

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЯДЕРНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ОСТАПЕНКО ІВАН АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 621.039

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РАДІАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ОБЛАДНАННЯ  
ЯДЕРНИХ ЕНЕРГОУСТАНОВОК**

05.14.14 - Теплові та ядерні енергоустановки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук  
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і  
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело \_\_\_\_\_ Іван ОСТАПЕНКО

Науковий керівник:

**Сахно Віктор Іванович,**

доктор технічних наук,

старший науковий співробітник

Київ-2026

## АНОТАЦІЯ

**Остапенко І.А. Радіаційна стійкість обладнання ядерних енергоустановок. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.14 – Теплові та ядерні енергоустановки. Інститут ядерних досліджень Національної академії наук України та Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2026.

Дисертаційна робота присвячена підвищенню достовірності оцінки радіаційної стійкості обладнання ядерних енергоустановок на прикладі кабельної продукції систем, важливих для безпеки.

У першому розділі обґрунтовано важливість випробувань і профілактичного обслуговування обладнання для безпеки АЕС та показано, що в умовах довгострокової експлуатації енергоблоків особливої ваги набуває достовірне підтвердження працездатності систем і елементів, важливих для безпеки, у тому числі в аварійних режимах.

Проаналізовано сучасні підходи до кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС, зокрема кабельної продукції, та показано, що традиційні методи радіаційних випробувань, які ґрунтуються переважно на застосуванні ізотопних  $\gamma$ -джерел, не повною мірою відтворюють реальні умови впливу на обладнання при аваріях.

На підставі узагальнення міжнародних рекомендацій і наявної випробувальної практики зроблено висновок про необхідність розроблення фізично обґрунтованої методики випробувань кабельної продукції у керованих змішаних  $\beta$ - $\gamma$  полях із забезпеченням інструментального контролю дозових параметрів і встановленням функціонально значущих критеріїв працездатності ізоляції. Завершує розділ постановка завдань дослідження, що випливають з аналізу

сучасного стану проблеми.

У другому розділі виконано аналіз існуючих методів кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС та показано їх переваги й обмеження в можливості відтворення реальних умов впливу аварій на обладнання, розміщене в ГО реакторних установок типу ВВЕР. Розглянуто стандартну процедуру кваліфікації, підхід із застосуванням спеціальної ЛОСА-камери та запропоновано методіку комплексних випробувань на радіаційній установці. На підставі аналізу нормативної та методичної бази встановлено, що традиційні підходи до радіаційних випробувань, які переважно базуються на використанні ізотопних джерел  $^{60}\text{Co}$ , мають виражений консервативний характер і не повною мірою відображають реальні фізичні умови аварійного опромінення під герметичною оболонкою.

У розділі досліджено умови формування радіаційних полів у разі аварії з втратою теплоносія та показано, що під герметичною оболонкою радіаційне поле має змішаний  $\beta$ - $\gamma$  характер, причому істотний внесок у нього роблять як короткоживучі інертні гази та ізотопи йоду, так і середньо- та довгоживучі продукти поділу. За результатами чисельного моделювання методом Монте-Карло отримано енергетичні спектри  $\beta$ -частинок і  $\gamma$ -квантів, характерні для аварій ЛОСА у реакторах типу ВВЕР, а також проаналізовано їх значення для механізмів радіаційної деградації кабельної ізоляції.

У третьому розділі представлено результати розроблення та експериментальної апробації стенду для проведення прискорених радіаційних випробувань на базі радіаційної установки Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України з лінійним прискорювачем електронів «Електроніка У-005». Наведено технічні характеристики установки, показано її придатність для формування інтенсивних полів опромінення та обґрунтовано можливість використання такого комплексу для відтворення умов, релевантних завданням кваліфікації обладнання атомних електростанцій. Встановлено, що застосована установка забезпечує широкий діапазон регулювання параметрів електронного пучка та дозволяє реалізувати експериментальні режими, необхідні для дослідження впливу інтенсивного іонізуючого випромінювання на кабельну

продукцію та інші елементи обладнання, важливого для безпеки.

У розділі обґрунтовано двоетапний принцип формування змішаних радіаційних полів у реакційній камері. На першому етапі вузький пучок прискорених електронів трансформується у широке рівномірне поле опромінення, придатне для досліджень і радіаційно-технологічних застосувань. На другому етапі реалізовано формування змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля з потрібним співвідношенням компонент шляхом використання напівпрозорої конверсійної вольфрамової мішені, встановленої на виході системи формування поля, що забезпечує генерацію гальмівного випромінювання та перехід від переважно електронного до змішаного опромінення. Таким чином створено фізично обґрунтовану експериментальну основу для проведення кваліфікаційних випробувань у режимах, наближених до реальних аварійних умов експлуатації обладнання під герметичною оболонкою.

Окрему увагу приділено опису створення засобів контролю параметрів поля іонізуючих випромінювань у реакційній камері. Для вимірювань у полях високої інтенсивності запропоновано використання пропорційного лічильника СИ-5007 у струмовому режимі («обернене включення»), що дало змогу істотно зменшити вплив імпульсних перевантажень, паразитних ємностей довгих ліній зв'язку та електромагнітних завад від високочастотних систем прискорювача. Аналіз вольтамперних характеристик лічильника без радіаційного поля та в робочому режимі дозволив визначити діапазон напруг, придатний для його стабільного використання як елемента системи дозиметричного контролю. У результаті створено модернізовану систему вимірювання характеристик змішаного поля, придатну для реєстрації як електронної, так і  $\gamma$  компоненти в умовах інтенсивного опромінення.

За результатами експериментальних досліджень отримано просторові розподіли потужності дози  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінювання в реакційній камері. Показано, що сформоване електронне поле забезпечує рівні потужності дози, достатні для проведення функціональних радіаційних випробувань і кваліфікації обладнання для використання на атомних електростанціях. Водночас для  $\gamma$  компоненти встановлено вищу проникну здатність порівняно з первинним електронним пучком і виражену кутову анізотропію, зумовлену діаграмою спрямованості гальмівного

випромінювання.

Отримані результати підтвердили можливість відтворення в реакційній камері контрольованого змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля з просторовими характеристиками, придатними для подальших досліджень радіаційної стійкості кабельної продукції.

У четвертому розділі представлено результати чисельного моделювання пучка прискорених електронів і процесів формування радіаційного поля в реакційній камері лінійного прискорювача електронів із застосуванням методу Монте-Карло в комп'ютерному коді TOPAS (GEANT4). Побудовано тривимірну модель реакційної камери, яка враховує випускне вікно прискорювача, повітряний проміжок, систему розсіювання та елементи формування широкого поля опромінення.

Показано, що включення до моделі випускного вікна, розсіювачів, відбивачів і захисних екранів є принципово необхідним для коректного відтворення початкового розсіювання електронів, генерації вторинного гальмівного випромінювання та просторового розподілу енерговиділення в об'ємі реакційної камери. На основі розрахунків обґрунтовано конфігурацію елементів системи формування поля, зокрема використання тонких алюмінієвих розсіювачів, конверсійної мішені і алюмінієвих відбивачів, що забезпечують розширення пучка та підвищення однорідності поля опромінення.

У розділі досліджено просторово-енергетичні характеристики пучка після виходу з прискорювача та в об'ємі реакційної камери. За результатами моделювання отримано траєкторії частинок, енергетичні спектри електронів і  $\gamma$ -квантів, а також залежності, що характеризують трансформацію пучка в процесі його проходження через повітряне середовище. Показано, що внаслідок багаторазового кулонівського розсіювання формується розширений пучок із вираженим градієнтом інтенсивності відносно осі, що потребує обґрунтованого вибору робочої зони опромінення. Окремо виконано аналіз статистичної збіжності розрахунків і визначено раціональний обсяг моделювання, достатній для отримання стійких оцінок поглинутої дози в контрольних точках.

За результатами моделювання параметрів радіаційного поля в реакційній

камері визначено просторові розподіли поглинутої дози за рахунок  $\beta$ - та  $\gamma$ -складових, а також зміну середньої енергії частинок уздовж осі поширення пучка.

Встановлено, що в режимі без конверсійної мішені основний внесок у поглинуту дозу дають прискорені електрони, тоді як  $\gamma$ -компонента має вторинний характер і формується переважно як гальмівне випромінювання. Разом з тим отримані розрахункові дані дозволили кількісно оцінити просторову неоднорідність поля, визначити межі робочої зони з прийнятним рівнем нерівномірності та підтвердити придатність розробленої моделі для подальшого перенесення результатів на завдання моделювання випробувань кабельної продукції в змішаних  $\beta$ - $\gamma$  полях.

У п'ятому розділі наведено результати експериментального дослідження радіаційної стійкості кабельної продукції в умовах інтенсивного змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля, сформованого в реакційній камері лінійного прискорювача електронів. У якості інтегрального електрофізичного показнику стану ізоляції використано струм витоку між центральною жилою та екраном кабелю, що відповідає практиці кваліфікації кабельної продукції систем керування і контролю, де критичним є не сам факт пробою, а збереження достатньо високого опору ізоляції при робочій напрузі. У роботі застосовано схему вимірювання з шунтуючим опором 1 МОм, що забезпечила реєстрацію струму витоку через ізоляцію за різних режимів зміни потужності дози. Вимірювання проводилися без прикладеної напруги, а також при напрузі 2 кВ у режимах зростання та зменшення потужності дози, що дало можливість окремо простежити внесок радіаційно-індукованої провідності та необоротної деградації ізоляційного матеріалу.

Основний масив експериментальних результатів отримано для коаксіального кабелю РК 75-9-13 з поліетиленовою ізоляцією. Для цього кабелю встановлено нелінійний характер залежності струму витоку від потужності поглиненої дози, а також наявність гістерезису при зміні режиму опромінення, що свідчить про накладання оборотної радіаційно-індукованої провідності та накопичувальних деградаційних процесів. Показано, що в області потужностей

доза приблизно 130-160 кГр/год відбувається якісна зміна характеру залежності, яка інтерпретується як перехід до режиму, де визначальним стає внесок накопичувальної деградації полімерної ізоляції.

Також досліджено коаксіальний кабель з мінеральною ізоляцією, для якого залежність струму витоку від потужності дози також має нелінійний характер, однак порогова область зміщена в зону значно вищих потужностей дози – близько 230–260 кГр/год, а максимальне значення струму витоку при потужності дози близько 300 кГр/год не перевищує 0,13 мкА. При цьому гістерезис для кабелю з мінеральною ізоляцією виражений значно слабше, що узгоджується з відсутністю радіаційно-хімічної деструкції, характерної для полімерних матеріалів.

На підставі аналізу отриманих результатів у роботі запропоновано функціональний критерій втрати ізоляційної здатності кабелю, що базується на допустимому струмі витоку при робочій напрузі. За критичний прийнято рівень  $I_{кр} = 1$  мкА при напрузі 2 кВ, що відповідає еквівалентному опору ізоляції  $2 \cdot 10^9$  Ом для зразка довжиною 5 м. Такий підхід дозволив перейти від якісної оцінки деградації ізоляції до кількісного визначення критичних режимів опромінення. Показано, що запропонований критерій безпосередньо пов'язує результати радіаційних випробувань із працездатністю кабельної лінії як елемента системи, важливої для безпеки АЕС, а також створює основу для практичного використання результатів у завданнях кваліфікації та оцінювання залишкового ресурсу кабельної продукції.

Отримані залежності узгоджуються з результатами розрахунково-експериментального моделювання, виконаного у попередньому розділі, та підтверджують визначальну роль сумісної дії потужності дози й механізмів радіаційно-індукованої та накопичувальної деградації ізоляції.

**Ключові слова:** ядерна енергоустановка, атомна електростанція, безпека АЕС, радіаційна стійкість, кваліфікація обладнання, кабельна продукція, кабельна ізоляція, змішане  $\beta$ - $\gamma$  поле, потужність дози, струм витоку, лінійний прискорювач електронів, Монте-Карло, TOPAS, GEANT4.

## ABSTRACT

### **Ostapenko I.A. Radiation Resistance of Nuclear Power Plant Equipment. – Qualifying scientific work as a manuscript.**

Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.14.14 – Thermal and Nuclear Power Installations. Institute for Nuclear Research National Academy of Sciences of Ukraine and National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, 2026.

The dissertation addresses an important scientific and technical problem of improving the reliability of the assessment of radiation resistance of nuclear power plant (NPP) equipment, using safety-related cable systems as a case study.

Chapter 1 substantiates the importance of equipment testing and preventive maintenance for the safety of Nuclear Power Plants (NPPs). It demonstrates that under long-term operation, the reliable confirmation of the operability of safety-critical systems and components, particularly during accident conditions, becomes paramount. The chapter analyzes current approaches to the qualification testing of NPP equipment, specifically cables. It shows that traditional radiation testing methods, which rely primarily on isotopic  $\gamma$ -sources, do not fully replicate the actual environmental conditions during accidents.

Based on a synthesis of international recommendations and existing testing practices, the study concludes that it is necessary to develop a physically grounded methodology for testing cable products in controlled mixed  $\beta$ - $\gamma$  fields, ensuring instrumental control of dose parameters and establishing functionally significant insulation operability criteria. The chapter concludes by defining the research objectives derived from the analysis of the current state of the problem.

Chapter 2 provides an analysis of existing qualification testing methods for NPP equipment, highlighting their advantages and limitations in replicating the actual impact of accidents on equipment located within the containment (VVER-type reactors). The

standard qualification procedure and the approach using a specialized LOCA (Loss-of-Coolant Accident) chamber are considered, and a methodology for integrated testing at a radiation facility is proposed. Analysis of the regulatory and methodological framework reveals that traditional radiation testing approaches, based largely on  $^{60}\text{Co}$  isotopic sources, are inherently conservative and do not fully reflect the actual physical conditions of emergency irradiation under containment. The chapter investigates the conditions for radiation field formation during a LOCA and demonstrates that the radiation field within the containment has a mixed  $\beta$ - $\gamma$  character. Significant contributions are made by short-lived noble gases and iodine isotopes, as well as medium- and long-lived fission products. Based on numerical modeling results using the Monte Carlo method, energy spectra for  $\beta$ -particles and  $\gamma$ -quanta characteristic of LOCA accidents in VVER reactors were obtained, and their significance for the mechanisms of radiation-induced cable insulation degradation was analyzed.

Chapter 3 presents the results of the development and experimental validation of a test stand for accelerated radiation testing based on the radiation facility of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, utilizing the "Elektronika U-005" linear electron accelerator. The technical characteristics of the facility are provided, demonstrating its suitability for generating intensive irradiation fields and justifying the possibility of using such a complex to replicate conditions relevant to NPP equipment qualification. It was established that the facility provides a wide range of adjustment for electron beam parameters, allowing for the experimental regimes necessary to study the impact of intense ionizing radiation on cable products and other safety-important components. The chapter justifies a two-stage principle for forming mixed radiation fields in the reaction chamber. Stage I: A narrow beam of accelerated electrons is transformed into a wide, uniform irradiation field suitable for research and industrial applications. Stage II: A mixed  $\beta$ - $\gamma$  field with the required component ratio is generated using a semi-transparent tungsten conversion target installed at the output of the field-forming system. This ensures the generation of bremsstrahlung and the transition from predominantly electron to mixed irradiation. Special attention is paid to the

development of monitoring tools for ionizing radiation parameters within the reaction chamber. For measurements in high-intensity fields, the use of a SI-5007 proportional counter in current mode ("reverse connection") is proposed. This significantly reduced the impact of pulse overloads, parasitic capacitance of long communication lines, and electromagnetic interference from the accelerator's high-frequency systems. Spatial distributions of  $\beta$  and  $\gamma$  dose rates were obtained, confirming the ability to replicate a controlled mixed field with characteristics suitable for further radiation stability studies of cable products.

Chapter 4 presents the results of numerical modeling of the accelerated electron beam and radiation field formation processes in the reaction chamber using the Monte Carlo method via the TOPAS (GEANT4) code. A three-dimensional model of the reaction chamber was constructed, accounting for the accelerator exit window, air gap, scattering system, and elements forming the wide irradiation field. The study demonstrates that including the exit window, scatterers, reflectors, and shielding in the model is fundamental for correctly replicating initial electron scattering, secondary bremsstrahlung generation, and the spatial distribution of energy deposition. Based on calculations, the configuration of the field-forming system elements was justified, specifically the use of thin aluminum scatterers, a conversion target, and aluminum reflectors to expand the beam and improve dose uniformity. The modeling results determined the spatial distributions of the absorbed dose due to  $\beta$  and  $\gamma$  components, as well as the change in average particle energy along the beam propagation axis. In the mode without a conversion target, accelerated electrons provide the primary contribution to the absorbed dose, while the  $\gamma$ -component is secondary. The calculated data allowed for a quantitative assessment of spatial non-uniformity and confirmed the model's suitability for simulating cable testing in mixed  $\beta$ - $\gamma$  fields.

Chapter 5 provides the results of an experimental study on the radiation stability of cable products in intensive mixed  $\beta$ - $\gamma$  fields. The leakage current between the central conductor and the cable shield was used as an integral electrophysical indicator of insulation state. This aligns with the qualification practices for control and monitoring

systems, where the critical factor is not insulation breakdown itself, but the maintenance of sufficiently high insulation resistance at operating voltage. Key findings include: Coaxial cable RK 75-9-13 (Polyethylene insulation): A non-linear relationship between leakage current and absorbed dose rate was established, along with hysteresis during irradiation changes. At dose rates of approximately 130–160 kGy/h, a qualitative shift occurs, where the contribution of cumulative polymer degradation becomes dominant. Mineral-insulated coaxial cable: The non-linear relationship persists, but the threshold region is shifted to significantly higher dose rates (230–260 kGy/h), with a maximum leakage current not exceeding 0.13  $\mu\text{A}$  at 300 kGy/h. Hysteresis is much less pronounced, consistent with the absence of radio-chemical destruction typical of polymers. Based on the results, a functional criterion for the loss of cable insulation capacity is proposed, centered on the permissible leakage current at operating voltage. A critical level of  $I_{cr} = 1 \mu\text{A}$  at a voltage of 2 kV was adopted, corresponding to an equivalent insulation resistance of  $2 \cdot 10^9 \Omega$  for a 5-meter sample. This approach enables a transition from qualitative assessment to the quantitative determination of critical irradiation regimes, providing a basis for evaluating the residual life of cable products in NPP safety systems.

**Keywords:** nuclear power plant, NPP safety, radiation resistance, equipment qualification, cable products, cable insulation, mixed beta-gamma field, dose rate, leakage current, linear electron accelerator, Monte-Carlo, TOPAS, GEANT4.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*- статті у наукових фахових виданнях України:*

1. Остапенко І.А., Горанчук Д.В., Косяк Д.Н. Методы оценки состояния квалификации АЭС Украины. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2012. Т. 3, № 8(57). С. 8–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2012.4067. Фахове видання, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus та ін.

*У публікації автору належить структурна схема виконання робіт з кваліфікації обладнання, аналіз та адаптація заходів із встановлення статусу кваліфікації та розробка заходів з підвищення кваліфікації.*

2. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г. Шляхи вдосконалення радіаційної техніки для кваліфікації обладнання АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2013. Т. 14, № 1. С. 91–96. DOI: 10.15407/jnpae2013.01.091. **Фахове видання**, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q4)**, Web of Science, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), International Nuclear Information System (INIS) та ін.

