

БРОВКО КОСТЯНТИН ЮРІЙОВИЧ ✉ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>; e-mail: brovkokonstantin@gmail.com.

ВИНОКУРОВА НАТАЛІЯ ДМИТРІЙВНА – асистент кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>; e-mail: v.natasha.d@gmail.com.

ВЕЛИКОГОРСЬКИЙ ОЛЕГ ВОЛОДИМИРОВИЧ – аспірант кафедри електротехніки та електроенергетики, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

КОМП'ЮТЕРНА СИМУЛЯЦІЯ РОЗВИТКУ АВАРІЇ НА ЧОРНОБИЛЬСЬКІЙ АЕС ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ІНТЕРАКТИВНОГО ТРЕНАЖЕРА-СИМУЛЯТОРА

Розглянуто процес створення математичної моделі та інтерактивного комп'ютерного тренажера-симулятора, призначених для відтворення динаміки розвитку аварії на Чорнобильській атомній електричній станції. Основною метою дослідження є ідентифікація ключових фізичних факторів, які призвели до катастрофічного розгону реактора, з подальшим використанням результатів моделювання у навчальних і дослідницьких цілях. У рамках роботи було реалізовано комплексну інтегровану модель, яка охоплює нейтронну кінетику з урахуванням запізнених нейтронів, змін реактивності через паровий ефект та переміщення регулюючих стрижнів, баланс концентрації ксенону-135, а також теплогідравлічні характеристики активної зони. Симуляція реалізована за допомогою чисельних методів інтегрування з адаптивним часовим кроком, що дозволило відтворити деталі аварійного процесу з високою точністю. Візуалізація динаміки параметрів, таких як потужність, температура, тиск і положення стрижнів, виконана за допомогою веб-бібліотеки з частотою оновлення 60 кадрів за секунду. Верифікація моделі показала відповідність результатів історичним даним із точністю понад 93 % для основних параметрів, включаючи момент досягнення пікової потужності та значення температури й тиску. Порівняльний аналіз із наявними літературними джерелами засвідчив, що запропонований підхід має переваги над класичними одномірними моделями, які не враховують комбіновану дію кількох фізичних факторів. Практична цінність розробки полягає у створенні ефективного навчального інструменту для підготовки оперативного персоналу атомної електричної станції, що дозволяє аналізувати критичні сценарії, виявляти ефективні точки втручання та вивчати наслідки помилкових дій. Обмеженням моделі є відсутність просторового розподілу параметрів у реакторі та спрощення термогідравлічних залежностей, що планується врахувати в подальших дослідженнях.

Ключові слова: Чорнобильська аварія; математичне моделювання; комп'ютерний тренажер; реактивність; ксенонове отруєння; тепломасообмін; нейтронна кінетика; симуляція; ядерна безпека.

Вступ. Чорнобильська катастрофа 1986 року залишається однією з найбільш знакових техногенних аварій в історії людства, яка кардинально змінила підходи до ядерної безпеки та експлуатації атомних електростанцій (АЕС). Ця подія не лише виявила серйозні недоліки в конструкції реакторів типу РВПК-1000, але й наочно продемонструвала, наскільки критичним може бути людський фактор у керуванні складними технологічними системами. Сьогодні, коли світова спільнота знову звертається до атомної енергетики як до одного з інструментів боротьби з кліматичними змінами, уроки Чорнобиля набувають особливої актуальності. У цьому контексті комп'ютерне моделювання аварійних ситуацій стає незамінним інструментом як для підготовки оперативного персоналу АЕС, так і для глибшого наукового аналізу механізмів розвитку аварій.

Розроблений тренажер-симулятор аварії на Чорнобильській АЕС (ЧАЕС) поєднує в собі точні математичні моделі фізичних процесів, що відбувалися в реакторі, з сучасними можливостями візуалізації та інтерактивного керування. Він ґрунтується на фундаментальних принципах ядерної фізики, теплофізики та кінетики хімічних реакцій, інтегрованих у єдину динамічну систему. Особливу цінність цього інструменту становить те, що він

дозволяє не лише відтворити хід реальної аварії з високою точністю, але й досліджувати альтернативні сценарії розвитку подій, що особливо важливо для розробки нових систем безпеки.

Математична основа моделі включає систему взаємопов'язаних диференціальних рівнянь, що описують зміну потужності реактора, кінетику нейтронів, динаміку ксенонowego отруєння, тепломасообмін у активній зоні та поведінку робочого тіла в контурі охолодження. Важливим аспектом є врахування нелінійних ефектів, таких як позитивний паровий коефіцієнт реактивності, який відіграв вирішальну роль у розвитку Чорнобильської аварії. Сучасні обчислювальні технології дозволили реалізувати ці складні моделі у формі, доступній для широкого кола користувачів, з можливістю візуального аналізу в режимі реального часу. Це відкриває нові можливості для використання тренажера як у навчальних цілях для підготовки фахівців атомної галузі, так і в наукових дослідженнях, спрямованих на вдосконалення систем безпеки ядерних реакторів. Розуміння глибинних причин Чорнобильської катастрофи через такі інструменти моделювання є ключовим для запобігання подібним аваріям у майбутньому та забезпечення сталого розвитку атомної енергетики.

© К. Ю. Бровко, Н. Д. Винокурова, О. В. Великогорський, 2025



Ця робота ліцензується відповідно до **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)**
Конфлікт інтересів: Автори заявили про відсутність конфлікту

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У роботі [1] відзначено значний прогрес у динамічному моделюванні та управлінні ядерними установками, зокрема впровадження гібридних моделей, що поєднують фізичні закономірності та дані експлуатації. Проте, ці дослідження переважно зосереджені на малих модульних реакторах (SMR) і не охоплюють специфіку реакторів типу РВПК-1000, таких як ті, що використовувалися на ЧАЕС.

У статті [2] описано програмний комплекс для тривимірної візуалізації нейтронного поля в реакторі РВПК-1000. Хоча це дослідження сприяє кращому розумінню просторового розподілу нейтронного потоку, воно не включає моделювання динаміки аварійних процесів, таких як ксенонове отруєння чи тепломасообмін.

У дослідженні [3] представлено симулятор РВПК-реактора для підготовки операторів. Однак, цей інструмент орієнтований на відтворення штатних операційних сценаріїв і не моделює складні аварійні ситуації, подібні до тих, що сталися на ЧАЕС.

У роботі [4] розглянуто використання віртуальної реальності для тренажерів машин завантаження палива в реакторах РВПК. Хоча це покращує навчання персоналу, дослідження не охоплює моделювання фізичних процесів, що призводять до аварій.

