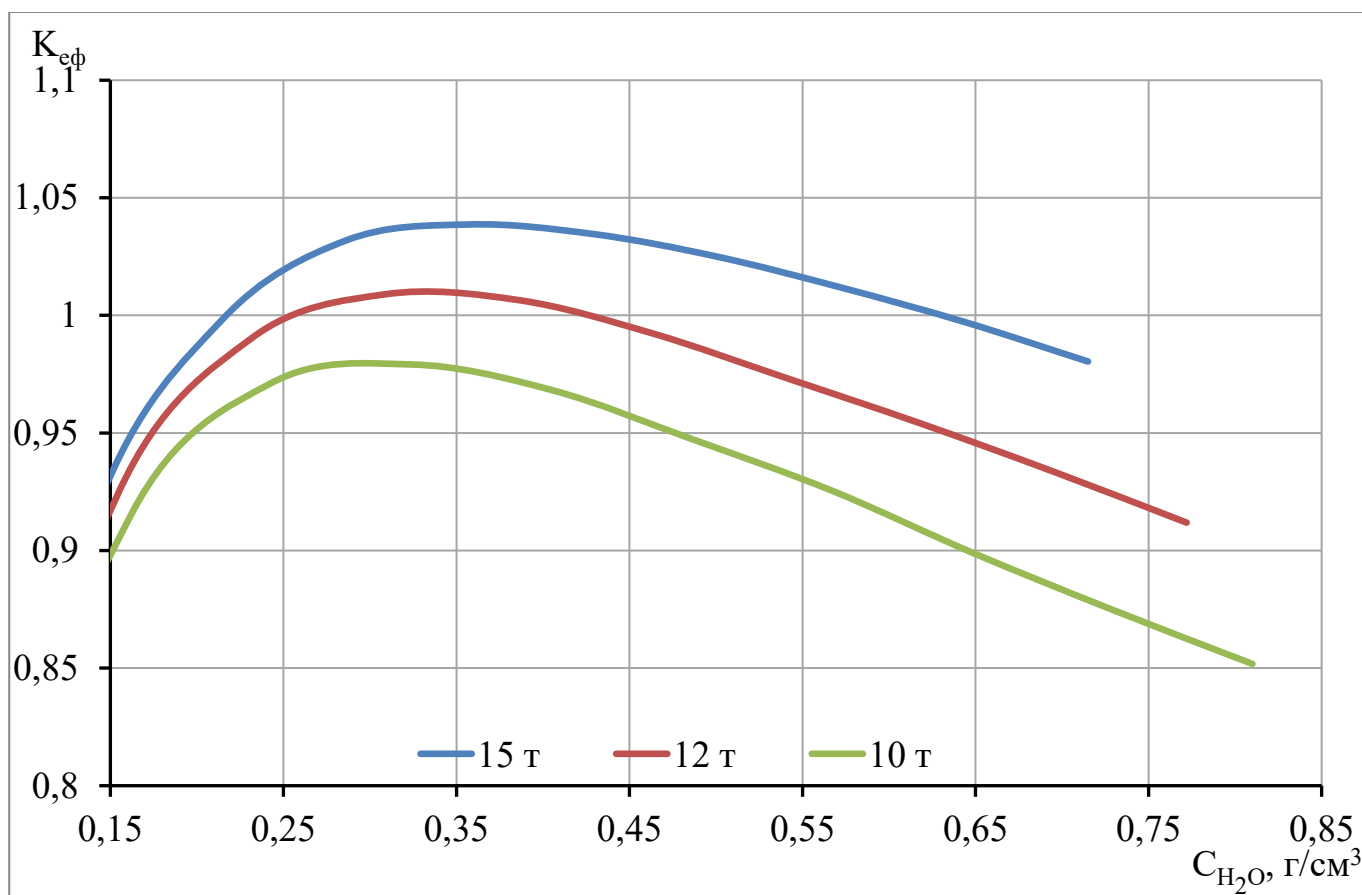


Рисунок 4.6 – Залежності K_{eff} від об’ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,40% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 8,5 МВт·добу/кг U; пористість 72% при 15 т урану, 77% при 12 т урану, 81% при 10 т урану; масова частка палива – 55%; крок моделюючої решітки – 5 см

Результати розрахунків нейтронно-фізичних характеристик моделей ЯНС що не увійшли до розділу 4, наведені в Додатку Б (рис. Б.1 – Б.23).

4.2 Оцінка поточного та прогнозованого рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення

4.2.1 Підготовка вхідних даних

Для отримання вхідних даних алгоритму проводиться аналіз динаміки ЩПН, зареєстрованої БД6, розташованого в свердл. 3-9-68. Фонова складова для цього БД

досить мала і практично не впливає на результати розрахунків. Розрахунки будуть проводитись по двом варіантам вихідних даних: не відкоригована нормована динаміка ІЦПН; нормована динаміка ІЦПН, відкоригована експертом, що виключає метрологічні відмови.

Інтервали, на яких проводився розрахунок, показано на рис. 4.7 та 4.8. Принцип, за яким обирались розрахункові інтервали описано в розділі 3.4.3.2.

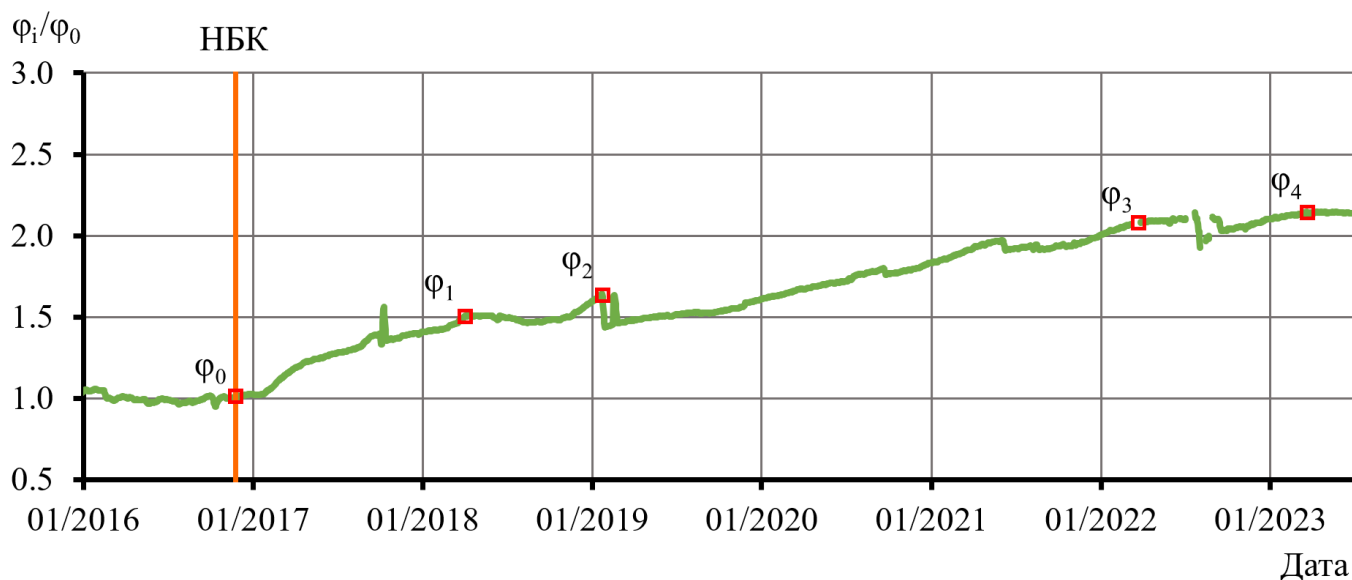


Рисунок 4.7 – Розбивка не відкоригованої динаміки ІЦПН, зареєстрованої БД6 СКЯБ, на інтервали

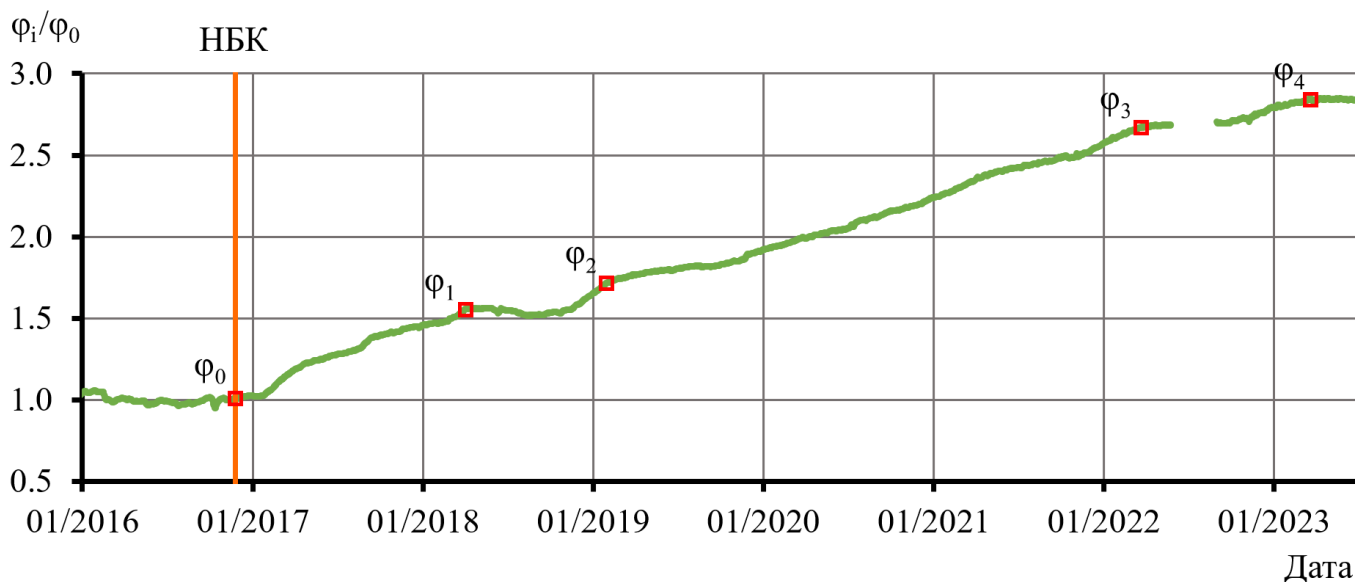


Рисунок 4.8 – Розбивка відкоригованої динаміки ІЦПН, зареєстрованої БД6 СКЯБ, на інтервали

Для визначення рівнів підкритичності верхнього та нижнього шарів ПВМ (див. рис. 4.1) необхідно задати залежності $K_{ef}(C)$. Розрахунки $K_{ef}(C)$ проводились з використанням програмного коду MCNP для уран-цирконієвої версії фізичної моделі скупчення ЯНС ПВМ у вигляді критичної збірки, що вписується в зону проплавлення бетону ОП шахти реактору в південно-східному секторі підреакторного приміщення 305/2. Критична збірка має форму плоского циліндра $2 \times 0,9$ м і містить до 20 т урану при збагаченні $^{235}\text{U} = 1,1 - 1,3$ % та пористості 50 – 80% від об'єму. Хімічний склад моделі спирався на результати, отримані в рамках версії коріумного походження скупчення ЯНС ПВМ [8].

На рисунках наведено розрахункові залежності K_{ef} від рівня об'ємного вмісту води у верхньому шарі чорних ЛПВМ (рис. 3.4) та в критичній масі кераміки (рис. 4.9, 4.10), що були використані для розрахунку.

Для перенесення в робочий лист Maple функції $K_{efч}(C_ч)$ та $K_{efк}(C_к)$ були представлені у табличному вигляді у програмному коді Microsoft Excel та апроксимовані у вигляді поліномів.

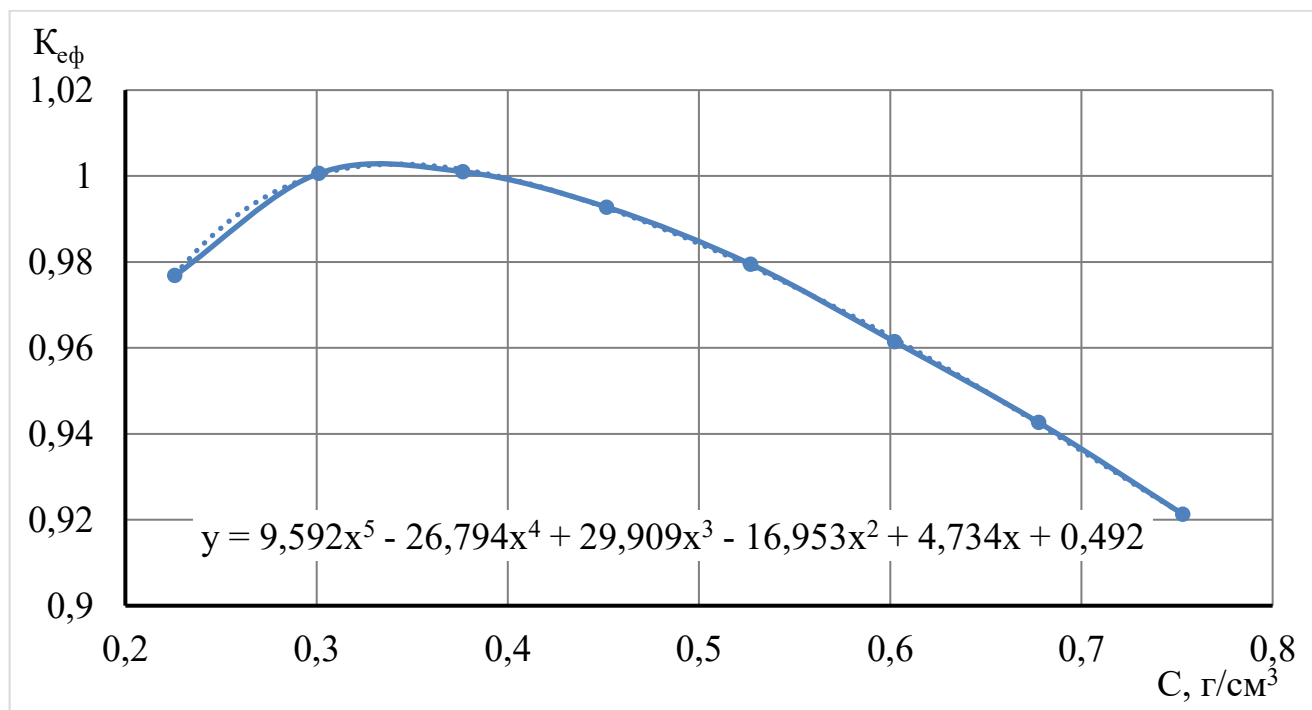


Рисунок 4.9 – Розрахункова залежність $K_{efк}(C_к)$ для шару з критичною масою палива. Крок моделюючої решітки – 4 см, 13 т урану, збагачення 1,28% по урану, пористість 75,3 %

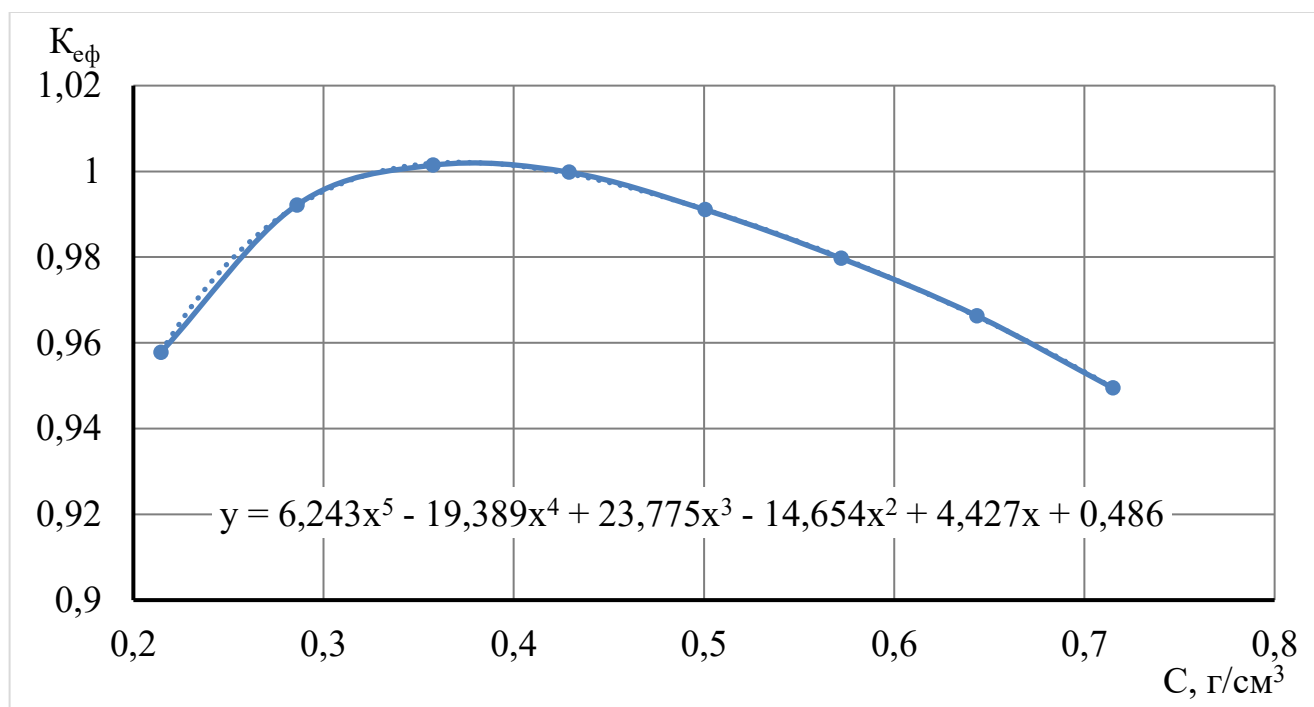


Рисунок 4.10 – Розрахункова залежність $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для шару з критичною масою палива. Крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

4.2.2 Математичне моделювання

Для отримання діапазону розрахункових значень підкритичності ЯНС виконано 4 розрахунки із такими варіантами вихідних даних:

- Динаміка ЩПН, зареєстрована БД6 СКЯБ, відкоригована експертом, $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для фізичної моделі з параметрами: крок моделюючої; решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %;
- Динаміка ЩПН, зареєстрована БД6 СКЯБ, відкоригована експертом, $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для фізичної моделі з параметрами: крок моделюючої; решітки – 3 см; 15 т урану; збагачення 1,18% по урану; пористість 71,5 %;
- Не відкоригована динаміка ЩПН, зареєстрована БД6 СКЯБ, $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для фізичної моделі з параметрами: крок моделюючої; решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %;
- Не відкоригована динаміка ЩПН, зареєстрована БД6 СКЯБ, $K_{\text{эфК}}(C_K)$ для

фізичної моделі з параметрами: крок моделюючої решітки – 3 см; 15 т урану; збагачення 1,18% по урану; пористість 71,5 %;

В цьому розділі розглянуто розрахунок для першого варіанту вихідних даних.

Спочатку необхідно визначити усереднену швидкість втрати води на першому інтервалі спостереження.

При припущенні, що на інтервалі спостереження швидкість зменшення об'ємної густини води в розмножувальній системі не змінюється, то в кінці i -го інтервалу спостереження t_i можна оцінити наступні параметри [15]:

- рівень підкритичності шару чорних ЛПВМ в кінці i -го розрахункового інтервалу, $\delta k_{\text{еф} \chi i} = 1 - k_{\text{еф} \chi i-1}$, де $k_{\text{еф} \chi i} = k_{\text{еф} \chi} (C_{\chi i-1} - \Delta t \cdot V_{\chi})$;
- ЩПН чорних ЛПВМ в кінці i -го розрахункового інтервалу, $\varphi_{\chi i} = \varphi_{\chi i-1} \frac{1 - k_{\text{еф} \chi i-1}}{1 - k_{\text{еф} \chi i}}$;
- підкритичність шару з критичною масою палива в кінці i -го розрахункового інтервалу, $\delta k_{\text{еф} K i} = 1 - k_{\text{еф} K i}$,
 $K_{\text{еф} K i} = 1 - \frac{\varphi_{K i-1}}{\varphi_{K i}} (1 - k_{\text{еф} K i-1})$;
- об'ємну густину води у шарі з критичною масою палива в кінці i -го розрахункового інтервалу, $C_{K i}$;
- середню швидкість втрати води шаром із критичною масою палива на i -му розрахунковому інтервалі, $\frac{dC_{K i}}{dt} = \frac{C_{K i-1} - C_{K i}}{\Delta t}, \left[\frac{\text{г}}{\text{см}^3 \cdot \text{с}} \right]$;
- швидкість введення позитивної реактивності в розмножувальне середовище шару з критичною масою палива в кінці i -го розрахункового інтервалу, $\frac{dk_{\text{еф} K i}}{dt} = \frac{k_{\text{еф} K i-1} - k_{\text{еф} K i}}{\beta \Delta t}, [\beta / \text{с}]$.

Вирішення завдання визначення швидкості виходу води вирішується в програмному коді Maple 2015. Для цього створюється новий робочий лист з розширенням *.mw.

Виконується команда "restart:". Ця команда очищає внутрішню пам'ять ядра Maple, таким чином Maple діє (майже) так, начебто він щойно був запущений.

Команда «Digits := 14» встановлює, що при обчисленнях з програмними

числами з плаваючою комою використовуватиметься 14 цифр.

Таким чином перший рядок робочого листа має вигляд:

$$\text{restart; Digits} := 14, \quad (4.1)$$

Наступний рядок містить вихідні дані для розрахунку швидкості втрати води розмножувальним середовищем шару з критичною масою палива:

$$\begin{aligned} \text{phi00} &:= 1; F := 0.1; C01 := 0.69; C02 := 0.753; \text{aaa} := 1.0e - 8; Cx : \\ &= 0; V1 := 10^{(-9)}; \text{bkbeta} := 0.0064 \end{aligned} \quad (4.2)$$

де:

$\text{phi00} - \frac{\varphi_0}{\varphi_0}$ – початкова сумарна нормована ЩПН у точці повного зволоження в момент встановлення НБК, що реєструється блоком детектування;

F – частка ЩПН від шару чорних ЛПВМ, що реєструється блоком детектування;

$C01 - C_{\text{ч0}}$ – початкова об'ємна густина води в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ. Визначається за залежністю $K_{\text{еф1}}(C)$;

$C02 - C_{\text{к0}}$ – початкова об'ємна густина води в розмножувальному середовищі шару ПВМ з критичною масою палива. Визначається за залежністю $K_{\text{еф2}}(C)$;

$Cx - C_{\text{чх}}$ – об'ємна густина води, при якій підключається компенсуючий доданок (щоб $C1$ не виходив у негативні значення);

$\text{aaa} - a$ – коефіцієнт для функції Хевісайда;

$V1 - V_{\text{ч}}$ – швидкість зменшення об'ємної густини води в шарі чорних ЛПВМ;

$\text{bkbeta} - \beta$ – частка нейтронів, що запізнюються.

Далі розглядатимемо динаміку ЩПН витоку шару чорних ЛПВМ та шару ПВМ з критичною масою палива. Для цього визначимо значення ЩПН витоку у початковий момент часу: $\text{phi01} - \varphi_{\text{ч0}}$ – частка ЩПН витоку від шару чорних ЛПВМ, яку реєструє БД; $\text{phi02} - \varphi_{\text{к0}}$ – частку ЩПН витоку від шару ПВМ з критичною масою

палива. Таким чином:

$$\text{phi01} := \text{phi00} \cdot F; \quad (4.3)$$

$$\text{phi02} := \text{phi00} \cdot (1 - F); \quad (4.4)$$

Визначимо момент часу t_x , коли досягається повне осушення шару чорних ЛПВМ:

$$t_x := (C_{01} - C_x)/V_1; \quad (4.5)$$

Для визначення безперервної функції об'ємної густини води у верхньому та нижньому шарі ПВМ використовується функція Хевісайда:

$$\text{theta} := (y) \rightarrow 1/(1 + \exp(-y/aaa)); \quad (4.6)$$

де y – змінна функції Хевісайда.

Залежність об'ємної густини води у шарі чорних ЛПВМ від часу записується як:

$$C_1 := t \rightarrow C_{01} - t * V_1 + (t - t_x + 1) * V_1 * \text{theta}(t - t_x + 1); \quad (4.7)$$

де t , [с] – час.

Залежність об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива від часу записується у вигляді:

$$C_2 := (t, V_2) \rightarrow C_{02} - t * V_2; \quad (4.8)$$

де V_2 , [г/(см³·с)] – швидкість осушення шару ПВМ з критичною масою палива. Тут C_2 залежить від двох змінних: часу t та швидкості осушення шару ПВМ з критичною масою палива V_2 , оскільки вона невідома.

Залежність $K_{\text{ефл}}(C_{\text{л}})$ для шару чорних ЛПВМ, показана на рис. 3.4, апроксимується у вигляді функцій:

$$K_{\text{ефл}}(C_{\text{л}}) = 1093.2 \cdot C_{\text{л}}^3(t) - 155.13 \cdot C_{\text{л}}^2(t) + 8.527 \cdot C_{\text{л}}(t) + 0.2237 \text{ при } 0 \leq C_{\text{л}}(t) \leq 0.060216. \quad (4.9)$$

$$K_{\text{ефл}}(C_{\text{л}}) = -27.154 \cdot C_{\text{л}}^6 + 69.862 \cdot C_{\text{л}}^5 - 72.484 \cdot C_{\text{л}}^4 + 38.865 \cdot C_{\text{л}}^3 - 11.375 \cdot C_{\text{л}}^2 + 1.4991 \cdot C_{\text{л}} + 0.3571 \text{ при } 0.060216 < C_{\text{л}}(t) \leq C01. \quad (4.10)$$

Залежність $K_{\text{ефк}}(C_{\text{к}})$ для шару ПВМ з високим вмістом урану, показана на рис. 4.9, апроксимується у вигляді функції:

$$K_{\text{ефк}}(C_{\text{к}}) = 9.592 \cdot C_{\text{к}}^5 - 26.794 \cdot C_{\text{к}}^4 + 29.909 \cdot C_{\text{к}}^3 - 16.953 \cdot C_{\text{к}}^2 + 4.736 \cdot C_{\text{к}} + 0.492. \quad (4.11)$$

Таким чином залежності рівнів підкритичності верхнього та нижнього шарів ПВМ від часу $bk1(t)$ та $bk2(t)$ записуються у вигляді:

$$\begin{aligned} bk1 := t \rightarrow 1 - \text{piecewise}(0 \leq C1(t) \\ \leq 0.060216, 1093.2 * C1(t)^3 + (-1) * 155.13 * C1(t)^2 \\ + 8.527 * C1(t) + 0.2237, 0.060216 < C1(t) \\ \leq C01, -27.154 * C1(t)^6 + 69.862 * C1(t)^5 - 72.484 \\ * C1(t)^4 + 38.865 * C1(t)^3 - 11.375 * C1(t)^2 + 1.4991 \\ * C1(t) + 0.3571) : \end{aligned} \quad (4.12)$$

$$\begin{aligned} bk2 := (t, V2) \\ \rightarrow 1 - (9.592 * C2(t, V2)^5 - 26.794 * C2(t, V2)^4 + 29.909 \\ * C2(t, V2)^3 - 16.953 * C2(t, V2)^2 + 4.736 * C2(t, V2) \\ + 0.492) : \end{aligned} \quad (4.13)$$

де $bk1(t) = 1 - K_{\text{ефч}}(t)$ – рівень підкритичності шару чорних ЛПВМ, $bk2(t) = 1 - K_{\text{ефк}}(t)$ – рівень підкритичності шару ПВМ з критичною масою палива.

Тут функція $bk2(t, V2)$ залежить від двох змінних – часу та швидкості осушення шару ПВМ з критичною масою палива.

Оскільки нейтронна активність ПВМ при $\delta k > \beta$ та $\delta k < \beta$ описуються різними залежностями, визначимо ЩПН витоку шару ПВМ з критичною масою палива, при якому рівень його підкритичності дорівнюватиме β :

$$phibeta := phi02 * bk2(0, V2) / bkbeta: \quad (4.14)$$

Динаміка ЩПН для шару чорних ПВМ описується рядком:

$$phi1 := t \rightarrow phi01 * bk1(0) / bk1(t): \quad (4.15)$$

Динаміка ЩПН для шару ПВМ з критичною масою палива залежить від часу та швидкості виходу води з розмножувального середовища:

$$\begin{aligned} phi2 := (t, V2) \rightarrow & piecewise(0.0064 \leq bk2(t, V2) \\ & \leq 0.1, phi02 * bk2(0, V2) / bk2(t, V2), 0 \leq bk2(t, V2) \\ & \leq 0.0064, phibeta * bkbeta * (0.1e - 3 + 14 * 0.0064 + 14 \\ & * bk2(t, V2)) / (bk2(t, V2) * (0.0001 + 14 * 0.0064 + 14 \\ & * bkbeta))) : \end{aligned} \quad (4.16)$$

Змодельована лінія тренду динаміки нейтронної активності описується як сума динамік ЩПН витоку верхнього та нижнього шару ЯНС ПВМ:

$$phi := (t, V2) \rightarrow phi1(t) + phi2(t, V2) \quad (4.17)$$

Для визначення швидкості втрати води розмножувальним середовищем шару

ПВМ з критичною масою палива використовується команда «fsolve», яка дозволяє розв'язати одне або кілька рівнянь, використовуючи арифметику з плаваючою комою. В даному випадку розв'язується рівняння (4.17), при цьому момент часу t і ЩПН що реєструється, ϕ обираються в кінці інтервалу спостереження:

$$fsolve(phi(68860800, V2) = 1.559, V2) \quad (4.18)$$

Рівень підкритичності шару ПВМ з критичною масою палива в кінці розрахункового інтервалу виводиться рядком:

$$1 - bk2(68860800, fsolve(phi(68860800, V2) = 1.559, V2)); \quad (4.19)$$

Рівень підкритичності шару чорних ЛПВМ наприкінці розрахункового інтервалу:

$$1 - bk1(68860800); \quad (4.20)$$

Об'ємна густина води в шарі ПВМ з критичною масою палива в кінці розрахункового інтервалу:

$$C2(68860800, fsolve(phi(68860800, V2) = 1.559, V2)) \quad (4.21)$$

Об'ємна густина води в шарі чорних ЛПВМ наприкінці розрахункового інтервалу:

$$C1(68860800) \quad (4.22)$$

Для перевірки коректності розрахунку швидкості втрати води розмножувальним середовищем шару ПВМ з критичною масою палива, підставимо у функцію $\phi(t, V2)$ певний параметр $V2$ і кінець інтервалу спостереження t .

$$\phi(68860800, 1.564 * 10^{(-9)}) \quad (4.23)$$

Параметр F в кінці інтервалу спостереження визначається рядком:

$$C1(68860800) \quad (4.24)$$

Таким чином, була отримана швидкість втрати води шару ПВМ з критичною масою палива V2 на першому інтервалі спостереження (далі - V21).