*У публікації автору належить визначення умов впливу на обладнання змішаного іонізуючого випромінювання, підтвердження необхідності удосконалення діючої радіаційної установки з прискорювачем електронів 4 МеВ.*

3. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17, № 2. С. 199–203. DOI: 10.15407/jnpae2016.02.199. **Фахове видання**, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q4)**, Web of Science, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), International Nuclear Information System (INIS) та ін.

*У публікації автору належить вимірювання та обробка даних з визначення конфігурації радіаційного поля в реакційній камері установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання АЕС.*

4. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Остапенко І.А., Федоров Д.О. Уроки аварії на АЕС Fukushima-Daiichi для безпеки ядерної енергетики України. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 3. С. 107–114. DOI: 10.20535/1813-5420.3.2022.272090. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus та ін.

*Автор виконав обробку даних з визначення обсягів викиду в навколишнє середовище радіоактивних речовин.*

5. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Верінов О.М., Філатов В.І., Остапенко І.А. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. Ядерна та радіаційна безпека. 2022. № 3(95). С. 76–81. DOI: 10.32918/nrs.2022.3(95).08. **Фахове видання, включено до категорії «А»** Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз **SCOPUS (Q2)**, EBSCO, Directory of Open Access Journals (DOAJ), OpenAIRE, Bielefeld Academic Search Engine (BASE), Google Scholar, Index Copernicus та ін.

*Автор виконав аналіз чинників, що можуть впливати на обладнання в умовах важких аварій.*

6. Скалозубов В.І., Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Дорож О.А., Остапенко І.А. Метод кваліфікації модернізацій активних систем безпеки для запобігання гідродинамічній нестійкості. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2. С. 95–99. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279688. Фахове видання, включено до категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus та ін.

*Автор виконав аналіз та підтвердження необхідності кваліфікації обладнання.*

7. Бібік Т.В., Остапенко І.А., Гончарук В.Г. Методика отримання іонізуючого випромінювання на основі ефекту гальмівного випромінювання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. С. 97–102. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2023.290936. Фахове видання, включено до категорії «Б»

Переліку наукових фахових видань України, включено до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Index Copernicus та ін.

*Автор запропонував варіанти формування гальмінового випромінювання під дією прискорених електронів.*

**- статті в інших виданнях:**

8. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Проект удосконаленого дослідницького радіаційного комплексу ІЯД НАН України. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. № 35. 2014. С. 167–171. Журнал включений до наукометричних баз CrossRef Open Journal Systems (США); Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Google Scholar (США); OpenAIRE; WorldCat та ін.

*Автор приймав участь у постановці задачі та аналізі отриманих результатів.*

9. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Сахно В.І. Характеристики лічильника СИ5007 в оберненому включенні. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія Фізика. № 38. 2015. С. 141–148. Журнал включений до наукометричних баз CrossRef Open Journal Systems (США); Bielefeld Academic Search Engine (BASE); Google Scholar (США); OpenAIRE; WorldCat та ін.

*Автор приймав участь в проведенні випробувань пропорційного лічильника та обробці результатів.*

**- тези доповідей та матеріали конференцій:**

10. Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Пилипець Д.Т., Сахно В.І., Халова Н.В. Дослідження проблем використання радіаційної установки ІЯД НАН України в технологіях нових конструкційних матеріалів в ядерній енергетиці. Тези доповідей XIX Щорічної конференції Інституту ядерних досліджень НАН України. 24–27 січня 2012 р. Київ, Україна. С. 96–97.

11. Остапенко І.А. Методика оцінки поточного стану кваліфікації обладнання АЕС України. X Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрів, студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 16–20 квітня 2012р. Тези доповіді. Київ, НТУУ «КПІ». 2012. С. 98.

12. Kovalinska T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyy A.G. The development of new projection methods of radiation protection of industrial radiation installations. The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Book of abstracts. Kyiv, Ukraine. September 3–7, 2012. P. 150–154. Включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.

13. Kovalinska T.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Zelinskyy A.G. The improvement of KINR NASU experimental base and methods of nondestructive control of functional characteristics of nuclear power stations' equipment and materials. The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Book of abstracts. Kyiv, Ukraine. September 3–7, 2012. P. 155–159. Включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.

14. Kovalinska T.V., Khalova N.V., Ostapenko I.A., Sakhno V.I., Shlapatska V.V., Zelinskyy A.G. The problems of the usage of powerful electrons accelerators for the irradiation of nuclear power stations' equipment and materials. The 4th International conference "Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy". Book of abstracts. Kyiv, Ukraine. September 3–7, 2012. P. 504–508. Включено до міжнародної наукометричної бази SCOPUS.

15. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Желтоножський В.О. Актуальність дослідження впливу іонізуючих випромінювань та заряджених частинок низьких енергій на функціональні характеристики обладнання для ядерної енергетики. XX-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 28 січня–01 лютого 2013 р. Тези доповіді. Київ. 2013. С. 102.

16. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Вишневський І.М. Перспективи розвитку експериментальної бази радіаційних досліджень ІЯД НАН України. XX-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 28 січня–01 лютого 2013 р. Тези доповіді. Київ. 2013. С. 102–103.

17. Зелінський А.Г., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Дослідження радіаційної стійкості конструкційних матеріалів АЕС України. XX-а

щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 28 січня–01 лютого 2013 р. Тези доповіді. Київ. 2013. С. 103–104.

18. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г., Халова Н.В. Проблеми оптимізації опромінювання промислових виробів. XX-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 28 січня–01 лютого 2013 р. Тези доповіді. Київ. 2013. С. 114–115.

19. Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Сахно В.І., Остапенко І.А., Халова Н.В., Шлапацька В.В. Проблеми технологічної дозиметрії радіаційних процесів. XX-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 28 січня–01 лютого 2013 р. Тези доповіді. Київ. 2013. С. 115.

20. Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Остапенко І.А., Сахно В.І., Фанлейб А.М. Методи дослідження і кваліфікації цементних виробів для переробки та зберігання радіоактивних відходів. XXI-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 27–31 січня 2014 р. Тези доповіді. Київ. 2014. С. 108–109.

21. Остапенко І.А., Вишневський І.М., Ковалінська Т.В., Сахно В.І. Дослідження параметрів поля радіаційної установки ІЯД НАН України з метою проведення кваліфікаційних випробувань обладнання. XXI-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 27–31 січня 2014 р. Тези доповіді. Київ. 2014. С. 114–115.

22. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Удосконалена система вимірювань змішаних  $\beta$ -,  $\gamma$ -полів у реакційній камері радіаційної установки ІЯД НАН України. XXII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 26–30 січня 2015 р. Тези доповіді. Київ. 2015. С. 109.

23. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А. Техніка та методи радіаційних вимірювань у дослідженнях на пучках електронів 4 МеВ радіаційної установки ІЯД. XXII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 26–30 січня 2015 р. Тези доповіді. Київ. 2015. С. 109–110.

24. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Вишневський І.М., Зелінський А.Г., Остапенко І.А., Халова Н.В. Дослідження та розробка прискорювача 0,5 МеВ для експериментального радіаційного комплексу. XXII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 26–30 січня 2015 р. Тези доповіді. Київ. 2015. С. 110–111.

25. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Стан кваліфікації обладнання АЕС України і шляхи подальшого прогресу цих радіаційних технологій. XXIII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 01–05 лютого 2016 р. Тези доповіді. Київ. 2016. С. 101–102.

26. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І., Зелінський А.Г., Халова Н.В., Файнлейб А.М., Даниленко І.Ю., Колесник Ю.М. Розробка нових радіаційних технологічних процесів для індустрії. XXIII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 01–05 лютого 2016 р. Тези доповіді. Київ. 2016. С. 123–124.

27. Сахно В.І., Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Зелінський А.Г., Міхнєва Є.Г., Халова Н.В., Жернов О.А. Аналіз отриманого досвіду, проблем та шляхів подальшого розвитку прикладних технологічних досліджень в секторі радіаційних технологій. XXIII-а щорічна наукова конференція Інституту ядерних досліджень НАН України. 01–05 лютого 2016 р. Тези доповіді. Київ. 2016. С. 127–128.

28. Притика Є.В., Остапенко І.А. Аналіз роботи систем САОЗ в умовах аварій. XVI Міжнародна науково-практична конференція аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики». 24–27 квітня 2018 р. Тези доповіді. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. Т. 1. С. 260.

## ЗМІСТ

|  |           |
|--|-----------|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ .....  | 21        |
| ВСТУП.....   | 23        |
| <b>1 ЗНАЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ І ПРОФІЛАКТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ<br/>ОБЛАДНАННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....</b>    | <b>30</b> |
| 1.1 Безпека експлуатації атомних електростанцій .....  | 30        |
| 1.2 Випробування обладнання АЕС для забезпечення його надійності .....   | 31        |
| 1.2.1 Сертифікаційні випробування.....   | 32        |
| 1.2.2 Приймальні випробування .....  | 32        |
| 1.2.3 Періодичні випробування .....  | 32        |
| 1.3 Система кваліфікації технологічного обладнання .....   | 33        |
| 1.3.1 Підготовка вихідних даних .....  | 34        |
| 1.3.2 Встановлення стану кваліфікації обладнання .....   | 36        |
| 1.3.3 Заходи, спрямовані на підвищення кваліфікації обладнання .....   | 38        |
| 1.4 Кваліфікаційні випробування – сучасний спосіб визначення ресурсних<br>показників обладнання атомних електростанцій. .... | 39        |
| 1.4.1 Метод кваліфікаційних випробувань .....  | 39        |
| 1.4.2 Проведення кваліфікаційних випробувань .....   | 41        |
| 1.4.3 Механізми радіаційно-хімічної деградації полімерних діелектриків.....  | 48        |
| 1.4.4 Установки для проведення кваліфікаційних випробувань .....   | 50        |
| 1.5 Поточний стан проблем кваліфікації кабельної продукції в умовах<br>продовження ресурсу АЕС .....                         | 51        |
| 1.5.1 Проблема моделювання синергетичних ефектів та масштабування часу<br>.....  | 51        |
| 1.5.2 Специфіка старіння сучасних полімерних композицій .....  | 52        |
| 1.5.3 Обмеженість експериментальної бази та необхідність нових методів... ..   | 52        |
| 1.5.4 Міжнародні рекомендації до кваліфікації обладнання.....  | 53        |
| 1.6 Висновки до розділу .....  | 54        |

|   |     |
|---|-----|
| 2 МЕТОДИ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ ОБЛАДНАННЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ .....  | 56  |
| 2.1 Переваги та недоліки існуючих методів кваліфікаційних випробувань.....  | 56  |
| 2.1.1 Стандартна процедура .....  | 56  |
| 2.1.2 Методологія проведення кваліфікаційних випробувань у спеціальній ЛОСА-камері.....                                 | 57  |
| 2.2 Методика комплексних випробувань на радіаційній установці .....   | 58  |
| 2.2.1 Визначення умов впливу навколишнього середовища.....  | 59  |
| 2.2.2 Моделювання характеристик іонізуючих випромінювань.....   | 65  |
| 2.2.3 Математична модель та алгоритм розрахунку режимів прискореного термічного старіння.....                           | 76  |
| 2.2.4 Методика розрахунку поглинутої дози при опроміненні електронами високих енергій .....                             | 79  |
| 2.2.5 Аналіз спектральних характеристик аварійного випромінювання та механізмів радіаційної деградації обладнання ..... | 80  |
| 2.3 Висновки розділу.....   | 86  |
| 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД НА БАЗІ РАДІАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З ПРИСКОРЮВАЧЕМ ЕЛЕКТРОНІВ .....                                | 88  |
| 3.1 Технічні характеристики радіаційної установки Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України ..... | 88  |
| 3.2 Принцип формування змішаних радіаційних полів .....   | 91  |
| 3.3 Засоби контролю поля іонізуючих випромінювань в реакційній камері.....  | 94  |
| 3.3.1 Стаціонарні засоби контролю інтенсивного поля випромінювання в просторі реакційної камери.....                    | 94  |
| 3.3.2 Механічний пристрій для переміщення датчиків випромінювання .....   | 97  |
| 3.3.3 Засоби контролю поля прискорених електронів .....   | 98  |
| 3.3.4 Засоби контролю поля $\gamma$ -випромінювання.....  | 99  |
| 3.3.5 Модернізована система контролю параметрів поля іонізуючих випромінювань в реакційній камері .....                 | 120 |

|  |     |
|--|-----|
| 3.4 Вимірювання характеристик змішаних полів в реакційній камері лінійного прискорювача електронів .....       | 121 |
| 3.4.1 Характеристики поля прискорених електронів.....  | 121 |
| 3.4.2 Характеристики змішаного $\beta$ - та $\gamma$ -поля .....   | 134 |
| 3.4.3 Порівняння отриманих результатів .....   | 137 |
| 3.5 Висновки до розділу .....  | 138 |
| 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПУЧКА ПРИСКОРЕНИХ ЕЛЕКТРОНІВ.....  | 140 |
| 4.1 Моделювання пучка прискорених електронів.....  | 140 |
| 4.1.1 Моделювання реакційної камери радіаційної установки та системи формування широкого поля опромінення..... | 144 |
| 4.1.2 Підбір оптимальної конфігурації розсіювачів.....   | 149 |
| 4.1.3 Моделювання параметрів радіаційного поля в реакційній камері прискорювача.....                           | 156 |
| 4.1.4 Моделювання випробувань кабелів в змішаних радіаційних полях .....                                       | 169 |
| 4.2 Висновки до розділу .....  | 174 |
| 5 ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ.....  | 176 |
| 5.1 Об'єкти та умови експериментальних досліджень.....   | 176 |
| 5.2 Методика вимірювання струмів витоку ізоляції .....   | 177 |
| 5.3 Результати експериментальних вимірювань .....  | 178 |
| 5.3.1 Результати експериментальних вимірювань для кабелю РК 75-9-13 ...  | 178 |
| 5.3.2 Порівняльні результати для кабелю з мінеральною ізоляцією.....   | 179 |
| 5.4 Аналіз та фізична інтерпретація результатів.....   | 180 |
| 5.5 Співставлення експерименту з розрахунково-експериментальною моделлю .....                                  | 181 |
| 5.6 Визначення критичної потужності дози для втрати ізоляційної здатності .                                    | 182 |
| 5.7 Практичне значення отриманих результатів.....  | 183 |
| ВИСНОВКИ.....  | 184 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....  | 187 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

|          |   |
|----------|---|
| DLO      | – Diffusion Limited Oxidation (дифузійно-лімітоване окислення);   |
| ENSDF    | – Evaluated Nuclear Structure Data File (бібліотека оцінених ядерних даних);                              |
| HELB     | – High Energy Line Break (розрив високоенергетичного паропроводу);  |
| IEC      | – International Electrotechnical Commission (Міжнародна електротехнічна комісія);                         |
| IEEE     | – Institute of Electrical and Electronics Engineers (Інститут інженерів з електротехніки та електроніки); |
| LOCA     | – Loss of Coolant Accidents (аварії з втратою теплоносія);  |
| MSLB     | – Main Steam Line Break (розрив магістрального паропроводу);  |
| АЕС      | – атомна електрична станція;  |
| АСУ ТП   | – автоматизована система управління технологічними процесами;   |
| ВВЕР     | – водо-водяний енергетичний реактор;  |
| ВПА      | – вихідна подія аварії;   |
| ГО       | – герметична оболонка;  |
| ЕПГ      | – етилен-пропіленова гума;  |
| ІАБ      | – імовірнісний аналіз безпеки;  |
| ІД       | – індукційний датчик;   |
| ІКС      | – інформаційно-керуюча система;   |
| ІЯД      | – Інститут ядерних досліджень;  |
| КВ       | – кваліфікація встановлена;   |
| КВП та А | – контрольно-вимірювальні прилади та автоматика   |
| КНВ      | – кваліфікація не встановлена;  |
| КО       | – кваліфікація обладнання;  |

- МАГАТЕ – Міжнародне агентство з атомної енергії;
- НАН – Національна академія наук;
- НРБУ-97 – Норми радіаційної безпеки України;
- ПА – проєктна аварія;
- ПВХ – полівінілхлорид;
- ПЕ – поліетилен;
- ПЛ – пропорційний лічильник;
- ППР – планово-попереджувальний ремонт;
- ПТЕ – подовження терміну експлуатації;
- ТОіР – технічне обслуговування та ремонт;
- ЦФ – циліндр Фарадея;
- ЯЕУ – ядерна енергетична установка;

## ВСТУП

Надійність і безпека експлуатації ядерних енергоустановок визначаються здатністю систем і елементів, важливих для безпеки, зберігати працездатність упродовж усього життєвого циклу — за умов нормальної експлуатації, порушень нормальної експлуатації та в аварійних режимах [1]. У межах сучасних підходів до управління строком служби енергоблоків [2] ключовим інструментом підтвердження працездатності електротехнічного обладнання є кваліфікація обладнання за чинниками навколишнього середовища (Environmental Qualification), що можуть виникати в місцях експлуатації обладнання, яка має забезпечувати відтворюваний, метрологічно контрольований та фізично обґрунтований зв'язок між умовами випробувань і реальними впливами на обладнання в енергоблоці.

У контексті довгострокової експлуатації реакторних установок типу вододіючих енергетичних реакторів (ВВЕР) та реалізації заходів з подовження терміну експлуатації [2] особливої актуальності набуває достовірною оцінка радіаційної стійкості обладнання. Одним із найбільш критичних об'єктів у цьому напрямі є кабельно-провідникова продукція, зокрема кабельні лінії в герметичній оболонці (ГО), де повна заміна кабельних трас є технічно складною та економічно обтяжливою. Водночас кабельні мережі істотно впливають на працездатність систем керування, контролю та електропостачання, а відтак — на здатність систем, важливих для безпеки, виконувати свої функції в умовах проєктних і запроєктних аварій.

Практика кваліфікаційних випробувань кабельної продукції історично спирається на застосування ізотопних  $\gamma$ -джерел та підхід «еквівалентної  $\gamma$ -доза», коли  $\beta$ - і (за потреби) нейтронна складові зводяться до еквівалентних дозових навантажень. Проте для аварійних умов у герметичній оболонці реакторних установок спектральний склад поля іонізуючого випромінювання має принципове значення: домінування  $\beta$ -компоненти для низки нуклідів продуктів поділу, відмінності в просторовому розподілі джерел, а також можливі високі потужності

доза формує інші механізми деградації, ніж у «чистому»  $\gamma$ -полі малої інтенсивності. Додатково ускладнює ситуацію дозова залежність процесів радіаційного старіння полімерів (ефекти потужності дози), яка може призводити до методично некоректного масштабування результатів прискорених випробувань до реальних умов експлуатації.

З огляду на це, актуальною науково-прикладною задачею є розроблення та валідація методики кваліфікаційних випробувань кабельної продукції, яка, з одного боку, відтворює фізично релевантне змішане  $\beta$ - $\gamma$  поле аварійних режимів, а з іншого — забезпечує інструментальний контроль дозових параметрів, можливість оцінки як миттєвих, так і накопичувальних ефектів, та дозволяє формувати практично придатні критерії працездатності кабельної ізоляції.