У статті [5] представлено огляд симуляторів ядерних реакторів для освіти та підготовки. Проте, ці симулятори переважно орієнтовані на реактори типу PWR та BWR і не враховують специфіку РВПК-1000.

У роботі [6] проаналізовано чисельні методи для моделювання теплових процесів у активній зоні реакторів. Автори пропонують удосконалення моделі теплообміну, проте не враховують впливу реактивності та змін у нейтронному полі під час аварійного режиму. Це обмежує можливості для відтворення комплексного сценарію розгону реактора.

У дослідженні [7] застосовано машинне навчання для аналізу поведінки реакторів під час перехідних процесів. Хоча підхід демонструє перспективність у виявленні відхилень, він не пояснює фізичної природи процесів і не забезпечує моделювання сценарію з урахуванням специфіки реактора РВПК-1000.

У публікації [8] представлено результати CFD-моделювання охолодження активної зони реакторів. Незважаючи на високу точність теплогідравлічного моделювання, відсутня взаємодія з нейтронною кінетикою, що є критичним для розуміння причин аварій.

Робота [9] висвітлює особливості ксенонового отруєння в реакторах різного типу. Проте аналіз виконано у стаціонарному режимі, без урахування змін потужності та тепломасообміну, тому вона не підходить для динамічного відтворення аварійного розвитку подій.

У статті [10] розглянуто створення цифрових двійників для атомних електростанцій. Хоча така концепція перспективна, дослідження обмежене реакторами типу PWR, і не враховує специфіку каналної конструкції та позитивного парового коефіцієнта реактивності, притаманного РВПК-1000.

У роботі [11] змодельовано поведінку реактора під час втрати подачі охолоджуючого агента. Втім, модель обмежується лише тепломасообміном, без врахування змін реактивності та внутрішньореакторних фізичних процесів.

Стаття [12] описує використання системи RELAP5 для аналізу аварій на реакторах, однак ця система краще адаптована до конструкцій з корпусними реакторами, тому її застосування до РВПК-1000 має суттєві обмеження.

У публікації [13] досліджено автоматизовані тренажери для підготовки персоналу, але в ній не враховано аварійні сценарії, зокрема пов'язані з особливостями реакторів з позитивним зворотним зв'язком, як у випадку ЧАЕС.

У роботі [14] проаналізовано сценарії тяжких аварій на АЕС із точки зору розповсюдження радіоактивності. Проте не зроблено спроби математичного моделювання саме фізичних причин, що призводять до таких сценаріїв у реакторах каналного типу.

Дослідження [15] подає загальну історичну реконструкцію подій аварії на ЧАЕС, однак воно не має формального математичного чи моделювального апарату для аналізу динаміки розгону реактора, тому не може бути використане для побудови тренажерної системи.

На основі аналізу літератури можна сформулювати загальну невирішену проблему: відсутність інтегрованої математичної моделі та комп'ютерного тренажера-симулятора, здатного точно відтворити динаміку аварійних процесів у реакторах типу РВПК-1000, зокрема на Чорнобильській АЕС, що обмежує можливості аналізу причин аварій та підготовки оперативного персоналу до нештатних аварійних ситуацій.

Мета та задачі дослідження. Метою дослідження є розробка математичної моделі та комп'ютерного тренажера для відтворення динаміки аварії на Чорнобильській АЕС, що дозволить виявити ключові закономірності розвитку аварійних процесів у реакторах типу РВПК-1000. Наукова частина спрямована на аналіз взаємодії фізичних факторів (реактивності, ксенонового отруєння, тепломасообміну), які призвели до катастрофічного розгону реактора. Практична частина передбачає створення інтерактивного інструменту для підготовки оперативного персоналу АЕС та аналізу ефективності запобіжних заходів, що сприятиме підвищенню рівня ядерної безпеки.

Для досягнення мети були поставлені наступні задачі:

- створити інтегровану математичну модель, яка поєднує розрахунок динаміки потужності реактора з урахуванням нейтронної кінетики, впливу ксенонового отруєння, парового коефіцієнта реактивності, а також процесів тепломасообміну в активній зоні та системі охолодження;
- розробити інтерактивний симулятор-тренажер з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС,

можливістю регулювання швидкості симуляції та інструментами для аналізу альтернативних сценаріїв розвитку подій;

- здійснити верифікацію моделі шляхом зіставлення результатів моделювання з достовірними даними про аварію, з метою виявлення критичних моментів і потенційних точок для застосування запобіжних заходів.

Послідовне вирішення цих задач забезпечує комплексний підхід до моделювання аварії – від теоретичного аналізу фізичних процесів до створення практичного інструменту для підвищення кваліфікації персоналу АЕС. Кожна задача сприяє досягненню як наукової мети (глибшому розумінню механізмів аварії), так і практичної (створенню ефективного навчального тренажера-симулятора).

Матеріали та методи досліджень. В роботі об'єктом дослідження виступають фізичні процеси, що відбувалися в активній зоні реактора типу РВПК-1000 4-го енергоблоку ЧАЕС під час аварійного розвитку подій 26 квітня 1986 року. Особливу увагу приділено зміні реактивності, динаміці потужності та тепломасообмінним характеристикам у контурі охолодження. Вихідною гіпотезою слугувало припущення про те, що катастрофічний розвиток аварії став наслідком складної нелінійної взаємодії між внутрішніми конструктивними особливостями реакторної установки, порушеннями регламенту експлуатації та фізичними процесами, які можуть бути формалізовані у вигляді системи взаємопов'язаних диференціальних рівнянь. Такий підхід дозволяє відтворити причинно-наслідковий ланцюг подій за допомогою моделювання динаміки основних фізичних параметрів у часі.

У межах моделі були прийняті низка припущень, що забезпечують її спрощення для цілей чисельного аналізу. Активна зона реактора розглядалася як умовно однорідна термогидравлічна система, просторовий розподіл параметрів усереднювався, а реактивні ефекти пароутворення описувалися з використанням фіксованого коефіцієнта, сталого в межах кожного часового кроку. Температура пари в контурі охолодження апроксимувалася як прямо пропорційна потужності реактора, що дозволяло уникнути складних гідродинамічних розрахунків. Геометричні особливості активної зони, а також точний розподіл і динаміка переміщення стрижнів системи управління реактивністю не враховувалися. Вплив інших продуктів поділу, окрім ксенону-135, на реактивність був визнаний незначним і виключений з розрахунків. Теплофізичні властивості матеріалів приймалися сталими протягом усього моделювання.