Робочий лист для визначення параметрів V2, C1, C2, ϕ , F наведений в Додатку А (рис. А.1):

Параметри C1, C2, ϕ , F, визначені в кінці розрахункового інтервалу в рядках 4.21 – 4.24, будуть використовуватися як вихідні дані C01, C02, ϕ_{00} і F на другій ітерації розрахунку для визначення швидкості втрати води шару ПВМ з критичною масою палива V2 на другому інтервалі спостереження. Кількість ітерацій розрахунку дорівнює кількості інтервалів спостереження. Таким чином буде отримана залежність V2(t), яка описується кусково-неперервною функцією.

Для побудови залежностей C1(t), C2(t), $K_{ef1}(t)$, $K_{ef2}(t)$, $\phi_{11}(t)$, $\phi_{12}(t)$, $\phi(t)$ необхідно створити другий робочий лист на основі першого робочого листа.

Для другого листа рядки (4.1, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.12, 4.14, 4.15) мають аналогічний вигляд.

До другого рядку додаються результати розрахунку V_{2i} на кожному інтервалі:

$$\begin{aligned} \phi_{00} &:= 1; F := 0.1; C01 := 0.69; C02 := 0.753; aaa := 1.0e - 8; Cx : \\ &= 0; V1 := 10^{(-9)}; bkbeta := 0.0064; V21 : \\ &= 1.564 * 10^{(-9)}; V22 := 6.509 * 10^{(-10)}; V23 : \\ &= 7.064 * 10^{(-10)}; V24 := 2.501 * 10^{(-10)}; V25 : \\ &= 2.501 * 10^{(-10)} \end{aligned} \quad (4.25)$$

Для побудови залежності від часу об'ємної густини води в шарі чорних ЛПВМ

$C1(t)$ використовується команда “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([C1(t)], t = 0 .. 191879736, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} \\ = C1, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) \end{aligned} \quad (4.26)$$

Залежність об'ємної густини води від часу в шарі ПВМ з критичною масою палива $C2(t)$ має вигляд:

$$\begin{aligned} C2 := (t) \rightarrow C02 - t * V21 + (t - 68860800) * (V21 - V22) * \theta(t \\ - 68860800) + (t - 93744000) * (V22 - V23) * \theta(t \\ - 93744000) + (t - 192067200) * (V23 - V24) * \theta(t \\ - 192067200) + (t - 227577600) * (V24 - V25) * \theta(t \\ - 227577600): \end{aligned} \quad (4.27)$$

Для побудови залежності від часу об'ємної густини води в шарі ПВМ з критичною масою палива $C2(t)$ використовується команда “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([C2(t)], t = 0 .. 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} \\ = C2, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Для побудови залежності від часу ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів в шарі чорних ЛПВМ $K_{\text{efl}}(t)$ використовується команда “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([1 - bk1(t)], t = 0 .. 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} \\ = 3, \text{title} = K1, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) \end{aligned} \quad (4.29)$$

Залежність рівня підкритичності шару ПВМ з критичною масою палива $bk2(t)$ має вигляд:

$$bk2 := (t) \rightarrow 1 - (9.592 * C2(t)^5 - 26.794 * C2(t)^4 + 29.909 * C2(t)^3 - 16.953 * C2(t)^2 + 4.734 * C2(t) + 0.492); \quad (4.30)$$

Для побудови залежності від часу ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів в шарі ПВМ з критичною масою палива $K_{\text{ef}2}(t)$ використовується команда “plot”:

$$\text{plot}([1 - bk2(t)], t = 0 .. 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} = K2, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]); \quad (4.31)$$

Динаміка ЩПН для шару ПВМ з критичною масою палива записується у вигляді:

$$\begin{aligned} \text{phi2} := (t) \rightarrow & \text{piecewise}(0.0064 \leq bk2(t) \\ & \leq 0.1, \text{phi02} * bk2(0)/bk2(t), 0 \leq bk2(t) \\ & \leq 0.64e - 2, \text{phibeta} * bkbeta * (0.0001 + 14 * 0.0064 + 14 \\ & * bk2(t))/(bk2(t) * (0.0001 + 14 * 0.0064 + 14 * bkbeta))); \end{aligned} \quad (4.32)$$

Змодельована лінія тренду динаміки нейтронної активності описується як сума ЩПН від верхнього та нижнього шару ЯНС ПВМ:

$$\text{phi} := (t) \rightarrow \text{phi1}(t) + \text{phi2}(t); \quad (4.33)$$

Динаміка ЩПН для шару чорних ЛПВМ $\text{phi1}(t)$ виводиться командою “plot”:

$$\text{plot}([\text{phi1}(t)], t = 0 .. 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} = \text{phi1}, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]); \quad (4.34)$$

Динаміка ЩПН для шару ПВМ з критичною масою палива $\text{phi2}(t)$ виводиться командою “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([\text{phi2}(t)], t = 0 \dots 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} \\ = \text{phi2}, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) : \end{aligned} \quad (4.35)$$

Змодельована лінія тренду динаміки нейтронної активності $\text{phi}(t)$ виводиться командою “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([\text{phi}(t)], t = 0 \dots 259200000, \text{color} = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} \\ = \text{phi}, \text{titlefont} = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) : \end{aligned} \quad (4.36)$$

Швидкість введення позитивної реактивності для шару ПБМ з критичною масою палива виводиться командою “plot”:

$$\begin{aligned} \text{plot}([(1 - \text{bk2}(t) - 1 + \text{bk2}(t - 1))/\text{bkbeta}], t = 0 \dots 259200000, \text{color} \\ = [\text{red}], \text{thickness} = 3, \text{title} = \text{dK/dt}, \text{titlefont} \\ = [\text{TIMES}, \text{BOLDITALIC}, 18]) : \end{aligned} \quad (4.37)$$

Другий робочий лист наведений в Додатку А (рис. А.2).

4.2.3 Результати розрахунків

На рисунках 4.11 – 4.14 показана динаміка розрахункових параметрів $\text{phi}(t)$, $K_{\text{ef2}}(t)$, $C2(t)$, $dK_{\text{ef2}}(t)/dt$, отримана по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, зареєстрованій БД6 СКЯБ для версії фізичної моделі з такими параметрами: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %. Результати оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності ЯНС для не відкоригованої динаміки ЩПН БД6 СКЯБ та фізичних моделей з іншими параметрами показані в додатку А (рис. А.3 – А.14, табл. А.1 – А.3).

У процесі зневоднення ЯНС K_{ef} може зростати тільки у разі зменшення об'ємної концентрації води в перезволоженому розмножувальному середовищі ЛПБМ та кераміки з критичною масою. У неперезволоженому середовищі будь-який

механізм виходу води призводить лише до зменшення $K_{\text{еф}}$ [4].

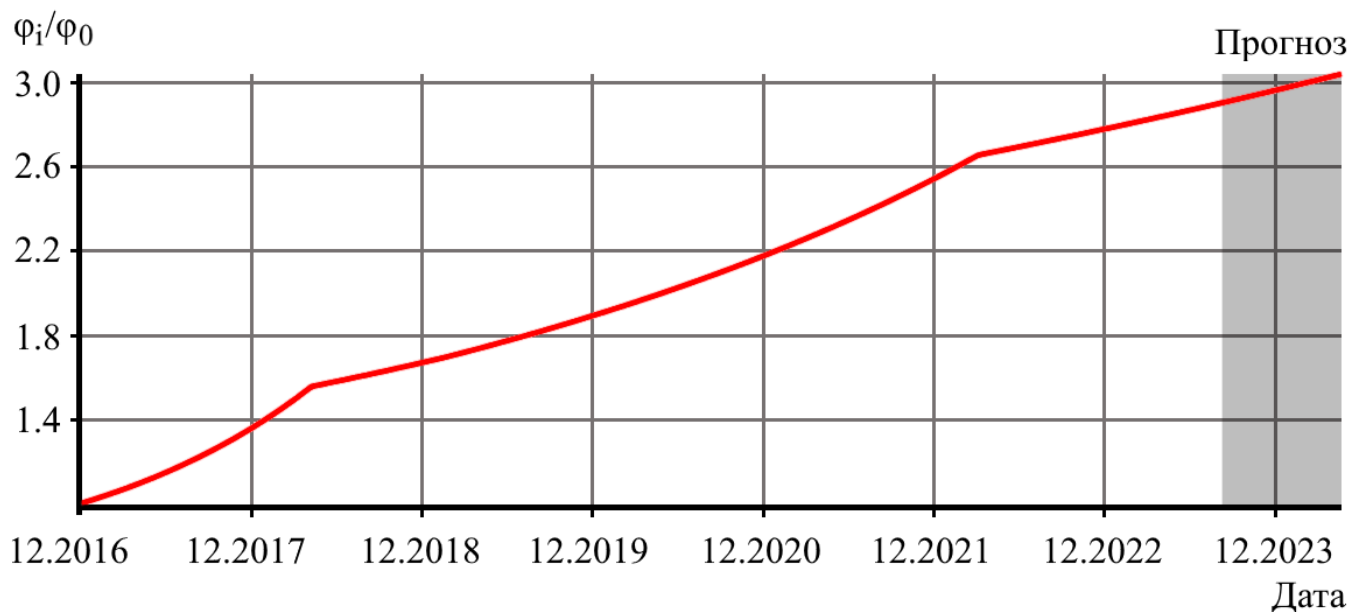


Рис. 4.11 – Поточні та прогнозні оцінки ЩПН (відкоригованої), що реєструються БД

№6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану;

збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

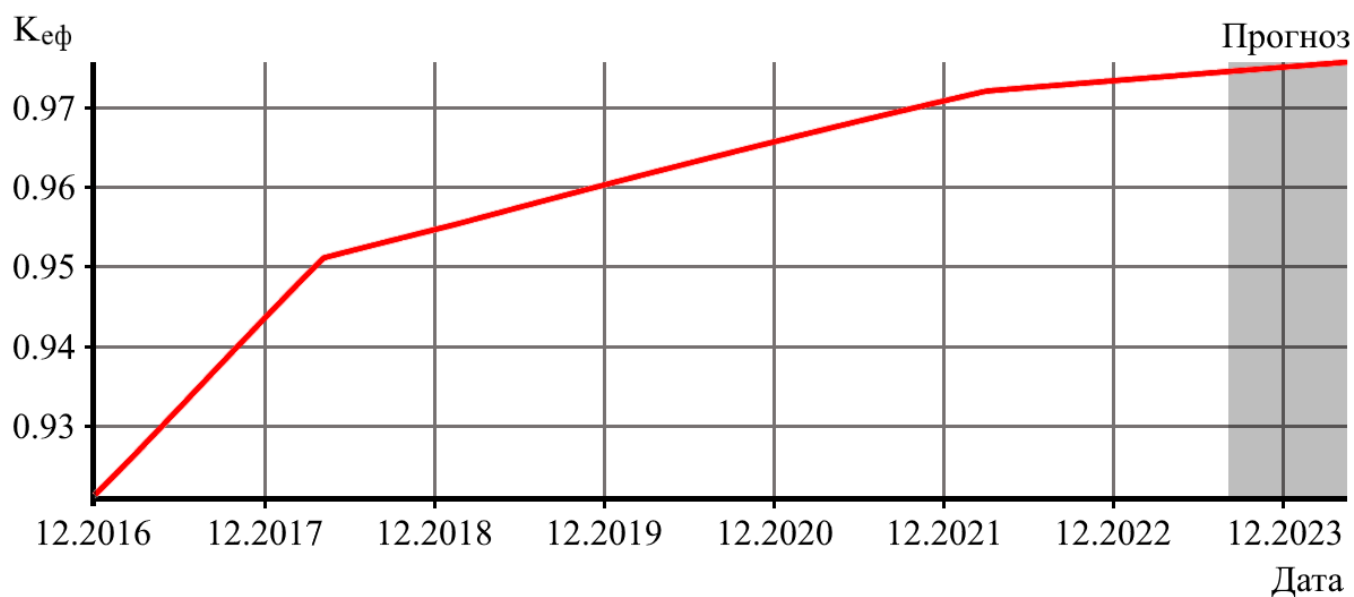


Рис. 4.12 – Поточні та прогнозні оцінки $K_{\text{еф}}$ ЯНС, розраховані по відкоригованій

експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі:

крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість

75,3 %

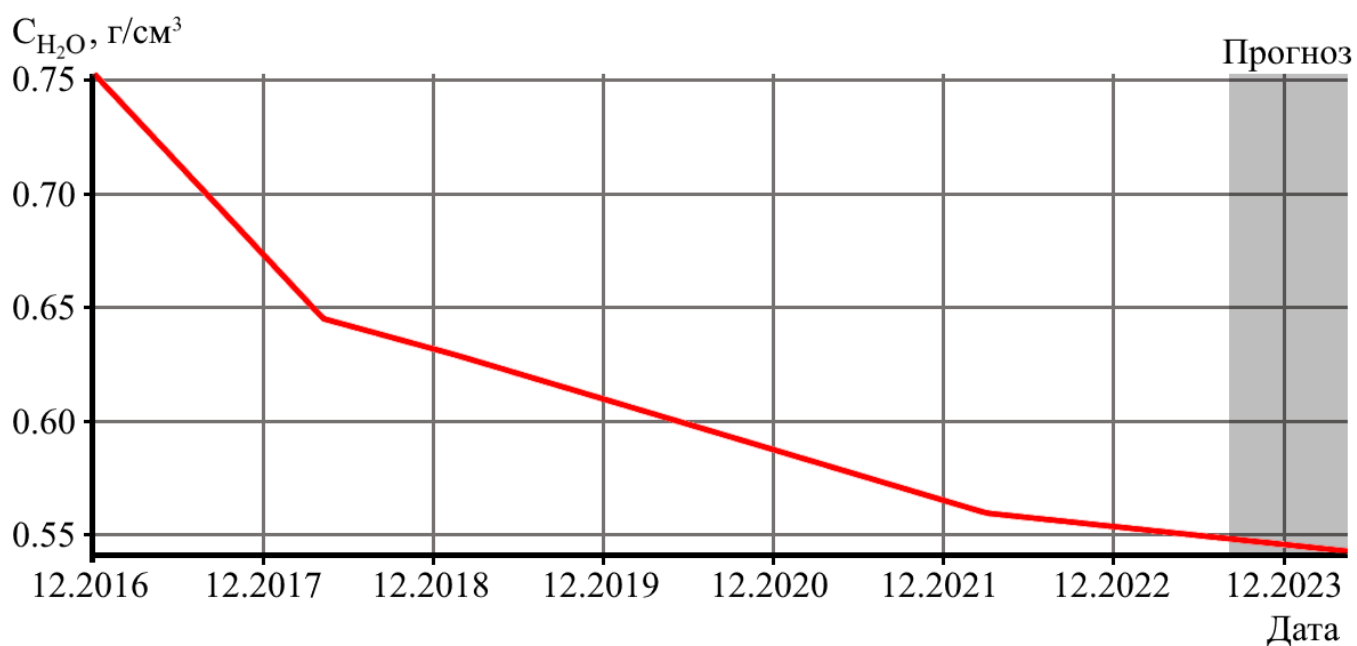


Рис. 4.13 – Поточні та прогнозні оцінки об'ємної густини води в шарі ПВМ з високою концентрацією палива, розраховані по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

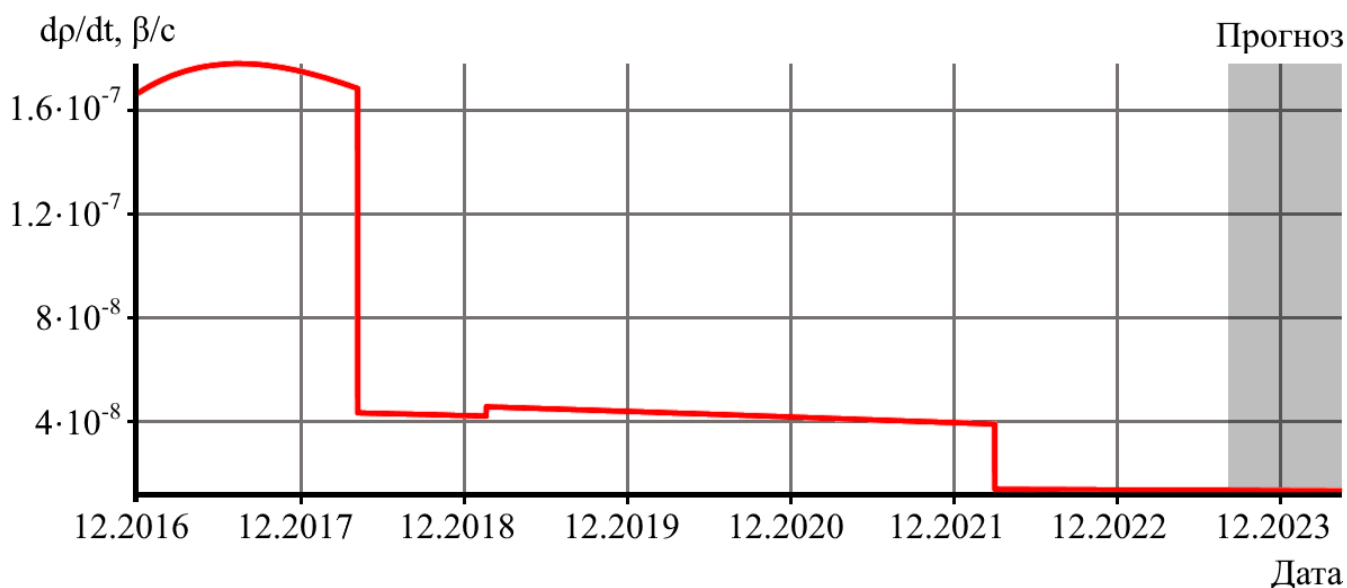


Рис. 4.14 – Поточні та прогнозні оцінки швидкості введення позитивної реактивності, розраховані по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

В таблиці 4.1 наведено результати оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності, де: ϕ_i/ϕ_0 – нормована на момент встановлення НБК ЩПН на периферії ЯНС в початковий момент часу i -го розрахункового інтервалу; ϕ_{i+1}/ϕ_0 – нормована на момент встановлення НБК ЩПН на периферії ЯНС в кінцевий момент часу i -го розрахункового інтервалу; F_{i+1} – відношення частки ЩПН від чорних ЛПВМ, яку реєструє детектор, до сумарної ЩПН на периферії ЯНС; $V_{\text{СЛі}}$ – швидкість виходу води з розмножувального середовища чорних ЛПВМ на i -му розрахунковому інтервалі; $V_{\text{СКі}}$ – швидкість виходу води з розмножувального середовища ПВМ з високим вмістом урану на i -му розрахунковому інтервалі; t_i – тривалість i -го розрахункового інтервалу; $K_{\text{ефКі}}$ – ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в розмножувальному середовищі ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі; $K_{\text{ефЛі}}$ – ефективний коефіцієнт розмноження нейтронів в розмножувальному середовищі чорних ЛПВМ на i -му інтервалі; $C_{\text{Кі}}$ – швидкість виходу води з розмножувального середовища ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі; $C_{\text{Лі}}$ – швидкість виходу води з розмножувального середовища чорних ЛПВМ на i -му інтервалі; $d\rho_i/dt_i$ – позитивної реактивності в розмножувальному середовищі ПВМ з високим вмістом урану на i -му інтервалі.

Таблиця 4.1 – Поточні і прогнозні значення нейтронно-фізичних характеристик ЯНС, що розраховані на інтервалах спостереження по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, зареєстрованій БД №6 штатною системою СКЯБ ІАСК, параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см, 13 т урану, збагачення 1,28% по урану, пористість 75,3 %

№ інт.	ϕ_i/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	ϕ_{i+1}/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	F_{i+1}	$V_{\text{слі}}$, г/(см ³ ·с)	$V_{\text{скі}}$, г/(см ³ ·с)	t_i , Днів (кінець інтервалу)	$K_{\text{ефкі}}$	$K_{\text{ефлі}}$	$C_{\text{кі}}$, г/см ³	$C_{\text{лі}}$, г/см ³	dp_i/dt , β/с
1	1.0059	1.5591	0.0654	1E-09	2.531E-09	493 (09/04/2018)	0.9512	0.3186	0.6452	0.6474	1,74E-07
2	1.5591	1.6989	0.0604	1E-09	6.504E-10	288 (22/01/2019)	0.9554	0.3236	0.6290	0.6225	4,27E-08
3	1.6989	2.6555	0.0399	1E-09	7.060E-10	1138 (05/03/2022)	0.9721	0.3442	0.5596	0.5242	4,24E-08
4	2.6555	2.8472	0.0377	1E-09	2.500E-10	411 (20/04/2023)	0.9740	0.3523	0.5507	0.4887	1,36E-08
5	2.8472	3.0392	0.0357	1E-09	2.500E-10	366 (20/04/2024)	0.9757	0.3596	0.5428	0.4571	1,34E-08

4.3 Моделювання повторної критичності 1990 року та зворотної критичності в розмножувальному середовищі ЯНС

4.3.1 Моделювання повторної критичності 1990 року

Для моделювання кінетики повторної критичності 1990 року використана математична модель, наведена в роботах [14,91,104]. Ця математична модель є системою трьох кінетичних рівнянь для: щільності нейтронів (4.38), n ; об'ємної густини води в розмножувальному середовищі ЯНС (4.39), m ; температури розмножувального середовища ЯНС (4.40), T [91].

$$\frac{dn}{dt} = \frac{\rho}{\bar{\tau}} n + f; \quad (4.38)$$

$$\frac{dm}{dt} = v - \theta(T - T_{ev}) \left(\frac{dm}{dt} \right)_{ev}; \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} (MC_{FCM} + mC_{H_2O}) \frac{dT}{dt} + \lambda \theta(T - T_{ev}) \left(\frac{dm}{dt} \right)_{ev} + vC_{H_2O}(T - T_i) + \chi(T - T_e) \\ = \varepsilon_f \Sigma_f v_T n. \end{aligned} \quad (4.40)$$

де ρ – реактивність середовища, що є залежною від часу величиною, оскільки вона залежить кількості води в середовищі; f – це постійне внутрішнє джерело нейтронів; $\bar{\tau}$ – це ефективний час життя нейтронів; T_{ev} — це температура кипіння води; v – швидкість надходження води в розмножувальне середовище; а $\theta(x)$ – одинична ступінчаста тета-функція Хевісайда; M – це густина розмножувального середовища; C_{FCM} та C_{H_2O} – питомі теплоємності ПВМ та води відповідно; λ – питома теплота пароутворення; T_i – температура води, що надходить у систему; T_e – температура, що відповідає теплопередачі; χ – коефіцієнт теплообміну; ε_f – середня енергія, яка виділяється в результаті одного акту поділу важкого ізотопу, що ділиться нейтроном; Σ_f – макроскопічний переріз поділу середовища; v_T – швидкість теплових нейтронів; T – температура розмножувального середовища.

В рівнянні (4.38) реактивність ρ залежить від масового параметра m і задається

у вигляді полінома 2-го степеню, записаного у вигляді:

$$\rho(m) = -\rho_0 \left(1 - \frac{m}{m_1}\right) \left(1 - \frac{m}{m_2}\right), \quad (4.41)$$

де m_1 та m_2 – значення масових параметрів, при яких розмножувальне середовище ЯНС досягає критичності.

Залежність макроскопічного перерізу поділу середовища Σ_f носить практично лінійний характер обмеженої області зміни параметра m , і представляється як [14]:

$$\Sigma_f(m) = \Sigma_f(0)(1 + sm). \quad (4.42)$$

У випадку, коли швидкість надходження води в розмножувальне середовище ЯНС змінюється n разів, параметр v залежить від часу і задається за допомогою одиничної ступінчастої тета-функції Хевісайда $\theta(T)$ у вигляді [91]:

$$v(t) = v_1 + (v_2 - v_1)\theta(t - t_1) + \dots + (v_{n+1} - v_n)\theta(t - t_n). \quad (4.43)$$

де передбачається виконання умови $0 < t_1 < t_i < t_n$.

Відтворено результат моделювання повторної критичності 1990-го року та змодельовано динаміку «зворотньої» критичності з урахуванням температурного коефіцієнта реактивності. Результати моделювання повторної критичності показані в додатку В (рис. В.1 – В.4). Залежність 4.41 з урахуванням температурного коефіцієнта реактивності була записана у вигляді:

$$\rho(m) = -\rho_0 \left(1 - \frac{m}{m_1}\right) \left(1 - \frac{m}{m_2}\right) \pm \alpha T_i, \quad (4.44)$$

де α – температурний коефіцієнт реактивності по температурі води. При моделюванні повторної критичності доданок αT_i записується в формулі (4.44) зі

знаком «—», в той час як при моделюванні «зворотної» критичності доданок αT_i записується в формулі (4.44) зі знаком «+».

Розрахунки показали, що максимальне значення ЩПН при «зворотній» критичності більше за максимальне значення ЩПН при повторній критичності за рахунок додатного температурного коефіцієнту реактивності.

Використання рівняння кінетики для точкової моделі реактора в даній моделі не дозволяє врахувати просторовий процес надходження води в розмножувальне середовище з периферії ЯНС [21]. Натомість розрахунок проводиться таким чином, ніби вода надходила у розмножувальне середовище рівномірно по об'єму. Отже дана математична модель дозволяє отримати якісну картину повторної критичності 1990-го року. Для покращення даної моделі необхідно створити просторову модель ЯНС. На даний момент покращення даної моделі є не доцільним, оскільки дослідження зворотної критичності на сьогоднішній день є більш актуальним, а виникнення повторної критичності в розмножувальному середовищі ЯНС є малоімовірним у зв'язку з встановленням НБК і перебуванням ЯНС в закритичному стані.

4.3.2 Моделювання зворотної критичності

Під час підготовки рукопису дисертації на основі вищезазначеної моделі Павловичем В. М. та Бабенком В. А. [14,91,104] було опубліковано статтю щодо можливості виникнення СЛР в Об'єкті «Укриття» станом на 2023-й рік [105]. Згідно проведеним розрахункам (рис. 4.15) СЛР поділу в розмножувальному середовищі ЯНС ПВМ можлива, але без небезпечних наслідків для навколишнього середовища [105].

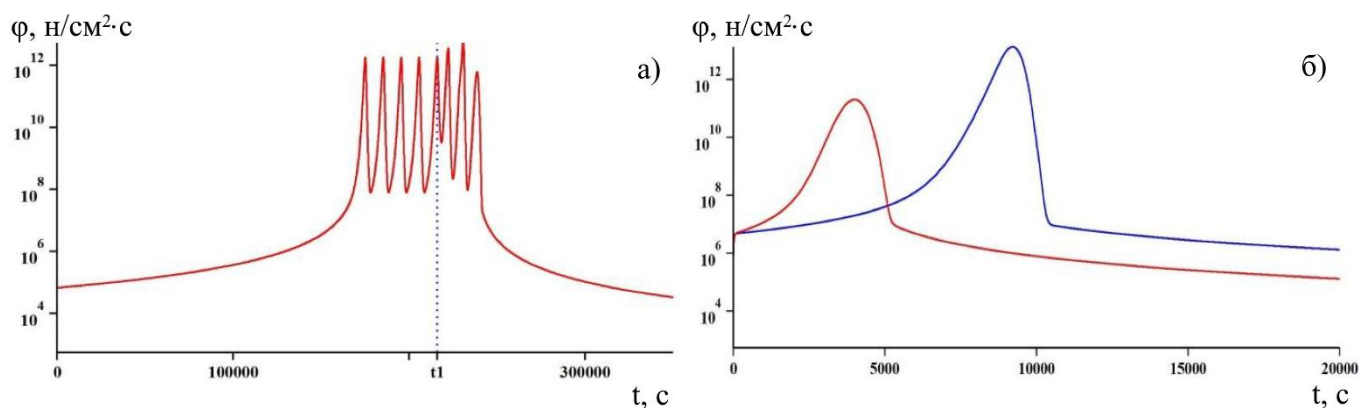


Рисунок 4.15 – Змодельована динаміка ЩПН при повторній (а) та зворотній (б) критичності

Для верифікації результатів розрахунку динаміки ЩПН в розмножувальному середовищі ЯНС при зворотній критичності було виконано модифікацію даної моделі з використанням нових даних, отриманих в рамках дисертації. Окрім врахування температурного ефекта реактивності, було використано результати розрахунку залежності K_{ef} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі ЯНС, показані на рисунку 4.9. Враховуючи що в навіолокритичному стані $\rho = K_{\text{ef}} - 1$, залежність (4.44) матиме вигляд:

$$\rho(m) = 9.592 \cdot m^5 - 26.794 \cdot m^4 + 29.909 \cdot m^3 - 16.953 \cdot m^2 + 4.734 \cdot m + 0.492 - 1 + \alpha T_i, \quad (4.45)$$

Швидкість втрати води розмножувальним середовищем ЯНС становить $v = 2.501 \cdot 10^{-10} \text{ г}/(\text{см}^3 \cdot \text{с})$ згідно результатів розрахунку алгоритму поточного та прогнозного рівня підкритичності ЯНС на останньому інтервалі спостереження (Таблиця 4.1). Решта вихідних даних залишилась незмінною, і відображена в публікації [14]. Результати розрахунку показані на рисунку 4.16.