#### **Зв'язок з науковими програмами, планами, темами.**

Наукові дослідження проведено у рамках науково-дослідних робіт в Інституті ядерних досліджень НАН України, що виконувались на замовлення Національної академії наук України та інших замовників з 2012 по 2026 рр.:

«Дослідження впливу іонів низьких енергій на структури матеріалів» (2012-2016, ДР №0112U003596), «Розробка нових радіаційно-технологічних методів подовження термінів експлуатації бетонних конструкцій на об'єктах атомної енергетики» (2013-2014 ДР №0113U005377, 2015-2016, ДР № 0115U004374), «Розроблення новітніх методів і засобів навчання, спрямованих на забезпечення фізичної ядерної безпеки в Україні» (2022-2024 ДР № 0121U110691).

Окремі розділи даної дисертації входили до складу робіт, що фінансуються міжнародними проєктно-грантовими фондами, які проводяться на кафедрі АЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського:

«Запровадження спеціалізації «Фізична ядерна безпека» (2018-2026 договір № P710).

**Мета дисертаційної роботи** полягає у підвищенні достовірності оцінки радіаційної стійкості обладнання ядерних енергоустановок (на прикладі кабельних ліній систем, важливих для безпеки) шляхом обґрунтування спектрально- та

дозово-коректної процедури випробувань у змішаних  $\beta$ - $\gamma$  полях і розроблення функціональних критеріїв втрати ізоляційної здатності.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені такі завдання:

1) проаналізовано сучасний стан нормативної та науково-технічної бази з кваліфікації кабельної продукції для АЕС та визначено обмеження підходів, що базуються на використанні ізотопних  $\gamma$  джерел з низькою потужністю дози;

2) досліджено умови формування та характеристики радіаційних полів у ГО реакторних установок у разі проєктних аварій і аварій з розширеними проєктними умовами з урахуванням спектрального складу та наявності  $\beta$  і  $\gamma$  складових;

3) обґрунтовано можливість і доцільність використання лінійного прискорювача електронів для формування керованих змішаних  $\beta$   $\gamma$  полів і проведення прискорених випробувань кабельної продукції в умовах високих потужностей дози;

4) адаптовано та експериментально апробовано установку з лінійним прискорювачем електронів і методику радіаційних випробувань кабелів у змішаному  $\beta$   $\gamma$  полі з відтворюваними дозовими характеристиками;

5) проведено експериментальні дослідження радіаційної стійкості кабелів з різними типами ізоляції, що застосовуються на атомних електростанціях, та встановлено закономірності зміни їх електрофізичних параметрів під дією інтенсивного опромінення;

6) досліджено вплив потужності дози та складу радіаційного поля на процеси деградації ізоляції з урахуванням механізмів радіаційно-індукованої провідності та накопичувального радіаційного старіння;

7) запропоновано та експериментально обґрунтовано функціональний критерій втрати ізоляційної здатності кабелів, визначено критичні значення потужності дози для різних типів ізоляції та оцінено практичні можливості використання отриманих результатів у завданнях кваліфікації й подовження строку експлуатації.

**Об'єкт дослідження** – радіаційна деградація електротехнічного обладнання ядерних енергоустановок в аварійних і післяаварійних умовах під впливом інтенсивних полів іонізуючого випромінювання.

**Предмет дослідження** – закономірності зміни електрофізичних параметрів кабельної ізоляції під дією інтенсивних змішаних  $\beta$   $\gamma$  полів та критерії втрати її ізоляційної здатності, а також методика формування і метрологічного контролю таких полів під час прискорених випробувань.

**Методи дослідження** включають: аналіз і систематизацію нормативних вимог та науково-технічних підходів до кваліфікації; чисельне моделювання радіаційних полів та дозових навантажень (зокрема для аварійних умов під ГО ВВЕР із використанням стохастичних методів та методів математичного моделювання (метод Монте-Карло) для розрахунку перенесення випромінювання в речовині; експериментальні дослідження у реакційній камері лінійного прискорювача електронів із контролем параметрів поля та реєстрацією електрофізичних характеристик зразків; розрахунково-експериментальне зіставлення результатів і оцінювання невизначеностей як складову валідації методики.

**Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:**

1. Вперше для задач кваліфікації кабельно-провідникової продукції систем, важливих для безпеки, обґрунтовано та реалізовано підхід до прискорених випробувань у керованому змішаному  $\beta$ - $\gamma$  полі, який відтворює визначальні для аварійних умов механізми радіаційного впливу та дозволяє варіювати компонентний склад поля в межах одного випробувального комплексу.

2. Вперше запропоновано та експериментально підтверджено двоетапну схему формування змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля на базі електронного прискорювача (з використанням конверсійної мішені для генерації гальмівного випромінювання), що забезпечує можливість переходу від переважно електронного опромінення до змішаного опромінення з контрольованою  $\gamma$ -складовою.

3. Удосконалено методичний підхід до інструментального контролю потужності дози в умовах інтенсивного (у т.ч. імпульсного) опромінення шляхом

застосування струмового режиму реєстрації та калібрувальної прив'язки до незалежних дозиметричних методів, що забезпечує відтворюваність режимів та прийнятну узгодженість результатів у практичному діапазоні потужностей дози.

4. Вперше розроблено та валідовано комплексну модель реакційної камери з використанням Монте-Карло коду TOPAS (GEANT4) та досліджено закономірності формування просторово-енергетичних характеристик  $\beta$ - $\gamma$  поля з визначенням робочої зони опромінення та оцінкою нерівномірності дозового поля, що забезпечує можливість обґрунтованого перенесення результатів випробувань на реальні умови опромінення об'єктів.

5. Набуло подальшого розвитку уявлення про механізми деградації полімерної ізоляції в інтенсивному змішаному полі за рахунок кількісної інтерпретації сумісної дії радіаційно-індукованої провідності (ефект, що визначається потужністю дози) та накопичувальної деградації (необоротні зміни матеріалу), що пояснює появу характерних перегинів на експериментальних залежностях і формування гістерезису при зміні режимів опромінення/навантаження.

6. Вперше запропоновано та експериментально обґрунтовано функціональний критерій втрати ізоляційної здатності кабелів за струмом витoku при заданій випробувальній напрузі (зокрема,  $I_{кр}$ ), що на пряму пов'язує результати випробувань із працездатністю кабельної лінії як елемента системи.

7. Вперше для досліджених типів кабельної продукції визначено критичні значення потужності дози, що відповідають досягненню функціонального критерію відмови ізоляції, а також показано суттєву відмінність поведінки кабелів з полімерною та мінеральною ізоляцією (для мінеральної ізоляції в дослідженому діапазоні режимів критерію не досягнуто), що має пряме прикладне значення для програм кваліфікації та обґрунтування ресурсу.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у розробленні та апробації методики прискорених радіаційних випробувань кабельної продукції у керованому змішаному  $\beta$ - $\gamma$  полі на базі лінійного прискорювача електронів із забезпеченням інструментального контролю потужності дози та валідацією

дозових характеристик методом Монте-Карло. Запропонований функціональний критерій втрати ізоляційної здатності (за струмом витоку при заданій випробувальній напрузі) та визначені критичні режими опромінення для досліджених типів ізоляції, які можуть бути використані для удосконалення програм кваліфікації, оцінювання залишкового ресурсу і планування замін кабельних ліній у гермозоні під час довгострокової експлуатації енергоблоків.

Матеріали дисертаційної роботи застосовуються в навчальному процесі при підготовці студентів НН ІАТЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського за спеціальністю G4 Енерговиробництво, спеціалізацією G4.01 Атомна енергетика.

**Особистий внесок здобувача** полягає у постановці задачі та формулюванні мети і завдань роботи, розробленні методики прискорених випробувань у керованому змішаному  $\beta$ - $\gamma$  полі, проведенні експериментальних досліджень та обробленні отриманих даних, виконанні чисельного моделювання методом Монте-Карло й валідації результатів за експериментом, а також у формулюванні функціонального критерію втрати ізоляційної здатності та практичних рекомендацій щодо використання результатів.

**Достовірність отриманих результатів** підтверджена застосуванням комплексу взаємодоповнювальних методів (нормативно-технічний аналіз, чисельне моделювання методом Монте-Карло, експериментальні випробування у контрольованих режимах), метрологічним супроводом вимірювань дозових параметрів та електрофізичних характеристик зразків, а також валідацією результатів моделювання експериментальними даними. Отримані закономірності узгоджуються з фізичними механізмами радіаційно-індукованої провідності та накопичувальної деградації полімерів. Запропонований функціональний критерій втрати ізоляційної здатності та критичні значення параметрів опромінення визначено на основі експерименту.

**Апробація результатів дисертації.** Результати та основні положення роботи доповідалися та обговорювалися на XIX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, Україна 24-27 січня 2012 р.); X Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і

студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (м. Київ, Україна 16 - 20 квітня 2012 р.); The 4-th International conference „Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy” (September 3 - 7, 2012 Kyiv, Ukraine); XX Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, Україна 28 січня - 01 лютого 2013 р.); XXI Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, Україна 27 - 31 січня 2014 р.); XXII Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, Україна 26 - 30 січня 2015 р.); XXIII Щорічній науковій конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (м. Київ, Україна 01 - 05 лютого 2016 р.); XVI Міжнародній науково-практичній конференції аспірантів, магістрантів і студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики» (м. Київ, Україна 24 - 27 квітня 2018 р.).

**Публікації.** За результатами досліджень опубліковано 28 наукових праць, у тому числі 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні, включеному до категорії «А» (SCOPUS (Q2) Переліку наукових фахових видань України; 2 статті у фаховому науковому виданні, включеному до міжнародної наукометричної бази SCOPUS (Q4); 4 статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз), 19 тез доповідей та матеріалів конференцій, 2 статті в інших виданнях.

**Структура роботи.** Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та переліку джерел посилання. Вона викладена на 197 сторінках, в тому числі об'єм основного тексту 172 сторінки. У роботі наведено 92 рисунки, 6 таблиць; перелік джерел посилання містить 89 найменувань.

# 1 ЗНАЧЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ І ПРОФІЛАКТИЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ОБЛАДНАННЯ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

## 1.1 Безпека експлуатації атомних електростанцій

Згідно з нормативним документом [3], безпека атомної станції визначається як властивість не перевищувати встановлені межі радіаційного впливу на персонал, населення та навколишнє природне середовище за нормальної експлуатації, а також обмежувати радіаційний вплив у разі аварійних ситуацій. Головна мета безпеки досягається шляхом реалізації двох складових: радіаційної та технічної. Радіаційна складова гарантує, що межі опромінення не перевищуватимуть лімітів, встановлених нормами радіаційної безпеки (НРБУ-97) [4].

Основною метою забезпечення безпеки будь-якої ядерної установки є захист персоналу, населення та навколишнього природного середовища від неприйняттого рівня опромінення.

Досягнення цієї мети має бути забезпечено протягом всіх етапів життєвого циклу атомної електростанції: від вибору майданчика, проектування, будівництва, введення в експлуатацію, експлуатації, до зняття з експлуатації [5].

Радіологічний компонент гарантує, що межі опромінення персоналу, населення та навколишнього природного середовища, встановлені стандартами охорони здоров'я [4], не перевищуватимуть встановлених лімітів доз за нормальних умов експлуатації, порушення нормальної експлуатації та аварій. Також важливо забезпечити економічно та соціально стійкі умови, які забезпечують мінімально можливий рівень радіаційного опромінення персоналу та населення.

Технічна складова – це система технічних та організаційних заходів, спрямованих на попередження та недопущення аварій на атомних електростанціях та обмеження їх наслідків.

Особливої гостроти питання забезпечення безпеки набуває в контексті Енергетичної стратегії України [2], яка передбачає довгострокову експлуатацію

наявного парку реакторів типу ВВЕР-1000 та ВВЕР-440. Оскільки більшість енергоблоків України вже відпрацювали проектний ресурс (30 років) або наближаються до цієї межі, ключовим завданням галузі є діяльність з подовження терміну експлуатації (ПТЕ).

У рамках ПТЕ критичним елементом є кабельно-провідникова продукція. На відміну від насосів чи арматури, кабельні траси (загальна довжина яких на одному блоці досягає тисяч кілометрів) часто є невідновлюваним ресурсом, особливо у ГО реакторної установки. Повна заміна кабельних мереж є економічно надважкою та технічно складною задачею. Тому виникає науково-технічна проблема: як достовірно оцінити залишковий ресурс кабелю, що експлуатувався 30+ років, і як підтвердити його стійкість до проектних аварій, наприклад, аварій з втратою теплоносія – (Loss of Coolant Accidents - LOCA), на наступні 10–20 років. Існуючі консервативні методики часто дають прогноз про необхідність заміни кабелю, який фактично ще зберігає працездатність, що призводить до невиправданих витрат.

У роботі [6] зазначається, що надійність елементів обладнання, трубопроводів і конструкцій атомних електричних станцій (АЕС) є невід'ємною частиною безпеки АЕС, де забезпечення безпеки передбачає широкий комплекс заходів, у тому числі вибір майданчик для розміщення атомної електростанції, її експлуатації, створення систем захисту та локалізації, забезпечення заходів щодо захисту населення у разі аварії.

## 1.2 Випробування обладнання АЕС для забезпечення його надійності

Надійність ядерної установки визначається працездатністю її обладнання при нормальній експлуатації, при порушенні нормальної експлуатації і в аварійних режимах. Одним з основних методів підтвердження надійності обладнання в усіх заданих режимах є випробування. При проектуванні, встановленні та експлуатації обладнання на атомних електростанціях проводяться сертифікаційні, приймальні та періодичні випробування.

### 1.2.1 Сертифікаційні випробування

Основною метою сертифікаційних випробувань є оцінка та підтвердження здатності обладнання виконувати покладені на нього функції в умовах впливів чинників робочого та навколишнього середовища, визначених проєктом. Під час сертифікаційних випробувань здійснюють вимірювання параметрів обладнання та оцінку їх відхилень від проєктних значень. Також виконують перевірку стійкості обладнання до впливу чинників навколишнього середовища з метою підтвердження того, що параметри залишаються в межах допустимих норм навіть за максимально можливих навантажень. Результатом сертифікаційних випробувань є надання сертифіката відповідності конструкції пристрою вимогам.

### 1.2.2 Приймальні випробування

Приймальні випробування проводяться, щоб підтвердити, що встановлене обладнання відповідає проєктним вимогам і що всі елементи зібраної системи разом виконують свої функції. Ці випробування проводяться за спеціально розробленими програмами, які враховують можливий вплив параметрів навколишнього середовища, які можуть виникнути під час аварійних умов експлуатації.

### 1.2.3 Періодичні випробування

У ході експлуатації електростанції під час проведення планово-попереджувальних ремонтів (ППР) проводяться періодичні випробування окремих блоків обладнання та систем загалом. Графіки та методики випробувань визначаються для кожного обладнання з урахуванням його конструктивних особливостей, режимів експлуатації, впливу навколишнього середовища та значущості для забезпечення безпеки.

Проведення ППР є технічно та організаційно складним процесом, оскільки передбачає виконання значного обсягу робіт у відносно короткий термін. Ця робота включає:

- профілактичні огляди та планові ремонти після закінчення певного періоду експлуатації обладнання. Частота та тривалість ремонтів залежать від конструкції та особливостей ремонту обладнання та умов його експлуатації;
- проведення комплексу профілактичних заходів щодо технічного обслуговування та ремонту обладнання;
- поточні ремонти обладнання здійснюються для своєчасної заміни окремих елементів, деталей та вузлів, перевірки окремих вузлів, очищення, промивання та ревізії механізмів, зміні мастила в ємностях систем змащення, перевірці кріплень і заміні кріпильних деталей, що вийшли з ладу;
- капітальні ремонти, при яких здійснюється повний демонтаж обладнання, його чищення та промивання, ремонт або заміна основних деталей (наприклад, рам), повна заміна всіх зношених вузлів та деталей, монтаж, тестування та налагодження обладнання.

Для скорочення кількості робіт при ППР пропонується [7] використовувати результати імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ), що дозволяє ідентифікувати об'єкти з найвищим пріоритетом для профілактики, ремонту та випробувань. Такий підхід дозволить оптимізувати технічне обслуговування та ремонт з використанням ймовірнісних методів, спрямованих на більш ефективне виконання комплексу робіт при забезпеченні необхідного рівня безпеки.

### 1.3 Система кваліфікації технологічного обладнання

Використання всіх процедур у рамках єдиного блоку, метою якого є забезпечення належного рівня працездатності обладнання систем, важливих для безпеки, з урахуванням їхнього взаємозв'язку – дуже тривалий, важкий та технічно

складний процес, який можна спростити запровадженням єдиної системи кваліфікації технологічного обладнання.

Відповідно до нормативного документу [8] кваліфікація обладнання (КО) – підтвердження та підтримка показників та технічних характеристик обладнання з метою забезпечення його працездатності у «жорстких» умовах навколишнього середовища та/або при сейсмічних впливах.

Проект КО рекомендований Міжнародним агентством з атомної енергії (МАГАТЕ) [9] і є одним із найважливіших напрямів діяльності щодо забезпечення необхідного рівня безпеки атомних електростанцій.

Основною метою кваліфікації обладнання є встановлення або визначення кваліфікаційного терміну обладнання – періоду часу, протягом якого обладнання гарантовано виконуватиме покладені на нього функції з урахуванням впливу процесів деградації обладнання при його експлуатації та під дією чинників навколишнього середовища.

Рекомендації щодо реалізації процесу КО наведено у стандартах МАГАТЕ [10]. У статті [11] запропоновано модернізовану загальну схему структури процесу визначення чи встановлення кваліфікації обладнання. Схема представлена на рисунку 1.1.

Відповідно до цієї схеми, процес КО має три основні фази:

- підготовка вихідних даних;
- оцінка стану кваліфікації;
- розробка методів підвищення кваліфікації.

### 1.3.1 Підготовка вихідних даних

Кваліфікація всього обладнання енергоблоку потребує значних матеріальних та людських ресурсів, що робить її економічно недоцільною. Тому рекомендації МАГАТЕ [10] пропонують застосовувати диференційований підхід, фокусуючись насамперед на обладнанні, функціонування якого є критичним для систем безпеки.