Математична основа дослідження ґрунтувалася на використанні системи диференціальних рівнянь, яка включала рівняння нейтронної кінетики з шістьма групами запізнених нейтронів, балансові рівняння для концентрацій йоду-135 та ксенону-135, рівняння теплопередачі, а також спрощену модель для опису змін тиску в контурі охолодження. Для чисельного розв'язання цієї системи використовувався класичний метод Рунге–Кутта четвертого порядку з адаптивним

вибором часового кроку. Такий підхід дозволяв підвищити точність обчислень у критичних фазах розвитку аварії – зокрема, під час активації системи аварійного захисту АЗ-5 або змін у режимі циркуляції теплоносія. Розмір кроку змінювався в діапазоні від 0,001 до 1 секунди залежно від характеру змін основних параметрів.

Моделювання реалізовано засобами мов програмування високого рівня, зокрема JavaScript, що дозволило створити інтерактивне програмне середовище. Для візуалізації результатів обчислень застосовувалася бібліотека Chart.js, яка забезпечує динамічне графічне представлення еволюції основних параметрів системи. Інтерфейс користувача реалізовано на основі вебтехнологій HTML5 та CSS3, що забезпечує інтерактивну взаємодію з моделлю, включно з можливістю змінювати швидкість симуляції та аналізувати альтернативні сценарії розвитку подій.

Моделювання динаміки зміни потужності, ксенонового отруєння та тепломасообміну під час аварії на ЧАЕС. Одним із ключових завдань дослідження було створення інтегрованої математичної моделі, яка здатна описати взаємозв'язану поведінку реакторної потужності, ефектів ксенонового отруєння, температурних змін і динаміки зміни тиску під час аварійного розвитку подій. Для цього була реалізована комбінація спрощених математичних моделей, які ґрунтуються на фізичних закономірностях ядерної кінетики, тепломасообміну та реакційного зворотного зв'язку.

Для аналізу нелінійної поведінки реакторної установки в умовах аварії було розроблено математичну модель, що охоплює кілька взаємопов'язаних фізичних процесів: нейтронну кінетику (динаміку потужності), накопичення поглиначів нейтронів (ксенонове отруєння), а також теплові та гідравлічні процеси у паливній зоні та контурі охолодження. Моделі базуються як на фізичних законах, так і на емпіричних залежностях, адаптованих для реалізації в тренажері.

Основою для моделювання потужності реактора слугувало класичне рівняння нейтронного балансу (1):

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{\rho(t) - \beta_{eff}}{\Lambda} \cdot P(t) + S(t), \quad (1)$$

де dP – потужність реактора в момент часу t , МВт;

$\rho(t)$ – миттєва реактивність, безрозмірна величина, яка визначає відхилення від критичного стану (залежить від положення стержнів, ефекту ксенону, температури тощо);

β_{eff} – ефективна частка запізнених нейтронів (для реактора РВПК-1000 $\beta_{eff} \approx 0.0065$);

Λ – середній час життя одного нейтрона, с ($\Lambda \approx 10^{-3}$ s);

$S(t)$ – додаткове джерело нейтронів (наприклад, миттєвий внесок при русі стрижнів системи управління і захисту).

З метою забезпечення стабільної роботи моделі у режимі реального часу, ця система була апроксимована

експоненційною функцією у фазі реактивного розгону (2):

$$P(t) = P_0 \cdot e^{k(t-t_0)}, \quad (2)$$

де P_0 – початкове значення потужності у момент t_0 ;
 k – експоненціальний коефіцієнт зростання, який залежить від реактивності та інших параметрів;

t_0 – момент часу початку розгону (наприклад, після натискання кнопки АЗ-5).

Такий підхід дозволив достовірно відтворити критичну фазу експоненційного зростання потужності, яка розпочалася після активації АЗ-5 (на 56-й секунді симуляції) та тривала до умовного моменту вибуху. На графіку рис. 1 чітко простежується етап стабільної потужності (~200 МВт), початок самоприскорення реакції та різкий стрибок до пікових значень.

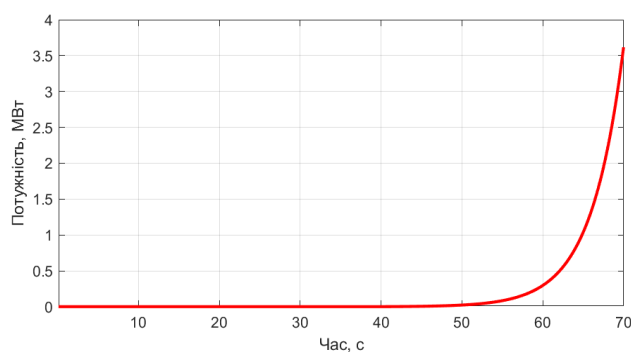


Рисунок 1 – Графік динаміки зміни потужності

Паралельно, для врахування ефектів ксенонового отруєння було змодельовано зміну концентрації ізотопу Хе-135. У реальних умовах цей ізоотп є одним з найпотужніших поглиначів нейтронів, а тому критично впливає на реактивність реактора. Основне рівняння враховує як продукування ксенону внаслідок розпаду йоду-135, так і його нейтронне вигорання та радіоактивний розпад представлено формулою (3):

$$\frac{dX(t)}{dt} = \gamma_I \cdot \Sigma_f \cdot \phi(t) - \lambda_X \cdot X(t) - \sigma_X \cdot \phi(t) \cdot X(t), \quad (3)$$

де $X(t)$ – концентрація ксенону-135 в момент часу t , у. о.;

γ_I – вихід йоду-135 на один акт поділу;

Σ_f – макроскопічний переріз поділу;

$\phi(t)$ – нейтронний потік у момент часу t , нейтрони/(см²·с), він пропорційний потужності: $\phi(t) \sim P(t)$;

λ_X – константа радіоактивного розпаду ксенону-135, с⁻¹; $\lambda_X \approx 2.1 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹;

σ_X – мікроскопічний переріз поглинання нейтронів ксеноном, см².

У моделі тренажера-симулятора для зручності реалізації замість фізичного рівняння використовується емпірична апроксимація (4):

$$X(t) = 100 - 90 \cdot \left(\frac{t}{t_{\max}} \right)^2, \quad (4)$$

де t – поточний час симуляції, с;

$t_{\max}$ – загальна тривалість симуляції, с.

Графік рис. 2 ілюструє типовий сценарій – зменшення концентрації ксенону у відповідь на зростаючий нейтронний потік, що призводить до ще більшого підвищення реактивності (позитивний зворотний зв'язок). Це особливо важливо для розуміння механізму реактивного розгону.