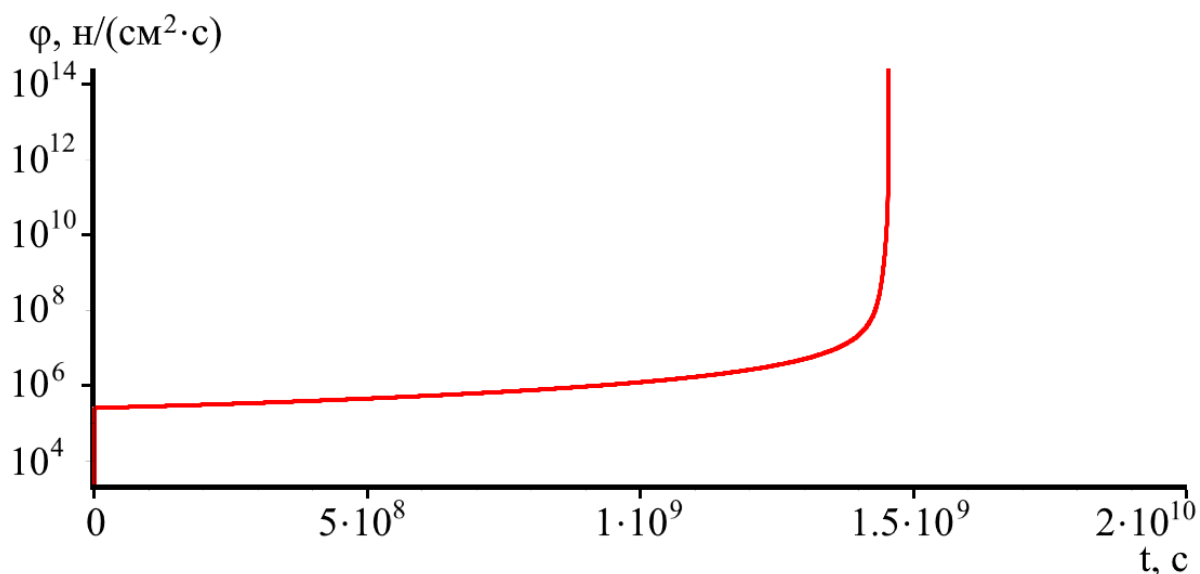


Рисунок 4.16 – Змодельована динаміка ЩПН при зворотній критичності

Розрахунок показує, що при зворотній критичності існує реальний ризик виникнення СЛР з неконтрольованим експоненційним ростом ЩПН, і, як наслідок, розгону на миттєвих нейтронах. Існує два фактори що підтверджують дану гіпотезу:

- Швидкість виходу води з розмножувального середовища ЯНС, отримана на поточному розрахунковому інтервалі при зворотній критичності, на три порядки менше, ніж при повторній критичності 1990го року. Таким чином при досягненні зворотньої критичності система буде знаходитись в надкритичному стані протягом великого проміжку часу, що призведе до неконтрольованого зростання ЩПН.
- Оскільки властивості води як поглинача нейтронів переважають її сповільнювальні властивості в закритичній області (за другим значенням критичності), температурний коефіцієнт реактивності при зворотній критичності має додатне значення. При досягненні зворотньої критичності розігрів розмножувального середовища ЯНС призведе до збільшення запасу реактивності, прискорюючи зростання ЩПН.

Таким чином, для забезпечення ядерної безпеки НБК необхідно виконати превентивні дії по придушенню небезпечних рівнів підкритичності ЯНС.

4.4 Моделювання нейтронно-фізичних характеристик низькозбагачених підкритичних скупчень ПВМ

Найбільше абсолютне значення ЩПН від ПВМ в ОУ реєструється блоком детектування №5, що розміщений безпосередньо в так званому великому вертикальному потоці ЛПВМ – скупченні у 4-му пароскидному клапані, що знаходиться в південно-західній частині ОП шахти реактора. Основним компонентом цього скупчення є коричневі ЛПВМ, що утворилися в результаті взаємодії коріуму з серпентинітом засипки Схеми «ОР», і скинуті в південно-західний сектор приміщення 305/2 на активній стадії аварії [5, 62].

Слід зазначити, що це скупчення ПВМ вже привертало увагу учених. У 1991 р. були описані методи та апаратура дослідження ядерно-фізичних параметрів скупчень ПВМ, та проведена оцінка об'ємної густини палива в 4-му пароскидному клапані методом каліброваного джерела [106]. Згідно з даними оцінками, об'ємна густина ядерного палива склала $0,5 \pm 0,1$ г/см³, що у перерахунку дає $\sim 20\%$ масової долі урану у ПВМ.

У 1997 р. були проведені розрахунки нейтронно-фізичних характеристик паливовмісних матеріалів, виконані на основі спрощених одновимірних моделей [107]. Отримані залежності K_{ef} від об'ємної густини води в середовищі розмноження нейтронів вказують на підкритичність а також наявність оптимального водо-уранового співвідношення для K_{ef} в нейтронно-фізичних характеристиках ПВМ. Однак, як вказали автори, одновимірна модель добре підходить для шару ПВМ, який можна представити у вигляді паралелепіпеда, у той час як для ПВМ в пароскидному клапані, що має більш складну форму середовища розмноження нейтронів і відбивачів, необхідно використовувати тривимірну фізичну модель.

На початку 2000-х проводилися розрахунки критичності для фізичної моделі з гетерогенним середовищем розмноження нейтронів та періодичними граничними умовами (розрахунок для нескінченного середовища розмноження нейтронів) у програмних кодах MCNP4B та SCALE 4.4a [108, 109]. Скупчення ПВМ моделювалося у вигляді силікатної матриці із включеннями таблеток UO_2 , щільність заповнення

якими нерівномірна у вертикальній площині (рис. 4.17) [108, 109]. Розрахунки показали, що фізична модель із вмістом палива до 18% та вигоранням палива 10 МВт·добу/кг глибоко підкритична залишається глибоко підкритичною навіть за найсприятливіших умов для виникнення критичності, зокрема, при вмісті води 40% у ПВМ, рівні води 3 м та обваленні стелі, що дає $K_{\text{эф}}$ приблизно 0,449.

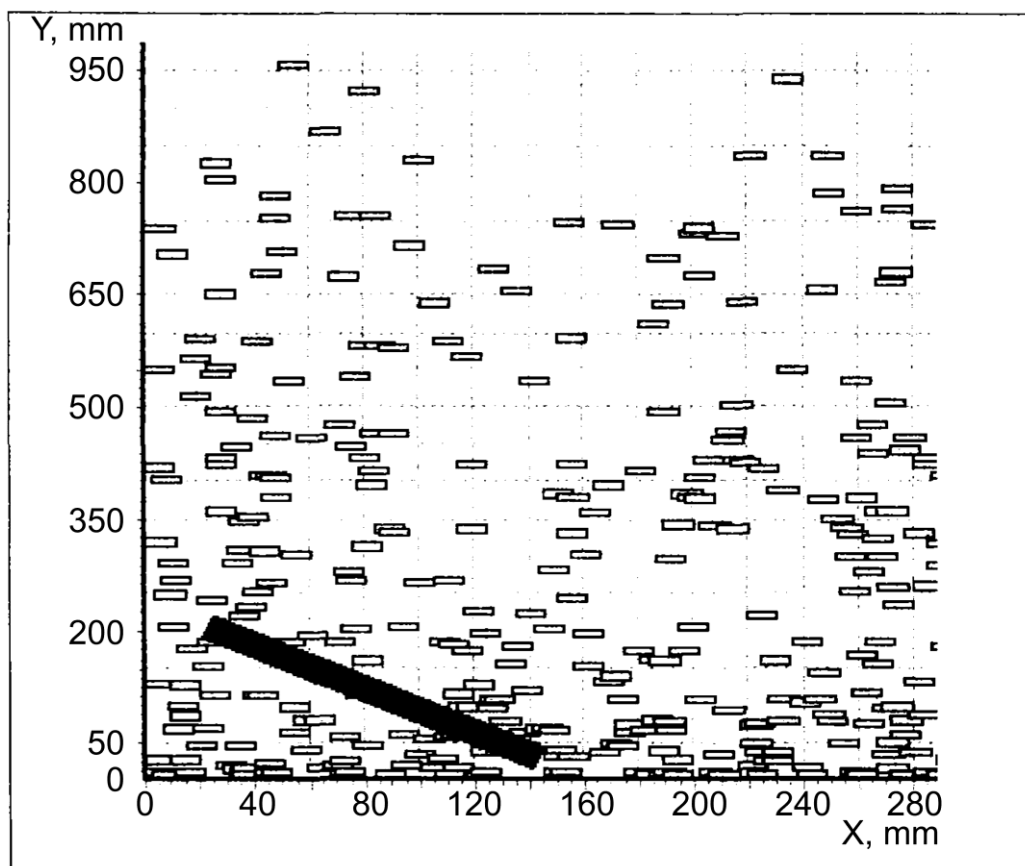


Рисунок 4.17 – Гіпотетичний розподіл паливних таблеток (маленькі білі смужки) та уламків паливних стрижнів (чорна смужка) в елементарній комірці 300x300x1000 мм

Однак, через обмеженість даних, спираючись на теоретичний ізотопний хімічний склад та відтворення геометрії скупчення на основі непрямих показників, це скупчення було класифіковане як потенційно небезпечне, враховуючи можливість існування гіпотетичної композиції, при якій може виникнути критичність.

4.4.1 Параметри фізичної моделі

У процесі буріння свердловини 3-9-Ж, під час проходження через 4-й ПСК не

вдалося відібрати пробу ЛПВМ, тому точний ізотопний хімічний склад невідомий. Незважаючи на це, уявлення про хімічний склад вертикального потоку ЛПВМ у 4-му пароскидному клапані можна сформувати на основі результатів радіохімічного аналізу проб №№ 16 та 16', відібраних у паророзподільному коридорі (в приміщенні 210/7). Проби взяті на виході коричневих ЛПВМ із 4-го пароскидного клапана (див. табл. 4.2) [110, 111].

Таблиця 4.2 – Хімічний склад проб коричневих ЛПВМ, відібраних в паророзподільному коридорі на виході із 4-го пароскидного клапана

№ проби	Масова частка, %							
	Si	Ca	Ti·10	Zr	Cu·10 ³	Na	Ba·10	U
16	33	4,0	1,5	5,4	28	2,2	1,5	8,4
16'	35	5,5	1,1	5,3	2,0	4,5	1,8	8,1
	Al	Mn·10	Fe	Pb·10 ³	Cr·10	Mg	Ni·10	B·10 ²
16	2,7	4,6	0,6	31	2,3	5,0	3,1	7,6
16'	2,7	3,5	1,1	24	2,0	4,9	1,9	6,9

Примітка: Кисень займає решту масової частки.

Однак, для цілей моделювання була використана середньозважена концентрація основних хімічних елементів у коричневих ЛПВМ, наведену в [68] (див. табл. 4.3), оскільки вона узагальнює дані з усіх зразків коричневих ЛПВМ, взятих на ОУ. Масова частка кисню займає решту і не вказана в Таблиці 4.3.

В основі геометричної моделі закладені відомі дані про конструкцію ПСК РВПК-1000. Геометричні параметри наведені на рисунку 4.18: циліндричне скупчення висотою 3,7 м і діаметром 1,5 м.

Таблиця 4.3 –Середньозважена концентрація основних хімічних елементів у коричневих ЛПВМ

Хімічний елемент	U	Si	Al	Mg	Ca	Na	Zr	Fe
Масова частка, %	9.7	32.2	3.3	5.2	4.5	3.1	4.5	1.0

Примітка: Кисень займає решту масової частки.

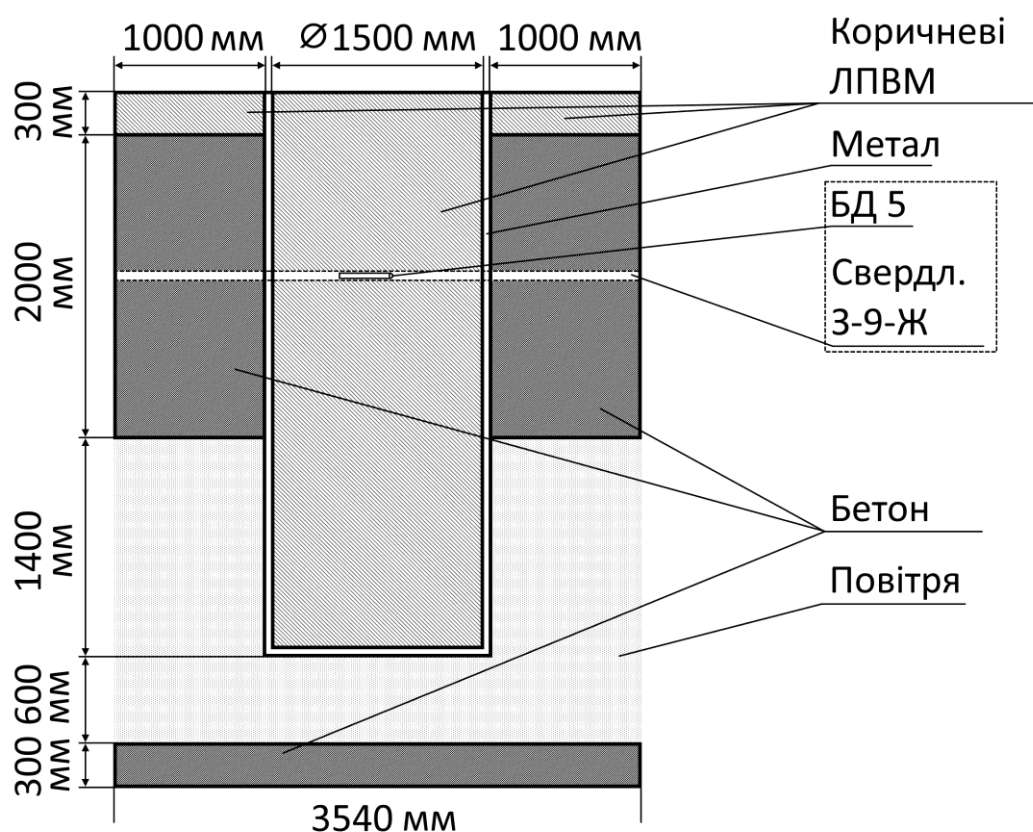


Рисунок 4.18 – Фізична модель скупчення коричневих ЛПВМ

До встановлення НБК в проєктне положення регулярно спостерігався витік води зі свердловин. Вважається, що це сталося внаслідок міграції води з верхніх ділянок ОУ, у які потрапляла вода, що проникала у відкриті або ще не герметичні конструкції внаслідок опадів, танення снігу та конденсації [112].

Щоб оцінити пористість та пустотний простір у ЛПВМ, необхідно враховувати існуючі пори та мікроканали в їх структурі, які також сприяють проникненню повітря та води. [1, 113]. Згідно з оцінками доступної пористості в середовищі розмноження

нейтронів коричневих ЛПВМ методом визначення об'єму випареної робочої рідини з сукупностей порових каналів зразків ЛПВМ в рамках робіт [113, 114], доступна пористість коричневих ЛПВМ становить 7 – 9%. Згідно з [115], інтегральна пористість більшості лавоподібних паливовмісних матеріалів (ЛПВМ) коливається від 15% до 40%, при цьому доступна пористість коричневих ЛПВМ для води оцінюється в 8–9%. Крім того, пемзоподібні ЛПВМ демонструють набагато вищу доступну пористість, яка сягає 90% [115]. Недавні дослідження показують, що закриті сферичні пори, заповнені газом, могли злитися як внаслідок процесів розтріскування, так і накопичення треків α -частинок у матеріалі [116]. На основі цих висновків для розрахунків було взято усереднений діапазон пористості від 20 до 50%.

У [108, 109] гетерогенність середовища розмноження нейтронів виражалася у виділенні окремих об'ємів для фрагментів тепловиділяючих елементів, паливних таблеток та ЛПВМ. Крім того, розрахунок проводився для середовища розмноження нейтронів з періодичними граничними умовами (розрахунок для нескінченного середовища). У дисертації ж, гетерогенність була реалізована шляхом виділення окремих об'ємів для води і ПВМ. Оскільки довжина дифузії теплових нейтронів у воді становить 2,88 см, інтервал кроків кубічної решітки моделі був обраний консервативно в межах 2 – 4 см для досягнення максимальних значень K_{ef} при оптимальному водо-урановому співвідношенні.

Середня концентрація урану, у коричневих ЛПВМ, отримана на основі відбору проб у прим. 210/7 складає 9,7% [68]. У той же час експериментальні оцінки об'ємної густини урану в 4-му ПСК склали $0,5 \pm 0,1$ г/см³ [106], що досягається при концентрації урану ~20% при пористості ПВМ 20 – 50%. Однак, оскільки існує гіпотетична можливість включення до потоку коричневих ЛПВМ фрагментів активної зони та паливних таблеток, також були виконані розрахунки для композицій із вмістом урану до 50%.

Оцінки вигорання палива в коричневих ЛПВМ проводилися в роботі [110]. Розрахунок по відношенню до питомих активностей ^{134}Cs та ^{137}Cs показав, що вигорання палива знаходиться в діапазоні $12,4 \pm 0,6$ МВт·добу/кг U; згідно з розрахунком по відношенню активностей ізотопів плутонію $A_{38}/A_{38+39+40}$ ця величина

знаходиться в діапазоні $12,5 \pm 1,4$ МВт·добу/кг U. Для консервативних оцінок у розрахунках середовища розмноження нейтронів було обрано діапазон вигорання 10,5–12,5 МВт·день/кг, що відповідає еквівалентному збагаченню від 1,24% до 1,13% по ^{235}U з урахуванням ^{240}Pu . Визначення діапазону збагачення палива по ^{235}U , з урахуванням ^{239}Pu було виконано шляхом інтерполяції даних у таблиці 3.2 [57].

4.4.2 Результати розрахунків у коді MCNP. Верифікація фізичної моделі

На основі розробленої фізичної моделі, описаної вище, було задано вхідний файл для моделювання за допомогою програми MCNP6. Для визначення впливу води на ЩПН та критичність було розраховано K_{eff} як функцію від концентрації води ($\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$) у розмножувальному середовищі коричневих ЛПВМ (рис. 4.19).

На рисунку 4.19 параметри моделі показано в такій послідовності: відсоток U (тобто 9.7%U – масовий вміст урану 9,7%); збагачення палива, розраховане за таблицею 3.2 (тобто 1.13% of ^{235}U – 1.13% по ^{235}U з урахуванням ^{240}Pu); крок моделюючої решітки (тобто. 2cm – крок моделюючої решітки 2 см). Критична маса в об'ємі 4-го пароскидного клапана досягнута при масовому вмісті урану в коричневих ЛПВМ 45%, що становить 10,8 тонни урану. В результаті, скупчення коричневих ЛПВМ у 4-му пароскидному клапані з хімічним складом, визначеним шляхом відбору проб коричневих ЛПВМ та врахуванням експериментальних оцінок густини палива, є глибоко підкритичним (див. рис. 4.19 а-б). Межі безпеки перевищені, а критичність досягнута лише в консервативній гіпотетичній моделі скупчення з вмістом урану 40% та 45% відповідно (див. рис. 4.19 в-г).

Крім того, розрахунки показують, що для пористості менше 20% зменшення вмісту води в розмножувальному середовищі завжди призводить до зменшення K_{eff} і, відповідно, зменшення ЩПН витоку скупчення.

При рівнях пористості, що перевищують 20%, середовище розмноження нейтронів демонструє певне (оптимальне) водо-уранове співвідношення, за якого K_{eff} досягає свого максимуму, в той час як вміст води в середовищі розмноження нейтронів залишається нижчим за максимально можливе значення. Це означає, що в

міру виходу води з так званого «перезволоженого» середовища розмноження нейтронів (з пористістю понад 20%), K_{ef} зростатиме, доки не буде досягнуто оптимального вмісту води. Після перевищення цього оптимуму подальша втрата води призведе до зменшення K_{ef} (рис. 4.19 в-г).

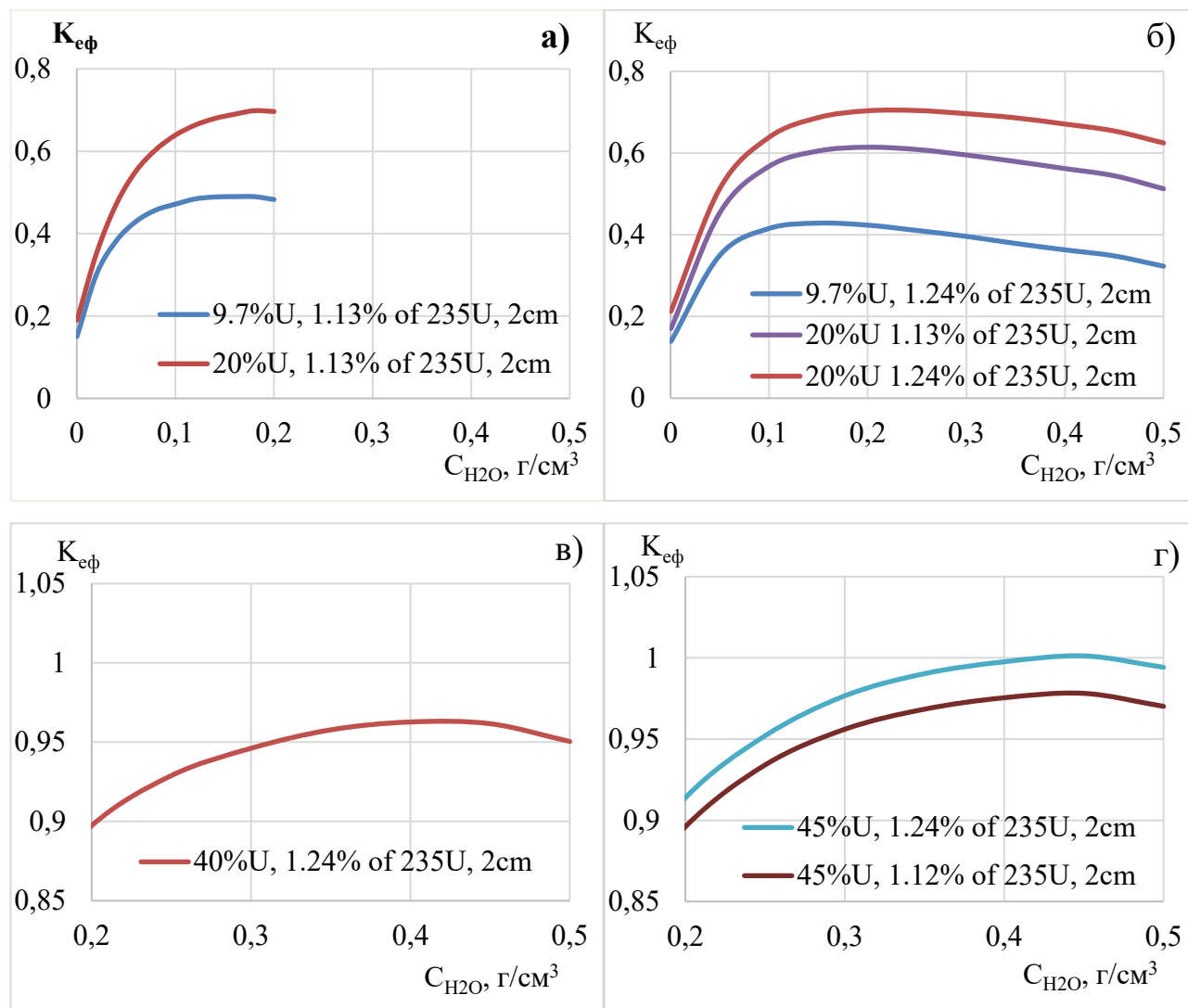


Рисунок 4.19 – Розрахункова залежність K_{ef} від об’ємного вмісту води в розмножувальному середовищі ($C_{\text{H}_2\text{O}}$) коричневих ЛПВМ для різних збагачень ($\% ^{235}\text{U}$), вмісту урану ($\%\text{U}$), та пористості:

а) Пористість розмножувального середовища – 20%;

б-г) Пористість розмножувального середовища – 50%

Позначимо φ_0 як ЩПН витoku при перезволоженому стані розмножувального середовища (максимальне значення $C_{\text{H}_2\text{O}}$), та φ_{Max} як максимально можливе значення ЩПН витoku. Тоді отримана залежність дозволяє оцінити максимальну швидкість

зростання ЩПН ($\frac{\varphi_{Max}}{\varphi_0}$) внаслідок відтоку води з розмножувального середовища. Припускаючи, що K_{eff0} належить перезволоженому стану, а K_{effMax} – максимальному значенню K_{eff} , максимальну швидкість зростання ЩПН ($\frac{\varphi_{Max}}{\varphi_0}$) можна визначити як:

$$\frac{\varphi_{Max}}{\varphi_0} = \frac{1 - K_{eff0}}{1 - K_{effMax}} \quad (4.45)$$

Розрахований коефіцієнт зростання ЩПН у разі виходу води з перезволоженого розмножувального середовища залишається нижче 1,27 для всіх підкритичних версій фізичної моделі з пористістю понад 20%.

4.5 Запобігання досягнення аварійних значень підкритичності

Для забезпечення ядерної безпеки в процесі втрати води основним завданням є раннє виявлення аварійних значень підкритичності ($K_{ef} = 0,95 - 0,98$) та визначення часу їх досягнення. При виявленні аварійних значень підкритичності в якості оперативної міри пропонується відновлення водного режиму шляхом подачі води через свердловини у розмножувальне середовище скупчення. Превентивне запобігання досягнення аварійних значень підкритичності може бути реалізовано тільки шляхом введення в розмножувальне середовище скупчення розчинених або твердих нейтронних поглиначів.

Ефективність просочення розчином поглинача залежить від пористості розмножувального середовища ЯНС, і від реальної можливості проходження розчину через наноканали. Подібна обставина вимагає контролю глибини проникнення поглинача для тієї чи іншої концентрації розчину нейтронпоглинаючих матеріалів (НПМ). Таким чином, для реалізації рекомендованого методу необхідно використовувати наявні свердловини або бурити додаткові вертикальні свердловини за відсутності інших способів досягти поверхні ПВМ через верхній шар бетону.

За результатами спостережень ЛПВМ схильні до процесів деградації. Спостерігаються окрихчування, руйнування лав, поява хімічних новоутворень. Для ЯНС у прим. 305/2 експериментальні дані про рівень їхньої деградації відсутні. У зв'язку з цим введення водного розчину поглинача в даний масив ПВМ вимагає додаткових досліджень та технічних рішень, адекватних даним, які можуть бути отримані в результаті їх проведення.

Введення твердого поглинача нейтронів може бути здійснено з зовнішньої горизонтальної поверхні ЛПВМ у вертикальному напрямку. Технологія реалізується за допомогою дистанційно керованих роботів на колісному ході та забезпечених свердлильним пристроєм. За допомогою цього агрегату з певним кроком можна забезпечити сітку отворів на всю глибину ПВМ. Потім в отвори вводяться стрижні поглиначі. Порівняно з методом використання бурових свердловин цей спосіб може бути менш ефективний через менший діаметр свердловин, і, отже, менший діаметр поглинаючого стрижня. Однак використання великої кількості стрижнів із НПМ може виправити цей недолік порівняно з використанням свердловин.

Найбільш ефективним і малозатратним методом придушення параметрів критичності може виявитися виключення критичної маси. Оскільки можливість вилучення скупчення цілком або його частини для придушення параметрів критичності дуже обмежена для вирішення подібного завдання доцільно використовувати контрольоване зневоднення скупчень. Вода, що заповнила пористу структуру ПВМ, відіграє роль і поглинача, і сповільнювача. Поступове зниження рівня води навколо ЯНС дозволить створити умови для виключення частини матеріалу, що ділиться зі складу критмаси. При цьому решта ЯНС зберігатиме вологу у своїй структурі, тим самим забезпечуючи її підкритичність.

Реалізація цього методу повинна забезпечувати постійне підживлення водою нижньої частини скупчення, водночас вода з верхньої частини скупчення протікатиме через відповідний канал – свердловину.

Даний метод придушення критичності може бути менш трудомістким і більш простим у технології його здійснення порівняно з введенням нейтронних твердих поглиначів.

4.6 Висновки до розділу

Розроблено уран-цирконієву фізичну модель ЯНС та виконано розрахунки її нейтронно-фізичних характеристик в програмному коді MCNP6. Визначено вплив діапазону пустот, маси урану, масової частки урану, вигоряння палива, густини розмножувального середовища та сукупної гетерогенності на нейтронно-фізичні характеристики фізичної моделі.

Виконано оцінку поточного та прогнозного рівнів підкритичності ЯНС ПВМ. В рамках даного алгоритму використано результати оцінки нейтронно-фізичних характеристик ЯНС.

У процесі зневоднення ЯНС K_{ef} може зростати тільки у разі зменшення об'ємної густини води в перезволоженому розмножувальному середовищі ЛПВМ та кераміки з критичною масою. У неперезволоженому середовищі будь-який механізм виходу води призводить лише до зменшення K_{ef} .

З метою моделювання повторної критичності 1990 року використана точкова математична модель ЯНС, описана в роботах [14,91,104]. Для даної моделі враховано температурний коефіцієнт реактивності. При моделюванні повторної критичності температурний коефіцієнт реактивності приймає від'ємні значення, в той час як при моделюванні «зворотної» температурний коефіцієнт реактивності буде додатним.

При невизначеності та непередбачуваності механізму зневоднення середовища ЯНС доцільно реалізувати локальний та ефективний контроль нейтронної активності на доступній периферії скупчення. У разі виявлення стійкої нейтронної аномалії та експертної ідентифікації її причинного зв'язку з небезпечним зменшенням підкритичності забезпечити оперативне відновлення водного режиму шляхом примусової подачі води до зони розміщення скупчення.

Основні результати розділу викладені автором у публікаціях [4,15,16,17,25,103].

ВИСНОВКИ

Контроль рівня підкритичності паливовмісних матеріалів в підреакторних приміщеннях зруйнованого 4-го енергоблоку ЧАЕС є пріоритетною задачею для забезпечення ядерної та радіаційної безпеки НБК-ОУ. В дисертаційній роботі поставлена та вирішена науково-практична задача розробки фізичної та математичної моделей для оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності за результатами постійного моніторингу значень ЩПН в точках контролю СКЯБ на периферії ЯНС ПВМ та їх впровадження в практичну діяльність по підтримці підкритичного стану ЯНС об'єкта НБК-ОУ. В рамках дисертаційної роботи виконано наступне:

1. На основі ретроспективного аналізу динаміки ЩПН, що була зареєстрована за допомогою СКЯБ та ЕДС запропоновано хронологію нейтронно-фізичних процесів, що мали місце в розмножувальному середовищі ЯНС. Запропоновано інтерпретацію динаміки ЩПН за періоди 1990 – 2016 р.р. та після встановлення НБК в 2016 р. Це дозволило висунути та підтвердити гіпотезу стосовно фізичних процесів, які стали причиною кардинальної зміни ЩПН на периферії ЯНС, що визначило подальший напрямок досліджень.