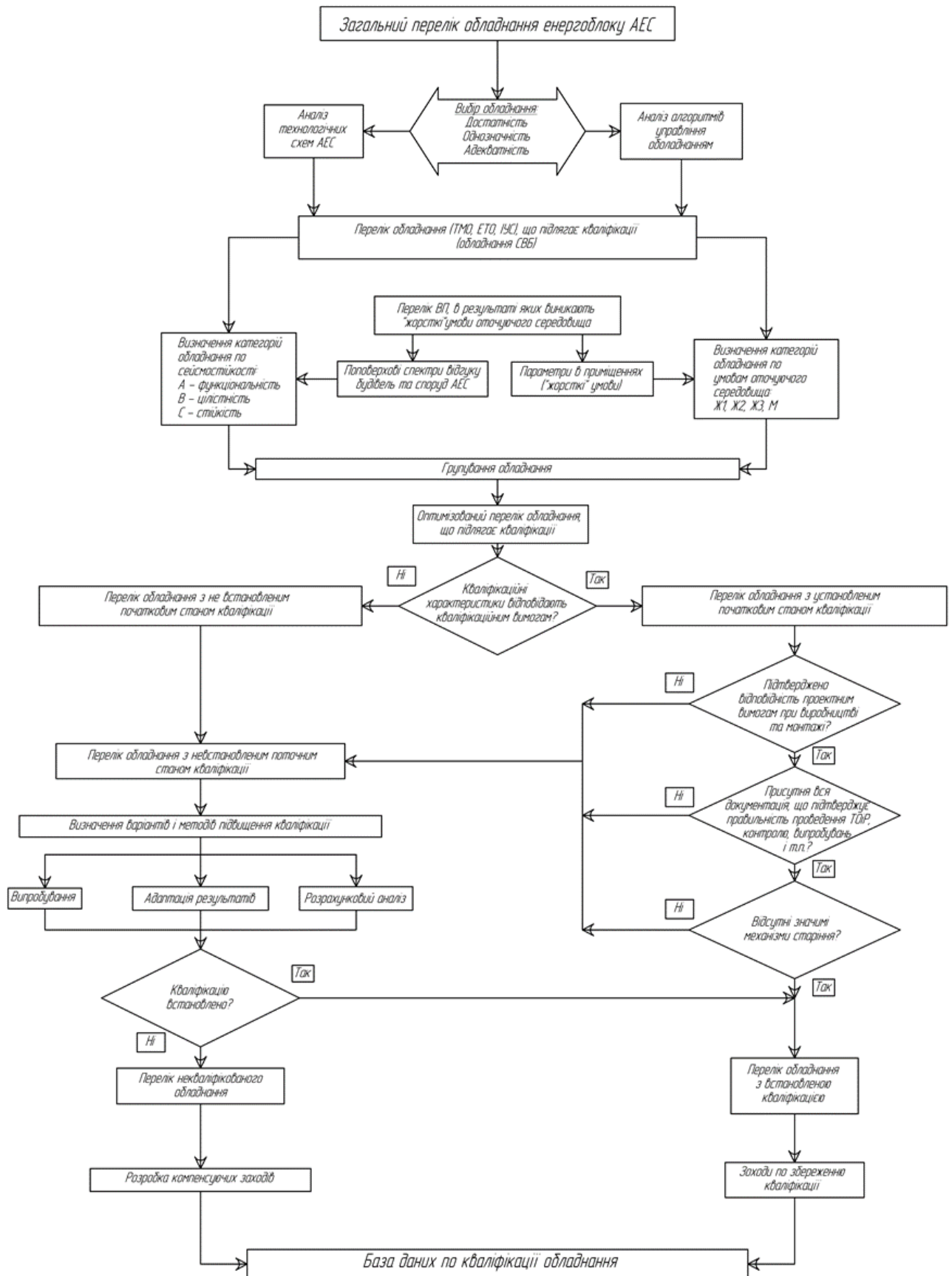


Рисунок 1.1 - Модернізована структурна схема оцінки стану кваліфікації обладнання

Відповідно до цих рекомендацій із загального переліку обладнання енергоблоку АЕС складається детальний перелік обладнання, що підлягає кваліфікації. Цей перелік є основним кваліфікаційним документом і повинен містити всю інформацію, необхідну та достатню для визначення рівня кваліфікації кожного обладнання.

У процесі створення розширеного списку збираються та документуються вихідні дані, які можна розділити на дві групи [12, 13]:

- кваліфікаційні характеристики - конструктивні параметри обладнання: найменування, позначення, тип, клас безпеки згідно з [3], група згідно з [14], [15], категорія сейсмостійкості згідно з [16] тощо;

- кваліфікаційні вимоги до обладнання, що базуються на розрахункових характеристиках впливу чинників навколишнього середовища під час реалізації вихідних подій аварії (ВПА) за результатами аналізу проєктних аварій (ПА): вихідні події, для яких необхідне функціонування конкретного обладнання; необхідний час роботи; параметри «жорстких» умов навколишнього середовища, можливих сейсмічних впливів.

Для прискорення виконання робіт по КО міжнародні документи рекомендують низку заходів щодо оптимізації процесу кваліфікації – групування та категоризацію.

### 1.3.2 Встановлення стану кваліфікації обладнання

Після первинної підготовки даних створюється список обладнання, що містить [13]:

- проєктні характеристики (сертифікат) кожної групи обладнання (кваліфікаційні характеристики);

- умови експлуатації в т.ч. умови навколишнього середовища, при яких повинно бути забезпечене надійне функціонування обладнання (кваліфікаційні вимоги).

У цілому можна сказати, що оцінка стану кваліфікації передбачає порівняння кваліфікаційних вимог з кваліфікаційними характеристиками.

Якщо всі характеристики обладнання, що зазначені в його паспорті відповідають або перевищують кваліфікаційні вимоги, то кваліфікація приладу визначається як встановлена (КВ), в іншому випадку кваліфікація не встановлена (КНВ).

Порівняння кваліфікаційних характеристик з кваліфікаційними вимогами дає змогу з'ясувати, наскільки вимоги до обладнання систем, що впливають на безпеку, були враховані при його проектуванні та виробництві.

Навіть якщо обладнання спочатку кваліфіковане (за паспортними даними), при його установці можуть виявитися відхилення від технічних вимог. Також слід враховувати, що в процесі експлуатації вимоги до функціонування обладнання можуть не виконуватися. Крім того, в процесі експлуатації обладнання відбувається знос і старіння. Ці фактори можуть призвести до зміни робочих характеристик обладнання і, відповідно, стану його кваліфікації.

Вплив цих змін враховується при оцінці поточного стану КО.

Так, обладнанню, яке за результатами порівняння кваліфікаційних характеристик відповідає зазначеним вимогам, кваліфікаційний статус встановлюється, якщо:

- під час візуальних перевірок підтверджено відповідність проектним вимогам при виготовленні та монтажі;
- атомна станція має всю необхідну документацію, що підтверджує правильність проведення технічного обслуговування та ремонтів (ТОіР), оглядів, випробувань тощо;
- не відбувається істотних впливів механізмів старіння, коли пристрій використовується в його штатному місці експлуатації.

Для такого обладнання встановлюється кваліфікаційний термін, який відповідає показникам проектного ресурсу.

Обладнання, поточний кваліфікаційний статус якого неможливо встановити через виявлення відхилень під час перевірок, відсутність необхідної експлуатаційної документації або неможливість оцінки ступеня впливу суттєвих механізмів старіння, включаються до переліку обладнання з невизначеною кваліфікацією. Для такого обладнання розроблюються методи та заходи підвищення кваліфікації.

### 1.3.3 Заходи, спрямовані на підвищення кваліфікації обладнання

Для підвищення КО можуть використовуватись різні методи, залежно від групи та категорії, до якої належить обладнання, а також параметрів умов навколишнього середовища. Такими методами можуть бути [13]:

- Метод кваліфікаційних випробувань – отримання фактичних кваліфікаційних характеристик обладнання при прискореному термічному, радіаційному та експлуатаційному старінні.

- Метод аналізу – визначення кваліфікаційних характеристик із використанням адекватних аналітичних моделей експлуатації обладнання.

- Досвід експлуатації – визначення кваліфікації з урахуванням досвіду експлуатації аналогічного обладнання на інших атомних електричних станціях.

- Адаптація результатів – аналітично обґрунтоване використання результатів кваліфікації аналогічного обладнання, встановленого на інших атомних електричних станціях, з урахуванням досвіду експлуатації.

Обладнання, кваліфікаційні характеристики якого після реалізації заходів з підвищення кваліфікації відповідають кваліфікаційним вимогам, включається до переліку обладнання із встановленою кваліфікацією. Для такого обладнання розробляються заходи щодо підтримки кваліфікації та фіксуються у базі даних.

Компенсаційні заходи розробляються та реалізуються для обладнання, кваліфікація якого не визначена після підвищення кваліфікації. Відповідно до [9, 10, 11] такими заходами можуть бути:

- розробка та реалізація заходів щодо компенсації виявлених недоліків, наприклад, встановлення захисних екранів, додаткового посилення тощо);
- виконання додаткових розрахунків та випробувань;
- модифікація (заміна окремих вузлів, деталей);
- заміна обладнання на нове та модернізоване, кваліфікація якого є встановленою.

Результати реалізації цих заходів також вносяться до бази даних по кваліфікації обладнання.

1.4 Кваліфікаційні випробування – сучасний спосіб визначення ресурсних показників обладнання атомних електростанцій.

#### 1.4.1 Метод кваліфікаційних випробувань

Метод натурних кваліфікаційних випробувань забезпечує найвищу достовірність результатів, оскільки дозволяє експериментально підтвердити здатність обладнання виконувати свої функції з урахуванням синергетичного ефекту впливу температури, радіації та механічних навантажень протягом визначеного терміну експлуатації.

В [17] показано, що для визначення точного моменту руйнування кабелів у процесі їх експлуатації необхідно вирішити систему диференціальних рівнянь, за допомогою якої можна визначити джерело пошкодження ізоляції та спрогнозувати час виходу кабелю з ладу:

- рівняння, що описує роботу обладнання у нормальному режимі експлуатації;

- рівняння, що описує роботу обладнання у перехідних режимах з коливаннями робочих параметрів (пуск/зупинка енергоблоку, перехідні режими, режими порушення нормальної експлуатації);

- рівняння, що описує роботу обладнання в аварійному режимі (проектна аварія, розширені проєктні умови).

Подібна система нелінійних диференціальних рівнянь характеризуватиме роботу будь-якого обладнання. Однак для різного обладнання будуть різні показники, які визначатимуть його стан у даний момент та прогнозуватимуть час його гарантованої роботи.

Для вирішення системи таких рівнянь необхідно створити базу даних про роботу обладнання за умов реальних впливів чинників навколишнього середовища. Отримати дані для такої бази даних можна двома способами:

- 1) дослідження об'єкта при його випробуваннях за умов моделювання експлуатації з урахуванням консервативного підходу, тобто забезпечення максимально можливого впливу всіх факторів, які можуть впливати на обладнання в режимах нормальної експлуатації, порушення нормальної експлуатації та в умовах аварій;

- 2) шляхом дослідження об'єкта безпосередньо в процесі його експлуатації на енергоблоці, проте цей метод може бути реалізований тільки для введеного в експлуатацію нового обладнання, а також частково для обладнання, що вже перебуває в експлуатації, за умови детального вивчення його параметрів.

На даний момент перший варіант є найбільш прийнятним способом проведення випробувань обладнання. Для проведення кваліфікаційних випробувань необхідно забезпечити відповідність процесів, що відбуваються в обладнанні під час його експлуатації на ядерній установці, та процесів під час їх моделювання в лабораторних умовах. Відповідно до рекомендацій МАГАТЕ [10] та промислових стандартів [12, 13] встановлено, що для проведення кваліфікаційних випробувань обладнання необхідно спочатку змоделювати процеси теплового,

потім радіаційного та експлуатаційного старіння. Рекомендується проводити всі ці процеси поступово [10, 13].

#### 1.4.2 Проведення кваліфікаційних випробувань

Випробування є кращим методом кваліфікації для електричного обладнання, та обладнання інформаційно-керуючих систем (ІКС), що експлуатується в «жорстких» умовах навколишнього середовища.

Типові випробування проводяться у вигляді серії випробувань, послідовність яких включає попереднє старіння зразка до стану, що відповідає закінченню терміну його експлуатації, з подальшим моделюванням впливу умов, що виникають при нормальній експлуатації, порушеннях нормальної експлуатації та аваріях.

Загальноприйнята послідовність випробувань для кваліфікації обладнання для «жорстких» умов така [17]:

- визначення вихідних характеристик;
- функціональні випробування з урахуванням нормальних відхилень параметрів умов експлуатації;
- прискорене старіння (термічне, експлуатаційне, радіаційне);
- сейсмічні випробування (включаючи вібраційне старіння);
- випробування на аварійні та післяаварійні умови;
- підсумкові функціональні випробування.

##### 1.4.2.1 Термічне старіння

Як рекомендовано в [10, 18], моделювання термічного старіння виконується з огляду на те, що обладнання протягом певного часу піддається впливу температур, вищих за нормальні робочі умови, але достатньо низьких, щоб уникнути пошкодження обладнання. Коефіцієнт прискорення залежить від параметра енергії активації, характерного для матеріалів, з яких виготовлений зразок.

Залежність коефіцієнта прискорення від енергії активації описується законом Арреніуса:

$$R = C \cdot e^{\frac{-\varphi}{k \cdot T}},$$

де  $C$  - частота зіткнень молекул, що реагують,

$k$  - універсальна газова стала,

$\varphi$  - енергія активації матеріалу,

$T$  – абсолютна температура.

Для практичного визначення параметрів пришвидшеного термічного старіння при проведенні кваліфікаційних випробувань рекомендовано [13] застосовувати наступне формулювання закону Арреніуса:

$$\frac{t_s}{t_a} = e^{\left(\frac{\varphi}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a}\right)},$$

де  $t_s$  – термін експлуатації, який моделюється,

$t_a$  – час проведення термічного старіння,

$T_s$  – температура навколишнього середовища, що оточує обладнання при експлуатації,

$T_a$  – температура термічного старіння.

Значення енергій активації конкретної моделі вибираються з відповідної довідкової літератури залежно від матеріалів, у тому числі тих, з яких виготовлений зразок. Якщо таких даних немає, їх можна одержати, провівши спеціальні тести. У разі коли значення енергії активації невідоме і не може бути отримане шляхом випробувань, використовується консервативне значення. Таке консервативне значення енергії активації майже всіх матеріалів становить 0,5 еВ.

Якщо деталі обладнання виготовлені з різних матеріалів, то для визначення параметрів прискореного старіння (температури та тривалості випробування) слід використовувати властивості матеріалу, найбільш схильного до температурної деградації (матеріали з меншим значенням енергії активації).

Якщо компоненти обладнання виготовлені з різних матеріалів і закони їх старіння не лише різні, а й суперечать один одному, ці елементи необхідно випробовувати окремо.

Використання закону Арреніуса для випробувань обладнання на прискорене термічне старіння не є суттєвим. Інші закони старіння можуть застосовуватися за умови обґрунтування їх застосування, яке має ґрунтуватися на вимогах чинної нормативно-технічної документації.

Коефіцієнт прискорення при використанні будь-якої моделі термічного старіння повинен бути обмежений для того, щоб уникнути пошкодження зразка і не призводити до виникнення незвичайних явищ, але повинен забезпечувати достовірність випробувань.

Крім того, при проведенні випробувань на прискорене термічне старіння рекомендується враховувати такі фактори:

- самонагрівання пристрою (наприклад, при роботі під напругою);
- циркуляція повітря (основна хімічна реакція, що призводить до старіння під дією температури, - окислення, важливо забезпечити максимально сприятливі умови для протікання такої реакції, щоб забезпечити достатній рівень консерватизму).

Параметри прискореного термічного старіння та докладний опис моделі повинні бути відображені у програмі чи методиці випробувань.

#### 1.4.2.2 Радіаційне старіння

Відповідно до рекомендацій [19], випробування на прискорене радіаційне старіння проводять після вивчення характеристик обладнання в процесі прискореного термічного старіння. Такий варіант випробувань вносить похибку в

отримані результати, оскільки методика моделювання впливу основних факторів суттєво відрізняється від реальних умов експлуатації обладнання на АЕС.

Основне припущення при проведенні випробувань на прискорене радіаційне старіння полягає в тому, що ефект опромінення матеріалів обладнання в основному залежить від поглиненої дози і не залежить від потужності дози або типу випромінювання [19].

Таке припущення вносить неточність у процес випробування. Однак для кваліфікаційних випробувань таке припущення використовується за певних умов прийнятності і обмеження коефіцієнта прискорення випробувань.

Основними параметрами, які використовуються при проведенні пришвидшених радіаційних кваліфікаційних випробуваннях, є загальна поглинена доза і потужність дози.

Загальна поглинена доза – це доза іонізуючого випромінювання, якому піддається обладнання або його компонент протягом певного періоду експлуатації. Одиницею поглиненої дози є Грей (Гр), а несистемною одиницею – Рад ( $1 \text{ Гр} = 100 \text{ Рад}$ ) [4].

Потужність дози – це доза, що поглинається пристроєм чи елементом за одиницю часу. Одиниця виміру в системі СІ - Гр/год [4].

При проведенні випробувань необхідно враховувати всі види іонізуючих випромінювань, які можуть виникнути на АЕС за нормальної експлуатації та при аваріях. Основним видом є  $\gamma$ -випромінювання, у деяких випадках  $\beta$ -випромінювання та нейтронне випромінювання. Відповідно до рекомендацій [19],  $\beta$ - та нейтронне випромінювання при певних припущеннях при кваліфікаційних випробуваннях перераховуються в еквівалентні дози  $\gamma$ -випромінювання.

При проведенні прискорених кваліфікаційних випробувань слід враховувати, що ефект залежить від потужності дози. Експериментально встановлено [20], що менша потужність дози завдає більшої шкоди обладнанню, ніж висока потужність дози опромінення. Крім того, надто висока потужність дози призведе до відхилення процесу радіаційного старіння обладнання від процесу, що відбувається за нормальної експлуатації. Ці фактори враховуються у

кваліфікаційних стандартах та рекомендаціях шляхом обмеження потужності дози випробувань. Наприклад, при кваліфікаційних випробуваннях кабелів АЕС рекомендується обмежувати максимальну потужність дози 1 кГр/год.

При радіаційно прискореному старінні зразки обладнання можуть містити елементи, особливо чутливі до дії радіації. Зазвичай це елементи, які регулярно замінюються у процесі експлуатації. Деградація цих елементів буде вищою, тому їх випробування необхідно організовувати окремо за спеціально розробленою методикою.

Варто зауважити, що при моделюванні радіаційного старіння полімерної ізоляції кабелів виникає проблема кореляції між прискореними випробуваннями та природним старінням. Ключовим фактором тут є ефект потужності дози (Dose Rate Effect). При високих потужностях дози (характерних для експрес-випробувань) швидкість генерації вільних радикалів може перевищувати швидкість дифузії кисню вглиб матеріалу ізоляції. Це призводить до ефекту гетерогенного окислення або дифузійно-лімітованого окислення (Diffusion Limited Oxidation - DLO), коли поверхня зразка деградує швидко, а внутрішні шари залишаються неушкодженими. В реальних умовах експлуатації на АЕС потужність дози низька, і окислення відбувається рівномірно по всьому об'єму.

Тому використання прискорювачів електронів, які забезпечують високу потужність дози, вимагає розробки спеціальних методик, що враховують товщину зразків та умови опромінення для нівелювання ефекту DLO та забезпечення репрезентативності результатів.

#### 1.4.2.3 Старіння в процесі експлуатації

При кваліфікаційних випробуваннях обладнання також необхідно враховувати їхню деградацію в процесі експлуатації. Для вивчення такої деградації проводиться прискорене експлуатаційне старіння, що полягає у виконанні певної кількості експлуатаційних циклів, таких як пуск-зупин або включення-виключення у прискореному режимі. Таким чином, кількість циклів експлуатації обладнання,

що зазначені виробником в технічному паспорті, протягом випробувань буде досягнуто за більш короткий час.

Випробування на старіння під час експлуатації не проводяться, якщо очікувана кількість циклів експлуатації обладнання протягом терміну його служби незначна порівняно з кількістю циклів, зазначеній у проектній документації та визначеній при випробуваннях виробником, оскільки не очікується значного погіршення характеристик обладнання в процесі його експлуатації.

Крім того, слід враховувати, що в процесі експлуатації обладнання має місце ефект внутрішнього нагріву (самонагрівання), але цей фактор деградації враховується в межах термічного старіння.

При плануванні прискорених випробувань на експлуатаційне старіння важливо уникати підвищеного навантаження на зразок, що може призвести до виходу обладнання з ладу. Крім того, при проведенні випробувань на експлуатаційне старіння необхідно враховувати елементи, які слід замінити протягом терміну служби обладнання. Ці елементи також слід замінювати під час випробувань на старіння в процесі експлуатації.