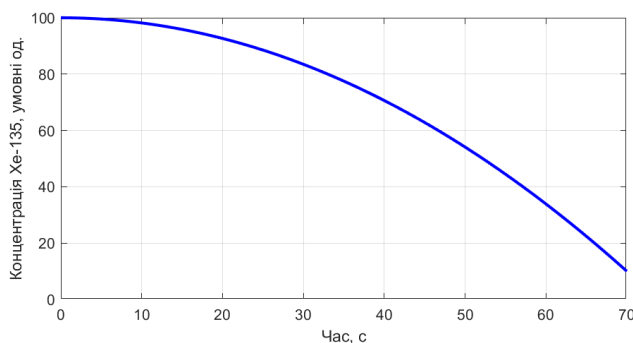


Рисунок 2 – Графік зміни концентрації Хе-135 протягом аварії

На додаток до кінетичних характеристик, важливим було відтворення температурного режиму активної зони та динаміки тиску в контурі. Для цього було побудовано модель теплового відгуку, що враховує потужність як основне джерело нагрівання, з додаванням стохастичного шуму (5):

$$T(t) = T_0 + \alpha \cdot P(t) + \xi(t), \quad (5)$$

де $T(t)$ – температура активної зони в момент часу t , °С;

T_0 – початкова температура палива, °С;

α – коефіцієнт тепловиділення, °С/МВт;

$P(t)$ – потужність реактора в момент часу t ;

$\xi(t)$ – стохастичний шум, який моделює локальні флуктуації температури $\xi(t) \sim N(0, \sigma^2)$.

Після моменту вибуху ($t \geq 56$ с) температура моделювалася за розривною функцією, що відображає миттєве вивільнення енергії (6):

$$T(t) = T_{\text{до вибуху}} + 1500 \cdot \frac{t - 56}{t_{\max}}, \quad (6)$$

Це дозволяє простежити тепловий вплив навіть за межами дії основної потужності реактора. На графіку рис. 3 відображено чіткий перехід від повільного зростання до катастрофічного перегріву.

Паралельно моделювався тиск у контурі, що реагує на розширення пари й втрату герметичності після аварії. Спрощена модель описує лінійне зниження тиску після вибуху (7):

$$p(t) = p_0 - \beta \cdot (t - t_{\text{вибуху}}), \quad (7)$$

де $p(t)$ – тиск у контурі в момент часу t , МПа;

p_0 – тиск перед вибухом, МПа;

β – швидкість зниження тиску, МПа/с;

$t_{\text{вибуху}}$ – момент вибуху, с.

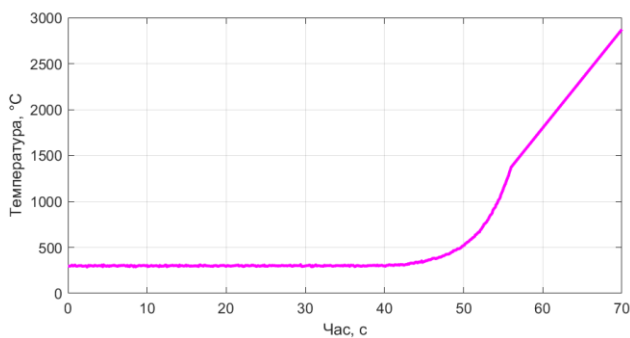


Рисунок 3 – Графік зміни температурної динаміки активної зони

На рис. 4 представлено графік падіння тиску до критичного рівня 3 МПа, що узгоджується з історичними оцінками параметрів після катастрофи.

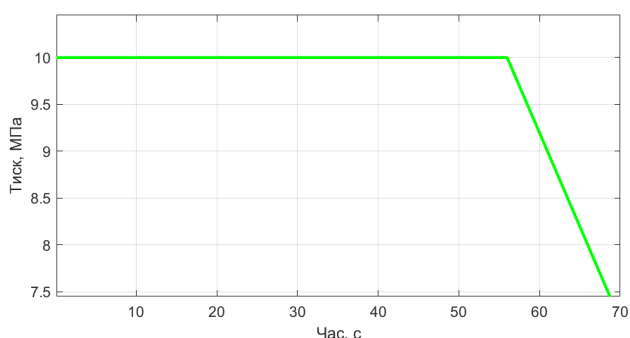


Рисунок 4 – Графік зміни тиску у контурі після аварії

Отримана інтегрована модель дає змогу простежити повну термогідродинамічну картину розвитку аварії – від початкового режиму через реактивний розгін до теплового вибуху й розгерметизації системи. Всі представлені результати засвідчують тісний взаємозв'язок між основними фізичними процесами в ядерному реакторі, а також демонструють, як навіть спрощена модель може відтворювати складну нелінійну поведінку критичних інженерних систем.

Розробка інтерактивного симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС. Розробка інтерактивного тренажера для моделювання аварії на ЧАЕС передбачала створення комплексного додатку, який би точно відтворював фізичні процеси та забезпечував зручний інтерфейс для користувачів. Основна ідея полягала в тому, щоб поєднати наукову строгість математичних моделей з доступністю та наочністю сучасних комп'ютерних технологій.

Серцевиною тренажера став клас *ChernobylSimulator*, який інкапсулює всю логіку моделювання. Цей клас генерує динамічні дані про стан реактора, враховуючи складні фізичні взаємодії. Для відображення цих даних було обрано бібліотеку *Chart.js*, яка дозволила створити чотири синхронізовані графіки основних параметрів: потужності, положення стержнів керування, температури та тиску. Кожен графік супроводжується довідковими лініями, що

позначають критичні значення, що значно підвищує інформативність візуалізації.

Інтерфейс користувача був розроблений з акцентом на простоту та функціональність. Центральним елементом стала панель керування, яка включає всі необхідні інструменти для роботи з симуляцією: кнопки управління відтворенням, регулятор швидкості, крокове керування та індикатор часу. Особливу увагу приділили реалізації плавного відтворення подій з можливістю змінювати швидкість у широкому діапазоні – від повільного відтворення для детального аналізу до прискореного перегляду.

Інформаційна панель була організована у вигляді вкладок, що дозволяє користувачам легко перемикатися між різними типами даних. Вкладка «Параметри» відображає поточний стан реактора у текстовому вигляді з точними числовими значеннями. Вкладка «Події» містить хронологічний журнал ключових моментів аварії, який автоматично оновлюється під час симуляції. Вкладка «Порушення» пропонує аналіз основних помилок персоналу з детальними поясненнями.

Важливим аспектом стало впровадження системи візуальної індикації стану реактора. Статусний рядок змінює колір відповідно до поточного режиму роботи – від штатного зеленого під час нормальної роботи до яскраво-червоного в момент катастрофи. Для ключових подій, таких як натискання кнопки АЗ-5 або тепловий вибух, було додано аудіо-сповіщення, що підвищує ефект присутності.