2. Проаналізовано послідовність зареєстрованих подій, що передують руйнуванню реактора, а також результати обстеження післяаварійного стану шахти реактора та підреакторного приміщення 305/2. Запропоновано концепцію нової версії сценарію аварійних процесів, що враховує існування в зоні проплавлення ОП ЯНС коріумного походження з критичною масою палива.

3. Проведено аналіз найбільш імовірної конфігурації, хімічного складу та структури ЯНС для версії коріумного походження силікатної матриці розмножувального середовища на основі досліджень характеристик продуктів взаємодії ядерного палива з бетоном. Це дозволило створити вдосконалену фізичну модель ЯНС в умовах відсутності доступу до зони проплавлення ОП.

4. Визначено діапазони параметрів фізичної моделі ЯНС коріумного походження, необхідних для оцінки її нейтронно-фізичних характеристик. Такий підхід до вибору вихідних даних дозволяє скоротити кількість розрахунків шляхом

відсіювання моделей ЯНС з набором параметрів, які не могли бути досягнуті при формуванні ЯНС. Створено вдосконалену фізичну модель ЯНС в програмному коді MCNP6 з використанням результатів оцінки елементного складу продуктів взаємодії розплаву палива з конструкційними матеріалами активної зони, а також уточненими геометричними характеристиками ЯНС. Виконано розрахунки її нейтронно-фізичних характеристик. Визначено діапазони параметрів фізичної моделі ЯНС, які не протирічать результатам ретроспективного аналізу динаміки ЩПН на периферії ЯНС. Отримано ряд найбільш імовірних нейтронно-фізичних характеристик ЯНС.

5. Вдосконалено математичну модель для дослідження можливості виникнення, розвитку та властивостей СЛР в розмножувальному середовищі ЯНС об'єкту «Укриття» [14]. Враховано температурний коефіцієнт реактивності, що дало змогу отримати кращу точність розрахунку характеристик СЛР. В рамках даної моделі виконано моделювання повторної за зворотної критичності в розмножувальному середовищі ЯНС 1990 р. Проведено порівняння характеру розвитку СЛР при повторній та зворотній критичності в ЯНС ПВМ.

6. Створено алгоритм оцінки поточного та прогнозованого рівнів підкритичності по динаміці ЩПН на периферії ЯНС. Отримано діапазон поточних та прогнозованих значень підкритичності ЯНС. Змодельовано прогноз динаміки ЩПН на периферії ЯНС за умови незмінності швидкості зменшення об'ємної густини води в розмножувальному середовищі ЯНС. Запропонований алгоритм спирається на результати розрахунку нейтронно-фізичних характеристик ЯНС в MCNP6.

7. Отримані наукові результати надали можливість інтерпретувати результати безперервного моніторингу ЩПН на периферії ЯНС з метою визначення поточного стану підкритичності ЯНС в умовах відсутності безпосереднього доступу до його розмножувального середовища. Розроблено технічні пропозиції по процедурам раннього виявлення та превентивного придушення аварійних значень підкритичності.

Розроблені моделі, методи та програмно-методичне забезпечення були виконані в рамках звітів ІПБ АЕС [92,101,102].

Доведено до практичного застосування при реалізації моніторингу ЩПН СКЯБ на 4-му енергоблоці ДСП Чорнобильська АЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2018. Вип. 30. С. 76–86.
2. The Nuclear Safety Monitoring System for fuel-containing materials located in destroyed unit no. 4 of the Chornobyl NPP and proposals for its modernization / M. V. Saveliev, R. L. Godun, M. A. Pantin, I. S. Skiter, K. O. Sushchenko. Nuclear Physics and Atomic Energy. 2022. Vol. 23, № 3. P. 172–181.
3. Features of neutron flux density and gamma-radiation exposure dose rate dynamics in ChNPP Shelter Object after the New Safe Confinement commissioning / O. V. Mykhailov, M. V. Saveliev, K. O. Sushchenko, V. V. Dmytryshyn. Nuclear Power and the Environment. 2023. Вип. 27, № 2. С. 44–55.
4. Subcriticality control of fuel-containing materials clusters in the conditions of the NSC-SO complex / K. O. Sushchenko, Ye. D. Vysotskyi, R. L. Godun, M. V. Saveliev. International Conference on Nuclear Decommissioning and Environment Recovery INUDECO 2022. Slavutych, 2022. URL: <https://youtu.be/Ppf0YwdMWtE?t=17944>
5. Объект «Укрытие»: 1986–2011. На пути к преобразованию : монография / А. А. Ключников, В. А. Краснов, В. М. Рудько, В. Н. Щербин. Чернобыль : Институт проблем безопасности АЕС НАН України, 2011. 288 с.
6. Аномальный инцидент 27–30 июня 1990 г. в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / В. В. Фролов. Атомная энергия. 1996. Т. 80, вып. 3. С. 216–219.
7. Neutron Incident at the Chornobyl NPP Shelter Object: Study of the Causes and Impacts of Safety in the New Confinement / R. L. Godun, S. V. Kupriianchuk, K. O. Sushchenko, A. Iatsyshyn, A. Lahoiko. Studies in Systems, Decision and Control : collective monograph IV / ed. by A. Zaporozhets. Springer International Publishing, 2023. P. 91–111.

8. Ядерная безопасность при ликвидации последствий тяжелой аварии на ЧАЭС / Е. Д. Высотский, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, В. А. Краснов. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2017. Вип. 28. С. 60–67.
9. The level of nuclear safety of fuel-containing materials inside the NSC “ARKA” / R. Godun, K. Sushchenko. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECО 2018. С. 70–71.
10. Анализ модели, описывающей состояния ядерно-опасного скопления топливосодержащих материалов в Объекте «Укрытие» / В. Б. Шостак, А. А. Ключников. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2015. Вип. 24. С. 42–50.
11. Ядерное топливо в объекте «Укрытие» Чернобыльской АЭС / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, А. А. Боровой, Е. П. Велихов, А. А. Ключников. М. : Наука, 2010. 240 с. ISBN 978-5-02-037465-2.
12. Результаты расчетной оценки характеристик материальной среды ядерно-опасных скоплений НБК-ОУ ЧАЭС для версии их коринумного происхождения / А. В. Михайлов. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2018. Вип. 31. С. 59–67.
13. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки : Закон України від 11.07.2001 № 2623-III : станом на 5 лют. 2023 р. База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2623-14#Text> (дата звернення: 17.08.2023).
14. Изучение возможности возникновения, развития и свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта “Укрытие” / В. А. Бабенко, В. Н. Павлович. Ядерна фізика та енергетика. 2017. Т. 18, № 3. С. 254–266.
15. Експертна оцінка поточного рівня підкритичності скупчень паливовмісних матеріалів після встановлення Нового Безпечного Конфайнмента / Є. Д. Висотський, К. О. Сущенко, Р. Л. Годун. Nuclear Power and the Environment. 2020. Вип. 16. С. 49–56.

16. Оцінка поточного і прогнозного рівня підкритичності потенційно ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів / Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, К. О. Сущенко. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2019. С. 38–42.

17. Експертна оцінка поточного і прогнозного рівня підкритичності потенційно ядерно-небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів / Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, К. О. Сущенко. XXVI щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 8–12 квітня 2019 року) : тези доповідей. С. 77–78.

18. Assessment of the Existing Safety Barriers and the Effectiveness of the Subcriticality Operational Control of Fissile Materials Clusters Localized Inside the Shelter Object / R. L. Godun, S. V. Kupriianchuk, K. O. Sushchenko. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe. Portorož, Slovenia, September 7–10, 2020. 7 p.

19. Динамика нейтронной активности и подкритичность ядерно-опасного скопления в условиях комплекса НБК-ОУ / Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко, К. О. Сущенко. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018. С. 64–67.

20. Аналіз нейтронної активності на периферії локалізованих в НБК-ОУ накопичень паливовмісних матеріалів / Р. Л. Годун, М. В. Савельєв, Є. Д. Висотський, К. О. Сущенко, І. С. Скітер. Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2020 : тези доповідей П'ятнадцятої Міжнародної науково-практичної конференції. Чернігів : ЧНТУ, 2020. С. 103–107.

21. Comprehensive analysis and interpretation of a neutron incident registered at the peripherals of nuclear dangerous fissile materials cluster in june 1990 / К. О. Sushchenko, R. L. Godun. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2021 (м. Славутич). С. 278–279.

22. Стан наукової проблеми щодо дослідження характеристик продуктів взаємодії розплаву ядерного палива з бетоном / К. О. Сущенко, А. В. Носовський. Nuclear Power and the Environment. 2023. Вип. 27, № 2. С. 30–43. URL: <https://doi.org/10.31717/2311-8253.23.2.4>
23. Statistical analysis of neutron activity, registered by the nuclear safety monitoring system (NSMS IAMS) NSC-SO / R. Godun, A. Doroshenko, A. Skorbun, E. Vysotsky, K. Sushchenko. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2018. С. 87.
24. Ядерная безопасность системы ОУ-НБК / Є. Д. Висотський, Р. Л. Годун, М. В. Савельєв, А. А. Дорошенко, К. О. Сущенко. Міжнародна конференція "Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища" INUDECO 2020. С. 60–63.
25. Оцінка можливості виникнення критичності у великому вертикальному потоці паливовмісних матеріалів на об'єкті «Укриття» / К. О. Сущенко, Є. Д. Висотський, М. В. Савельєв, К. Веттер. Ядерна та радіаційна безпека. 2025. № 2(106). С. 40–49. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2\(106\).04](https://doi.org/10.32918/nrs.2025.2(106).04)
26. Examination of relocated fuel debris adjacent to the lower head of the TMI-2 reactor vessel / D. W. Akers, S. M. Jensen, B. K. Schuetz. United States, 1994. doi: 10.2172/10140801.
27. Изменение размножающих свойств реактора типа ВВЭР-1000 при прохождении запроектной аварии с расплавлением активной зоны / Н. В. Артамонов, А. С. Сидоров. ВАНТ. Сер. «Обеспечение безопасности АЭС». 2012. Вип. 31. С. 102–111.
28. Analysis of Fuel Criticality during Severe Accidents / I. Bilodid, J. Duspiva. Ядерна та радіаційна безпека. 2015. Вип. 4(68). С. 3–8.
29. Accomplishments and challenges of the severe accident research / B. R. Sehgal. Nuclear Engineering and Design. 2001. Vol. 210. P. 79–94.

30. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС / И. В. Казачков. Ядерная и радиационная безопасность. 2003. № 1. С. 25–34.
31. Проблема охлаждения расплава кориума в контейнменте в пассивных системах защиты от тяжелых аварий. Часть 1 / И. В. Казачков. Ядерная и радиационная безопасность. 2009. № 1. С. 34–41.
32. Высокотемпературные процессы с расплавами кориума в проблеме безопасности АЭС с ВВЭР : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.03 / С. В. Бешта. 2004.
33. Разработка проблемно-ориентированных подходов к обеспечению безопасности новых проектов АЭС с ВВЭР : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.03 / В. В. Безлепкин. 2003.
34. Моделювання процесів плавлення-солідіфікації при охолодженні розплаву коріуму зануреними легкоплавкими блоками : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / Калванд Алі. 2013. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/3334> (дата звернення: 11.06.2026).
35. Локализация и охлаждение кориума в запроектной аварии водо-водяного энергетического реактора при разрушении активной зоны : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.03 / А. С. Сидоров. 2004.
36. Разработка методики расчета теплообмена в задаче локализации расплава активной зоны ВВЭР в подреакторной ловушке при тяжелой аварии на АЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.03 / Чинь Кыонг. 2001.
37. Обоснование ядерной безопасности устройства локализации расплава для АЭС с реакторами типа ВВЭР / Н. В. Артамонов, А. С. Сидоров. Ядерная энергетика. 2012. № 3. С. 23–31.
38. Взаимодействие расплава активной зоны с материалами реакторной установки в проблеме тяжелой аварии ВВЭР : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.03 / В. С. Жданов. 2008.
39. Assessment and Development of Molten Corium Concrete Interaction / C. Spengler, H.-J. Allelein, M. Cranga, F. Duval, J.-P. Van Dorsselaere. Forum Eurosafe. Bruxelles (Belgique), 7–8 November 2005.

40. The COMET-L3 experiment on long-term melt. Concrete interaction and cooling by surface flooding / H. Alsmeyer, T. Cron, B. Fluhrer, G. Messemer, A. Miassoedov, S. Schmidt-Stiefel, T. Wenz. Germany, 2007. P. 110.
41. State-of-the-art report on molten corium concrete interaction and ex-vessel molten core coolability : NEA/CSNI/R(2016)15 / Nuclear Energy Agency of the OECD. 2016. 434 p.
42. The Evaluation Status of Reactor Core Damage at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station. Units 1 to 3: November 30, 2011 / TEPCO. URL: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/images/handouts_111130_04-e.pdf (дата звернення: 14.12.2023).
43. 10 Years of Fukushima Part 3: Dismantling / GRS gGmbH. URL: <https://www.grs.de/en/news/10-years-fukushima-part-3-dismantling> (дата звернення: 14.12.2023).
44. Расчеты размножающих свойств гомогенных смесей : отчет ИАЭ им. И. В. Курчатова / Э. Б. Бродкин, А. В. Хрусталеv. Москва, 1990. № 30/1-1030-90.
45. Разработка сценария и методики оценки последствий СЦР при обращении с ТСМ и попадании воды : техн. справка исх. № 29-28/33 от 27.06.96. ФЭИ. Обнинск, 1996. 22 с.
46. Анализ ядерной безопасности объекта "Укрытие" : отчет / ИЯЭ АН БССР. Минск, 1990. 80 с. Инв. № 1449.
47. Анализ текущей безопасности объекта «Укрытие» и прогнозные оценки развития ситуации», отчет МНТЦ, арх. №1032-ОУ, Чернобыль, 1996, 272с.
48. Отчет о состоянии безопасности объекта «Укрытие». ЧАЭС, 2002. 194 с.
49. Nuclear Fuel in the Destroyed 4th Unit of Chernobyl NPP / V. M. Pavlovych. Recent Research Activities about the Chernobyl NPP Accident in Belarus, Ukraine and Russia. Kyoto University Research Institute. Osaka, Japan, 2002. (KURRI-KR-79, July 2002).
50. Разработка методик и способов контроля состояния подкритичности топливосодержащих материалов, экспериментальное исследование эффективности критериев раннего обнаружения и технологии локального подавления

подкритических аномалий : звіт про НДР / ІПБ АЕС НАН України ; кер. А. А. Боровой. Чорнобиль, 2001.

51. Анализ и оценка «Технического обоснования ядерной безопасности объекта «Укрытие». Поведение критичности TCM на объекте «Укрытие» : отчет GRS по проекту SR – 2075/8 –1, рабочий пункт 1, GRS –А – 2414 / Б. Гмаль, Е. Ф. Мозер, Г. Претш, У. Кваде. 1997. 44 с.

52. Некоторые вопросы ядерной безопасности объекта "Укрытие" / О. Я. Верцимаха, В. А. Павлович, В. А. Бабенко и др. Ядерная и радиационная безопасность. 1998. Т. 1, вып. 2. С. 52–67.

53. Техническое обоснование ядерной безопасности объекта «Укрытие» / С. Т. Беляев, А. А. Боровой, В. Г. Волков и др. ИАЭ. М., 1990. 127 с.

54. Модель распределения плотности потока нейтронов в объеме топливосодержащих материалов помещения 305/2 объекта «Укрытие» / В. Н. Павлович, В. А. Бабенко, Е. Д. Высотский и др. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2005. Вип. 2. С. 55–60.

55. Моделирование массовых и геометрических параметров скопления топливосодержащих материалов в юго-восточной части помещения 305/2 разрушенного 4-го блока ЧАЭС / В. А. Бабенко, Е. Д. Высотский, А. А. Ключников и др. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2008. Вип. 9. С. 36–43.

56. Исследование ядерно-физических параметров и разработка методов и способов контроля и управления подкритичностью в зонах критмассового риска : звіт про НДР (заключ.) / ІПБ АЕС НАН України ; відп. викон. Є. Д. Высотський. Чорнобиль, 2010. 127 с. Інв. № 3998.

57. Разработка мероприятий, повышающих ядерную, радиационную и экологическую безопасность объекта «Укрытие» и нового безопасного конфайнмента. Т. 1 : Исследование нейтронно-физических и физико-химических характеристик ядерно-опасных скоплений и разработка способов подавления их параметров критичности : звіт про НДР (заключ.) / ІПБ АЕС НАН України ; кер. А. В. Носовський ; викон.: В. О. Каштанов та ін. Чорнобиль, 2015. 127 с. Інв. № 4021.

58. Заключение экспертной комиссии о причинах аномального события в пом. 304/3 объекта «Укрытие» в июле 1990 г. / ИБРАЭ РАН. М., 1992. 67 с.
59. Нейтронно-физические характеристики ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, В. Н. Щербин, В. Б. Шостак. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2009. Вип. 12. С. 93–102.
60. Ядерно-опасные скопления топливосодержащих материалов в разрушенном четвертом блоке Чернобыльской АЭС / Е. Д. Высотский, А. А. Ключников, А. С. Лагуненко и др. Радиохимия. 2011. Т. 53, № 2. С. 178–183.
61. Определение величин параметров модели, описывающей ядерноопасное скопление топливосодержащих материалов в Объекте «Укрытие» / В. Б. Шостак, В. Н. Щербин, Е. Е. Олейник. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2014. Вип. 22. С. 98–109.
62. Лавообразные топливосодержащие массы 4-го блока Чернобыльской АЭС: топография, физико-химические свойства, сценарий образования / Э. М. Пазухин. Радиохимия. 1994. Т. 36, № 2. С. 78–99.
63. Динамика высокотемпературного взаимодействия аварийного ядерного топлива с конструкционными материалами РБМК / В. В. Гончар, А. В. Жидков. Проблемы Чорнобиля. 2002. Вип. 9. С. 25–33.
64. 25 років еволюції уявлень про паливовмісні матеріали об'єкта «Укриття»: сценарії їхнього утворення та фізичні міркування / О. В. Жидков. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2011. Вип. 16. С. 86–100.
65. Топливо в помещении 305/2 4-го блока ЧАЭС. Критмассовые зоны. Уточнение сценария образования лавообразных топливосодержащих материалов / Е. Д. Высоцкий, В. А. Краснов, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2007. Вип. 8. С. 77–85.
66. Лагуненко О. С. Пошук та дослідження прихованих скупчень паливовмісних матеріалів зруйнованого 4-го блока Чорнобильської АЕС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14 / ІПБ АЕС НАН України. Чорнобиль, 2008. 148 с.

67. Концептуальная модель «дóменной» версии образования ядерно-опасных скоплений на 4-м блоке ЧАЭС / Е. Д. Высоцкий, А. В. Михайлов. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2013. Вип. 21. С. 99–106.
68. К вопросу о материальных и энергетических источниках образования топливосодержащих материалов во время аварии на 4-м блоке ЧАЭС / А. В. Михайлов. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17, № 4. С. 354–363.
69. Скважины объекта «Укрытие». Обобщенные данные (альбом) : отчет о НИР / А. С. Лагуненко, Г. С. Скуридин ; ОЯРБ МНТЦ «Укрытие». Чернобыль, 1998. 117 с. Инв. № 09/05-66 від 09.06.98.
70. Оценка количества топлива в подаппаратном помещении 305/2 4-го энергоблока Чернобыльской АЭС / А. А. Боровой, А. С. Лагуненко, Э. М. Пазухин. Атомная энергия. 1998. Т. 84, вып. 4. С. 356–361.
71. Локализация ядерно-опасных скоплений топливосодержащих материалов / Е. Д. Высоцкий, А. А. Ключников, В. А. Краснов. Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2007. Вип. 7. С. 66–76.
72. The Chernobyl Shelter Implementation Plan / European Bank for Reconstruction and Development. URL: <https://www.ebrd.com/what-we-do/sectors/nuclear-safety/chernobyl-shelter-implementation.html#> > (2023, серпень, 29).
73. TACIS. Chornobyl Unit 4: Shelter Implementation Plan / TACIS Services DG IA, European Commission. Brussels, 1997. 150 p.
74. Technical Decision No. 3/01-OU «On development of an Integrated Automated Monitoring System of the Shelter» / Chornobyl NPP. Chornobyl, 2001. 5 p.
75. IAMS. Technical Design. Explanatory Note : IAMS-OVER-ZS-1103-E / NUTECO. 2005. 112 p.
76. Determination of new informative locations for detecting units. Well verification : technical report / Intersectoral Scientific and Technical Center (ISTC) «Shelter». Chornobyl, 2001. 131 p.
77. IAMS. Design Basis : NUTECO-03-DBP-001 / NUTECO. 2003. 145 p.

78. Методологія калібрування вимірювальних каналів «Експертної Дослідницької Системи» : ІПБ АЕС 01.00.00.00 МК / ІПБ АЕС НАН України. Чорнобиль, 2022. 30 с.
79. Робоча інструкція з експлуатації «Експертної Дослідницької Системи» в приміщеннях НБК-ОУ : РІ-ВЯРБ-21-19 / ІПБ АЕС НАН України. Чорнобиль, 2022. 24 с.
80. Звіт про створення та калібрування дослідницької експертної системи моніторингу основних параметрів скупчень ЯНМД, які розташовані всередині комплексу НБК-ОУ / ІПБ АЕС НАН України. Чорнобиль, 2020. 85 с.
81. Керівництво з експлуатації «Експертної Дослідної Системи» : ІПБ АЕС 01.00.00.00 КЕ / ІПБ АЕС НАН України. Чорнобиль, 2022. 54 с.
82. Аналіз динаміки потужності експозиційної дози γ -випромінювання та щільності потоку нейтронів в об'єкті «Укриття» Чорнобильської АЕС / М. В. Савельєв, О. В. Михайлов, Д. О. Сущенко. Nuclear Power and the Environment. 2022. № 3 (25). С. 24–32.
83. Смоляк С. А., Титаренко Б. П. Устойчивые методы оценивания. Москва : Статистика, 1980. 208 с.
84. Об исключении экстремальных значений / Я. С. Бродский, Н. Н. Быцан, В. М. Власенко. Завод. лаб. 1975. № 7. С. 847–849.
85. Tests for many outliers in an exponential sample / A. C. Kimber. Appl. Stat. 1982. Vol. 31, № 3. P. 263–271.
86. Dispersion of the neutron emission in U-235 fission / R. P. Feynman, F. de Hoffmann, R. Serber. J. Nucl. Energy. 1956. Vol. 3. P. 64.
87. Аналіз експериментальної статистики інтервалів. І. Еквівалентність статистики інтервалів і статистики відліків / О. А. Кучмагра, Г. І. Одинокін, А. Д. Скорбун, С. М. Стадник. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2017. Вип. 28. С. 93–99.
88. Pazuhin Ye. M. Lava-like fuel-containing masses of the 4th unit of the Chornobyl NPP: topography, physical and chemical properties, formation scenario, environmental impact : Doctor's thesis. Chornobyl, 1999. 293 p.

89. Analysis of the Shelter's current safety and predictive assessments of the situation development : technical report / Intersectoral Scientific and Technical Center (ISTC) «Shelter». Chornobyl, 1996. 272 p.

90. Боровой А. А., Велихов Е. П. Опыт Чернобыля (работы на объекте «Укрытие»). Ч. 1. Москва : НИЦ «Курчатовский институт», 2012. 168 с.

91. Изучение свойств самоподдерживающейся цепной ядерной реакции в топливосодержащих массах объекта «Укрытие» в случае переменной скорости поступления воды / В. А. Бабенко, В. Н. Павлович. Ядерна фізика та енергетика. 2018. Т. 19, № 1. С. 21–30.

92. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) об'єкта «Укриття» (моніторинг паливовмісних матеріалів). Т. 1 : звіт про НДР / ІПБ АЕС НАН України ; кер. С. О. Паскевич. Чорнобиль, 2023. 182 с.

93. Широков С. В. Нестационарные процессы в ядерных реакторах : навч. посібник. Київ, 2002. 286 с.

94. Нейтронная активность скоплений лавообразных топливосодержащих материалов на 4-м блоке ЧАЭС / Е. Д. Высоцкий, Р. Л. Годун. Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобыля. 2015. Вип. 25. С. 108–114.

95. Наноразмерные поровые каналы как составляющая порового пространства лавообразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. А. Ключников, Е. Е. Олейник, П. Е. Пархомчук, Г. Ф. Чемерский, В. Н. Щербин. Проблемы безопасности атомных электростанций і Чернобыля. 2014. Вип. 22. С. 70–73.

96. Прогноз динамики нейтронной активности в зоне локализации потенциально ядерно-опасного скопления топливосодержащих материалов внутри Нового Безопасного Конфайнмента / Е. Д. Высоцкий, Р. Л. Годун, А. А. Дорошенко. XXV щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 16–20 квіт. 2018 р.) : тези доповідей. С. 86–87.

97. Анализ первой фазы аварийного процесса на четвертом энергоблоке Чернобыльской АЭС / Е. О. Адамов и др. Атомная энергия. 1988. Т. 64, вып. 1. С. 24–28.
98. Чернобыльская авария: дополнение к INSAG-1: INSAG-7 : доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности. Вена : МАГАТЭ, 1993. 110 с. (Серия изданий по безопасности ; № 75-INSAG-7). ISBN 92-0-400593-9.
99. Проведение расчетов и разработка технических предложений по методам влияния на подкритичность ядерно-опасных материалов объекта «Укрытие» : отчет о НИР (заключит.) / Ин-т радиозкологических проблем НАН Беларуси ; рук. Г. А. Шароваров. Минск, 1997. Инв. № 3708.
100. Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. Москва : Атомиздат, 1980. С. 48–54.
101. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) об'єкта «Укриття» (моніторинг паливовмісних матеріалів) : звіт про НДР (етап 2) / ІПБ АЕС НАН України ; кер. С. О. Паскевич. Чорнобиль, 2022. 167 с. № ДР 0122U200956.
102. Дослідження стану паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента та розробка методичних і технологічних підходів до їх кондиціювання (заключний). Дослідження впливу еволюції (деградації) структури розмножувального середовища скупчень ядерно-небезпечних матеріалів, що діляться, на рівень ядерної безпеки НБК-ОУ : звіт про НДР (заключ.) / ІПБ АЕС НАН України ; кер. С. О. Паскевич ; викон.: М. В. Савельєв та ін. Чорнобиль, 2020. Т. 2. 49 с. № ДР 0117U003058. Инв. № НДР-ВЯРБ-03-17.
103. Reactivity effects at the «recurrent» criticality in fuel-containing materials clusters / К. О. Sushchenko, Ye. D. Vysotskyi, M. V. Saveliev. Міжнародна конференція «Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища» INUDECO 2023 (м. Славутич, 27–28 квіт. 2023 р.). URL: <https://youtu.be/CM1sQG6T8gU?t=22457> (дата звернення: 11.06.2026).

104. Fuel-Containing Masses of Chernobyl Unit 4: Multiplying Properties and Neutron Characteristics / V. A. Babenko, L. L. Jenkovszky, V. N. Romanov et al. Nucl. Sci. Eng. 1999. Vol. 133, No. 3. P. 301–313.

105. Про можливість самопідтримної ланцюгової реакції поділу в об'єкті «Укриття» на теперішній час / В. М. Павлович, В. О. Бабенко. Ядерна фізика та енергетика. 2023. Т. 24, № 3. С. 239–246.

106. Техника и методы изучения нейтронно-физических характеристик топливосодержащих масс 4-го энергоблока ЧАЭС / С. Т. Беляев, Л. Н. Бондаренко, А. А. Боровой и др. Москва, 1991. 23 с. (Препринт / Ин-т атом. энергии им. И. В. Курчатова ; ИАЭ-5312/3).

107. Исследование размножающих свойств топливных масс 4-го блока ЧАЭС / В. А. Бабенко. Киев, 1997. 30 с. (Препринт / НАН Украины, Ин-т ядер. исслед. ; 97-1).

108. Использование программных кодов MCNP 4B и SCALE 4.4A для оценки критичности топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / Д. Г. Бобро, И. М. Хоменко. Научные и технические аспекты международного сотрудничества в Чернобыле / под ред. В. Н. Глыгало, А. В. Носовского. 3-е изд. Киев, 2001.

109. Использование программных кодов MCNP 4B и SCALE 4.4a для оценки критичности топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / Д. Г. Бобро, Е. В. Гарин, А. В. Носовский, И. М. Хоменко. Проблемы Чернобиля. Чернобыль, 2002. Вып. 10, ч. 1. С. 256–262.

110. Лаваобразные топливосодержащие материалы в бассейне-барботере и парораспределительном коридоре 4-го блока Чернобыльской АЭС / А. А. Боровой, А. А. Ключников, В. А. Краснов и др. Проблемы Чернобиля. 2001. Вып. 7. С. 181–193.

111. Изучение образцов лаваобразных топливосодержащих материалов, отобранных с различной глубины залегания лавы / Э. М. Пазухин, А. А. Боровой, А. С. Лагуненко, Ф. Н. Коломиец. Проблемы Чернобиля. 2002. Вып. 9. С. 66–75.

112. Многолетний мониторинг неорганизованных скоплений жидких радиоактивных отходов объекта «Укрытие» / А. А. Одинцов, В. Е. Хан, В. А. Краснов,

В. Н. Щербин. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2016. Вип. 27. С. 43–57. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pbaech_2016_27_8

113. Природа формирования наноразмерных поровых каналов лаваобразных топливосодержащих материалов объекта «Укрытие» / С. В. Габелков, А. А. Ключников, П. Е. Пархомчук, Г. Ф. Чемерский. Вопросы атомной науки и техники. 2015. № 2 (96). С. 77–83. (Сер. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение ; вып. 105).

114. Гончар В. В. и др. Исследование некоторых физических характеристик ЛПВМ объекта "Укрытие". *Объект "Укрытие" – 10 лет. Основные результаты научных исследований*. Чернобыль: МНТЦ "Укрытие", 1996. С. 173–182.