#### 1.4.2.4 Випробування на вплив аварійних умов експлуатації

Заключним етапом кваліфікаційних випробувань обладнання є випробування на вплив аварійних умов експлуатації. Метою проведення таких кваліфікаційних випробувань є підтвердження працездатності обладнання в умовах впливу чинників навколишнього середовища, що можуть виникати в результаті розвитку проектних аварій та розширених проектних умов.

Типові проектні аварії, які моделюються під час кваліфікаційних випробувань, включають [19]:

- втрата теплоносія - LOCA;
- розрив магістрального паропроводу (Main Steam Line Break - MSLB);
- розрив високоенергетичного паропроводу (High Energy Line Break - HELB).

Основні характеристики умов навколишнього середовища, які можуть формуватися в умовах таких аварій, включають раптове підвищення температури та тиску, включаючи високі дози радіації та зрошування водою з хімічними речовинами.

Обладнання зі встановленою кваліфікацією при проведенні аварійних випробувань має гарантувати, що воно виконуватиме визначені функції безпеки у разі аварії.

Проведення таких випробувань створює низку проблем, головною з яких є відсутність інструментів, здатних імітувати повний набір параметрів навколишнього середовища. Також складно організувати робоче навантаження обладнання в імітованих аварійних умовах.

Типові аварійні цикли включають початкову фазу швидких змін параметрів навколишнього середовища, включаючи вплив парів і хімічних розчинів. Тривалість цієї фази коливається від кількох годин до кількох днів (гостра фаза розвитку аварії). Друга фаза, під час якої вплив умов навколишнього середовища поступово послаблюється, триває (залежно від типу аварії) від 30 днів до 1 року (фаза ліквідації аварії). Важливо розрізняти ці дві фази, оскільки прискорені випробування можна проводити на етапі фази ліквідації аварії, скорочуючи тривалість усіх випробувань.

Під час аварійних випробувань сертифіковане обладнання піддається навантаженням, які значно перевищують його проектні критерії. Крім того, обладнання повинно бити завчасно зістареним, що відповідає умовам експлуатації в кінці свого терміну служби. Тому необхідно імітувати умови аварійного випробування, щоб не було невідповідного перевантаження зразків випробовуваного обладнання.

Найбільш критичним етапом для функціонування обладнання є початок розвитку аварії, який необхідно змоделювати. Контроль динаміки випробувань, а також стану обладнання на цьому етапі дуже важливий.

Загалом післяаварійні умови не моделюються в реальному часі через їхню значну тривалість. Ці випробування виконуються з використанням тих самих

критеріїв і методології, які використовуються для прискорених термічних, радіаційних випробувань і випробувань на експлуатаційне старіння.

#### 1.4.3 Механізми радіаційно-хімічної деградації полімерних діелектриків

Для наукового обґрунтування методики кваліфікаційних випробувань необхідно розуміти природу структурних змін, що відбуваються в ізоляції кабелів під дією іонізуючого випромінювання. В умовах експлуатації на АЕС полімерні матеріали (полівінілхлорид (ПВХ), поліетилен (ПЕ), етилен-пропіленова гума (ЕПГ)) перебувають під впливом змішаних  $\beta$ -,  $\gamma$ - та нейтронних полів у присутності кисню повітря.

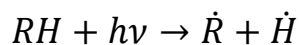
Енергія випромінювання (як  $\gamma$ -квантів, так і електронів), поглинаючись матеріалом, викликає іонізацію та збудження молекул полімеру, що призводить до утворення високореакційних вільних радикалів ( $\dot{R}$ ). Подальша деградація матеріалу визначається конкуренцією двох основних процесів:

1. Радіаційне зшивання (Cross-linking): Процес утворення нових хімічних зв'язків між макромолекулами (рекомбінація радикалів  $\dot{R} + \dot{R} \rightarrow R - R$ ). Це призводить до утворення тривимірної сітки ("гель-фракції"). Макроскопічно цей процес проявляється у підвищенні твердості та модуля пружності, але критичному зниженні еластичності. Матеріал стає крихким і втрачає здатність витримувати механічні навантаження при вібраціях або монтажних вигинах.

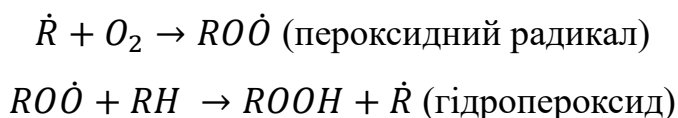
2. Радіаційна деструкція (Chain Scission): Розрив головних вуглецевих ланцюгів молекули. Цей процес веде до зниження молекулярної маси, розм'якшення матеріалу та погіршення діелектричних властивостей.

Для більшості сучасних кабельних ізоляцій (зокрема ПЕ) домінуючим механізмом, що обмежує ресурс, є радіаційно-окиснювальна деструкція. Цей процес протікає за ланцюговим механізмом автоокислення.

Ініціювання: Під дією радіації від полімерного ланцюга (RH) відривається атом водню:



Ріст ланцюга: Вільний радикал миттєво реагує з киснем (швидкість реакції лімітується лише дифузією кисню):



Розгалуження: Гідроперокси (ROOH) є нестабільними і розпадаються, утворюючи нові радикали, що прискорюють процес деградації.

Сучасні кабельні композиції містять хімічні добавки – антиоксиданти, які перехоплюють вільні радикали, гальмуючи процес окислення. Період, поки антиоксидант витрачається, називається інкубаційним періодом. Протягом цього часу механічні властивості кабелю майже не змінюються. Однак, після повного вичерпання антиоксиданту відбувається лавиноподібна деградація.

Саме наявність інкубаційного періоду робить просту екстраполяцію результатів короткочасних випробувань небезпечною. Якщо під час прискорених випробувань ми не вичерпали весь антиоксидант, ми отримаємо хибно-позитивний результат про стійкість кабелю, який в реальності вийде з ладу через 10–15 років.

Розуміння цих механізмів диктує головну вимогу до методики випробувань на прискорювачі електронів: режим опромінення повинен забезпечувати повне проходження окислювальних реакцій по всьому об'єму ізоляції, уникаючи ситуації, коли поверхня вже зруйнована, а внутрішні шари, де ще зберігся антиоксидант, залишаються неушкодженими.

#### 1.4.4 Установки для проведення кваліфікаційних випробувань

Кваліфікаційні випробування обладнання АЕС повинні виконуватись в спеціалізованих сертифікованих випробувальних центрах. Окрім випробувальних лабораторій у компаній-виробників обладнання для АЕС, в Україні існують спеціалізовані організації (випробувальні центри), які проводять різноманітні випробування промислової продукції.

Аналіз можливостей лабораторій українських випробувальних центрів щодо проведення кваліфікаційних випробувань показує, що лише два з таких центрів мають можливість організувати повноцінні кваліфікаційні випробування, зокрема:

- прискорене термічне старіння;
- вібраційні випробування;
- кліматичні випробування;
- моделювання надзвичайних умов впливу чинників навколишнього середовища;
- прискорене старіння під впливом радіації.

До таких підприємств відносяться Науково-виробниче підприємство «ХАРТРОН-СІГМА», де можна проводити випробування напівпровідникової продукції, електронних компонентів, електрообладнання, електродвигунів, елементів автоматизованої системи управління технологічними процесами (АСУ ТП), низьковольтного обладнання та Товариство з обмеженою відповідальністю «Сертифікаційний центр автоматизованих систем управління» (ТОВ «Сертцентр АСУ»), де можливо проводити кваліфікаційні випробування кабельної продукції.

Експериментальні бази інших підприємств, які проводять випробування обладнання, не дозволяють проводити повноцінні кваліфікаційні випробування у межах одного центру.

## 1.5 Поточний стан проблем кваліфікації кабельної продукції в умовах продовження ресурсу АЕС

На сучасному етапі розвитку ядерної енергетики, який характеризується глобальною тенденцією до ПТЕ енергоблоків понад проектний ресурс, питання кваліфікації кабельного господарства набуває статусу критичної інженерної та наукової проблеми. Аналіз міжнародного досвіду (звіти МАГАТЕ [10, 18, 22, 23], стандарти [25 - 27]) та практики експлуатації АЕС України [8, 12, 13] дозволяє виділити три групи невирішених проблем:

- методологічні;
- матеріалознавчі;
- організаційно-технічні.

### 1.5.1 Проблема моделювання синергетичних ефектів та масштабування часу

Фундаментальною проблемою прискорених випробувань є складність відтворення реальної кінетики деградації полімерів. У реальних умовах під ГО кабель піддається одночасному впливу низькоінтенсивного іонізуючого випромінювання (потужність дози  $R_D < 0,1$  Грей/год) та підвищеної температури протягом десятків років. При кваліфікаційних випробуваннях ми змушені моделювати цей процес за короткий час (тижні або місяці), використовуючи високі потужності доз та високі температури. Це породжує ризик виникнення ефекту DLO. Суть ефекту полягає в тому, що при високій потужності дози (характерній для прискорювачів електронів) швидкість споживання кисню вільними радикалами у поверхневих шарах ізоляції перевищує швидкість дифузії кисню з повітря вглиб матеріалу [21]. Це призводить до гетерогенного старіння: поверхня зразка стає крихкою та окисленою, тоді як внутрішні шари залишаються відносно неушкодженими. В класичних роботах [21, 24] доведено, що нехтування ефектом DLO призводить до хибної (надміру оптимістичної) оцінки залишкового ресурсу. Відповідно, використання високоінтенсивних джерел випромінювання, таких як

прискорювачі електронів, вимагає наукового обґрунтування режимів опромінення, які б нівелювали цей ефект (наприклад, фракціонування дози або використання тонких зразків).

### 1.5.2 Специфіка старіння сучасних полімерних композицій

Парк кабелів на АЕС України є неоднорідним. Якщо для кабелів старого зразка (ізоляція на основі ПВХ, гуми) механізми старіння вивчені досить детально, то для сучасних кабелів, що встановлюються в рамках програм модернізації, база даних є обмеженою. Сучасні кабелі з ізоляцією із зшитого ПЕ або ЕПГ, які не містять галогенів, мають іншу хімію деградації. Для них характерний інкубаційний період, після якого відбувається різке падіння відносного подовження, що ускладнює прогнозування ресурсу за класичним законом Арреніуса [24]. Крім того, діючий стандарт [25], що гармонізує підходи до кваліфікації, вимагає врахування не лише "жорсткого" старіння, але й "м'яких" режимів, які можуть бути більш небезпечними для певних типів антиоксидантів у складі ізоляції.

### 1.5.3 Обмеженість експериментальної бази та необхідність нових методів

Традиційним стандартом радіаційних випробувань є використання ізотопних джерел  $^{60}\text{Co}$ . Проте цей метод має суттєві недоліки в контексті масштабних програм ПТЕ:

- Низька продуктивність: набір необхідної дози (наприклад, 200–500 кГрей для імітації аварії ЛОСА) може займати тижні.
- Висока вартість та логістика: утримання потужних гамма-установок стає дедалі дорожчим через вимоги фізичного захисту ядерних матеріалів.

В той же час, в Україні наявна розгалужена мережа промислових прискорювачів електронів. Використання електронного пучка дозволяє скоротити час опромінення з тижнів до годин. Однак, наукова проблема полягає у доведенні еквівалентності впливу корпускулярного (електрони) та електромагнітного ( $\gamma$ -кванти) випромінювання на структуру полімерів, а також у технічному забезпеченні рівномірності поглинутої дози по об'єму циліндричного зразка кабелю.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є розробка та валідація методики прискорених кваліфікаційних випробувань кабельної продукції на базі прискорювачів електронів, що дозволить вирішити проблему масової перекваліфікації обладнання АЕС у стислі терміни ремонтних кампаній.

#### 1.5.4 Міжнародні рекомендації до кваліфікації обладнання

Аналіз світової практики показує, що методологічним базисом кваліфікації обладнання АЕС є стандарти Інституту інженерів з електротехніки та електроніки (Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE) та Міжнародної електротехнічної комісії (International Electrotechnical Commission - IEC), які на сьогодні гармонізуються з українською нормативною базою.

Основоположним документом є [26]. Цей стандарт вводить концепцію «кваліфікованого терміну служби» (Qualified Life) та встановлює вимогу врахування ефектів старіння перед випробуваннями на сейсмічну стійкість та аварійні режими (LOCA). Важливою вимогою [26] є категоризація умов експлуатації на «м'які» (mild environment) та «жорсткі» (harsh environment). Для обладнання в ГО (жорсткі умови) обов'язковим є підтвердження стійкості до радіаційного впливу.

Стосовно кабельної продукції, ключовим є стандарт [27]. Цей документ вперше постулював необхідність комплексних випробувань, що імітують аварію з втратою теплоносія (LOCA), включаючи послідовний вплив радіації, пари високого тиску та хімічного спрею.

Варто зазначити, що сучасна редакція [25] підкреслює важливість врахування синергетичних ефектів (одночасного впливу температури та радіації), що часто ігнорувалося в ранішніх методиках, де випробування проводилися послідовно. Саме ігнорування синергії може призводити до неконсервативних оцінок залишкового ресурсу полімерної ізоляції кабелів, що підтверджує актуальність розробки нових експериментальних стендів зі змішаними полями випромінювання.

## 1.6 Висновки до розділу

Проведений аналіз досвіду експлуатації енергоблоків АЕС України з реакторами ВВЕР показав, що ключовою проблемою ПТЕ енергоблоків у понадпроектний період є підтвердження радіаційної стійкості (кваліфікація) обладнання систем безпеки, зокрема кабельно-провідникової продукції, що працює в «жорстких» умовах ГО. Встановлено, що деградація полімерної ізоляції під дією іонізуючого випромінювання є домінуючим фактором старіння, який визначає залишковий ресурс обладнання.

Аналіз сучасної нормативної бази [25, 26, 27] свідчить про посилення вимог до методології кваліфікаційних випробувань. Виявлено, що існуючі методики, які базуються на використанні ізотопних джерел ( $^{60}\text{Co}$ ) з низькою потужністю дози, не дозволяють коректно відтворити умови проєктних аварій типу LOCA, де потужність дози сягає  $10^4 - 10^5$  Гр/год. Крім того, стандартні методи часто нехтують синергетичним ефектом одночасного впливу радіації та температури, що може призводити до неконсервативних оцінок надійності.

Встановлено, що для підвищення достовірності результатів кваліфікації необхідно перейти від статичних випробувань на ізотопних джерелах до динамічних випробувань на прискорювачах електронів, які здатні генерувати змішані поля випромінювання (електронне та гальмівне) високої інтенсивності. Однак, існуючі установки потребують модернізації для забезпечення рівномірності поля опромінення та коректного дозиметричного супроводу в режимі реального часу.

Виявлено проблему метрологічного забезпечення проведення випробувань при високих дозових навантаженнях: стандартні дозиметричні системи втрачають працездатність або мають значну похибку в умовах інтенсивних полів випромінювання, характерних для активної фази проєктних аварій та розширених проєктних умов. Це вимагає розробки нових методів контролю поглиненої дози безпосередньо в процесі опромінення.

На основі проведеного аналізу сформульовано мету роботи та основні завдання дослідження:

1. Проаналізувати сучасний стан нормативної та науково-технічної бази з кваліфікації кабельної продукції для атомних електростанцій та визначити обмеження існуючих підходів до оцінки радіаційної стійкості, що базуються на використанні ізотопних  $\gamma$ -джерел з низькою потужністю дози.

2. Дослідити умови формування та характеристики радіаційних полів, які можуть виникати в герметичній оболонці реакторних установок у разі проектних аварій та розширених проектних умов, з урахуванням спектрального складу та наявності  $\beta$ - і  $\gamma$ -складових.

3. Обґрунтувати можливість та доцільність використання лінійного прискорювача електронів для формування керованих змішаних  $\beta$ - $\gamma$  радіаційних полів і проведення прискорених випробувань кабельної продукції в умовах високих потужностей дози.

4. Створити та експериментально апробувати установку і методику радіаційних випробувань кабелів, що забезпечують опромінення зразків у змішаному  $\beta$ - $\gamma$  полі з відтворюваними дозовими характеристиками та дозволяють досліджувати як миттєві, так і накопичувальні ефекти радіаційного впливу.

5. Провести експериментальні дослідження радіаційної стійкості кабелів з різними типами ізоляції, що застосовуються на атомних електростанціях, та встановити закономірності зміни їх електрофізичних параметрів під дією інтенсивного радіаційного опромінення.

6. Дослідити вплив потужності дози та складу радіаційного поля на процеси деградації ізоляції кабелів, з урахуванням механізмів радіаційно-індукованої провідності та накопичувального радіаційного старіння.

7. Запропонувати та експериментально обґрунтувати функціональний критерій втрати ізоляційної здатності кабелів, визначити критичні значення потужності дози для різних типів ізоляції та оцінити практичні можливості використання отриманих результатів при кваліфікації й продовженні терміну експлуатації обладнання атомних електростанцій.

## 2 МЕТОДИ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ ВИПРОБУВАНЬ ОБЛАДНАННЯ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

### 2.1 Переваги та недоліки існуючих методів кваліфікаційних випробувань

#### 2.1.1 Стандартна процедура

Відповідно до рекомендацій МАГАТЕ [18, 22, 23] та нормативних документів України [8, 12, 13] під час кваліфікаційних випробувань після категоризації та групування обладнання і розробки переліку обладнання, що підлягає кваліфікації, визначають зразки обладнання, що характеризують кожну групу обладнання відповідно до чинників, що впливають на деградацію обладнання. Випробування проводяться в кілька етапів.

Спочатку проводиться пришвидшене термічне старіння зразків для отримання стану, що відповідає кінцевому проектному терміну експлуатації цього обладнання. Після термічного старіння проводяться перевірки та контроль параметрів зразків.

Наступним кроком є моделювання радіаційної деградації обладнання за рахунок впливу іонізуючого випромінювання. Зразки опромінюються на основі елементних матеріалів для отримання дози, яка відповідатиме кінцевому терміну експлуатації з урахуванням максимально можливого аварійного опромінення.

На завершальному етапі зразки піддаються прискореному експлуатаційному навантаженню, під час якого термічно та радіаційно зістарене обладнання проходить певний набір робочих циклів.

Після цих випробувань визначається залишковий термін експлуатації або термін кваліфікації кожного обладнання. Ці дані необхідні для продовження експлуатації обладнання понад проектний термін [18].

Перевагою використання цієї методики є найбільш оптимальна економічна доцільність, оскільки дослідження проводяться на лабораторних стендах відносно простої конструкції.

Недоліки цієї методики полягають у наступному:

- суттєве спрощення моделювання процесів, що відбуваються під час експлуатації обладнання, порівняно з реальними умовами на ядерних установках;
- неможливість отримання глобальної характеристики досліджуваного об'єкта при сукупному впливі всіх факторів;
- труднощі з інтерпретацією результатів, отриманих на проміжних етапах випробувань;
- проблеми організації дослідницької лабораторії, здатної проводити всі дослідження в одному місці.

### 2.1.2 Методологія проведення кваліфікаційних випробувань у спеціальній LOCA-камері

На базі Київського центрального конструкторського бюро арматуробудування створено унікальний стенд з LOCA-камерою [28].