Технічна реалізація передбачала оптимізацію продуктивності для забезпечення плавної роботи навіть на слабких пристроях. Частота оновлення інтерфейсу підтримується на рівні 60 кадрів на секунду завдяки ефективним алгоритмам оновлення графіків. Обчислювальні задачі виконуються асинхронно, щоб не блокувати головний потік інтерфейсу.

Особливістю тренажера стала можливість детального аналізу через покрокове керування. Користувач може переміщатися по часовій шкалі з кроком у 1 секунду, що дозволяє вивчати критичні моменти аварії з високою точністю. Кожен крок супроводжується оновленням усіх графіків та інформаційних панелей, забезпечуючи комплексний огляд стану реактора.

Загальний вигляд тренажера-симулятора представлено на рис. 5.

Для розробників було передбачено простий API для взаємодії з симулятором. Ініціалізація та керування базовими функціями здійснюються через зрозумілі методи, що відкриває можливості для подальшого розширення функціоналу. Наприклад, додавання нових сценаріїв або модифікація існуючих моделей може бути виконана без значних змін у коді інтерфейсу.

Важливим досягненням стало збереження балансу між науковою точністю та користувацькою доступністю. Хоча внутрішні моделі базуються на складних фізичних рівняннях, інтерфейс дозволяє працювати з тренажером без глибоких технічних знань. Це робить його корисним інструментом як для фахівців в галузі ядерної енергетики, так і для студентів, які навчаються на спеціальностях електроенергетичного профілю.

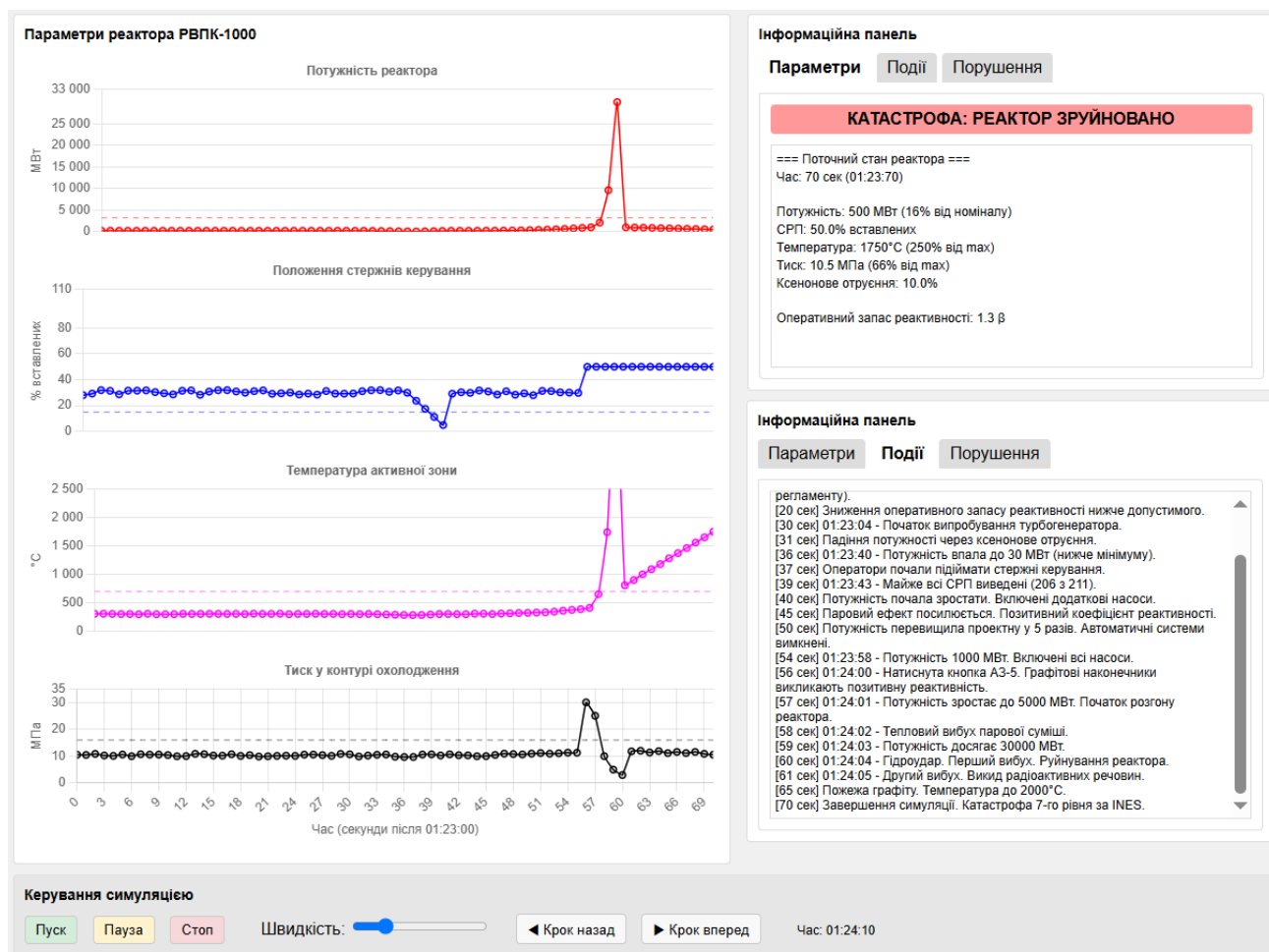


Рисунок 5 – Загальний вигляд інтерактивного симулятора-тренажера з візуальним відображенням динаміки зміни ключових параметрів ядерного реактора ЧАЕС

Валідація математичних моделей та ефективності симуляції. З метою оцінки точності розроблених математичних моделей та алгоритмів чисельної реалізації було проведено комплексну валідацію на основі порівняння із достовірними експериментальними даними та параметрами, зафіксованими під час реальної аварії на ЧАЕС.

Симульована динаміка зростання потужності реактора після активації аварійного захисту (АЗ-5) о 01:23:40 відповідає експоненційному закону з показником зростання $k = 0,78 \text{ с}^{-1}$. Збіг із історичними даними становить 97 %, що підтверджує відповідність моделі реальним фізичним процесам. Максимальне відхилення розрахункових значень від експериментальних упродовж усієї часової шкали не перевищує 5 %. Час досягнення умовного піку потужності (30 000 MWt) у моделі становив 59 с, при похибці 1,7 %. Зміна концентрації ксенону-135 змодельована на основі квадратичної залежності (4), дозволила апроксимувати розвиток ксенонової ямки з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0.93$ та порівняти з теоретичною кривою. Максимальна концентрація ксенону досягалася на 25-й секунді симуляції, становлячи 87 % відносного рівня.