115. Жидков А. В. Топливосодержащие материалы объекта «Укрытие» сегодня: актуальные физические свойства и возможности прогнозирования их состояния. Проблемы Чернобиля. 2001. Вып. 7. С. 23–40.

116. Габелков С. В., Жиганюк І. В. Оновлена модель еволюції мікроструктури лавоподібних паливовмісних матеріалів 4-го блока Чорнобильської АЕС. Коричнева кераміка. *Український фізичний журнал*. 2021. Т. 66, № 4. С. 348–357.

URL: <https://doi.org/10.15407/ujpe66.4.348> (дата звернення: 21.03.2025).

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ПОТОЧНОГО І ПРОГНОЗОВАНОГО РІВНЯ ПІДКРИТИЧНОСТІ ЯДЕРНО- НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ

```

> restart : Digits := 14 :
phi00 := 46.455598; F := 0.25; C01 := 0.69; C02 := 0.52; aaa := 1.0e-8; Cx := 0; V1 := 3·10(-9); bkbeta
:= 0.0064;
phi01 := phi00·F; phi02 := phi00·(1 - F);
tx := (C01 - Cx) / V1; theta := xx → 1 / (1 + exp((-xx) / aaa)) :
#plot([theta], -15..15, 0..1.25, color = [red], thickness = 2);
C1 := t → C01 - t·V1 + (t - (tx - 1))·V1·theta(t - (tx - 1));
C2 := (t, V2) → C02 - t·V2;
bk1 := t → 1 - piecewise(0 ≤ C1(t) ≤ 0.060216, 1093.2·C1(t)3 - 155.13·C1(t)2 + 8.527·C1(t)
+ 0.2237, 0.060216 < C1(t) ≤ C01, -27.154·C1(t)6 + 69.862·C1(t)5 - 72.484·C1(t)4 + 38.865
·C1(t)3 - 11.375·C1(t)2 + 1.4991·C1(t) + 0.3571) :
bk2 := (t, V2) → 1 - (-19.308·C2(t, V2)4 + 31.382·C2(t, V2)3 - 19.639·C2(t, V2)2 + 5.2463·C2(t,
V2) + 0.4997) :
phibeta := phi02·bk2(0, V2) / bkbeta :
phi1 := t → phi01·bk1(0) / bk1(t) :
phi2 := (t, V2) → piecewise(0.0064 ≤ bk2(t, V2) ≤ 0.1, phi02·bk2(0, V2) / bk2(t, V2), 0 ≤ bk2(t, V2)
≤ 0.0064, phibeta·bkbeta·(0.0001 + (0.0064 + bk2(t, V2))·14) / (bk2(t, V2)·(0.0001 + (0.0064
+ bkbeta)·14))) :
phi := (t, V2) → phi1(t) + phi2(t, V2) :
fsolve(phi(12722568, V2) = 53.686424, V2);
1 - bk2(12722568, fsolve(phi(12722568, V2) = 53.686424, V2));
1 - bk1(12722568);
C2(12722568, fsolve(phi(12722568, V2) = 53.686424, V2));
C1(12722568);
phi(12722568, 2.0347521952064·10(-9));
phi1(12722568) / (phi(12722568, 2.0347521952064·10(-9)));

```

Рисунок А.1 – Робочий лист для визначення параметрів V2, C1, C2, phi, F на початку наступного розрахункового інтервалу

```

> restart : Digits := 14 :
phi00 := 46.455598; F := 0.25; C01 := 0.69; C02 := 0.52; aaa := 1.0e-8; Cx := 0;
V1 := 3 · 10(-9); bkbeta := 0.0064; V21 := 2.0347521952064 · 10(-9); V22 := 1.1555038906748 · 10(-9); V23
:= 6.2190191510574 · 10(-10); V24 := 3.076109343056 · 10(-10); V25 := 2.8151378920896 · 10(-10);
V26 := 2.8151378920896 · 10(-10);
phi01 := phi00 · F; phi02 := phi00 · (1 - F);
tx := (C01 - Cx) / V1; theta := xx → 1 / (1 + exp((-xx) / aaa)) :
#plot([theta], -15 .. 15, 0 .. 1.25, color = [red], thickness = 3) :
C1 := t → C01 - t · V1 + (t - (tx - 1)) · V1 · theta(t - (tx - 1));
plot([C1(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = C1, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
C2 := t → C02 - t · V21 + (t - 12722568) · (V21 - V22) · theta(t - 12722568) + (t - 26967424) · (V22 - V23)
· theta(t - 26967424) + (t - 48264316) · (V23 - V24) · theta(t - 48264316) + (t - 87267144) · (V24 - V25)
· theta(t - 87267144) + (t - 131745336) · (V25 - V26) · theta(t - 131745336) :
plot([C2(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = C2, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
bk1 := t → 1 - piecewise(0 ≤ C1(t) ≤ 0.060216, 1093.2 · C1(t)3 - 155.13 · C1(t)2 + 8.527 · C1(t) + 0.2237,
0.060216 < C1(t) ≤ C01, -27.154 · C1(t)6 + 69.862 · C1(t)5 - 72.484 · C1(t)4 + 38.865 · C1(t)3
- 11.375 · C1(t)2 + 1.4991 · C1(t) + 0.3571) :
plot([1 - bk1(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = K1, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
bk2 := t → 1 - (-19.308 · C2(t)4 + 31.382 · C2(t)3 - 19.639 · C2(t)2 + 5.2463 · C2(t) + 0.4997) :
plot([1 - bk2(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = K2, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
phibeta := phi02 · bk2(0) / bkbeta :
phi1 := t → phi01 · bk1(0) / bk1(t) :
phi2 := t → piecewise(0.0064 ≤ bk2(t) ≤ 0.1, phi02 · bk2(0) / bk2(t), 0 ≤ bk2(t) ≤ 0.0064, phibeta · bkbeta · (0.0001
+ (0.0064 + bk2(t)) · 14) / (bk2(t) · (0.0001 + (0.0064 + bkbeta) · 14))) :
phi := t → phi1(t) + phi2(t) :
plot([phi1(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = phi1, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
plot([phi2(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = phi2, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
plot([phi(t)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title = phi, titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
plot([((1 - bk2(t)) - (1 - bk2(t - 1))) / (bkbeta)], t = 0 .. 191879736, color = [red], thickness = 3, title =  $\frac{dK}{dt}$ ,
titlefont = [TIMES, BOLDITALIC, 18]);
phi(191879736);
C1(191879736);
C2(191879736);
1 - bk1(191879736);
1 - bk2(191879736);
phi1(191879736) / phi(191879736);

```

Рисунок А.2 – Математична модель для оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС, реалізована в програмному коді Maple

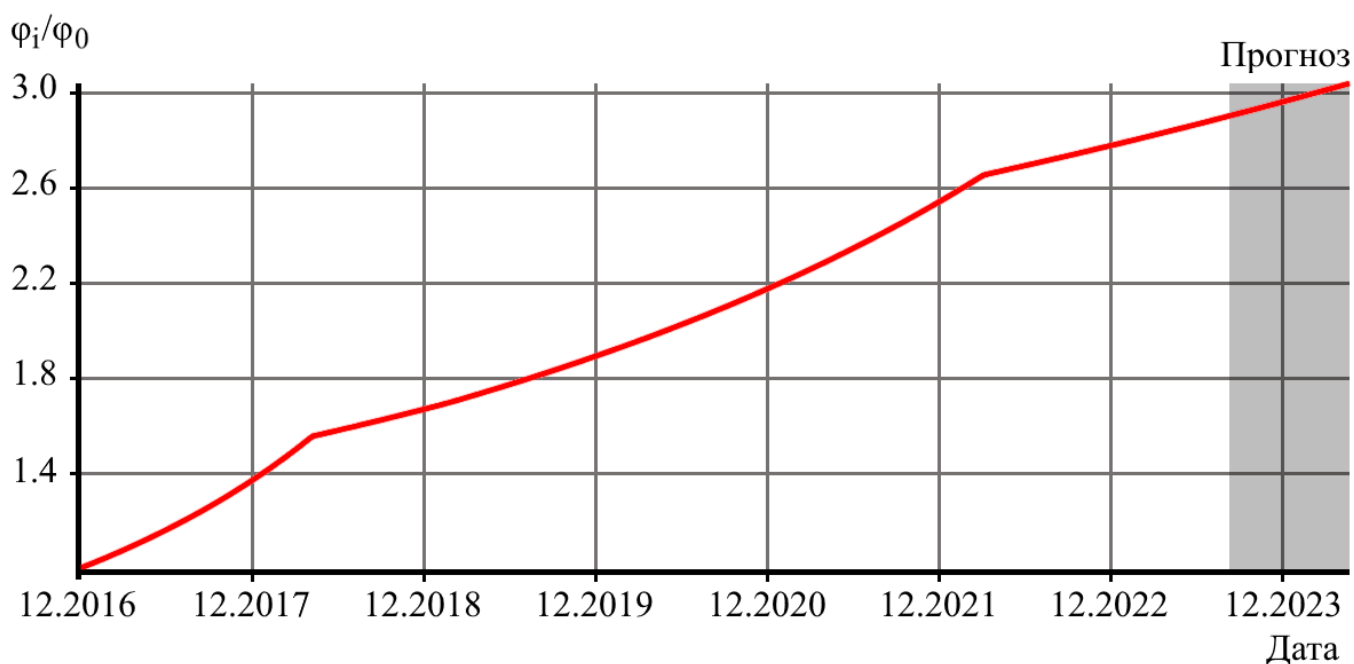


Рисунок А.3 – Поточні та прогнозні оцінки ЩПН (відкоригованої), що реєструються БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

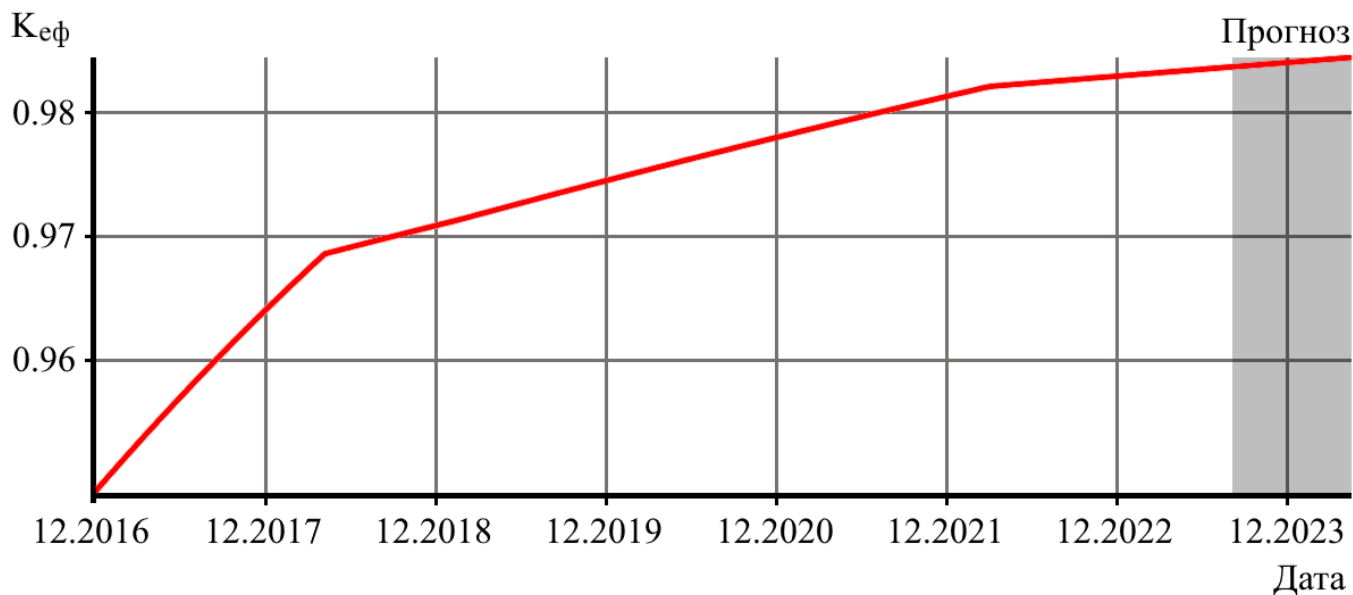


Рисунок А.4 – Поточні та прогнозні оцінки K_{ef} ЯНС, розраховані по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

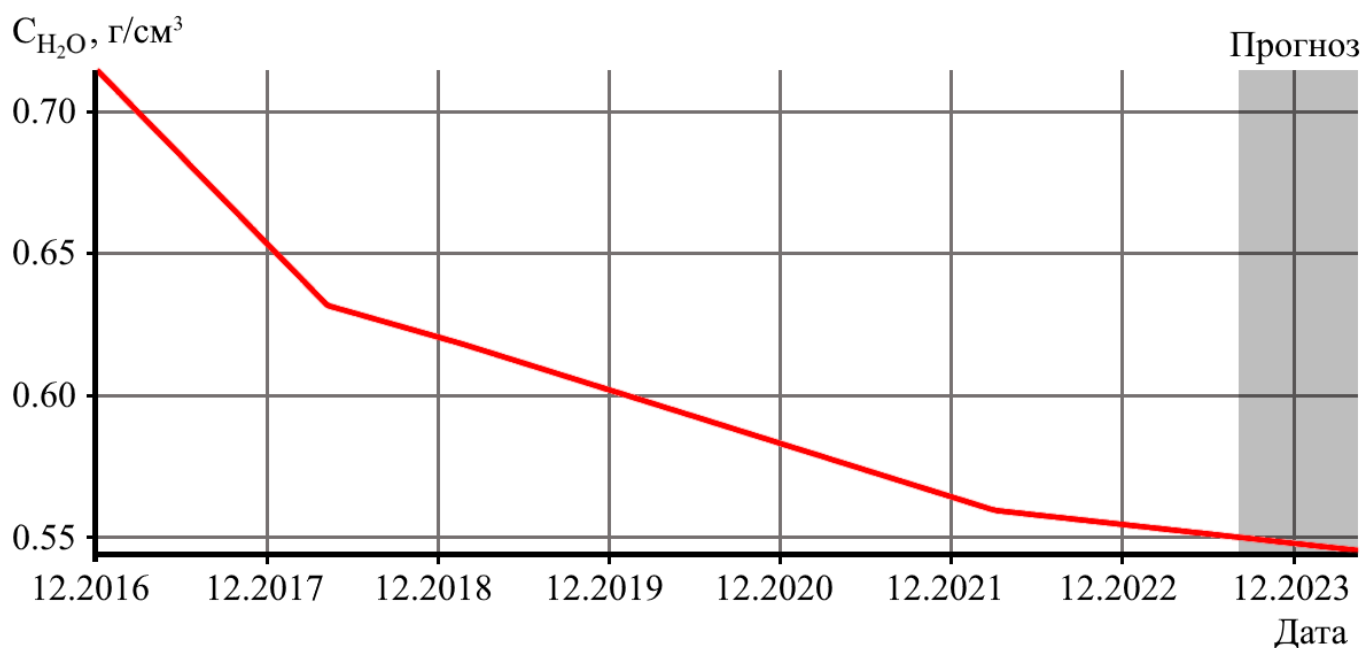


Рисунок А.5 – Поточні та прогнозні оцінки об’ємної густини води в шарі ПВМ з високою концентрацією палива, розраховані по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

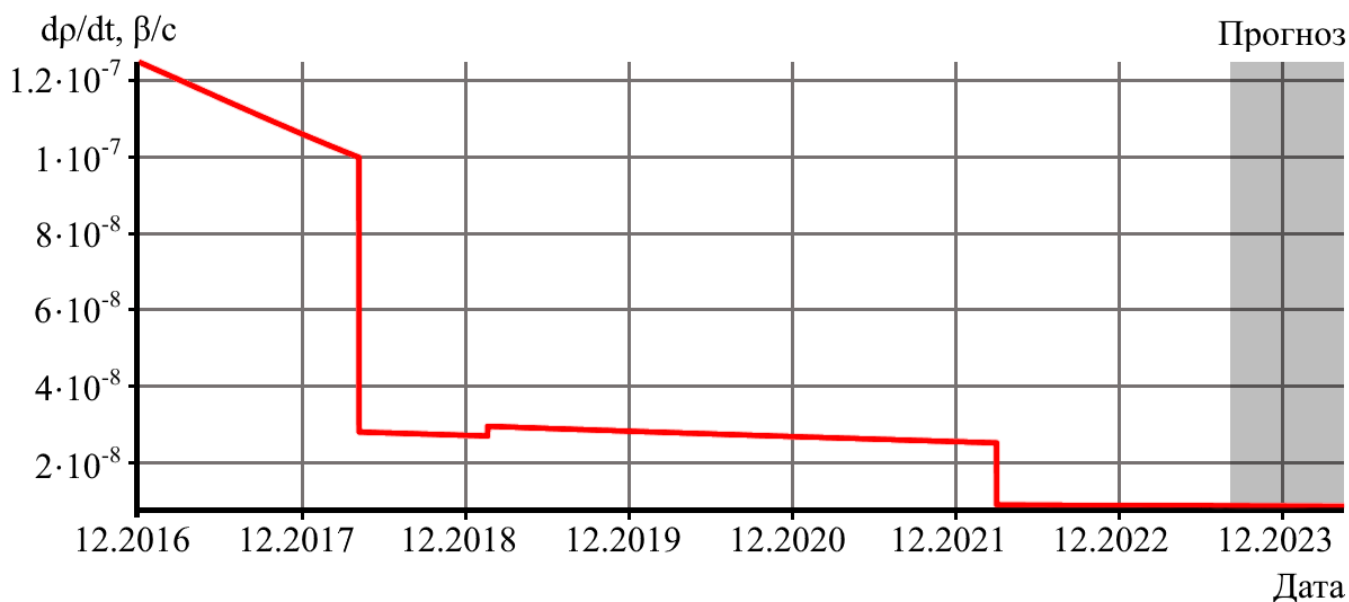


Рисунок А.6 – Поточні та прогнозні оцінки швидкості введення позитивної реактивності, розраховані по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

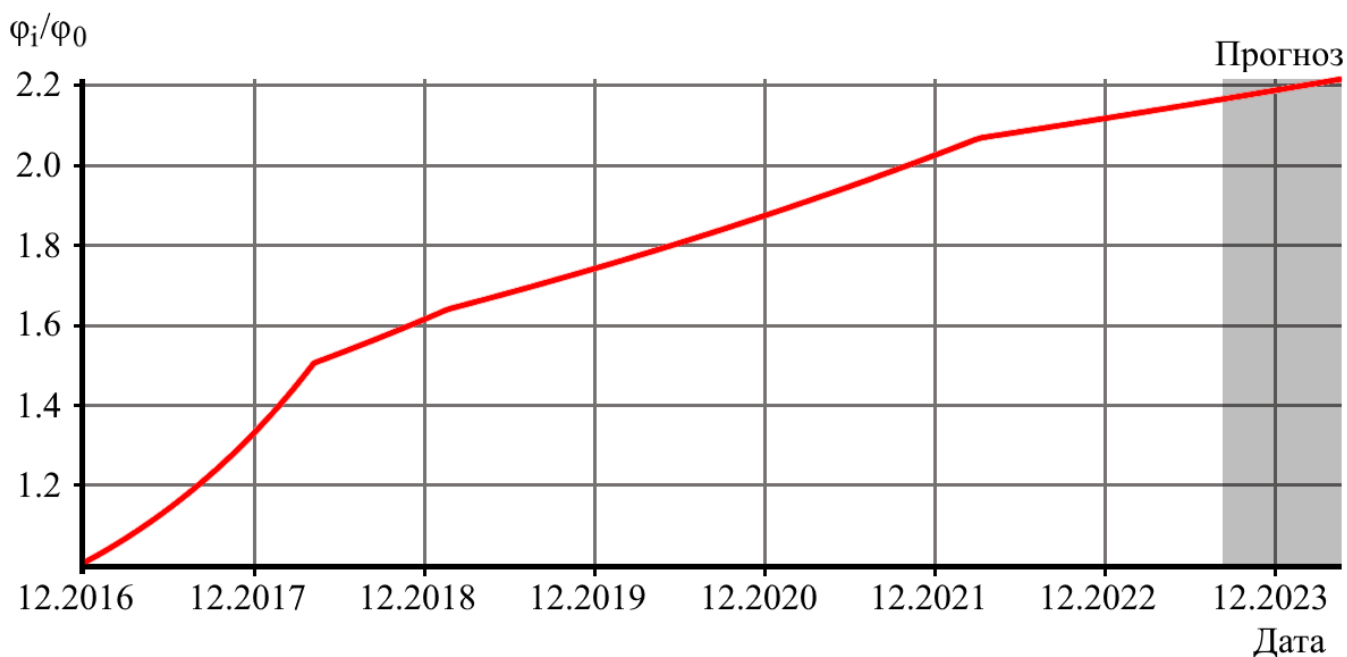


Рисунок А.7 – Поточні та прогнозні оцінки ЩПН (не відкоригованої), що реєструються БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

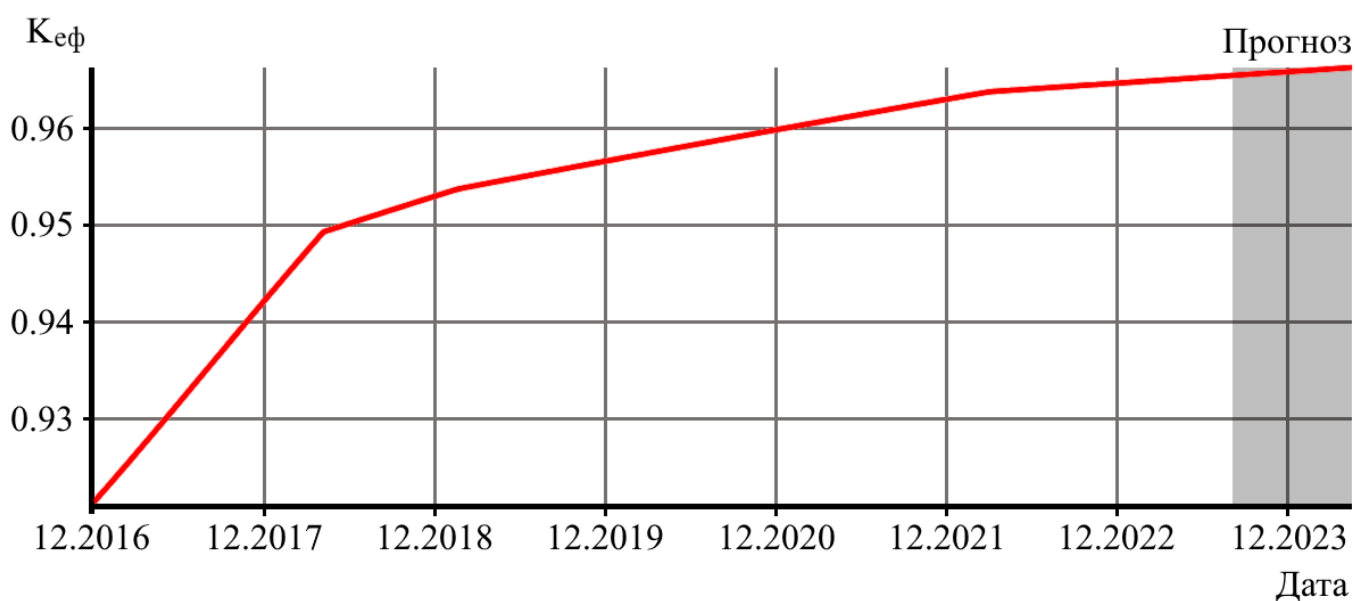


Рисунок А.8 – Поточні та прогнозні оцінки K_{eff} ЯНС, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

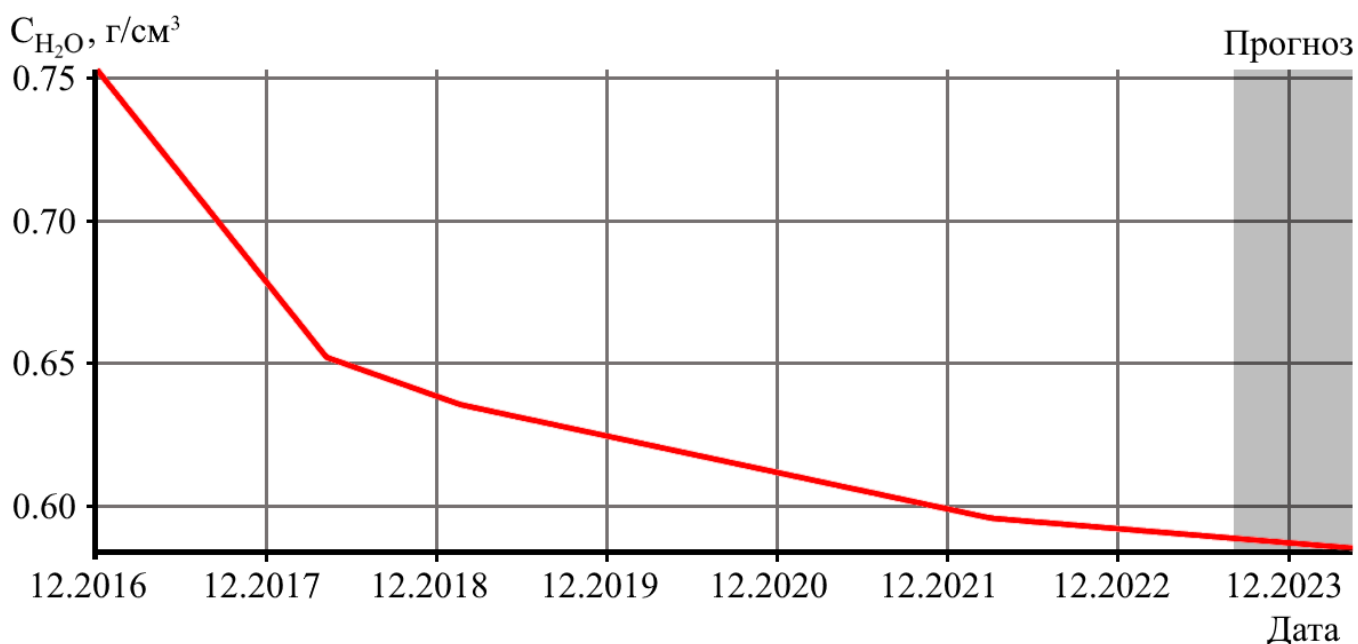


Рисунок А.9 – Поточні та прогнозні оцінки об’ємної густини води в шарі ПВМ з високою концентрацією палива, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

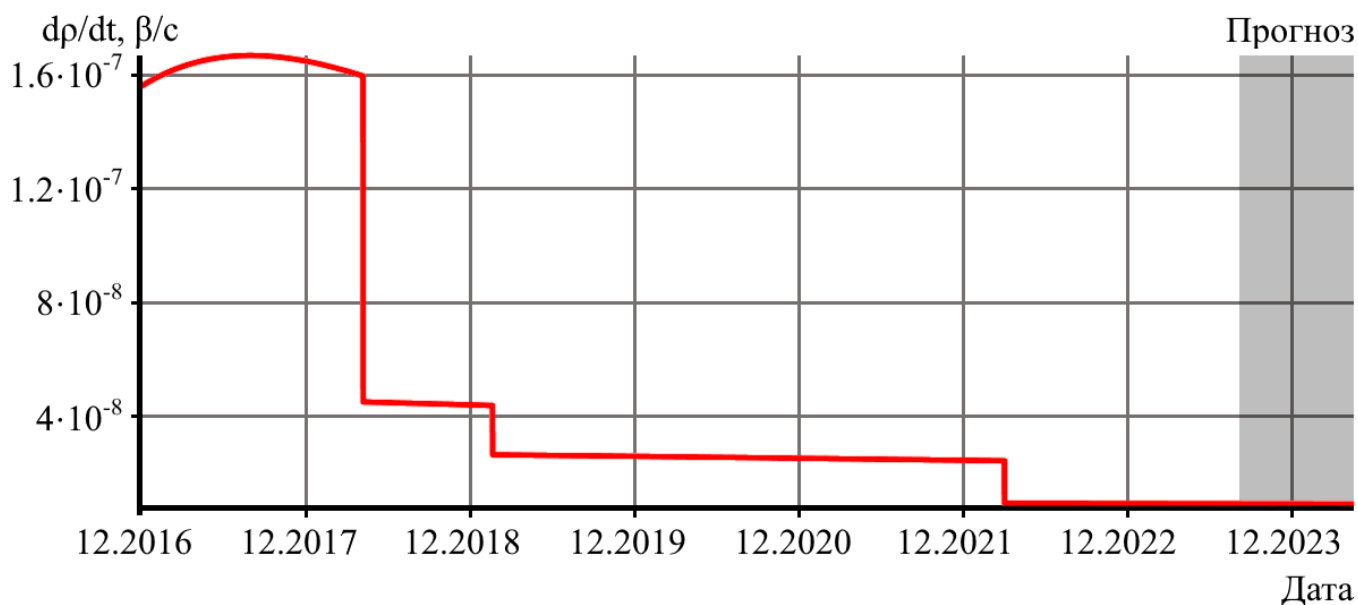


Рисунок А.10 – Поточні та прогнозні оцінки швидкості введення позитивної реактивності, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см; 13 т урану; збагачення 1,28% по урану; пористість 75,3 %