Даний стенд дозволяє змоделювати умови навколишнього середовища, що виникають при роботі обладнання під ГО в разі аварії з втратою теплоносія. Стенд містить 2 робочі камери об'ємом  $0,5 \text{ м}^3$  і  $1,8 \text{ м}^3$ . У камерах забезпечується робочий тиск  $0,4 \text{ МПа}$  і  $1,6 \text{ МПа}$ . Температура пароводяної суміші становить  $230^\circ\text{C}$ , а температура суміші, що зрошує зразки, забезпечується в межах  $70\text{-}130^\circ\text{C}$ . За хімічним складом суміші в камерах є водний розчин, що містить  $16 \text{ г/кг}$  борної кислоти з додаванням  $3 \text{ г/кг}$  калію гідроксиду та  $150 \text{ мг/кг}$  гідразингідрату. До досліджуваних зразків приладу подається стиснене повітря з температурою  $350^\circ\text{C}$  і тиском  $40 \text{ МПа}$ . Також можлива подача струму на зразки постійною напругою  $36 \text{ В}$  і змінною напругою  $220/380 \text{ В}$ .

Такі умови дозволяють досліджувати роботу зразків обладнання з урахуванням одночасного впливу підвищеної температури і тиску та впливу хімічно активного навколишнього середовища.

У зарубіжних зразках LOCA-камер забезпечується можливість формування впливу радіаційних факторів основних ізотопів, що можуть бути під ГО.

Перевагами цього методу випробування є:

- обладнання перевіряється на одночасну дію факторів, які можуть виникнути під ГО в умовах аварій з втратою теплоносія (окрім дії іонізуючого випромінювання);
- всі випробування проводяться в одній лабораторії;
- можливе визначення робочих характеристик обладнання під впливом різних факторів.

До недоліків зазначеної методики віднесено:

- високі капітальні витрати на створення випробувального стенду;
- технічна складність експлуатації та обслуговування стенду;
- необхідність залучення висококваліфікованого персоналу зі спеціальною підготовкою;
- підвищена радіаційна небезпека, пов'язана з використанням ізотопних джерел.

## 2.2 Методика комплексних випробувань на радіаційній установці

У цій методиці для кваліфікаційних випробувань пропонується використовувати спеціальний стенд, розроблений на базі лінійного прискорювача електронів.

Методика ґрунтується на численних дослідженнях, проведених у галузі [29, 30, 31, 32]. За результатами дослідження визначено, що для оцінки стану кваліфікації обладнання необхідно побудувати математичну модель, яка описуватиме характеристики обладнання за умов його експлуатації:

- у нормальному режимі роботи;
- у перехідних режимах;
- під впливом максимально можливих чинників аварії.

Для проведення подібних досліджень була створена спеціальна реакційна камера [31, 32], що забезпечує можливість роботи обладнання під впливом

іонізуючого випромінювання, що утворюється прискореними електронами, високих температур, вологості та хімічних розчинів, які можуть впливати на зразок обладнання під час його експлуатації на ядерній установці. У камері є спеціальні проходки для підключення зразків до електромережі, а також встановлення датчиків і зняття параметрів її роботи в досліджуваних умовах.

Для визначення характеристик обладнання у нормальному режимі експлуатації необхідно створити в реакційній камері умови, що відповідають впливу реальних факторів, що діють у місці розташування даного зразка обладнання на ядерній установці. Більшість цих факторів включають підвищену температуру і тиск, вологість, вплив  $\gamma$ -і  $\beta$ -випромінювання. Для визначення часових залежностей необхідно провести прискорене старіння обладнання за таких умов і визначити час його виходу з ладу. Для прискореного старіння можна використовувати закон Арреніуса для термічного старіння та умови максимально допустимої потужності дози для радіаційного старіння.

При експлуатації обладнання в таких умовах необхідно також постійно реєструвати його експлуатаційні характеристики, до яких можуть належати вольт-амперні характеристики, струми витоку, властивості ізоляції, температури поверхні тощо. Регулюючи ці характеристики, можна оцінити термін працездатності обладнання.

Аналогічні дослідження необхідно провести для визначення працездатності зразків обладнання в перехідних режимах. Відмінним буде лише те, що в таких експериментах слід забезпечити можливість зміни чинників, що будуть впливати на зразки обладнання, в межах допустимих змін цих параметрів в місці розташування обладнання. Постає технічна проблема зняття експлуатаційних характеристик обладнання в перехідних режимах, оскільки слід дослідити залежність їх зміни від зміни чинників навколишнього середовища.

### 2.2.1 Визначення умов впливу навколишнього середовища

Сучасна філософія безпеки АЕС, яка базується на уроках аварії на АЕС «Фукусіма-1», вимагає розгляду не лише проєктних аварій, а й розширених

проектних умов та важких аварій, що характеризуються екстремальними параметрами навколишнього середовища. Як показано в роботі [33], основною загрозою для цілісності бар'єрів безпеки є вихід параметрів (тиску, температури) за межі проектних значень внаслідок відмови систем відведення залишкового тепловідведення. У таких умовах критично важливим є збереження працездатності вимірювальних каналів та кабельних ліній, які забезпечують моніторинг стану реакторної установки.

Аналіз сценаріїв розвитку аварій [34] свідчить про необхідність перегляду підходів до оцінки безпеки з урахуванням детерміністичних та імовірнісних методів. Це означає, що кваліфікаційні випробування обладнання повинні проводитись із запасом, який перебиває невизначеності розрахункових кодів, що моделюють важкі аварії.

Окрім радіаційного та температурного впливу, обладнання систем безпеки (зокрема, насосне обладнання та його електричне живлення) зазнає значних гідродинамічних навантажень. У дослідженнях [35] було проаналізовано умови виникнення гідродинамічної нестійкості в активних системах безпеки. Це підтверджує тезу про те, що кабельна продукція, яка забезпечує електроживлення, а також контроль та управління цими системами, повинна зберігати свої ізоляційні властивості (опір ізоляції, відсутність пробою) навіть в умовах вібраційних навантажень та термоударів, які супроводжують аварійні режими.

Таким чином, визначення параметрів модельних випробувань (зокрема, потужності поглиненої дози та інтегрального флюенсу) повинно базуватись на консервативних оцінках, що враховують можливість переходу аварії у важку фазу.

Аварія з втратою теплоносія реакторної установки типу ВВЕР належить до найбільш визначальних з точки зору впливу на обладнання, розташоване під ГО. У результаті порушення герметичності трубопроводів або обладнання першого контуру відбувається витік теплоносія з активованими продуктами поділу та корозійними радіонуклідами у внутрішній об'єм ГО.

Для таких аварій характерне формування комплексного аварійного навколишнього середовища, яке поєднує:

- високі теплофізичні параметри;
- насичену парогазову атмосферу;
- інтенсивний радіаційний вплив;
- хімічно агресивні домішки;
- механічні та динамічні навантаження.

Зазначені фактори визначають вимоги до радіаційної та функціональної стійкості обладнання систем безпеки, що підтверджується нормативними документами та рекомендаціями МАГАТЕ [22, 36, 37].

#### 2.2.1.1 Теплофізичні та фізико-хімічні умови під ГО

При аварії LOCA під ГО формується парогазове середовище з параметрами, що істотно відрізняються від умов нормальної експлуатації.

Для реакторних установок ВВЕР характерні такі діапазони параметрів:

- температура навколишнього середовища на початковій стадії аварії — до 150–180 °С, з подальшим зниженням до 60–120 °С після спрацювання систем локалізації;
- максимальний тиск під ГО — до 0,45–0,55 МПа (для ВВЕР-1000);
- відносна вологість — близька до 100 %, з утворенням конденсату на поверхнях обладнання.

Хімічний склад навколишнього середовища визначається наявністю борної кислоти, продуктів радіолізу води ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O_2$ ), а також радіоактивних аерозолів, що створює умови для прискореної деградації матеріалів обладнання [37, 38].

#### 2.2.1.2 Радіаційна складова аварійного навколишнього середовища для ВВЕР-440

У таблиці 2.1 наведено основні ізотопи, які виходять під ГО в умовах LOCA, їх сумарна активність і відсоткове співвідношення [39].

Таблиця 2.1 – Приклад можливої активності, що виходить під ГО.

| Ізотоп            | Сумарна активність в ГО, Бк | Вклад в сумарну активність |
|-------------------|-----------------------------|----------------------------|
| $^{85m}\text{Kr}$ | 7,59E+14                    | 0,89%                      |
| $^{87}\text{Kr}$  | 1,57E+15                    | 1,84%                      |
| $^{88}\text{Kr}$  | 2,20E+15                    | 2,57%                      |
| $^{133}\text{Xe}$ | 7,44E+15                    | 8,70%                      |
| $^{135}\text{Xe}$ | 3,17E+15                    | 3,71%                      |
| $^{131}\text{I}$  | 3,46E+15                    | 4,05%                      |
| $^{132}\text{I}$  | 3,55E+15                    | 4,15%                      |
| $^{133}\text{I}$  | 4,00E+15                    | 4,68%                      |
| $^{134}\text{I}$  | 4,07E+15                    | 4,76%                      |
| $^{135}\text{I}$  | 3,48E+15                    | 4,07%                      |
| $^{103}\text{Ru}$ | 5,37E+15                    | 6,28%                      |
| $^{106}\text{Ru}$ | 6,77E+14                    | 0,79%                      |
| $^{134}\text{Cs}$ | 7,44E+14                    | 0,87%                      |
| $^{137}\text{Cs}$ | 6,96E+14                    | 0,81%                      |
| $^{141}\text{Ce}$ | 1,95E+16                    | 22,80%                     |
| $^{144}\text{Ce}$ | 1,26E+16                    | 14,73%                     |
| $^{140}\text{La}$ | 1,18E+16                    | 13,80%                     |
| $^{90}\text{Sr}$  | 4,40E+14                    | 0,51%                      |
| Всього            | 8,55E+16                    | 100,00%                    |

Для оцінки радіаційної складової використано табличні дані щодо викиду радіонуклідів під ГО реакторної установки ВВЕР-440 при аварії з втратою теплоносія. Сумарна активність радіонуклідів становить  $8,55 \cdot 10^{16}$  Бк, що формує інтенсивне джерело іонізуючого випромінювання.

Аналіз ізотопного складу показує, що понад 80 % сумарної активності зосереджено в обмеженій групі радіонуклідів, які визначають як миттєві, так і інтегральні дозові навантаження.

Інертні радіоактивні гази криптоно та ксенону формують близько 18 % сумарної активності. Завдяки рівномірному розподілу в парогазовому об'ємі вони визначають початковий рівень потужності дози під ГО [40].

Ізотопи йоду ( $^{131}\text{I} \dots ^{135}\text{I}$ ) забезпечують понад 21 % сумарної активності та відіграють ключову роль у формуванні локальних дозових максимумів за рахунок сорбції на поверхнях обладнання і кабельних трас [41].

Найбільший внесок у сумарну активність і, відповідно, в інтегральну дозу опромінення забезпечують продукти поділу середніх мас –  $^{141}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Ce}$  та  $^{140}\text{La}$ , сумарний вклад яких перевищує 50 %. Осаджуючись на конструкціях і обладнанні, ці радіонукліди перетворюються на стаціонарні джерела  $\gamma$ -випромінювання тривалої дії [42].

Таким чином, радіаційне поле під ГО при аварії LOCA має як об'ємну, так і локалізовану складову, що є принципово важливим для аналізу стійкості обладнання. Результати аналізу впливу домінуючих ізотопів наведено в таблиці 2.2.

Аналіз домінуючих радіонуклідів, що формують радіаційне поле навколишнього середовища під ГО при аварії з втратою теплоносія, свідчить про комплексний характер впливу іонізуючого випромінювання на матеріали обладнання.

Інертні радіоактивні гази (криптон і ксенон) визначають початковий рівень потужності дози, формуючи практично однорідне  $\gamma$ -поле у внутрішньому об'ємі ГО. Їх вплив є критичним для електронних та напівпровідникових елементів, чутливих до миттєвих значень дози та дози за короткий проміжок часу.

Ізотопи йоду займають проміжне положення між газовими та осадженими джерелами. Їх здатність до сорбції на поверхнях обладнання та кабельних трас зумовлює формування локальних зон підвищеного радіаційного навантаження, що є особливо небезпечним для полімерних матеріалів, гумових ущільнень та ізоляції електричних кабелів.

Продукти поділу середніх мас, насамперед ізотопи церію та лантану, забезпечують основний вклад в інтегральну дозу опромінення обладнання. Осаджуючись на конструкціях, вони перетворюються на стаціонарні джерела  $\gamma$ -випромінювання, що визначають довготривалу деградацію матеріалів в умовах аварійної експлуатації.

Таблиця 2.2 – Домінуючі радіонукліди аварійного викиду під ГО

| Група ізотопів                               | Основні представники  | Тип випромінювання | Характер розподілу                                    | Основний вплив на матеріали та обладнання   |
|--|---|--------------------|---|---|
| Інертні радіоактивні гази                    | $^{85m}\text{Kr}$ , $^{87}\text{Kr}$ ,<br>$^{88}\text{Kr}$ , $^{133}\text{Xe}$ ,<br>$^{135}\text{Xe}$ | $\gamma$           | Об'ємний, рівномірний у парогазовому середовищі       | Формування загального $\gamma$ -фону; вплив на електронні компоненти, напівпровідникові елементи, системи керування |
| Радіоактивні ізотопи йоду                    | $^{131}\text{I}$ , $^{132}\text{I}$ , $^{133}\text{I}$ ,<br>$^{134}\text{I}$ , $^{135}\text{I}$       | $\beta$ , $\gamma$ | Частково газова фаза, частково осадження на поверхнях | Радіаційне старіння полімерів, деградація кабельної ізоляції, зниження електричної міцності                         |
| Продукти поділу середніх мас (церій, лантан) | $^{141}\text{Ce}$ , $^{144}\text{Ce}$ ,<br>$^{140}\text{La}$  | $\gamma$           | Осадження на конструкціях і обладнанні                | Формування локальних джерел випромінювання; визначальний внесок в інтегральну дозу опромінення                      |
| Рутеній                                      | $^{103}\text{Ru}$ , $^{106}\text{Ru}$   | $\beta$ , $\gamma$ | Аерозольне осадження                                  | Локальне підвищення доз; радіаційно-хімічна деградація поверхневих шарів матеріалів                                 |
| Цезій  | $^{134}\text{Cs}$ , $^{137}\text{Cs}$   | $\beta$ , $\gamma$ | Осадження, вторинне перерозподілення з конденсатом    | Тривалий вплив; накопичення дози в матеріалах з пористою структурою   |
| Стронцій                                     | $^{90}\text{Sr}$  | $\beta$            | Осадження з аерозолями та конденсатом                 | Локальний вплив на поверхні; другорядний внесок у $\gamma$ -поле  |

Рутеній та цезій, хоча й мають менший внесок у сумарну активність, відіграють суттєву роль у формуванні залишкового радіаційного фону та вторинного перерозподілу активності разом із конденсатом. Це призводить до додаткового опромінення поверхонь і ускладнює прогнозування реального дозового навантаження на обладнання.

Таким чином, дані, наведені в таблиці, підтверджують, що оцінка радіаційної стійкості обладнання ядерних енергоустановок повинна враховувати не лише сумарну дозу опромінення, але й характер просторового розподілу джерел випромінювання та спектральний склад радіаційного поля. Це положення є принциповим при кваліфікації обладнання на аварійні умови експлуатації для реакторних установок типу ВВЕР-440 і ВВЕР-1000.

### 2.2.1.3 Адаптація результатів для умов ВВЕР-1000

При адаптації отриманих для ВВЕР-440 результатів до умов ВВЕР-1000 у роботі застосовано порівняльний методичний підхід, що ґрунтується на фізичних та конструктивних відмінностях реакторних установок.

Основними чинниками адаптації є:

- вища теплова потужність активної зони ВВЕР-1000, що зумовлює потенційно більшу сумарну активність викидів;
- більший об'єм ГО, який призводить до зниження середньої концентрації активності в газовій фазі;
- підвищена ефективність систем локалізації аварій, що сприяє інтенсивнішому осадженню аерозолів і йодовмісних сполук [22].

Якісний ізотопний склад радіонуклідів при аварії з втратою теплоносія для ВВЕР-440 та ВВЕР-1000 є подібним, оскільки визначається фізикою процесів поділу та активації теплоносія. Водночас просторовий розподіл джерел випромінювання та інтегральні дозові навантаження для ВВЕР-1000 можуть бути як порівнянними, так і вищими в зонах інтенсивного осадження аерозолів.

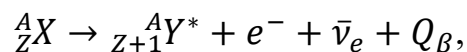
З огляду на це, дані для ВВЕР-440 можуть розглядатися як консервативна основа для аналізу радіаційної стійкості обладнання ВВЕР-1000.

### 2.2.2 Моделювання характеристик іонізуючих випромінювань

У контексті визначення впливу на обладнання ядерних енергетичних установок (ЯЕУ) критичне значення має аналіз спектрального складу випромінювання ізотопів, що належать до групи продуктів поділу. Розглянутий перелік нуклідів (ізотопи Kr, Xe, I, Ru, Cs, Ce, La, Sr) охоплює основні групи летких та твердих продуктів поділу, що визначають радіаційну обстановку як у нормальному режимі, так і при проєктних аваріях, розширених проєктних умовах та важких аваріях.

Всі ізотопи з наведеного переліку (за винятком ізомерних переходів) є нейтронно-надлишковими ядрами, тому основним каналом їхньої релаксації є електронний  $\beta$ -розпад ( $\beta^-$ ).

Процес описується рівнянням слабкої взаємодії, при якому нейтрон (n) у ядрі перетворюється на протон (p):



де  ${}^A_ZX$  - материнське ядро;

${}^A_{Z+1}Y^*$  - дочірнє ядро, яке у більшості випадків утворюється у збудженому квантовому стані;

$e^-$  -  $\beta$ -частинка (електрон);

$\bar{\nu}_e$  - електронне антинейтрино;

$Q_\beta$  - енергія розпаду (масовий дефект).

Ключовою особливістю  $\beta^-$ -розпаду для всієї групи (від  ${}^{87}\text{Kr}$  до  ${}^{144}\text{Ce}$ ) є неперервний енергетичний спектр електронів.

Енергія  $Q_\beta$  статистично розподіляється між електроном та антинейтрино:

$$E_e + E_{\bar{\nu}} = Q_\beta - E_{level}$$

Таким чином, електрони не мають фіксованої енергії, а описуються спектром Фермі з граничною енергією  $E_{max}$ . Для розрахунків тепловиділення в активній зоні або захисті використовується середня енергія:

$$E_{avg} \approx (1/3 \dots 1/2)E_{max}.$$

Зняття збудженого стану дочірнього ядра  ${}_{Z+1}^AY^*$  відбувається двома шляхами, характерними для більшості розглянутих ізотопів ( ${}^{135}\text{Xe}$ ,  ${}^{131}\text{I}$ ,  ${}^{137}\text{Cs}$ ):

1. Емісія  $\gamma$ -кванта: Випромінювання фотона з дискретною енергією  $E_\gamma = E_i - E_f$ , що відповідає різниці енергій рівнів ядра.

2. Внутрішня конверсія: Безвипромінювальна передача енергії електрону з К- або L-оболонки атома. Це характерно для ізотопів з низькоенергетичними переходами (наприклад, у схемах розпаду  ${}^{133}\text{Xe}$ ).

Окрему увагу слід приділити  ${}^{85m}\text{Kr}$ . Це ізомерний стан, який має два конкуруючі канали розпаду:

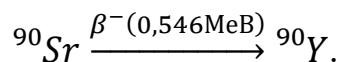
– Ізомерний перехід ( $\sim 79\%$ ):  ${}^{85m}\text{Kr} \xrightarrow{\gamma} {}^{85}\text{Kr}$ . Хімічна природа елемента не змінюється.