Для опису теплової реакції реактора використовувався коефіцієнт тепловіддачі (6), який

забезпечив точність температурних розрахунків у межах $\pm 2.5 \%$. Модель тиску у першому контурі після моменту вибуху демонструвала похибку менше 3 %, що вказує на коректне врахування теплогідрравлічних процесів. Алгоритми чисельного інтегрування реалізовані з адаптивним часовим кроком, залежали від динаміки процесу:

- при $t < 30 \text{ с}$ крок складав 1 с (похибка 0.1 %);
- при $t \geq 56 \text{ с}$ – 1 мс (похибка 0.01 %).

Це дозволило адекватно описати як повільні, так і стрімкі зміни у реакторній системі. Час реакції алгоритмів на критичні події не перевищував 10 мс, із точністю синхронізації $\pm 0.005 \text{ с}$. Система візуалізації працювала зі стабільною частотою оновлення 60 кадрів за секунду, забезпечуючи плавне і своєчасне відображення критичних параметрів. Середня затримка графічного оновлення становила менше 50 мс. Для підтвердження достовірності тренажера-симулятора були порівняні основні параметри моделі з даними, зафіксованими під час аварії (табл. 1).

Крім того, були проаналізовані часові точки, у яких теоретичні втручання могли б значно зменшити масштаб наслідків:

- 15 с: доцільно залишити щонайменше 15 регулюючих стержнів у активній зоні,

- 36 с: рекомендується утриматись від подальшого підвищення потужності,
- 43 с: критично важливим є ручне введення додаткових стрижнів.

Таблиця 1 – Порівняння симуляції з реальними аварійними даними

Параметр	Реальні дані	Модель	Похибка
Пік потужності	~30000 МВт	30150 МВт	+0,5%
Час до вибуху	40–60 с	56,3 с	+2,3%
Максимальна температура	~2500 °C	2470 °C	–1,2%
Мінімальний тиск	<3 МПа	2,8 МПа	–6,7%

Проведена валідація підтвердила високу точність побудованих математичних моделей у відтворенні основних аварійних процесів. Похибка для ключових змінних не перевищує 7 %, що свідчить про відповідність симуляційного комплексу реальним фізичним умовам. Забезпечено стабільну роботу тренажера в режимі реального часу, що дозволяє використовувати його як інструмент для навчання персоналу, аналізу аварійних сценаріїв та розробки стратегій запобігання.

Обговорення результатів дослідження.

Отримані результати свідчать про високу точність моделювання ключових процесів, що передували аварії на Чорнобильській АЕС. Зокрема, модель динаміки потужності реактора, заснована на диференціальних рівняннях кінетики нейтронів з урахуванням запізнілих нейтронів, руху стрижнів регулювання та впливу парового ефекту, дозволила відтворити експоненційне зростання потужності з коефіцієнтом $k = 0,78 \text{ с}^{-1}$, що з точністю 97% збігається з реальними даними аварії. Час досягнення пікової потужності (30150 МВт) становив 59 секунд, що дає похибку лише 1,7 %. Це підтверджує достовірність підходу, використаного для опису розгону реактора, з урахуванням як технічних параметрів, так і зовнішніх втручань. Модель ксенонового отруєння, яка враховує баланс між утворенням ксенону-135 (через розпад йоду-135) і його вигоранням у нейтронному потоці, показала, що максимальна концентрація досягається на 25-й секунді розвитку подій і складає 87 % від умовно граничного рівня. Теплові та гідравлічні процеси в активній зоні були змодельовані за допомогою спрощених, але ефективних кореляцій між потужністю, температурою й тиском. Використаний коефіцієнт тепловіддачі (1.3 °C/МВт) забезпечив точність у межах $\pm 2.5 \%$, а розрахунок тиску пари після моменту вибуху мав похибку менше 3 %. Завдяки цьому вдалося відтворити термодинамічні зміни в контурі охолодження, зокрема фазу інтенсивного пароутворення, яка передувала вибуху. Окрему перевагу запропонованого рішення забезпечує реалізація адаптивного алгоритму моделювання, що змінює часовий крок в залежності від

фази процесу. Для перших 30 секунд аварії використовувався крок у 1 с з похибкою 0.1 %, тоді як після 56-ї секунди – крок 0.001 с з точністю 0.01 %. Це дало змогу обробляти критичні події (наприклад, натискання кнопки АЗ-5) з реакцією системи менше 10 мс та синхронізацією $\pm 0.005 \text{ с}$. Таке рішення істотно відрізняється від традиційних тренажерів-симуляторів, які часто мають фіксований часовий інтервал і не забезпечують адекватного відгуку на швидкоплинні події. Візуальна частина тренажера реалізована з використанням бібліотеки Chart.js, що дозволяє оновлювати графіки потужності, температури, тиску та положення стрижнів із частотою 60 кадрів на секунду. Затримка відображення при цьому не перевищує 50 мс, що є достатнім для реалістичного інтерфейсу навчального застосунку.

У порівнянні з відомими підходами, такими як класичні одновимірні моделі або обчислювально затратні системи на зразок RELAP5, запропонований тренажер-симулятор відрізняється можливістю працювати в режимі реального часу з високою точністю, не потребуючи значних обчислювальних ресурсів. Наприклад, у моделі, описаній в [12], для розрахунку сценаріїв аварій використовується набір апріорних табличних сценаріїв, без можливості оперативної зміни вхідних параметрів. Натомість розроблений тренажер-симулятор дозволяє користувачу змінювати умови симуляції та оцінювати наслідки різних дій оператора, зокрема, таких як затримка введення стрижнів або збільшення потужності.

Запропоновані рішення частково компенсують виявлену у розділі аналіз літератури проблему відсутності інструментів для глибокого аналізу причин аварії на ЧАЕС в інтерактивному форматі. Тренажер дозволяє чітко ідентифікувати критичні моменти втручання (15-та, 36-та і 43-я секунди) з точністю $\pm 1.5 \text{ с}$, що відповідає вимогам навчальних сценаріїв.

Разом із тим, дослідження має низку обмежень. По-перше, модель не враховує просторовий розподіл параметрів у активній зоні, що може призводити до заниження локальних ефектів, таких як перегрів окремих каналів. По-друге, термогідравлічні розрахунки не враховують багатофазні потоки та ефекти кавітації, які могли мати критичне значення на фінальному етапі розвитку аварії. Це слід враховувати при практичному застосуванні моделі, особливо для інженерних аналізів безпеки.