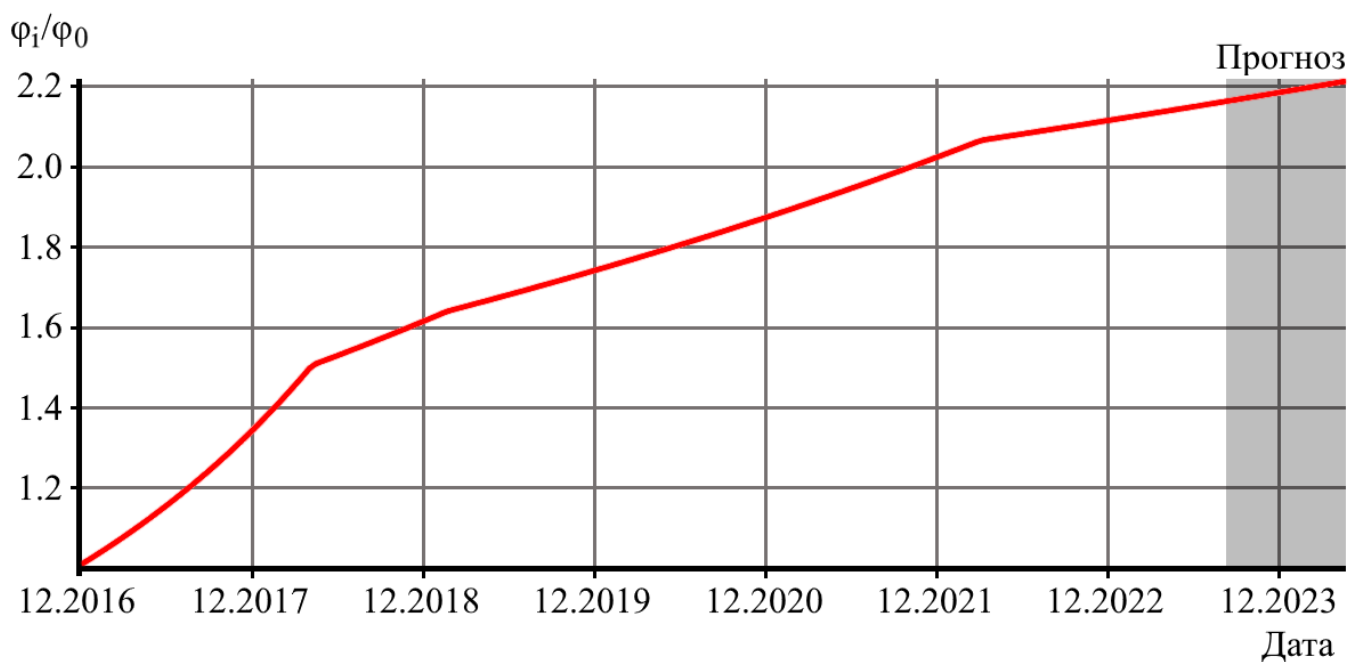


Рисунок А.11 – Поточні та прогнозні оцінки ЩПН (не відкоригованої), що реєструються БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

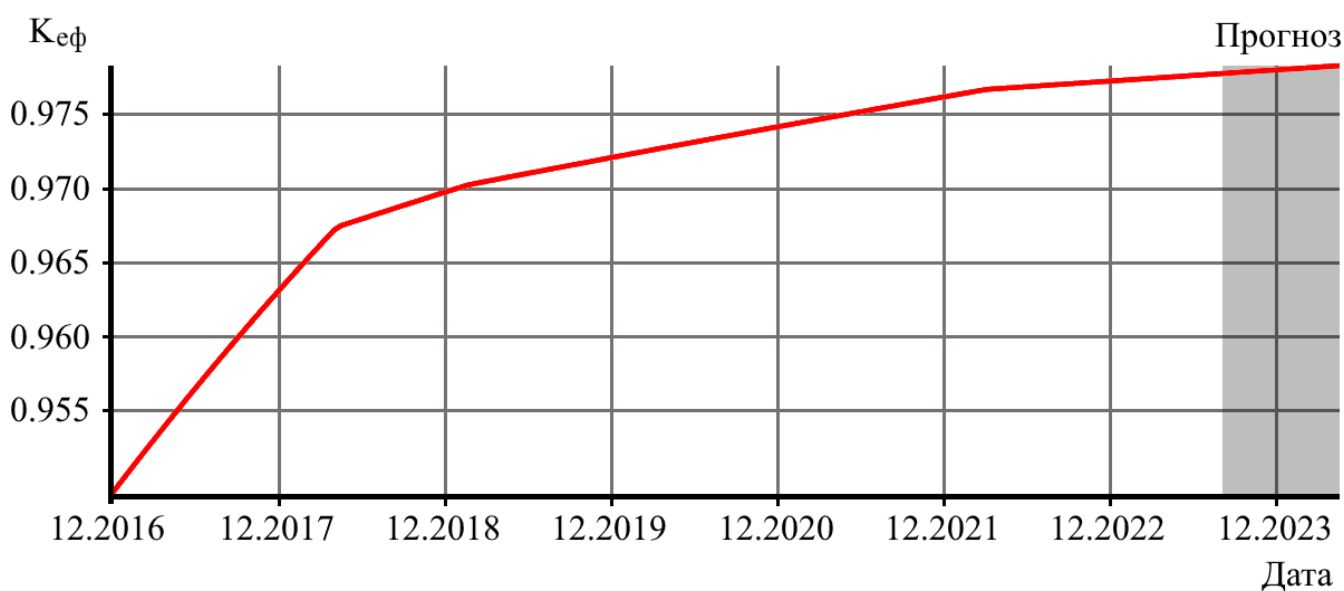


Рисунок А.12 – Поточні та прогнозні оцінки $K_{\text{эф}}$ ЯНС, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

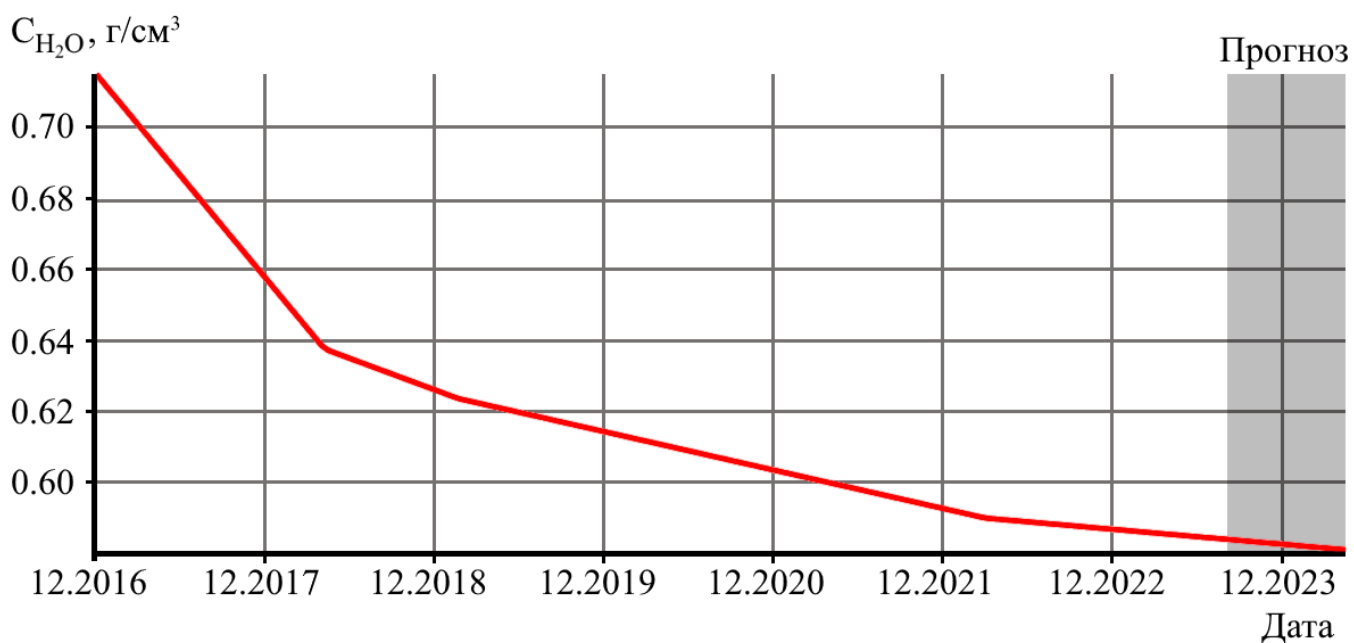


Рисунок А.13 – Поточні та прогнозні оцінки об'ємної густини води в шарі ПВМ з високою концентрацією палива, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

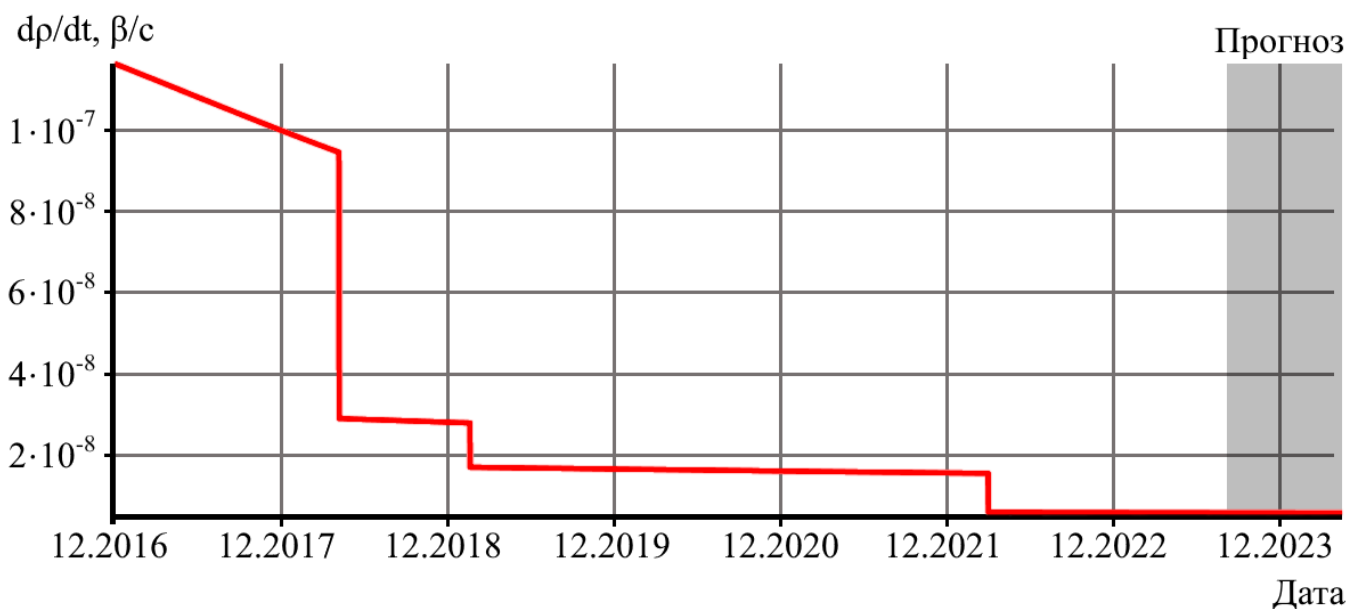


Рисунок А.14 – Поточні та прогнозні оцінки швидкості введення позитивної реактивності, розраховані по не відкоригованій динаміці ЩПН, що реєструється БД №6. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

Таблиця А.1 – Поточні і прогнознi значення нейтронно-фізичних характеристик ЯНС, що розраховані на інтервалах спостереження по відкоригованій експертом динаміці ЩПН, зареєстрованій БД №6 штатною системою СКЯБ ІАСК. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

№ інт.	ϕ_i/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	ϕ_{i+1}/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	F_{i+1}	$V_{\text{СЛі}}$, г/(см ³ ·с)	$V_{\text{СКі}}$, г/(см ³ ·с)	t_i , Днів (кінець інтервалу)	$K_{\text{ефКі}}$	$K_{\text{ефЛі}}$	$C_{\text{Кі}}$, г/см ³	$C_{\text{Лі}}$, г/см ³	$d\rho_i/dt$, β/с
1	1.0059	1.5591	0.0654	1E-09	1.954E-09	493 (09/04/2018)	0.9686	0.3186	0.6318	0.6474	1.10 E-7
2	1.5591	1.6989	0.0604	1E-09	5.468E-10	288 (22/01/2019)	0.9713	0.3236	0.6182	0.6225	2.74 E-8
3	1.6989	2.6555	0.0399	1E-09	5.984E-10	1138 (05/03/2022)	0.9821	0.3442	0.5593	0.5242	2.72 E-8
4	2.6555	2.8472	0.0377	1E-09	2.111E-10	411 (20/04/2023)	0.9833	0.3523	0.5518	0.4887	8.80 E-9
5	2.8472	3.0396	0.0357	1E-09	2.111E-10	366 (20/04/2024)	0.9844	0.3596	0.5451	0.4571	8.60 E-9

Таблиця А.2 – Поточні і прогнозні значення нейтронно-фізичних характеристик ЯНС, що розраховані на інтервалах спостереження по не відкоригованій динаміці ЩПН, зареєстрованій БД №6 штатною системою СКЯБ ІАСК, параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 4 см, 13 т урану, збагачення 1,28% по урану, пористість 75,3 %

№ інт.	ϕ_i/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	ϕ_{i+1}/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	F_{i+1}	$V_{\text{слі}}$, г/(см ³ ·с)	$V_{\text{скі}}$, г/(см ³ ·с)	t_i , Днів (кінець інтервалу)	$K_{\text{ефкі}}$	$K_{\text{ефлі}}$	$C_{\text{кі}}$, г/см ³	$C_{\text{лі}}$, г/см ³	dp_i/dt , β/с
1	1.0059	1.5057	0.0677	1E-09	2.368E-09	493 (09/04/2018)	0.9493	0.3186	0.6521	0.6474	1.62 E-7
2	1.5057	1.6406	0.0626	1E-09	6.687E-10	288 (22/01/2019)	0.9537	0.3236	0.6355	0.6225	4.43 E-8
3	1.6406	2.0687	0.0512	1E-09	4.046E-10	1138 (05/03/2022)	0.9637	0.3442	0.5957	0.5242	2.55 E-8
4	2.0687	2.1447	0.0500	1E-09	1.564E-10	411 (20/04/2023)	0.9651	0.3523	0.5901	0.4887	9.39 E-9
5	2.1447	2.2166	0.0489	1E-09	1.564E-10	366 (20/04/2024)	0.9662	0.3596	0.5852	0.4571	9.26 E-9

Таблиця А.3 – Поточні і прогнозні значення нейтронно-фізичних характеристик ЯНС, що розраховані на інтервалах спостереження по не відкоригованій динаміці ЩПН, зареєстрованій БД №6 штатною системою СКЯБ ІАСК. Параметри фізичної моделі: крок моделюючої решітки – 3 см, 15 т урану, збагачення 1,18% по урану, пористість 71,5 %

№ інт.	ϕ_i/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	ϕ_{i+1}/ϕ_0 , н/(см ² ·с)	F_{i+1}	$V_{\text{слі}}$, г/(см ³ ·с)	$V_{\text{скі}}$, г/(см ³ ·с)	t_i , Днів (кінець інтервалу)	$K_{\text{эфкі}}$	$K_{\text{эфлі}}$	$C_{\text{кі}}$, г/см ³	$C_{\text{лі}}$, г/см ³	$d\rho_i/dt$, β/с
1	1.0059	1.5057	0.0677	1E-09	1.818E-09	493 (09/04/2018)	0.9674	0.3186	0.6376	0.6474	1.04 E-7
2	1.5057	1.6406	0.0626	1E-09	5.601E-10	288 (22/01/2019)	0.9703	0.3236	0.6236	0.6225	2.85 E-8
3	1.6406	2.0687	0.0512	1E-09	3.425E-10	1138 (05/03/2022)	0.9767	0.3442	0.5899	0.5242	1.63 E-8
4	2.0687	2.1447	0.0500	1E-09	1.328E-10	411 (20/04/2023)	0.9776	0.3523	0.5852	0.4887	6.01 E-9
5	2.1447	2.2166	0.0489	1E-09	1.328E-10	366 (20/04/2024)	0.9783	0.3596	0.5810	0.4571	5.94 E-9

ДОДАТОК Б. РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ НЕЙТРОННО-ФІЗИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЯДЕРНО-НЕБЕЗПЕЧНОГО СКУПЧЕННЯ

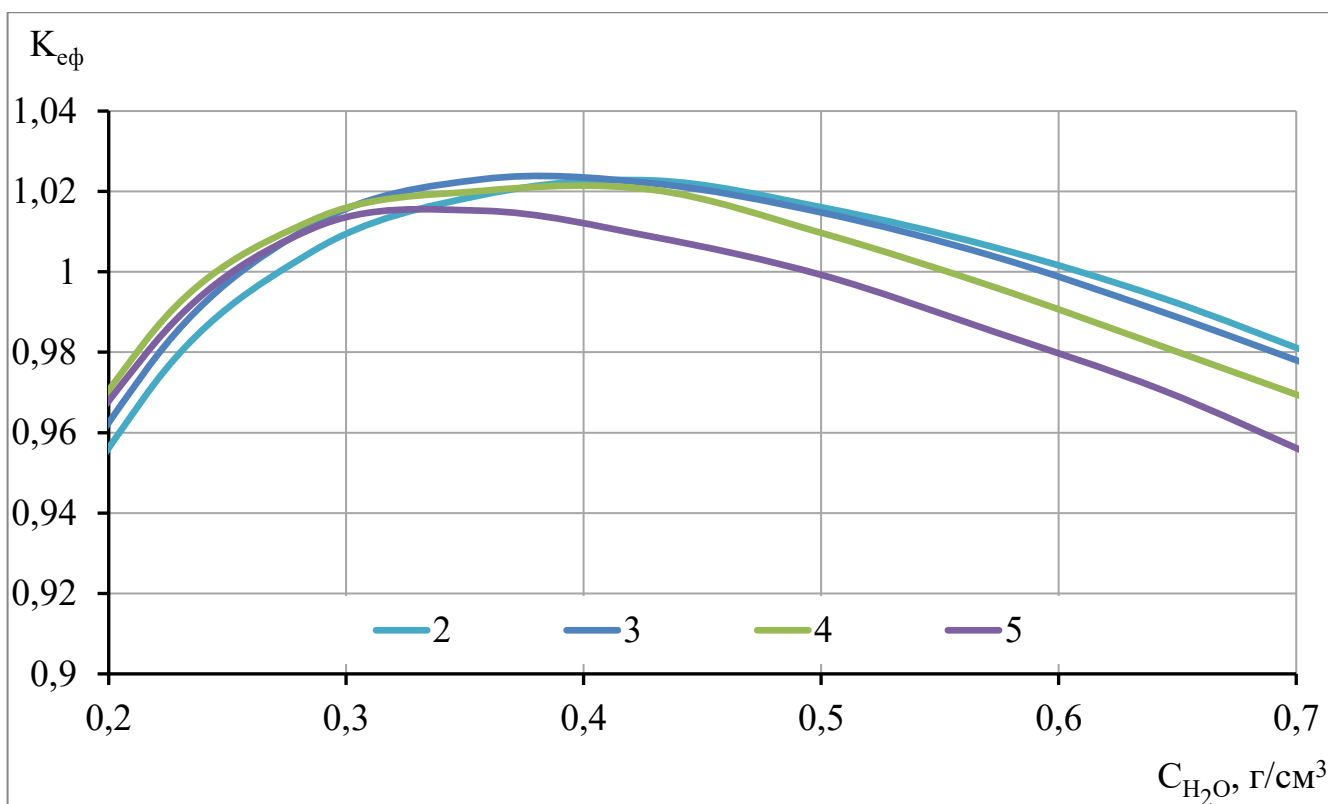


Рисунок Б.1 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,28% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,3 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 2 – 5 см

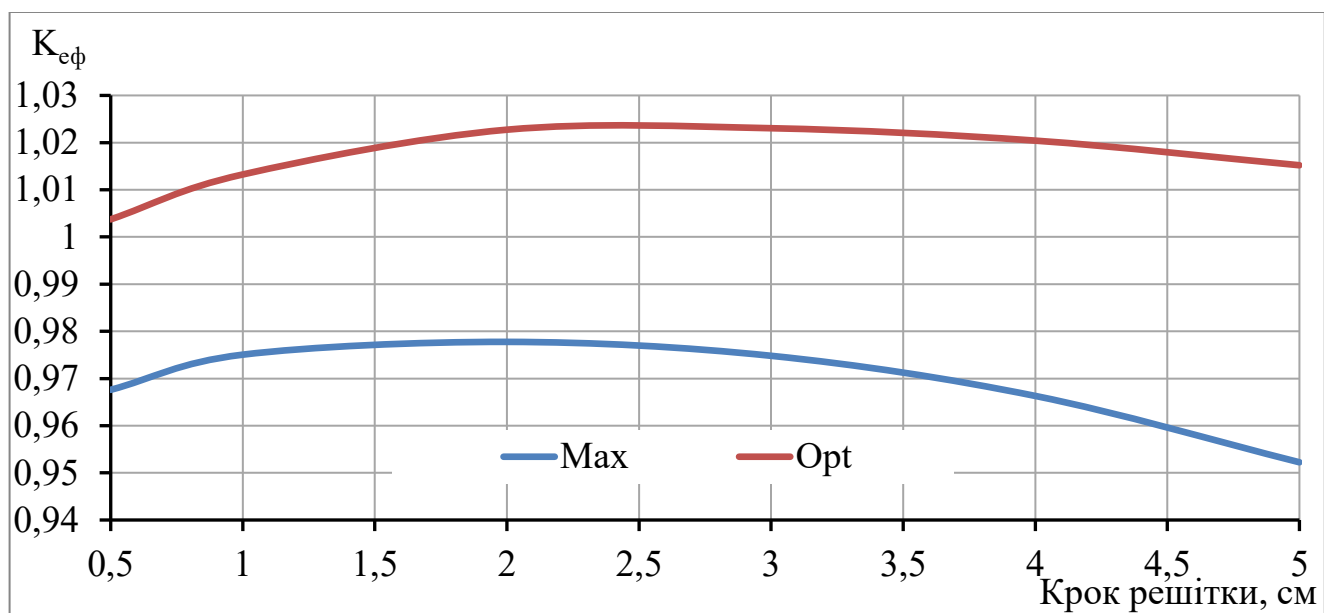


Рисунок Б.2 – Залежності K_{eff} від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,28% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,3 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

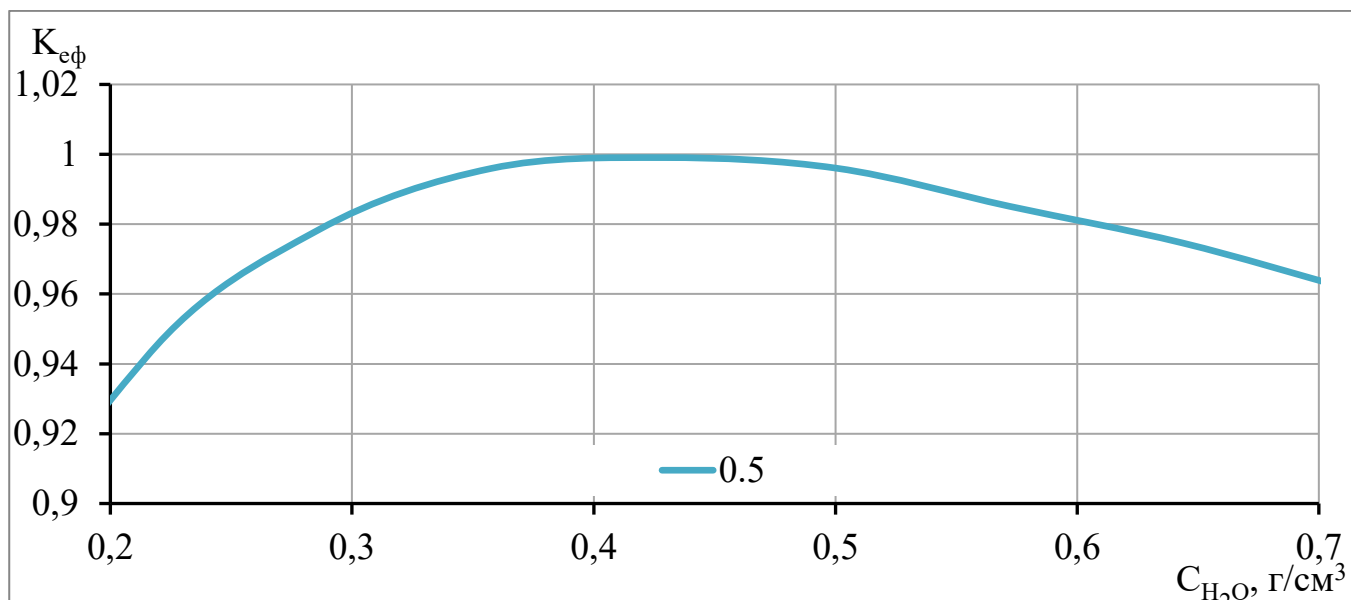


Рисунок Б.3 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,26% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,6 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 см

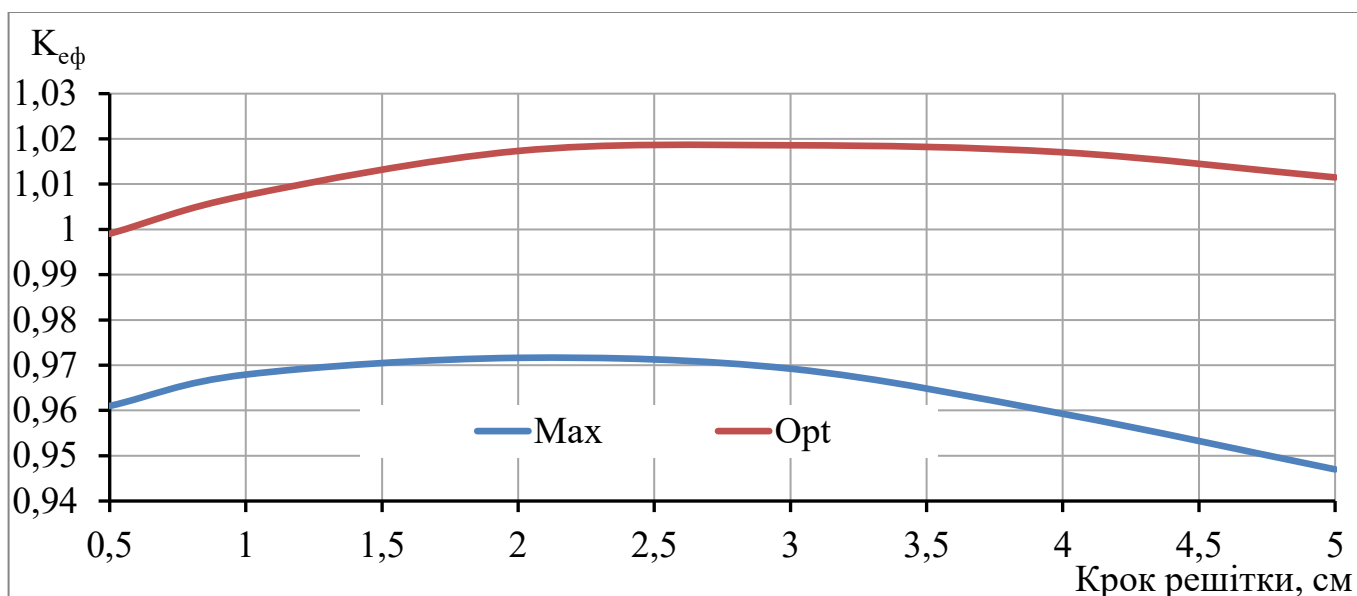


Рисунок Б.4 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,26% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,6 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

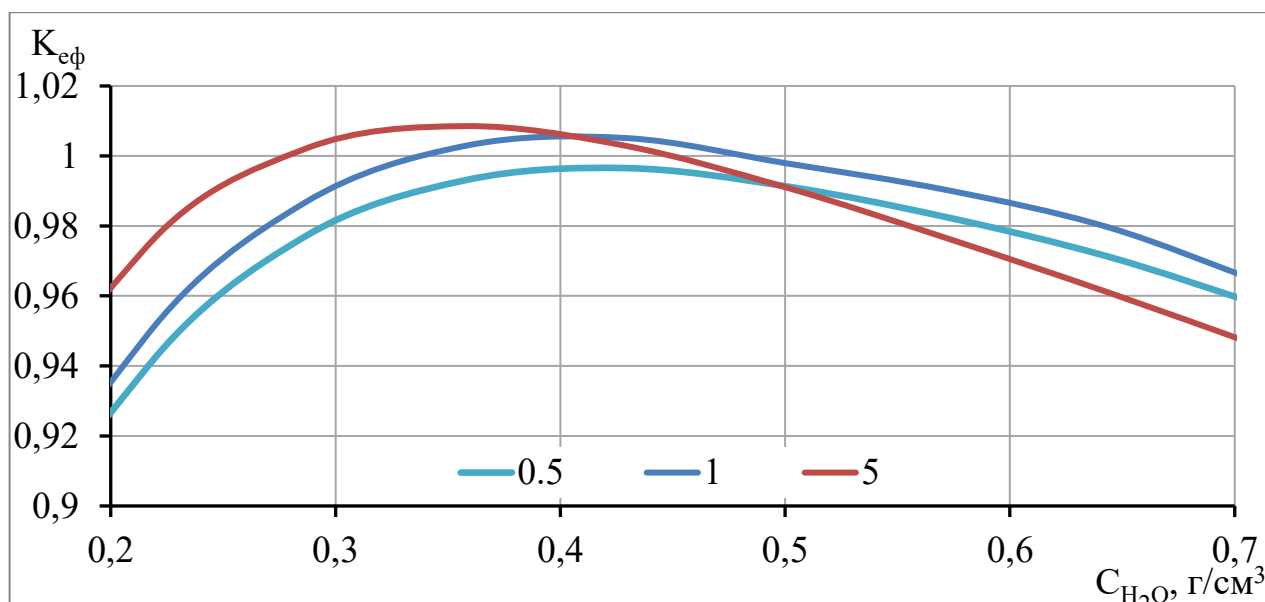


Рисунок Б.5 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,24% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,9 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5, 1, 5 см