–  $\beta^-$ -розпад ( $\sim 21\%$ ):  ${}^{85m}\text{Kr} \xrightarrow{\beta^-} {}^{85}\text{Rb}$ .

Це створює складну динаміку накопичення дочірнього  ${}^{85}\text{Kr}$  (довгоживучого), що необхідно враховувати при розрахунках викидів газоподібних продуктів поділу.

До цієї групи також відноситься  ${}^{133}\text{Xe}$ , де значна частка розпадів супроводжується внутрішньою конверсією, що генерує рентгенівське випромінювання та електрони Оже.

Унікальним у списку є  ${}^{90}\text{Sr}$ . Його схема розпаду:



Перехід відбувається безпосередньо на основний рівень дочірнього ядра.  $\gamma$ -випромінювання практично відсутнє (крім гальмівного випромінювання електронів у навколишньому середовищі). Це ускладнює його детектування спектрометричними методами.

Для ряду ізотопів (Ru, Ce, Sr) характерне утворення ланцюжків, де дочірній ізотоп є радіоактивним і має менший період напіврозпаду  $T_{1/2}^{parent} \gg T_{1/2}^{daughter}$ . Це призводить до встановлення вікової (secular) рівноваги.

– Система  $^{106}\text{Ru} / ^{106}\text{Rh}$ :  $^{106}\text{Ru}$  є м'яким  $\beta$ -випромінювачем ( $E_{max} \approx 39$  кеВ), тоді як дочірній  $^{106}\text{Rh}$  генерує жорсткі  $\beta$ -частинки ( $E_{max} > 3$  МеВ) та високоенергетичні  $\gamma$ -кванти.

– Система  $^{144}\text{Ce} / ^{144}\text{Pr}$ : Аналогічна ситуація, де  $^{144}\text{Ce}$  дає основний внесок у активність, а  $^{144}\text{Pr}$  – у дозу  $\gamma$ -випромінювання.

– Система  $^{137}\text{Cs} / ^{137m}\text{Ba}$ :  $^{137}\text{Cs}$  розпадається у метастабільний  $^{137m}\text{Ba}$   $T_{1/2} = 2,55$  хв, який і випромінює відому  $\gamma$ -лінію 661.7 кеВ.

Ізотопи  $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{132}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$  характеризуються високими значеннями енергії розпаду ( $Q_{\beta}$ ). Це призводить до:

1. Жорсткого  $\beta$ -спектру.
2. Складних схем розпаду з заселенням високих енергетичних рівнів дочірніх ядер, що супроводжується каскадним  $\gamma$ -випромінюванням широкого спектру (від сотень кеВ до кількох МеВ). Наприклад,  $^{140}\text{La}$  (дочірній від  $^{140}\text{Ba}$ ) має характерну лінію 1596 кеВ, важливу для моніторингу герметичності оболонок ТВЕЛ.

Визначення енергій  $E_e$  та  $E_{\gamma}$  для наведеного переліку ізотопів базується на квантово-механічних принципах збереження енергії та імпульсу [34].

Гранична енергія процесу визначається різницею мас спокою нейтральних атомів материнського ( $M_P$ ) та дочірнього ( $M_D$ ) нуклідів:

$$Q_{\beta^-} = [M_P(A, Z) - M_D(A, Z + 1)] \cdot c^2$$

Ця величина є константою для кожного ізотопу (наприклад, для  $^{135}\text{Xe}$   $Q \approx 1165$ кеВ) [43].

Спектр  $\gamma$ -випромінювання є лінійчатим. Енергія кожного кванта відповідає переходу між стаціонарними станами  $i$  та  $j$  дочірнього ядра:

$$E_{\gamma}(i \rightarrow j) = E_i - E_j - E_R,$$

де  $E_R$  - енергія віддачі ядра (зазвичай нехтувано мала для важких ядер продуктів поділу). Дані про структуру рівнів отримуються з бібліотек оцінених ядерних даних (Evaluated Nuclear Structure Data File – ENSDF), що формуються на основі прецизійної  $\gamma$ -спектрометрії [43].

Енергетичний розподіл  $\beta$ -частинок  $N(E)$  описується теорією Фермі:

$$N(E)dE \propto p \cdot E(E_{max} - E)^2 \cdot F(Z, E) \cdot dE,$$

де  $F(Z, E)$  - функція Фермі, що враховує кулонівську взаємодію електрона з ядром.

Для практичних цілей важливо враховувати, що для кожного ізотопу існує набір парціальних спектрів, які відповідають розпадам на різні збуджені рівні дочірнього ядра [43, 44].

Аналіз фізичних характеристик ізотопів (Kr, Xe, I, Ru, Cs, Ce, La, Sr) показує, що, незважаючи на спільний механізм  $\beta^-$ -розпаду, вони демонструють суттєві відмінності у спектрах випромінювання [45]. Наявність метастабільних станів ( $^{85m}\text{Kr}$ ), вікової рівноваги ( $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ,  $^{106}\text{Ru}/^{106}\text{Rh}$ ) та складних каскадних переходів вимагає диференційованого підходу при розрахунку радіаційного впливу на обладнання, що знаходиться в ГО в умовах впливу навколишнього середовища, що виникає при аварії із втратою теплоносія.

Радіаційний фактор є домінуючим з точки зору незворотної деградації полімерних матеріалів (радіаційно-окислювальна деструкція, зшивання). Склад викиду регламентується сценарієм аварії (наприклад, згідно з [46]).

Основними компонентами радіаційного поля є:

- Інертні радіоактивні гази (Xe, Kr), які створюють об'ємну (submersion) дозу  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінювання.
- Леткі форми йоду та цезію: Осідають на поверхнях обладнання (plate-out), створюючи інтенсивне контактне  $\beta$ -опромінення.

Проблема невідповідності спектрів: Стандартні кваліфікаційні випробування проводяться на джерелах  $^{60}\text{Co}$  (енергії  $\gamma$ -квантів 1,17 та 1,33 MeV). Однак реальний аварійний спектр містить значну частку низькоенергетичного  $\gamma$ -випромінювання та потужну  $\beta$ -компоненту з неперервним спектром. Ігнорування  $\beta$ -компоненти може призвести до недооцінки поглинутої дози в тонких поверхневих шарах (оболонки кабелів, корпуси датчиків), де пробіг електронів є малим, а густина іонізації - максимальною.

Для вирішення задачі коректного визначення параметрів випробувального поля було розроблено спеціалізований програмний комплекс, що базується на стохастичному моделюванні ядерних процесів.

В основу розрахункового модуля покладено метод Монте-Карло, який дозволяє моделювати перенесення випромінювання та його взаємодію з речовиною шляхом розіграшу статистичних випробувань. На відміну від детерміністичних методів, що оперують усередненими потоками, даний підхід відтворює фізичну історію окремих частинок [47].

Процедура розіграшу («sampling») однієї історії розпаду реалізована за наступним алгоритмом:

1. Вибір каналу розпаду (Discrete Sampling): Нехай для певного ізотопу існує  $N$  можливих енергетичних переходів (каналів) з імовірностями (інтенсивностями)  $I_1, I_2, \dots, I_N$ , причому  $\sum I_i \leq 100\%$ . Формується функція кумулятивного розподілу (CDF):

$$C_k = \sum_{j=1}^k I_j$$

Генерується псевдовипадкове число  $\xi$ , рівномірно розподілене на інтервалі  $[0, 100]$ . Канал  $k$  вважається обраним, якщо виконується умова  $C_{k-1} \leq \xi < C_k$ .

2. Генерація енергії  $\beta$ -частинки (Rejection Sampling): Оскільки спектр  $\beta$ -випромінювання є неперервним, для розіграшу енергії електрона застосовано метод відбору фон Неймана [48]. Алгоритм полягає у наступному:

- Генерується випадкова енергія  $E_{rand}$  в діапазоні  $[0, E_{max}]$ .
- Генерується випадкове число  $P_{rand}$  в діапазоні  $[0, P_{max}]$ , де  $P_{max}$  - максимум функції розподілу Фермі.
- Обчислюється теоретична імовірність  $P(E_{rand})$  для даної енергії.
- Перевірка умови: якщо  $P_{rand} \leq P(E_{rand})$ , значення енергії  $E_{rand}$  приймається. В іншому випадку — пара чисел відкидається, і генерація повторюється.

Цей метод забезпечує точне відтворення форми теоретичного спектру без необхідності аналітичного інтегрування функції розподілу.

#### 2.2.2.1 Фізична модель $\beta$ -розпаду

В основу модуля генерації  $\beta$ -спектрів покладено теорію Фермі для дозволених переходів. В такому випадку  $\beta$ -розпад розглядається як тричастинковий процес ( $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ), в якому енергія розподіляється між електроном та антинейтрино.

Імовірність  $N(W)dW$  випромінювання електрона з повною енергією  $W$  (в одиницях  $m_e c^2$ ) в інтервалі  $dW$  описується рівнянням [49]:

$$N(W)dW = \frac{g^2}{2 \cdot \pi^3} \cdot F(Z, W) \cdot p \cdot W(W_0 - W)^2 \cdot dW,$$

де  $W$ - повна релятивістська енергія електрона, пов'язана з кінетичною енергією  $E$  як  $W = 1 + \frac{E}{m_e \cdot c^2}$ ;

$W_0$  - гранична повна енергія спектра (Endpoint energy), що відповідає різниці мас материнського та дочірнього ядер;

$p = \sqrt{W^2 - 1}$  - імпульс електрона;

$(W_0 - W)^2$  - статистичний множник, що враховує розподіл енергії між електроном та нейтрино (фазовий об'єм нейтрино);

$F(Z, W)$  - функція Фермі, що враховує вплив кулонівського поля ядра на вилітаючий електрон. Для  $\beta^-$ -розпаду (виліт негативного електрона з позитивного ядра) кулонівська сила уповільнює електрон, зміщуючи максимум спектру в область нижчих енергій. Для легких та середніх ядер використовується нерелятивістське наближення:

$$F(Z, W) \approx \frac{2 \cdot \pi \cdot \eta}{1 - e^{-2 \cdot \pi \cdot \eta}},$$

$$\text{де } \eta = \frac{Z \cdot e^2}{\hbar \cdot v}.$$

#### 2.2.2.2 Фізична модель $\gamma$ -розпаду та апаратної функції детектора

На відміну від неперервного  $\beta$ -спектру,  $\gamma$ -випромінювання має дискретну природу, оскільки виникає при переходах ядра між фіксованими енергетичними рівнями.

Теоретичний (ідеальний) спектр джерела описується сумою дельта-функцій Дірака [42]:

$$S_{ideal}(E) = A \sum_{i=1}^N I_{\gamma,i} \cdot \delta(E - E_{\gamma,i}),$$

де  $A$  - активність джерела;

$N$  - кількість можливих енергетичних переходів для даного ізотопу;

$E_{\gamma,i}$  - енергія  $i$ -го  $\gamma$ -кванта;

$I_{\gamma,i}$  - квантовий вихід  $i$ -ї лінії (кількість квантів на один розпад);

$\delta(E - E_{\gamma,i})$  - дельта-функція Дірака.

У розробленому програмному забезпеченні розіграш енергії  $\gamma$ -кванта методом Монте-Карло відбувається у два етапи:

1. Вибір лінії. З бібліотеки ядерних даних завантажується набір пар значень  $E_{\gamma,i}$ ,  $I_{\gamma,i}$ . Для вибору конкретної лінії  $k$  для поточного акту розпаду будується кумулятивний розподіл імовірностей  $C_k = \sum_{j=1}^k I_{\gamma,j}$ . Генерація випадкового числа  $\xi \in [0,1]$  визначає індекс лінії  $k$ , якщо  $C_{k-1} \leq \xi < C_k$ .

2. Формування апаратної форми лінії. Оскільки в реальних умовах ідеальна лінія реєструється як пік скінченної ширини внаслідок статистичних флуктуацій іонізації, до обраної енергії  $E_{\gamma,k}$  застосовується функція розмиття. Форма зареєстрованої лінії описується розподілом Гауса [42]:

$$R(E, E_{\gamma,k}) = \frac{1}{\sigma(E_{\gamma,k}) \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(E - E_{\gamma,k})^2}{2 \cdot \sigma(E_{\gamma,k})^2}},$$

де  $\sigma(E_{\gamma,k})$  - стандартне відхилення, що залежить від енергії. Ця залежність є критичною для коректного моделювання суміші ізотопів.

Ключовим аспектом моделі є залежність ширини піку від енергії. Згідно з статистикою Пуассона, кількість утворених носіїв заряду  $N \propto E$ , а флуктуація  $\Delta N \propto \sqrt{N} \propto \sqrt{E}$ . Тому зв'язок між енергетичною роздільною здатністю (FWHM — Full Width at Half Maximum) та енергією має вигляд:

$$FWHM = 2,355 \cdot \sigma(E) = a + b \cdot \sqrt{E},$$

де  $a$  і  $b$  — коефіцієнти, що характеризують енергетичну роздільну здатність конкретного типу детектора або середовища поглинання (для напівпровідникових детекторів  $a \approx 0$ ).

Таким чином, результуючий модельований спектр є суперпозицією гаусових піків, центри яких відповідають табличним значенням енергій переходів, а площі пропорційні квантовим виходам.

Ця залежність імплементована в алгоритм розіграшу енергії для кожної події реєстрації, що дозволяє коректно моделювати суміш ізотопів, де перекриваються  $\gamma$ -лінії різних енергій.

### 2.2.2.3 Результати моделювання

Програмний засіб дозволяє отримати диференціальний спектр  $dN/dE$  суміші ізотопів (наприклад, «йодного викиду») для будь-якого моменту часу після аварії.

На основі отриманих спектрів розраховується коефіцієнт еквівалентності ( $K_{eq}$ ), який визначається як відношення інтегральних поглинутих доз (або пошкоджуючих ефектів) від реального аварійного спектру та спектру імітатора [50]:

$$K_{eq} = \frac{\int_0^{E_{max}} \Phi_{real}(E) \cdot S(E) \cdot dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi_{source}(E) \cdot S(E) \cdot dE},$$

де  $\Phi(E)$  - флюенс частинок,

$S(E)$  - масова гальмівна здатність речовини (для електронів) або коефіцієнт поглинання (для  $\gamma$ -квантів).

Оскільки в реальних аварійних умовах на обладнання діє змішане  $\beta$ - та  $\gamma$ -поле, а при кваліфікаційних випробуваннях можуть використовуватися джерела зі складною структурою поля (наприклад, лінійні прискорювачі електронів з конверсійною складовою), критерій еквівалентності  $K_{eq}$  повинен розраховуватися як відношення сумарних поглинутих доз.

Узагальнена формула набуває вигляду:

$$K_{eq} = \frac{D_{real}^{\Sigma}}{D_{source}^{\Sigma}} = \frac{D_{real}^{\beta} + D_{real}^{\gamma}}{D_{source}^{\beta} + D_{source}^{\gamma}}$$

Розкриваючи дозові компоненти через спектральні характеристики, отримаємо інтегральний вираз:

$$K_{eq} = \frac{\int_0^{E_{max}} \left[ \Phi_{real}^{\beta}(E) \cdot S_{col}(E) + \Phi_{real}^{\gamma}(E) \cdot E \cdot \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mat}(E) \right] dE}{\int_0^{E_{beam}} \left[ \Phi_{source}^{\beta}(E) \cdot S_{col}(E) + \Phi_{source}^{\gamma}(E) \cdot E \cdot \left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mat}(E) \right] dE},$$

де  $\Phi_{real}^{\beta}(E)$  - диференціальний флюенс  $\beta$ -частинок (спектр йоду, цезію тощо), отриманий методом Монте-Карло;

$\Phi_{real}^{\gamma}(E)$  - диференціальний флюенс  $\gamma$ -квантів аварійного викиду;

$\Phi_{source}^{\beta}(E)$  - спектр електронів прискорювача (у випадку моноенергетичного пучка це наближається до дельта-функції  $\delta(E - E_{\gamma,i})$ );

$\Phi_{source}^{\gamma}(E)$  - спектр фотонного випромінювання джерела (для  $^{60}\text{Co}$  - дискретні лінії 1,17 та 1,33 MeV (при цьому  $\Phi_{source}^{\beta} \approx 0$ ; для прискорювача - неперервний спектр гальмівного випромінювання (Bremsstrahlung), що виникає при взаємодії пучка з вихідним вікном та конструкційними елементами;

$S_{col}(E) = \frac{1}{\rho} \cdot \left( \frac{dE}{dx} \right)_{col}$  - масова гальмівна здатність речовини для електронів (Mass Collision Stopping Power);

$\left( \frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{mat}(E)$  - масовий коефіцієнт поглинання енергії для фотонів (Mass Energy-Absorption Coefficient).

Важливо зазначити, що при використанні лінійних прискорювачів електронів для імітації  $\beta$ -випромінювання, поле опромінення не є чисто

електронним. Внаслідок взаємодії прискорених електронів з матеріалом вихідного вікна (титанова або алюмінієва фольга), розсіювачами пучка та повітряним проміжком відбувається генерація гальмівного випромінювання (Bremsstrahlung). Хоча інтенсивність цієї  $\gamma$ -компоненти значно менша за інтенсивність первинного пучка (зазвичай становить 1–5% залежно від енергії та атомного номера мішені  $Z$ ), її проникаюча здатність є значно вищою.

Розроблений програмний комплекс дозволяє врахувати цей фактор шляхом введення в знаменник формули спектру гальмівного випромінювання  $\Phi_{source}^{\gamma}(E)$ , розрахованого або отриманого експериментально. Це дозволяє уникнути похибки у визначенні глибинного розподілу дози, оскільки  $\gamma$ -кванти створюють дозове навантаження у всьому об'ємі зразка, тоді як електрони поглинаються переважно у поверхневих шарах.

Використання розробленого програмного забезпечення дозволяє перейти від консервативних оцінок до науково обґрунтованих режимів випробувань:

- Визначати необхідну енергію електронів при використанні прискорювачів для імітації  $\beta$ -випромінювання (замість стандартних 1–4 MeV може бути достатньо 0,6–0,8 MeV для імітації спектру  $^{131}\text{I}$ , що зменшує ризик об'ємного пошкодження зразка, нехарактерного для реальної аварії).

- Розраховувати поправочні коефіцієнти на час опромінення при використанні  $\gamma$ -установок для компенсації відсутності  $\beta$ -компоненти. Таким чином, запропонована методика та програмний інструментарій забезпечують визначення граничних умов експлуатації, що є вхідними даними для проведення кваліфікаційних випробувань, описаних у наступних підрозділах.

### 2.2.3 Математична модель та алгоритм розрахунку режимів прискореного термічного старіння

Моделювання деградаційних процесів в полімерній ізоляції базується на кінетичній теорії хімічних реакцій.

Швидкість зміни визначального параметру (у нашому випадку – відносного подовження при розриві  $\varepsilon$ ) описується рівнянням:

$$\frac{dP}{dt} = -K(T) \cdot f(P),$$

де  $P$  - поточне значення параметру;

$t$  - час;

$K(T)$  - константа швидкості реакції, що залежить від температури;

$f(P)$  — функція, що описує механізм реакції (для реакцій першого порядку

$$f(P) = P.$$

Відповідно до закону Арреніуса, залежність константи швидкості від температури має вигляд:

$$K(T) = A \cdot e^{-\frac{E_a}{k_B \cdot T}},$$

де  $A$  - множник (частотний фактор);

$E_a$  - енергія активації процесу старіння (eВ);

$k_B$  - стала Больцмана ( $8,617 \cdot 10^{-5}$  eВ/К);

$T$  - абсолютна температура (К).