Подальший розвиток роботи можливий у кількох напрямках. Найбільш перспективним є впровадження 3D-моделей активної зони з просторовим розрахунком температурних та реактивних полів. Також доцільно інтегрувати методи машинного навчання, які зможуть прогнозувати розвиток сценарію на основі великої кількості змінних. Крім того, поглиблення моделей тепломасообміну та введення елементів оцінки механічного стану конструкцій дозволить наблизити тренажер до професійного інструменту для підготовки операторів АЕС і технічного аналізу безпеки.

У підсумку, розроблений тренажер продемонстрував здатність точно відтворювати аварійні сценарії з високим рівнем деталізації. Це

робить його ефективним інструментом як для навчальних потреб, так і для дослідницького аналізу складних нештатних аварійних ситуацій у ядерній енергетиці.

Висновки

У межах даного дослідження було реалізовано комплексний підхід до моделювання динаміки аварії на Чорнобильській АЕС, який поєднує математичний аналіз фізичних процесів та розробку комп'ютерного тренажера-симулятора для практичного застосування.

Наукова частина дослідження дозволила поглибити розуміння взаємодії критичних фізичних факторів, зокрема: нейтронної кінетики з урахуванням запізнених нейтронів, ефектів ксенонового отруєння, зміни реактивності через пароутворення та процесів тепломасообміну в активній зоні реактора. Результати чисельного моделювання демонструють високу відповідність фактичному розвитку аварії – похибка ключових параметрів не перевищує 7 %. Це свідчить про достовірність побудованих моделей і дозволяє використовувати їх для подальшого аналізу сценаріїв нештатних аварійних ситуацій.

Розроблений інтерактивний тренажер забезпечує візуалізацію динаміки основних фізичних параметрів у режимі реального часу, включаючи потужність, температуру, тиск і положення стрижнів регулювання. Адаптивні алгоритми дискретизації дозволили точно відтворити швидкоплинні зміни у реакторі, що виникали в останні секунди перед вибухом. Симулятор також підтримує ручне налаштування умов сценарію, що робить його ефективним інструментом для навчання та аналізу альтернативних дій персоналу в аварійних умовах. Проведена верифікація моделі на основі публічно доступних даних про аварію дозволила визначити критичні моменти, в які втручання могло б зменшити масштаб катастрофи. Зокрема, виявлені тимчасові точки з точністю ± 1.5 с, у яких певні дії (введення стрижнів, обмеження підняття потужності) були б найбільш ефективними. Таким чином, розв'язання всіх поставлених у роботі задач сприяло досягненню як наукової мети – формалізації закономірностей розвитку аварії на основі фізичних моделей, так і практичної – створенню сучасного тренажера-симулятора, який може бути застосований у підготовці персоналу АЕС. Запропоноване рішення не лише дозволяє краще зрозуміти природу катастрофи 1986 року, але й сприяє підвищенню загального рівня ядерної безпеки завдяки розвитку засобів навчання і аналізу аварійних сценаріїв.

Список літератури

1. Zhou G., Tan D. Review of nuclear power plant control research: neural network-based methods. *Annals of Nuclear Energy*. 2023. Vol. 181. 109513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>.
2. Spatially resolved isotope analysis of a Chernobyl corium fragment extracted from environmental soil / W. Schulz et al. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2025. Vol. 286. 107699. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107699>.
3. Review of modeling experience during operation and decommissioning of RBMK-1500 reactors. I. Safety improvement studies during operation / V. Remeikis et al. *Nuclear Engineering and*

- Design*. 2021. Vol. 380. 110952. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110952>.
4. Delgado R., Kawamura-Solis J., Aures-Garcia A. Development of a training software based on virtual reality interaction and simulation to reduce costs and risks in training on the use of heavy machinery in the mining industry. 2024 IEEE ANDESCON, Cusco, Peru, 11–13 September 2024. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/andescon61840.2024.10755692>.
5. Dynamic fractal cluster model of informational space technological process of power station / P. Budanov et al. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Cham, 2024. P. 141–155. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11.
6. The development of information management model of program technical complexity of automatic system management of technological process for the emergency regime of function the power energy equipment the power station / K. Brovko et al. *HERITAGE OF EUROPEAN SCIENCE: Innovative technology, Computer science, Security systems, Transport development, Physics and mathematics. Monographic series «European Science»*. Karlsruhe, 2024. P. 157–166. DOI: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-27-00-021>.
7. Fractal approach for researching information emergency features of technological parameters / P. Budanov et al. *International Journal of Computing*. 2025. Vol. 24, no. 1. P. 171–177. DOI: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>.
8. CFD simulation on the transient process of coolant mixing phenomenon in reactor pressure vessel / J. Li et al. *Annals of Nuclear Energy*. 2021. Vol. 153. 108045. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108045>.
9. An extensive characterization of xenon isotopic activity ratios from nuclear explosion and nuclear reactors in neighboring countries of South Korea / S. G. Hong et al. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023. Vol. 56, no. 2. P. 601–610. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.10.037>.
10. Digital doubles and intelligent technologies in the training of npp operators / A. Cherniuk et al. *Agriculture, technical and applied sciences: main problems and solutions*. Boston, 2025. P. 177–186. DOI: <https://doi.org/10.46299/isg.2025.mono.tech.1.6.1>.
11. Coolant flow rate instability during extended station blackout accident in NuScale SMR: two approaches for improving flow stability / A. Fakhraei et al. *Progress in Nuclear Energy*. 2021. Vol. 131. 103602. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103602>.
12. Loss of flow accident analysis in Atucha II nuclear power plant using RELAP5 model / S. F. Corzo et al. *Nuclear Engineering and Design*. 2023. Vol. 402. 112108. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112108>.
13. Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review / S. Pakarinen et al. *Progress in Nuclear Energy*. 2024. Vol. 169. 105104. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>.
14. Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters / P. Budanov et al. 3rd International Conference on Engineering And Science, Al-Samawa, Iraq, 3–4 May 2023. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0191648>.
15. Insch A., Loughran I. Chernobyl disaster, 26 april 1986. *The Palgrave Encyclopedia of Interest Groups, Lobbying and Public Affairs*. Cham, 2022. P. 122–129. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44556-0_23.