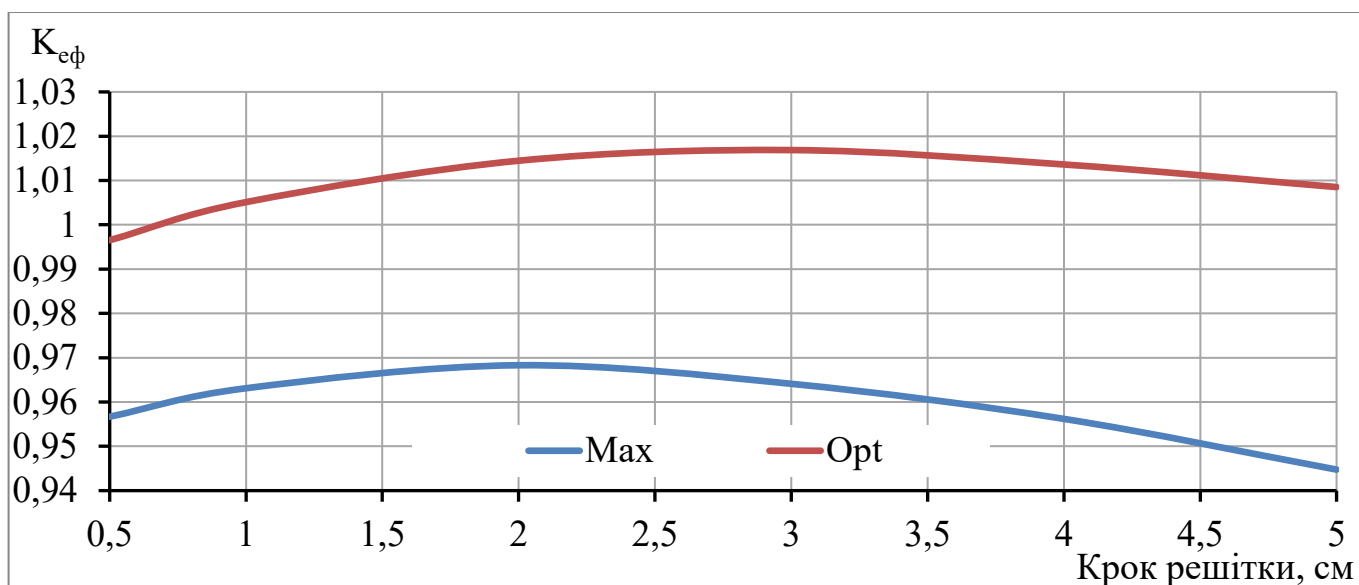


Рисунок Б.6 – Залежності K_{eff} від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,24% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,9 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

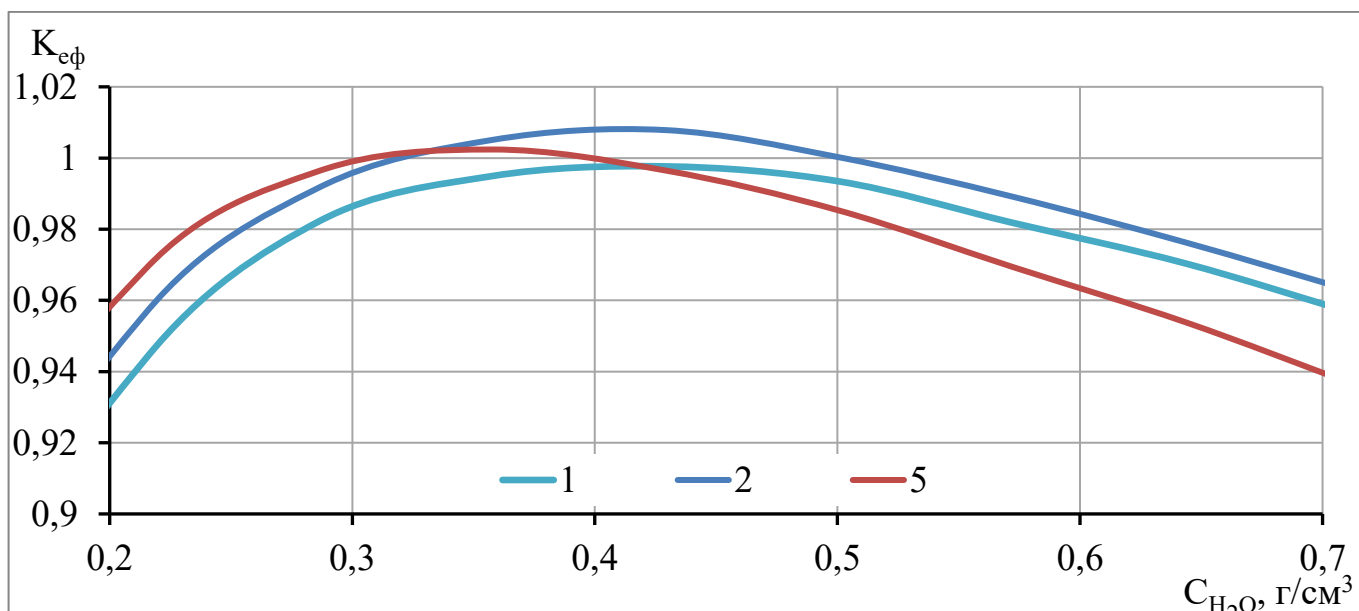


Рисунок Б.7 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,22% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,2 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 1, 2, 5 см

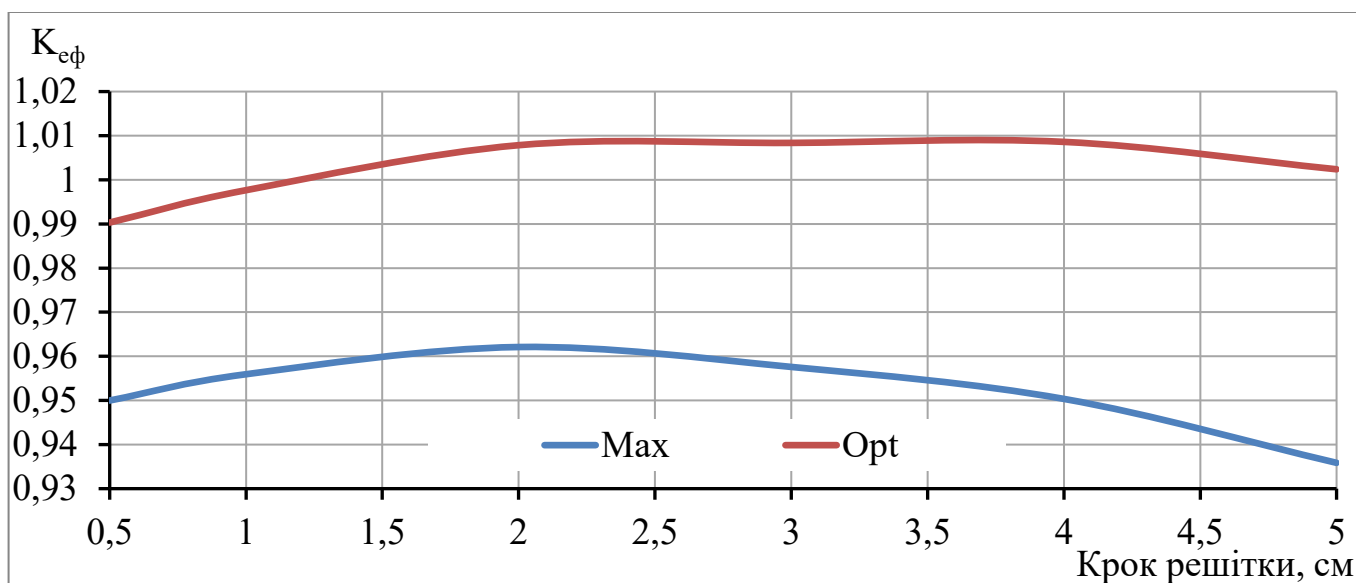


Рисунок Б.8 – Залежності K_{eff} від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,22% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,2 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

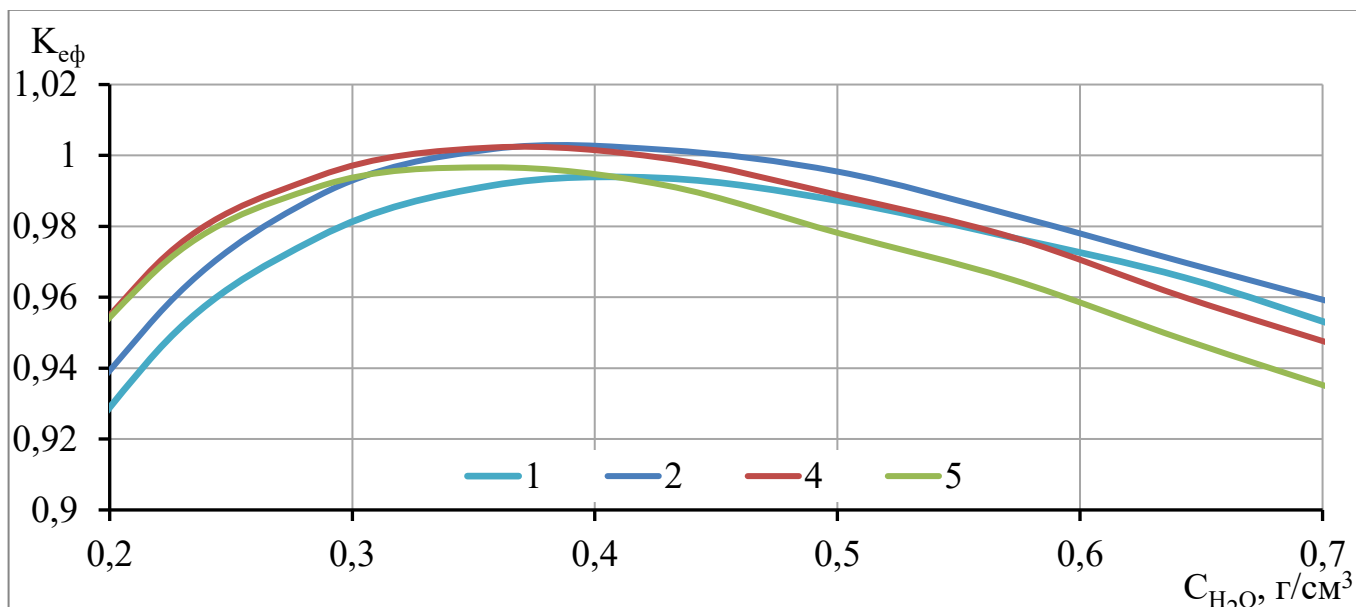


Рисунок Б.9 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,20% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,5 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 1, 2, 4, 5 см

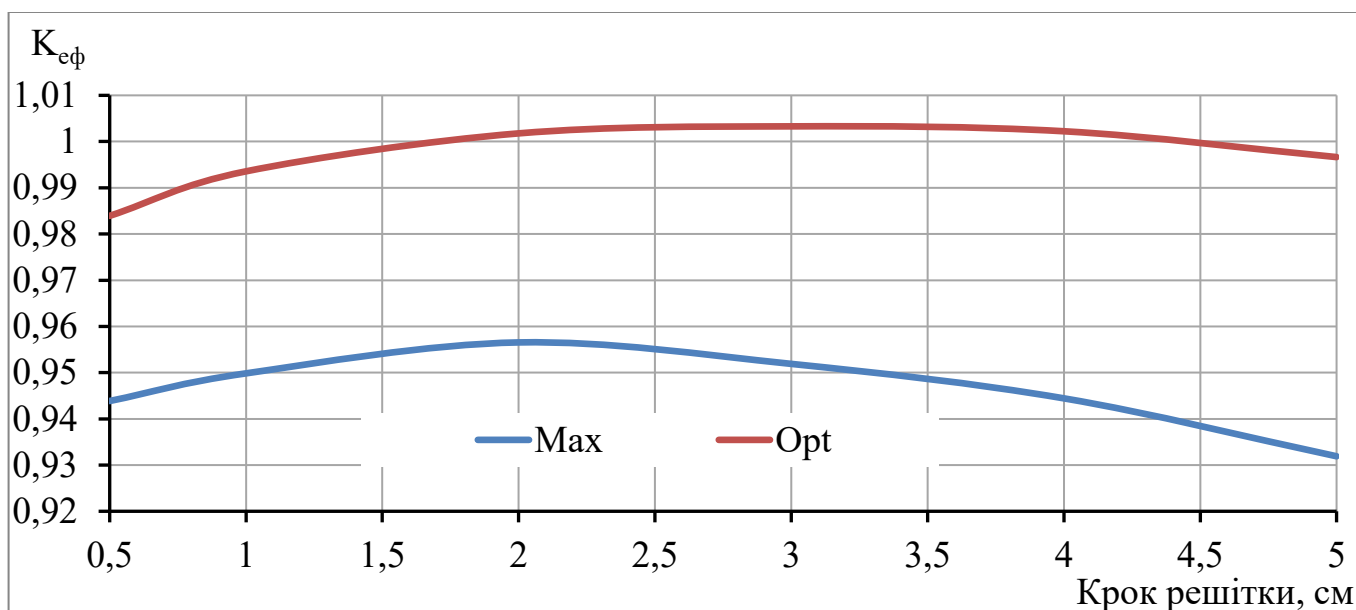


Рисунок Б.10 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,20% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,5 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

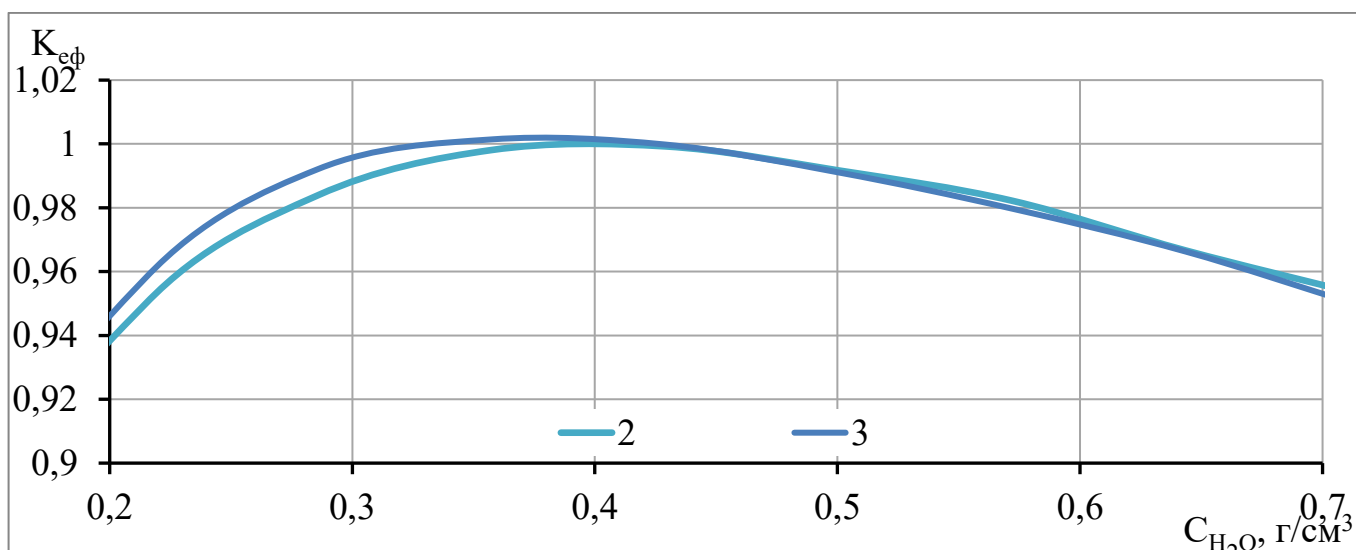


Рисунок Б.11 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,18% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,75 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 2, 3 см

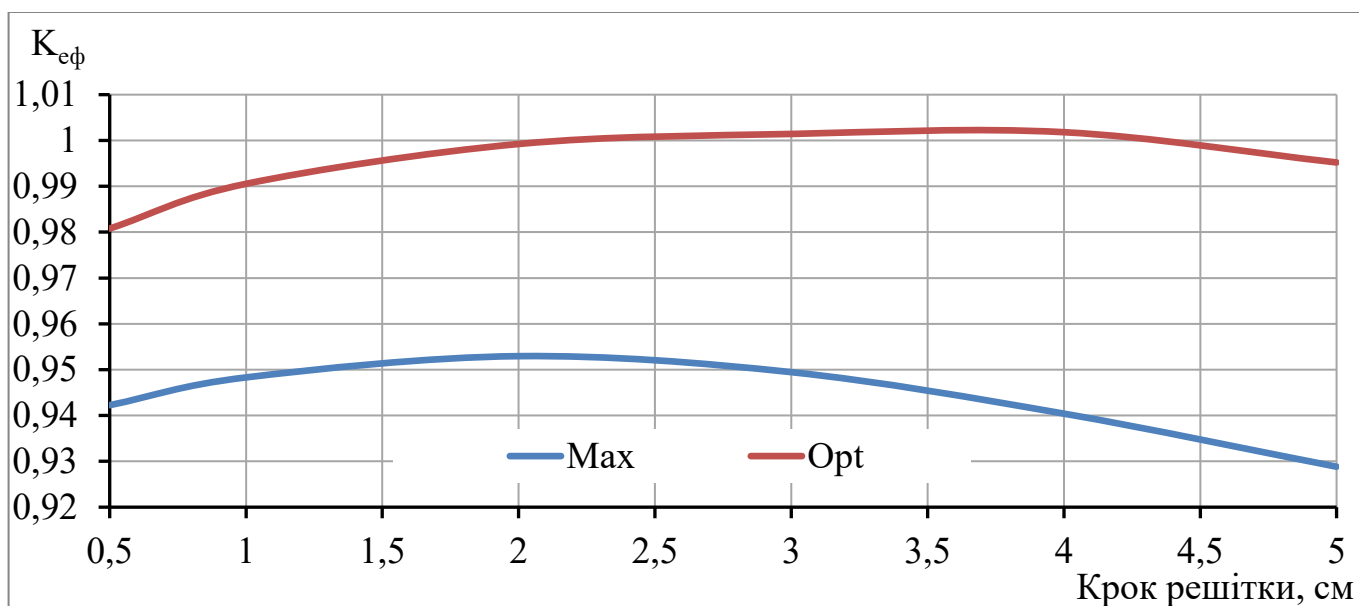


Рисунок Б.12 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від кроку моделюючої решітки фізичної моделі ЯНС, розраховані при оптимальній та максимальній об'ємній густині води в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,18% (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,75 МВт·добу/кг U; пористість 71,5%; масова частка палива – 55%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5 – 5 см

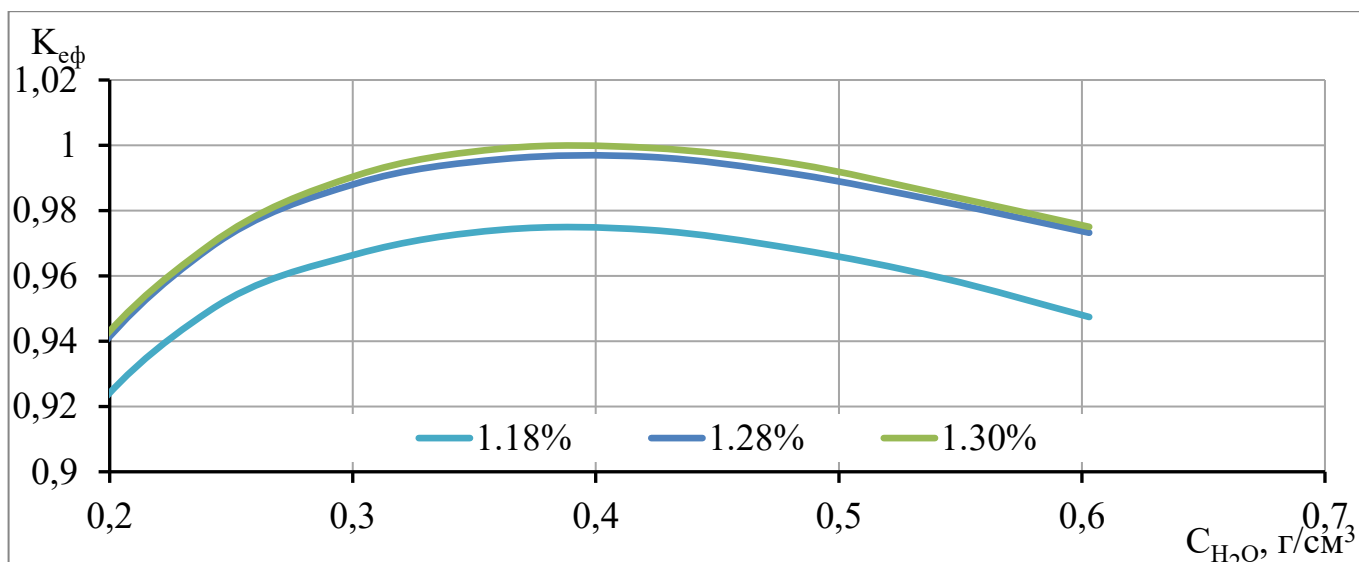


Рисунок Б.13 – Залежності $K_{\text{эф}}$ від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,18 – 1,30 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,0 – 11,75 МВт·добу/кг U; пористість 60%; масова частка палива – 45%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 3 см

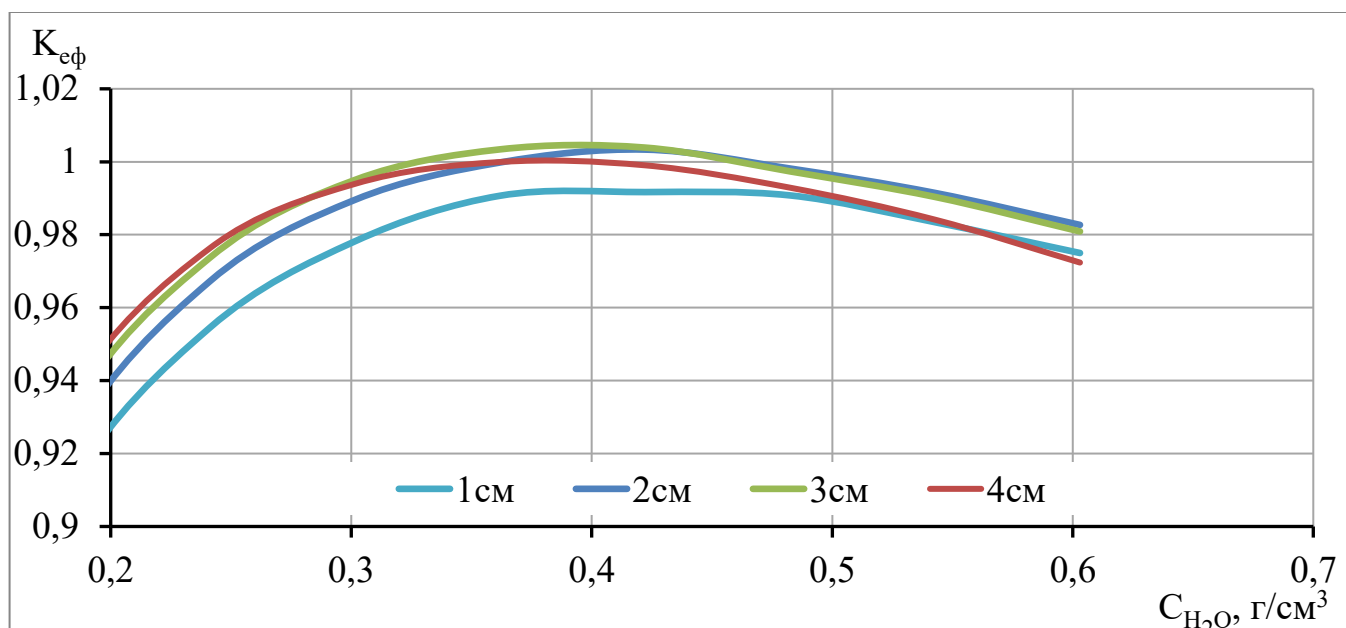


Рисунок Б.14 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,32 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 9,7 МВт·добу/кг U; пористість 60%; масова частка палива – 45%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 1 – 4 см

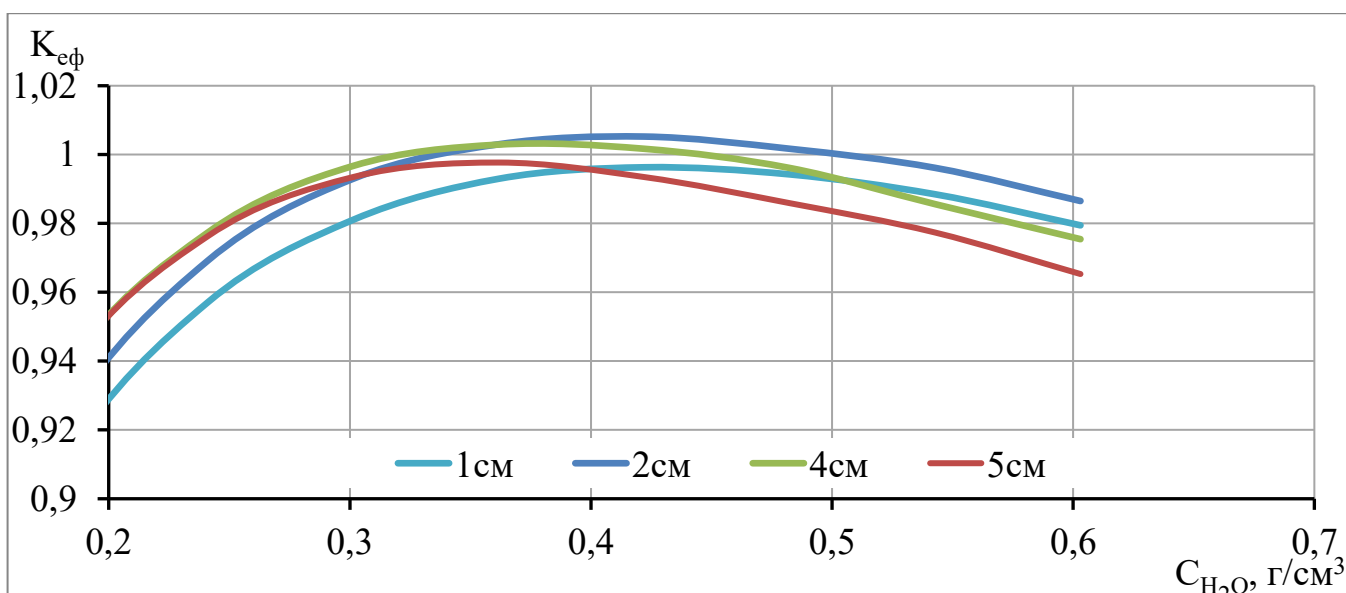


Рисунок Б.15 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,34 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 9,4 МВт·добу/кг U; пористість 60%; масова частка палива – 45%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 1, 2, 4, 5 см

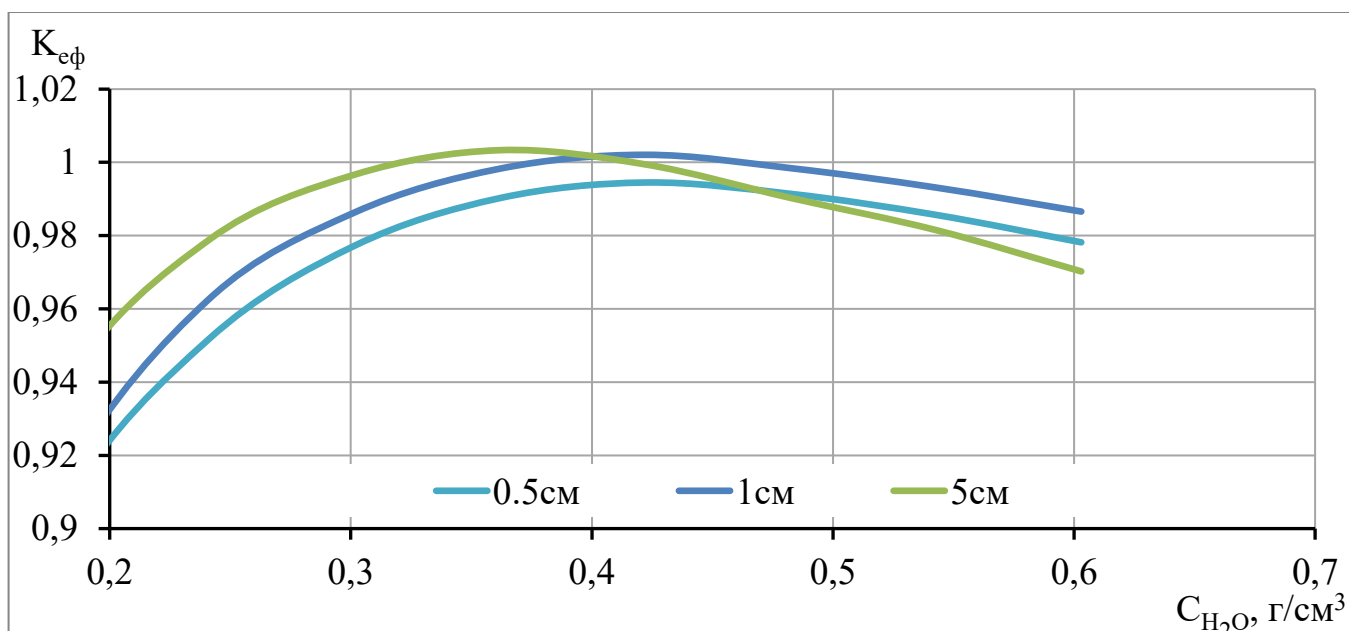


Рисунок Б.16 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,36 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 9,2 МВт·добу/кг U; пористість 60%; масова частка палива – 45%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5, 1, 5 см

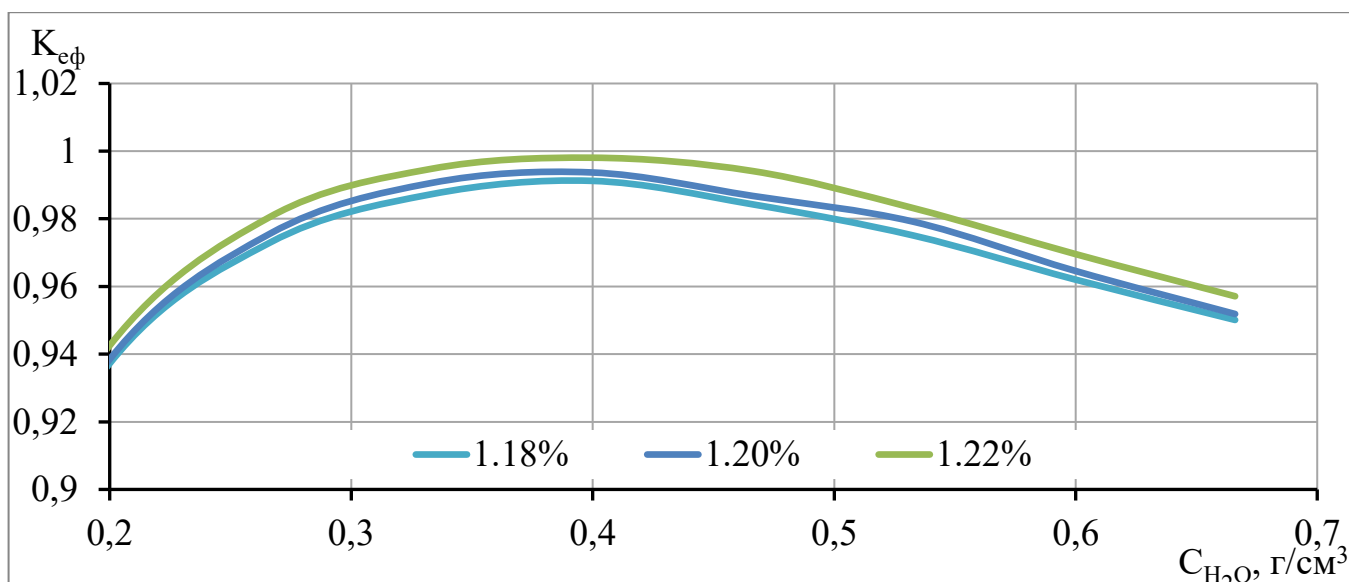


Рисунок Б.17 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,18 – 1,22 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 11,2 – 11,75 МВт·добу/кг U; пористість 67%; масова частка палива – 50%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 3 см

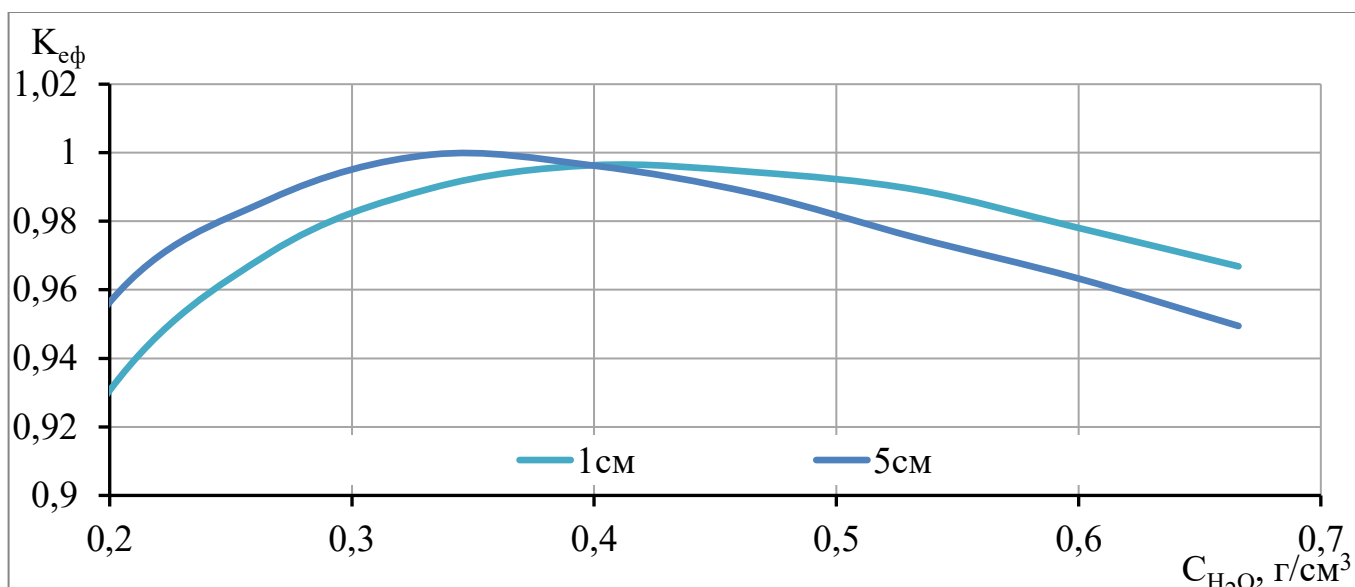


Рисунок Б.18 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,26 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,6 МВт·добу/кг U; пористість 67%; масова частка палива – 50%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 1, 5 см

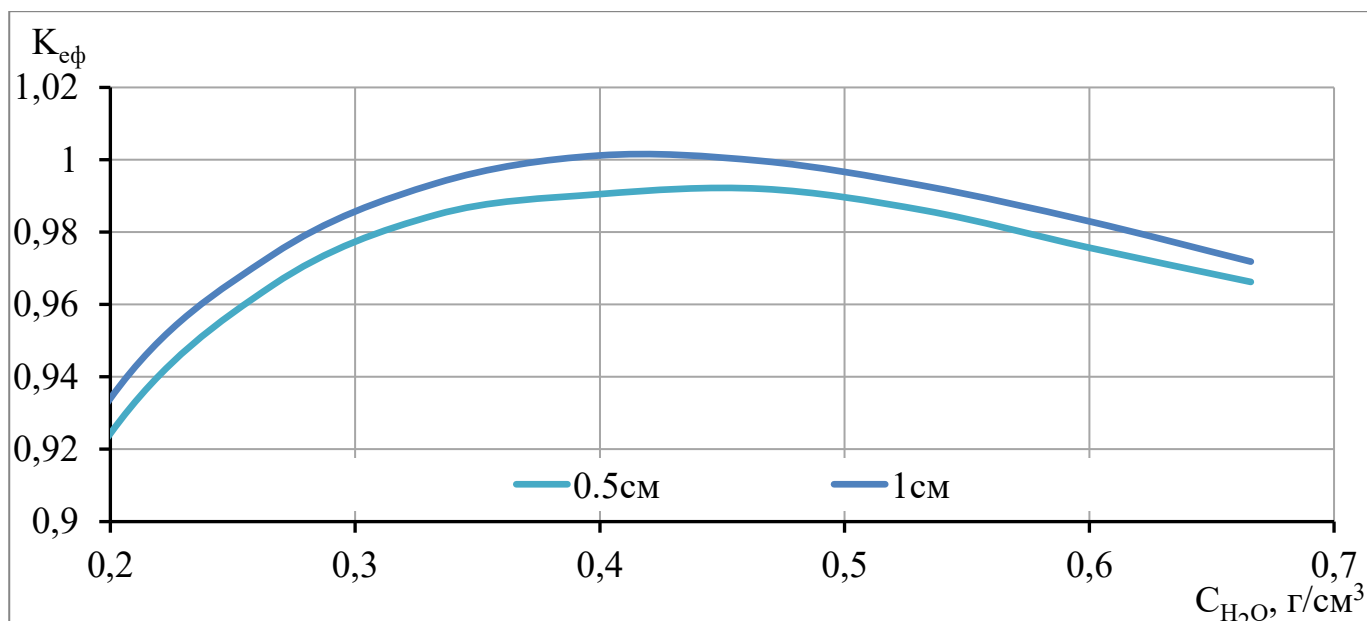


Рисунок Б.19 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,28 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,3 МВт·добу/кг U; пористість 67%; масова частка палива – 50%; маса урану – 15 т; крок моделюючої решітки – 0,5, 5 см

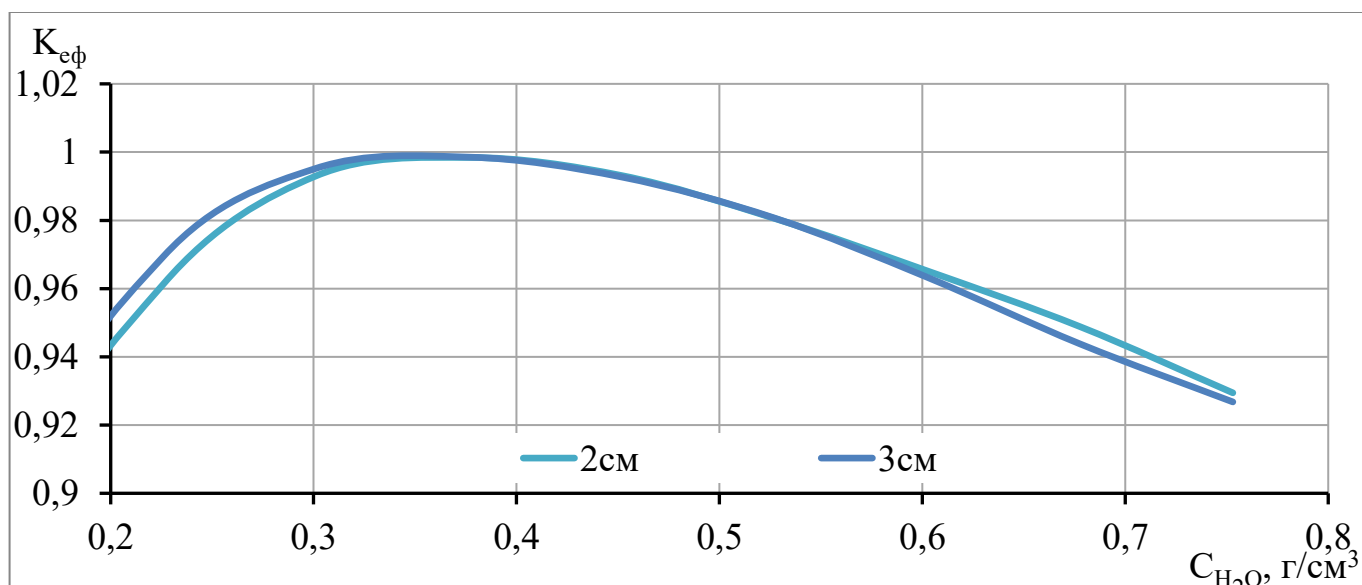


Рисунок Б.20 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,26 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,6 МВт·добу/кг U; пористість 75%; масова частка палива – 55%; маса урану – 13 т; крок моделюючої решітки – 2, 3 см

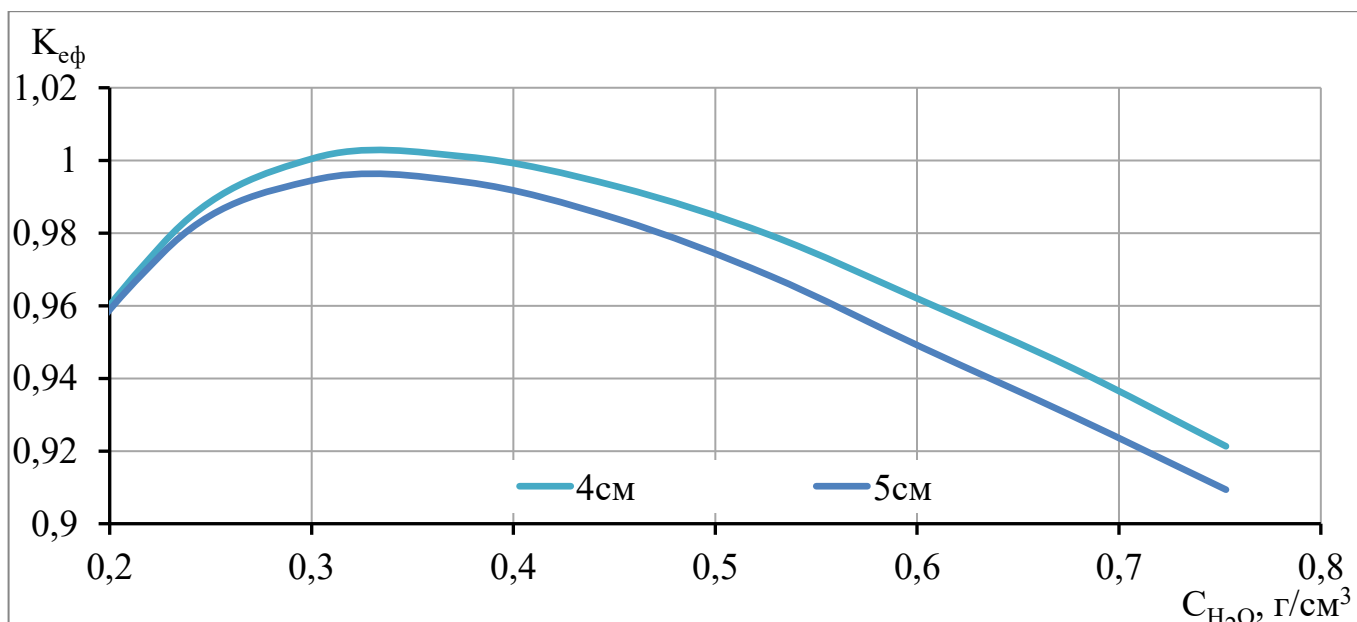


Рисунок Б.21 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,28 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 10,3 МВт·добу/кг U; пористість 75%; масова частка палива – 55%; маса урану – 13 т; крок моделюючої решітки – 4, 5 см

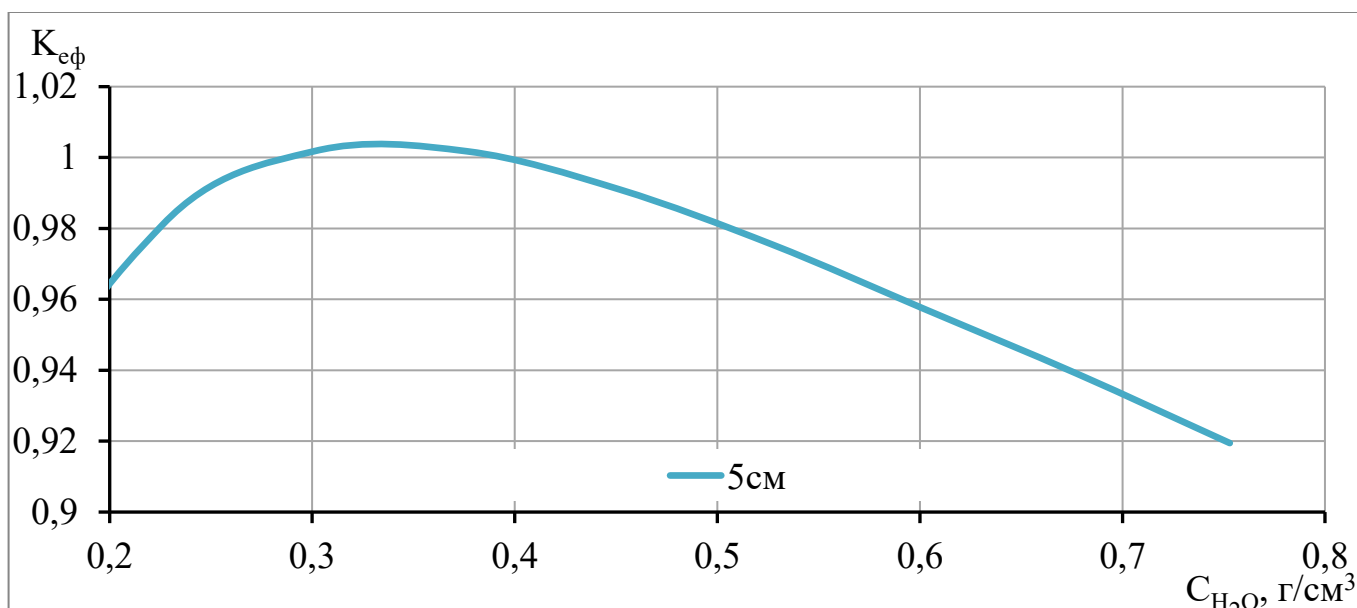


Рисунок Б.22 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,32 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 9,7 МВт·добу/кг U; пористість 75%; масова частка палива – 55%; маса урану – 13 т; крок моделюючої решітки – 5 см

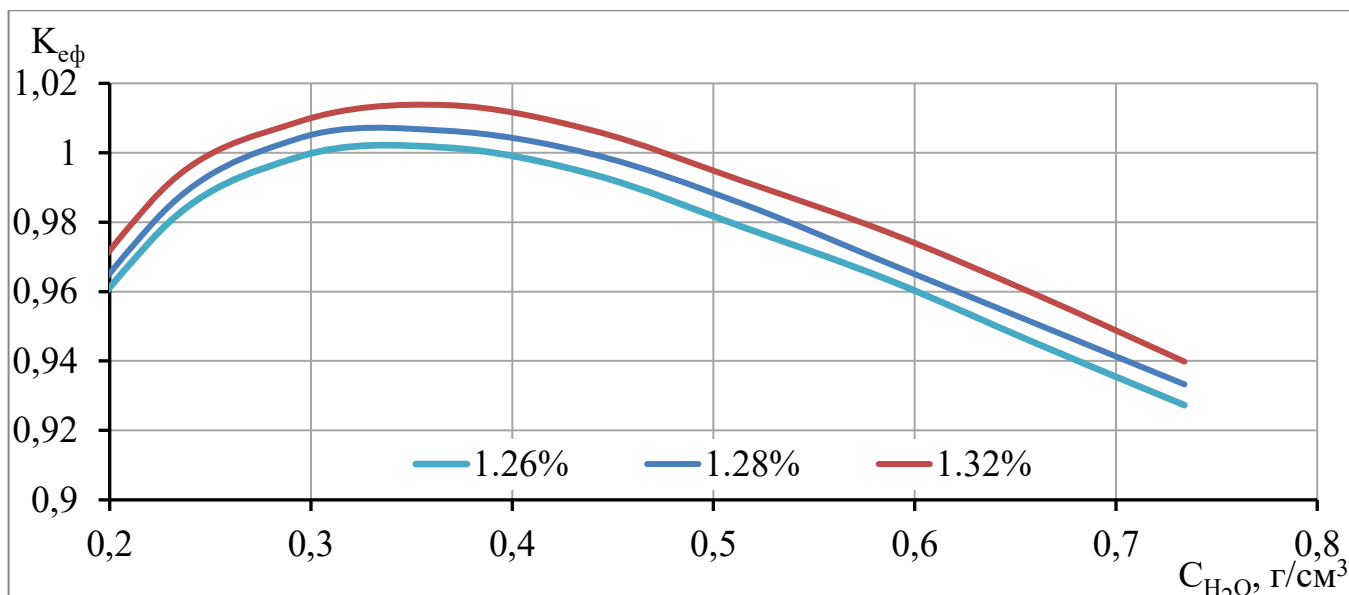


Рисунок Б.23 – Залежності K_{eff} від об'ємної густини води в розмножувальному середовищі фізичної моделі ЯНС, розраховані в програмному коді MCNP 6 при наступних параметрах: збагачення по ^{235}U – 1,26 – 1,32 % (з урахуванням ^{239}Pu) що відповідає вигорянню 9,7 – 10,6 МВт·добу/кг U; пористість 73%; масова частка палива – 55%; маса урану – 14 т; крок моделюючої решітки – 5 см

ДОДАТОК В. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВТОРНОЇ КРИТИЧНОСТІ 1990 РОКУ

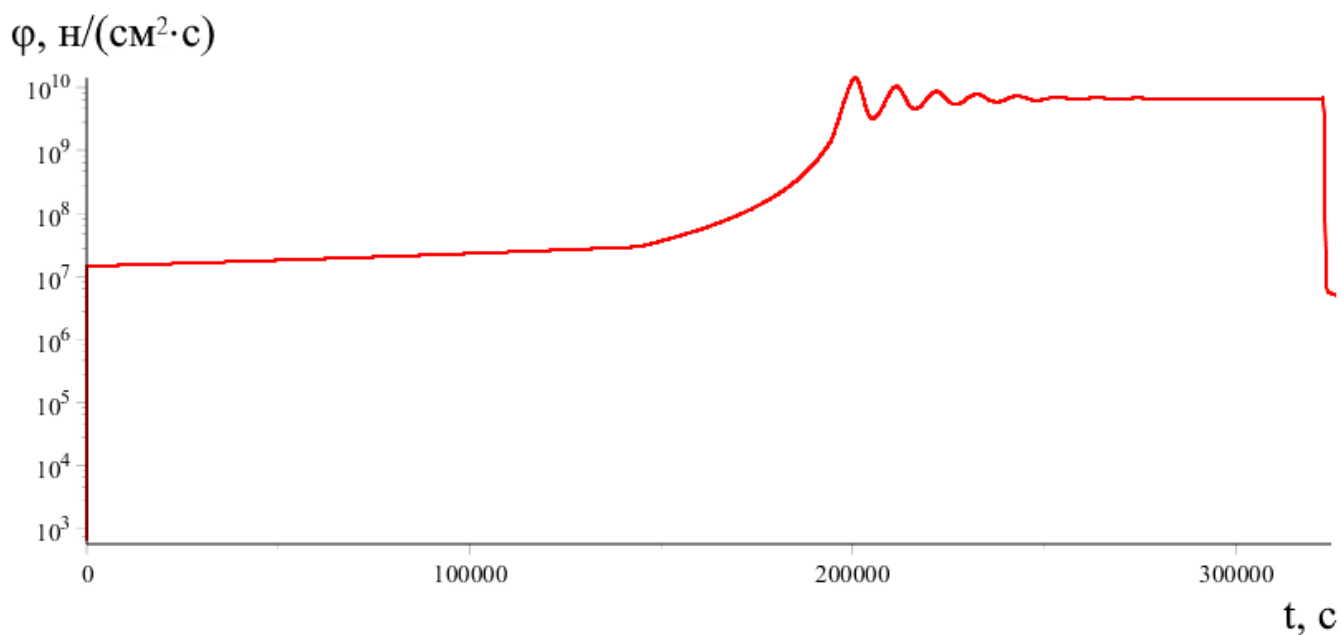


Рисунок В.1 – Змодельована динаміка зміни ЩПН при повторній та зворотній критичності

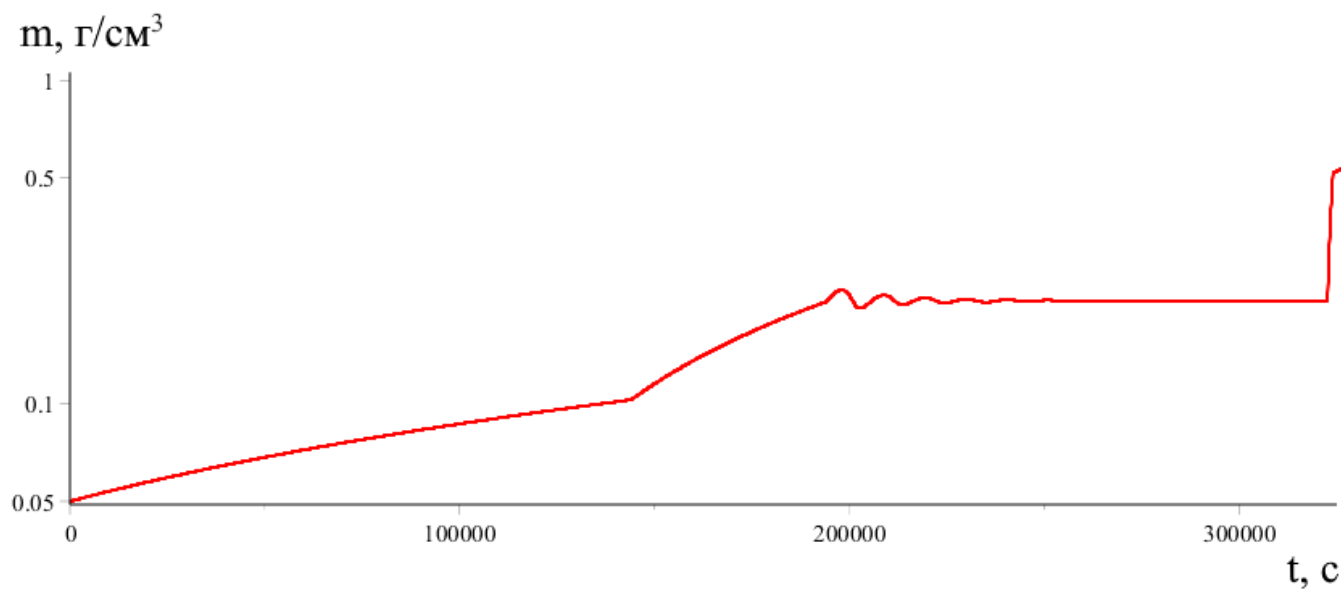


Рисунок В.2 – Змодельована динаміка зміни масового параметру при повторній та зворотній критичності

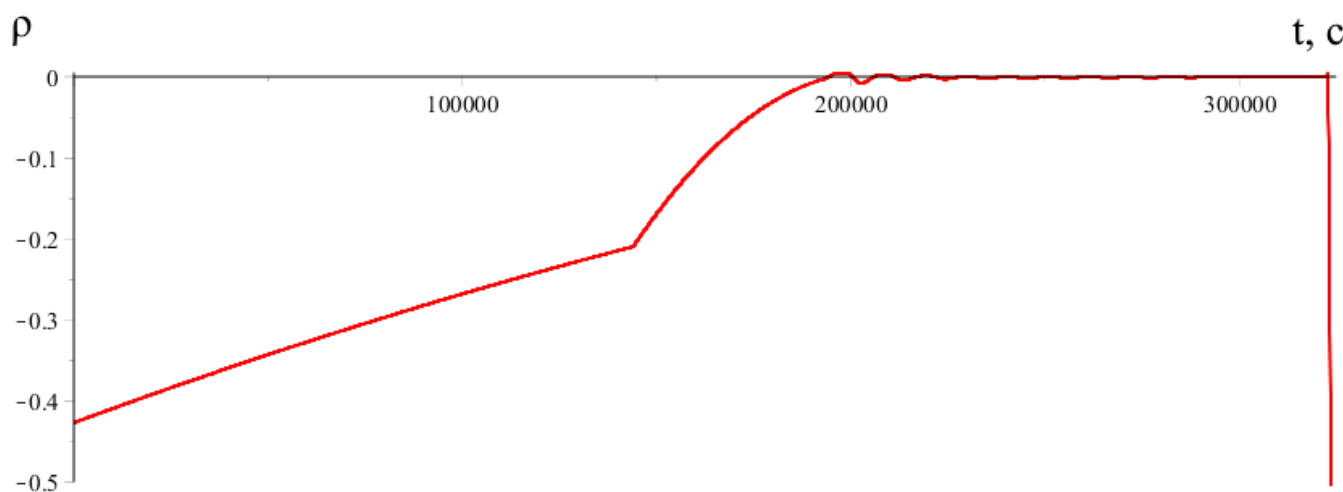


Рисунок В.3 – Змодельована динаміка зміни реактивності в розмножувальному середовищі при повторній та зворотній критичності

ДОДАТОК Г. АКТИ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор технічний (- головний
інженер) ДСП ЧАЕС

Олександр ТІТАРЧУК

« 09 » 06 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
СУЩЕНКА Костянтина Олександровича на тему «Моделювання ефекту повторної і
зворотної критичності в неорганізованих водо-уранових системах з
низькозбагаченим розмножуючим середовищем»

Результати, отримані в дисертаційному дослідженні аспіранта Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» СУЩЕНКА Костянтина Олександровича, реалізовані при впровадженні спеціального математичного та програмного забезпечення, що реалізує оцінку поточного та прогнозованого рівня підкритичності ядерно-небезпечного скупчення (ЯНС) паливовмісних матеріалів (ПВМ) в зоні проплавлення бетону опорної плити в південно-східній частині приміщення 305/2 Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) об'єкту «Укриття» Чорнобильської АЕС, та були включені до наступних звітів ІПБ АЕС, виконаних на замовлення ДСП ЧАЕС:

1. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів) (№ Держ.реєстр. 0121U112458, період виконання 2021 – 2022 рр.).
2. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів) (№ Держ.реєстр. 0122U200956, період виконання 08.2022 – 12.2022).

Заступник директора технічного
(з інфраструктури)

Сергій КОНДРАТЕНКО
« 09 » 06 2026 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник директора з наукової
роботи ІПБ АЕС НАН України

Віктор КРАСНОВ

06 2026 р.

АКТ

впровадження результатів дисертаційної роботи
СУЩЕНКА Костянтина Олександровича на тему «Моделювання ефекту повторної і
зворотної критичності в неорганізованих водо-уранових системах з
низькозбагаченим розмножуючим середовищем»

Комісія у складі: Голови комісії – Краснова Віктора Олександровича, членів комісії Михайлова Олександра Вікторовича, Савельєва Максима Володимировича, Висотського Євгена Дмитровича склала цей акт про те, що результати, отримані в дисертаційному дослідженні аспіранта Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» СУЩЕНКА Костянтина Олександровича, реалізовані в рамках наступних звітів ІПБ АЕС про НДР:

1. Дослідження стану паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» в умовах нового безпечного конфайнмента та розробка методичних і технологічних підходів до їх кондиціонування (№ Держ.реєстр. НДР-ВЯРБ-03-17, період виконання 2017 – 2020 рр.).
2. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (в рамках Договору № 377/18. № Держ.реєстр. 0118U001405, період виконання 2018 р.).
3. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів) (№ Держ.реєстр. 0121U112458, період виконання 2021 – 2022 рр.).
4. Науково-технічний супровід на етапах введення в експлуатацію та експлуатації нового безпечного конфайнмента (НБК) об'єкта "Укриття" (моніторинг паливовмісних матеріалів) (№ Держ.реєстр. 0122U200956, період виконання 08.2022 – 12.2022).

5. Розрахунково – експериментальні дослідження основних параметрів потенційно ядерно небезпечного скупчення паливовмісних матеріалів об'єкта «Укриття» на основі результатів вимірювання дослідницької системи Інституту проблем безпеки АЕС НАН України (№ Держ.реєстр. 0122U000795, період виконання 2022 р.).
6. Дослідження та прогностні оцінки стану ядерної безпеки комплексу «Новий безпечний конфайнмент – об'єкт «Укриття»» на етапі його експлуатації (№ Держ.реєстр. 0121U109338, період виконання 2021 – 2023 рр.).

В рамках вищенаведених звітів здобувачем виконувались: аналіз впливу встановлення НБК на умови зберігання паливовмісних матеріалів в об'єкті «Укриття»; аналіз і інтерпретація динаміки ЩПН, зареєстрованої БД ВК СКЯБ; розробка алгоритму оцінки поточного та прогнозованого рівня підкритичності ЯНС ПВМ; математичне моделювання «зворотної» критичності в розмножувальному середовищі ЯНС ПВМ.

с. н. с. ВЯБ ВЯРБ

ІПБ АЕС НАН України

 Євген ВИСОТСЬКИЙ

« 09 » 06 2026 р.

с. н. с. ВЯБ ВЯРБ

ІПБ АЕС НАН України

 Максим САВЕЛЬСЬ

« 09 » 06 2026 р.