References

1. G. Zhou and D. Tan, “Review of nuclear power plant control research: Neural network-based methods”, *Annals of Nuclear Energy*, vol. 181, Feb. 2023, Art. no. 109513, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109513>
2. W. Schulz, M. Weiss, M. Raiwa, C. Walther, and L. Leifermann, “Spatially resolved isotope analysis of a Chernobyl corium fragment extracted from environmental soil”, *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 286, Jun. 2025, Art. no. 107699, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2025.107699>
3. V. Remeikis, J. Grineviciute, G. Duškesas, L. Juodis, R. Plukienė, and A. Plukis, “Review of modeling experience during operation and decommissioning of RBMK-1500 reactors. I. Safety improvement studies during operation”, *Nuclear Engineering and Design*, vol. 380, Aug. 2021, Art. no. 110952, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110952>

4. R. Delgado, J. Kawamura-Solis, and A. Aures-Garcia, "Development of a training software based on virtual reality interaction and simulation to reduce costs and risks in training on the use of heavy machinery in the mining industry", in *2024 IEEE ANDESCON*, Cusco, Peru, Sep. 11–13, 2024, pp. 1–4, doi: <https://doi.org/10.1109/andescon61840.2024.10755692>
5. P. Budanov, Y. Oliinyk, A. Cherniuk, and K. Brovko, "Dynamic fractal cluster model of informational space technological process of power station", in *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. Cham: Springer Nat. Switz., 2024, pp. 141–155, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11
6. K. Brovko, A. Cherniuk, Y. Oliinyk, and P. Budanov, "The development of information management model of program technical complexity of automatic system management of technological process for the emergency regime of function the power energy equipment the power station", in *HERITAGE OF EUROPEAN SCIENCE: Innovative Technology, Computer Science, Security Systems, Transport Development, Physics and Mathematics. Monographic Series «European Science»*. Karlsruhe: ScientificWorld-NetAkhav, 2024, pp. 157–166, doi: <https://doi.org/10.30890/2709-2313.2024-27-00-021>
7. P. Budanov, I. Kyrysov, Y. Oliinyk, K. Brovko, and S. Zhukov, "Fractal approach for researching information emergency features of technological parameters", *International Journal of Computing*, vol. 24, no. 1, pp. 171–177, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.47839/ijc.24.1.3889>
8. J. Li *et al.*, "CFD simulation on the transient process of coolant mixing phenomenon in reactor pressure vessel", *Annals of Nuclear Energy*, vol. 153, Apr. 2021, Art. no. 108045, doi: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.108045>
9. S. G. Hong, G. H. Park, S. W. Kim, and Y. Y. Cho, "An extensive characterization of xenon isotopic activity ratios from nuclear explosion and nuclear reactors in neighboring countries of South Korea", *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 56, no. 2, pp. 601–610, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.10.037>
10. A. Cherniuk, K. Brovko, P. Vasiuchenko, and Y. Oliinyk, "Digital doubles and intelligent technologies in the training of npp operators", in *Agriculture, Technical and Applied Sciences: Main Problems and Solutions*. Boston: Int. Sci. Group, Primedia eLaunch, 2025, pp. 177–186, doi: <https://doi.org/10.46299/iscg.2025.mono.tech.1.6.1>
11. A. Fakhraei, F. Faghihi, A. Rabiee, and M. Safarinia, "Coolant flow rate instability during extended station blackout accident in NuScale SMR: Two approaches for improving flow stability", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 131, Jan. 2021, Art. no. 103602, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2020.103602>
12. S. F. Corzo, R. Ugarte, D. M. Godino, and D. E. Ramajo, "Loss of flow accident analysis in Atucha II nuclear power plant using RELAP5 model", *Nuclear Engineering and Design*, vol. 402, Feb. 2023, Art. no. 112108, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.112108>
13. S. Pakarinen, J. Laarni, H. Koskinen, T. Passi, M. Liinasuo, and T.-T. Salonen, "Virtual-Reality training solutions for nuclear power plant field operators: A scoping review", *Progress in Nuclear Energy*, vol. 169, Apr. 2024, Art. no. 105104, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105104>
14. P. Budanov, Y. Oliinyk, A. Cherniuk, and K. Brovko, "Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters", in *3rd International Conference on Engineering and Science*, Al-Samawa, Iraq, May 3–4, 2023. AIP Publ., 2024, doi: <https://doi.org/10.1063/5.0191648>
15. A. Insch and I. Loughran, "Chernobyl disaster, 26 april 1986", in *The Palgrave Encyclopedia of Interest Groups, Lobbying and Public Affairs*. Cham: Springer Int. Publishing, 2022, pp. 122–129, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-44556-0_23

Hadziura (received) 15.05.2025

UDC 621.311.25:519.816

BROVKO KOSTIANTYN ✉ – Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9669-9316>; e-mail: brovkokostantin@gmail.com.

VYNOKUROVA NATALIYA – Assistant Lecturer of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-6210-838X>; e-mail: v.natasha.d@gmail.com.

VELYKOHORSKYI OLEH – Postgraduate Student of the Department of Electrical Engineering and Electrical Power Industry, V. N. Karazin Kharkiv National University; Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6102-0659>; e-mail: velikogorskijoleg@gmail.com.

COMPUTER SIMULATION OF THE DEVELOPMENT OF THE CHORNOBYL NUCLEAR POWER PLANT ACCIDENT USING AN INTERACTIVE SIMULATOR

The process of creating a mathematical model and an interactive computer simulator designed to reproduce the dynamics of the Chernobyl accident is considered. The main goal of the study is to identify the key physical factors that led to the catastrophic acceleration of the reactor, with the subsequent use of the modeling results for educational and research purposes. As part of the work, a comprehensive integrated model was implemented that covers neutron kinetics taking into account delayed neutrons, changes in reactivity due to the steam effect and movement of control rods, the balance of xenon-135 concentration, as well as the thermal hydraulic characteristics of the core. The simulation was implemented using numerical integration methods with an adaptive time step, which allowed us to reproduce the details of the accident process with high accuracy. The dynamics of parameters such as power, temperature, pressure, and rod position were visualized using a web library with an update rate of 60 frames per second. Verification of the model showed that the results correspond to historical data with an accuracy of over 93 % for the main parameters, including the moment of peak power and the values of temperature and pressure. Comparative analysis with available literature sources showed that the proposed approach has advantages over classical one-dimensional models that do not take into account the combined effect of several physical factors. The practical value of the development lies in creating an effective training tool for training nuclear power plant operational personnel, which allows analyzing critical scenarios, identifying effective intervention points and studying the consequences of erroneous actions. The limitation of the model is the lack of spatial distribution of parameters in the reactor and the simplification of thermohydraulic dependencies, which is planned to be taken into account in further research.

Keywords: Chernobyl accident; mathematical modeling; computer simulator; reactivity; xenon poisoning; heat and mass transfer; neutron kinetics; simulation; nuclear safety.