Для розрахунку часу прискорених випробувань  $t_{acc}$ , який еквівалентний заданому терміну експлуатації  $t_{serv}$  (наприклад, 30 або 60 років) при робочій температурі  $T_{serv}$ , використовується інтегральна форма рівняння:

$$\ln(t_{acc}) = \ln(t_{serv}) + \frac{E_a}{k_B} \cdot \left( \frac{1}{T_{acc}} - \frac{1}{T_{serv}} \right)$$

Визначення енергії активації ( $E_a$ ).

Ключовим параметром, що впливає на точність прогнозу, є енергія активації.

Для її визначення використовуються 2 підходи:

1. Експериментальний підхід: Проводяться попередні випробування при трьох температурах (наприклад, 110, 120, 130 °С). Будується графік закону Арреніуса в координатах  $\ln(t)$  від  $\frac{1}{T}$ . Значення  $E_a$  визначається за тангенсом кута нахилу прямої:

$$E_a = k_B \frac{\partial(\ln t)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)}$$

2. Консервативний підхід (згідно з [26]): Якщо експериментальні дані відсутні, використовується мінімальне консервативне значення енергії активації для даного класу полімерів (наприклад, для зшитого ПЕ  $E_a = 1,1$  еВ). Це гарантує, що розрахований час випробувань буде з запасом перекривати реальні потреби.

Коефіцієнт прискорення ( $AF$ ).

Для практичного застосування вводиться безрозмірний коефіцієнт прискорення:

$$AF = \frac{t_{serv}}{t_{acc}}$$

При виборі температури прискорених випробувань  $T_{acc}$  накладається обмеження:

$$T_{acc} < T_{melt},$$

де  $T_{melt}$  — температура плавлення кристалічної фази полімеру (для зшитого ПЕ це ~135–140 °С). Перевищення цієї межі призводить до зміни фізичного стану речовини, що робить модель Арреніуса невалідною. У даній роботі максимальна температура старіння обмежена 130 °С.

## 2.2.4 Методика розрахунку поглинутої дози при опроміненні електронами високих енергій

На відміну від  $\gamma$ -квантів, які мають експоненційний закон поглинання, електрони є зарядженими частинками, що втрачають енергію безперервно вздовж траєкторії руху за рахунок іонізаційних та радіаційних втрат.

Для розрахунку параметрів опромінення використано зв'язок між флюенсом електронів  $\Phi$  (ел/см<sup>2</sup>) та поглинутою дозою  $D$  (Грей).

Поглинута доза  $D$  розраховується за формулою:

$$D = 1,602 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)_{col},$$

де  $1,602 \cdot 10^{-10}$  - коефіцієнт перерахунку одиниць (з МеВ/г в Грей);

$\Phi$  - флюенс електронів (частинок/см<sup>2</sup>);

$\rho$  - густина матеріалу ізоляції (г/см<sup>3</sup>);

$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{col}$  - лінійна гальмівна здатність речовини (Linear Stopping Power), яка для поліетилену та енергії електронів 4–10 МеВ становить приблизно 1,8 – 2,0 МеВ·см<sup>2</sup>/г.

В умовах реального експерименту на прискорювачі керуючими параметрами є струм пучка  $I_{beam}$  (мА) та лінійна швидкість переміщення зразка через зону опромінення  $V_{conv}$  (см/с).

Потужність дози  $P_D$  (Гр/с) в зоні опромінення визначається як:

$$P_D = \frac{I_{beam}}{S_{scan}} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dx}\right)_{col} \cdot K_{geom},$$

де  $S_{scan}$  - площа сканування пучка, а  $K_{geom}$  - геометричний фактор, що враховує форму зразка.

Для набору цільової дози  $D_{total}$  (наприклад, для імітації аварії LOCA) необхідна кількість проходів  $N$  під пучком розраховується за формулою:

$$N = \frac{D_{total} \cdot L_{scan} \cdot V_{conv}}{k \cdot I_{beam}}$$

де  $L_{scan}$  - ширина вікна розгортки пучка.

Забезпечення рівномірності дозового поля.

Специфікою опромінення електронами є обмежений пробіг частинок (для енергії 4 MeV пробіг у поліетилені становить близько 2 см). Для циліндричних кабелів діаметром більше 1 см виникає проблема "тіньових зон".

У методиці застосовано принцип багатостороннього опромінення. Коефіцієнт нерівномірності  $U$  визначається як:

$$U = \frac{D_{max}}{D_{min}}$$

Для забезпечення вимог кваліфікації (допустима похибка дози -0%/+10%) використовується схема з обертанням зразка або двостороннім проходом, що дозволяє досягти коефіцієнта  $U < 1,2$ .

Верифікація розрахункових значень проводиться за допомогою плівкових радіохромних дозиметрів, які розміщуються на поверхні кабелю та під шаром оболонки для побудови кривої розподілу дози по глибині (Depth-Dose Distribution).

### 2.2.5 Аналіз спектральних характеристик аварійного випромінювання та механізмів радіаційної деградації обладнання

Для оцінки складу випромінювання, яке буде впливати на обладнання під ГО в умовах аварії з втратою теплоносія були побудовані розподіли виходу  $\gamma$ -квантів і  $\beta$ -частинок з урахуванням внеску ізотопів у загальну активність, що генерується під ГО, як функції енергії. Результати представлені на рисунку 2.1 та в таблиці 2.3.

Жовтим кольором позначені мінімальні енергії частинок, що випускаються ізотопами, і ймовірність їх вивільнення. Зелений колір позначає максимальну енергію випущених частинок і ймовірність їх вивільнення [43, 44].

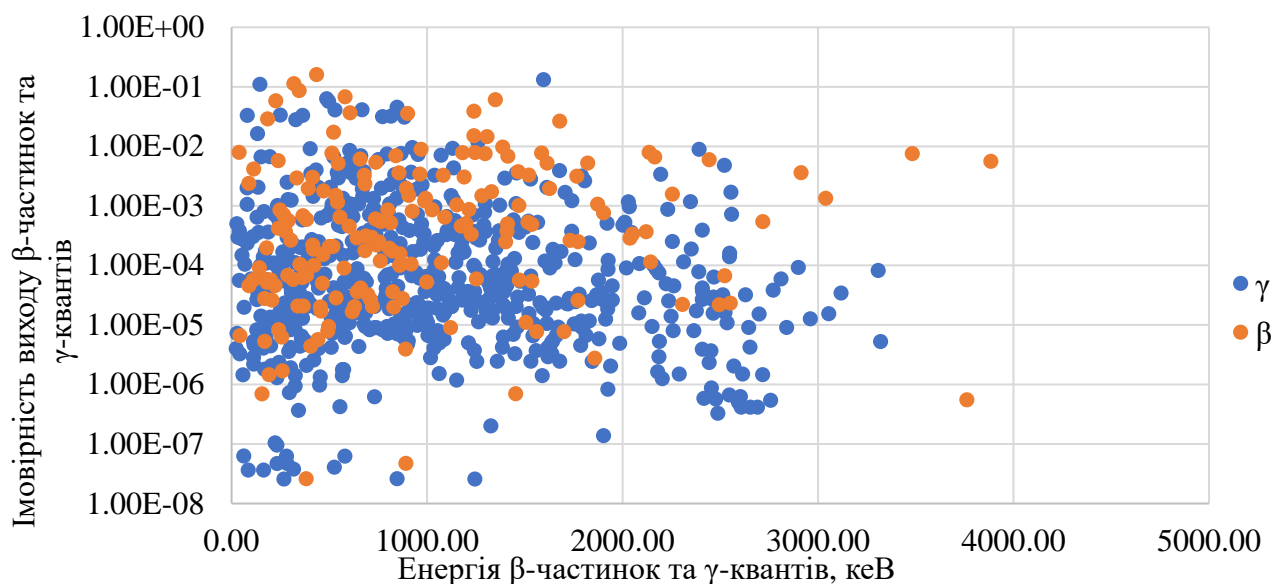


Рисунок 2.1 – Розподіл імовірності виходу  $\gamma$ -квантів і  $\beta$ -частинок при аварії LOCA в залежності від енергії.

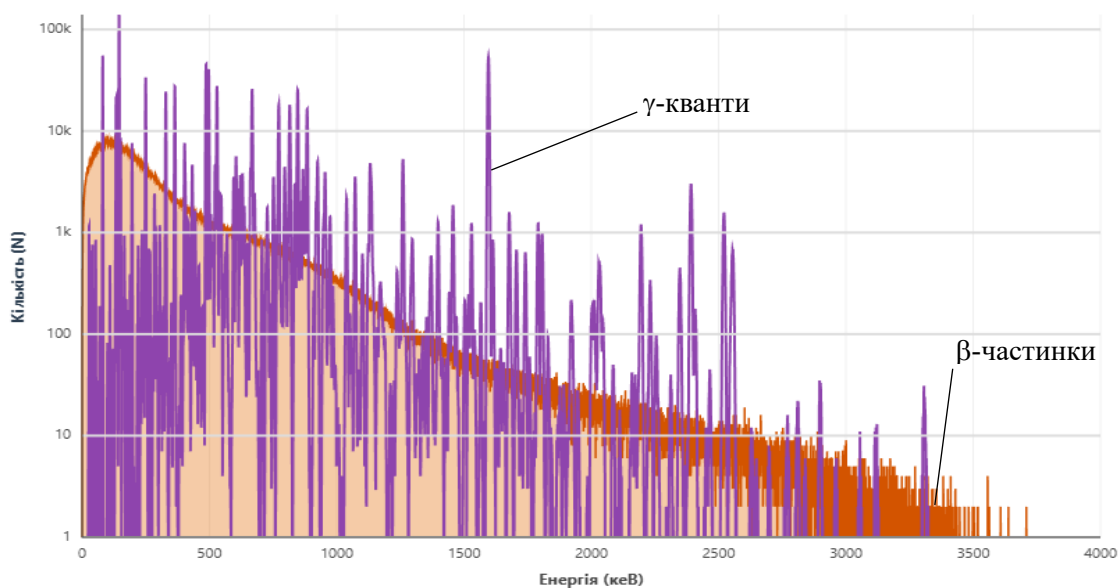
Для обґрунтування параметрів комплексних випробувань обладнання було проведено серію чисельних експериментів з моделювання радіаційних полів методом Монте-Карло, що виникають під ГО реактора ВВЕР при аваріях з втратою теплоносія. Результати моделювання представлено на рисунках 2.2 та 2.3.

Стохастична модель (Рисунок 2.2) — відображає імовірнісний розподіл енергій  $\beta$ -частинок (спектр Фермі), що відповідає реальному фізичному полю.

Консервативна модель (Рисунок 2.2) — відображає розподіл граничних енергій ( $E_{max}$ )  $\beta$ -частинок, що визначає кінематичні межі розпаду та максимальну проникаючу здатність випромінювання.

Таблиця 2.3 – Ймовірні енергії випромінювання  $\gamma$ -квантів та  $\beta$ -частинок.

| Ізотоп | Відсотковий вклад, % | Середня енергія $\gamma$ -квантів, keV | Імовірність виходу, % | Найбільш імовірна енергія $\beta$ -частинок, keV | Імовірність виходу, % |
|--------|----------------------|--|-----------------------|--|-----------------------|
| KR-85M | 0,89%                | 151,159                                | 83,96832              | 840,81   | 99,59425              |
| KR-87  | 1,84%                | 402,586                                | 60,17154              | 3482,41  | 40,91122              |
| KR-88  | 2,57%                | 2392,11                                | 25,25949              | 521,85   | 66,41686              |
| XE-133 | 8,70%                | 81,00                                  | 99,10462              | 346,40   | 99,18091              |
| XE-135 | 3,71%                | 249,77                                 | 95,76506              | 901,23   | 96,09802              |
| I-131  | 4,05%                | 364,49                                 | 81,08281              | 606,31   | 89,49637              |
| I-132  | 4,15%                | 667,7180                               | 33,44822              | 2136,6700  | 18,81197              |
| I-133  | 4,68%                | 529,8720                               | 83,10271              | 1240,1300  | 83,183                |
| I-134  | 4,76%                | 884,0900                               | 21,51094              | 1307,6300  | 30,06478              |
| I-135  | 4,07%                | 1260,4090                              | 21,49944              | 1387,5800  | 23,88144              |
| RU-103 | 6,28%                | 497,0800                               | 89,27635              | 226,5600   | 92,17963              |
| RU-106 | 0,79%                |  |                       | 39,4000  | 100,0000              |
| CS-134 | 0,87%                | 604,7210                               | 43,79707              | 658,1100   | 70,18136              |
| CS-137 | 0,81%                | 661,6570                               | 99,99932              | 513,9700   | 94,39945              |
| CE-141 | 22,80%               | 145,4405                               | 100                   | 435,2600   | 70,2000               |
| CE-144 | 14,73%               | 133,5150                               | 84,994                | 318,7000   | 76,5000               |
| LA-140 | 13,80%               | 1596,2100                              | 44,58                 | 1349,8900  | 45,21098              |
| SR-90  | 0,51%                |  |                       | 546,0000   | 100,0000              |



Рисунки 2.2 – Розрахунковий енергетичний спектр змішаного поля випромінювання під ГО (результат моделювання методом Монте-Карло)

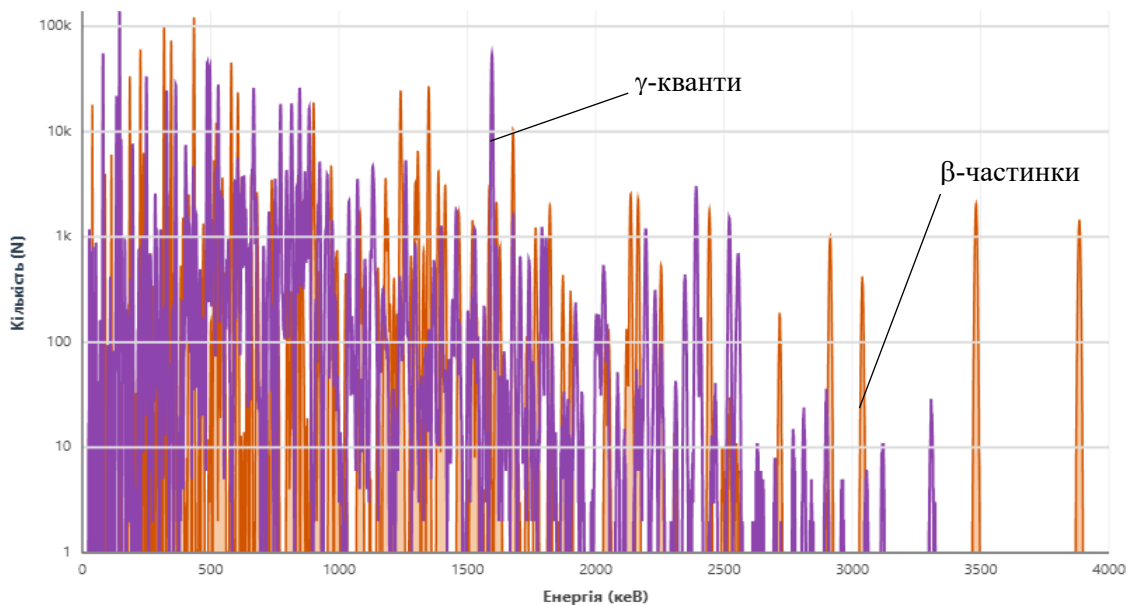


Рисунок 2.3 - Розподіл граничних енергій  $\beta$ -частинок та енергій  $\gamma$ -квантів  
(дискретна модель максимального впливу)

#### 2.2.5.1 Аналіз енергетичної структури поля

Зіставлення отриманих результатів (рис. 2.2 та 2.3) дозволяє виділити дві критичні зони енергетичного спектру, кожна з яких формує специфічний механізм пошкодження обладнання.

Низькоенергетична область (0,1 – 1,0 МеВ).

Згідно зі стохастичною моделлю (рис. 2.1), основна частка флюенсу електронів припадає на діапазон до 500 кеВ. Це зумовлено формою  $\beta$ -спектру, максимум якого для більшості продуктів поділу зміщений вліво відносно середньої енергії  $E_{avg} \approx \frac{1}{3} \cdot E_{max}$ [51].

Висока щільність частинок у цьому діапазоні призводить до формування екстремальних значень поглинутої дози у поверхневих шарах матеріалів (товщиною до 1–2 мм). Стандартні джерела  $\gamma$ -випромінювання ( $^{60}\text{Co}$ ) не відтворюють цей ефект через відносно рівномірний розподіл дози по глибині зразка, що призводить до недооцінки деградації поверхневих властивостей (тріщиностійкості, гідрофобності) при традиційних випробуваннях.

Високоенергетична область (2,5 – 4,0 МеВ).

Аналіз граничних енергій  $\beta$ -частинок (рис. 2.2) виявив наявність у спектрі «хвоста» жорсткого  $\beta$ -випромінювання (до 4 МеВ), джерелами якого є короткоживучі ізотопи криптону ( $^{87}\text{Kr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ) та йоду ( $^{132}\text{I}$ ,  $^{134}\text{I}$ ,  $^{135}\text{I}$ ).

Незважаючи на меншу інтегральну інтенсивність, ці частинки мають критичне значення для кваліфікації захищеного обладнання. Електрони з енергією 4 МеВ мають пробіг у алюмінії близько 8 мм, а в сталі — до 3 мм [52]. Це означає, що стандартні корпуси датчиків та приладів контрольно-вимірювальних приладів та автоматики (КВП та А), які ефективно екранують м'яке випромінювання, є «прозорими» для високоенергетичної компоненти спектру.

#### 2.2.5.2 Механізми впливу на компоненти обладнання

Специфіка змодельованого спектру визначає характер незворотних змін у матеріалах, що є критичними для функціонування систем безпеки.

Деградація полімерних матеріалів (ізоляція кабелів, герметизація).

Вплив змішаного  $\beta$ - та  $\gamma$ -поля на полімери (зшитий ПЕ, ЕПГ) характеризується ефектом «окислювального шару» (DLO) [53].

Низькоенергетична  $\beta$ -компонента створює високу швидкість генерації вільних радикалів у поверхневому шарі. Через обмежену швидкість дифузії кисню вглиб матеріалу, окислення відбувається переважно на поверхні, призводячи до її крихкості та розтріскування.

В умовах ЛОСА, коли присутнє зрошення хімічно активними розчинами (борна кислота, гідразин), поверхневі тріщини стають каналами для проникнення вологи до струмопровідних жил, викликаючи зниження опору ізоляції та короткі замикання [22]. Випробування лише на  $\gamma$ -джерелах можуть показати задовільний результат (збереження еластичності в об'ємі), приховавши катастрофічну деградацію поверхні.

Сучасні перетворювачі тиску та рівня, що містять мікропроцесорні елементи, піддаються впливу високоенергетичної частини спектру (рис. 2.3).

Іонізаційні ефекти: Проходження електронів з енергією  $> 2$  MeV крізь корпус приладу викликає накопичення пасткованого заряду в діелектричних шарах ( $\text{SiO}_2$ ) польових транзисторів [54]. Це призводить до зміщення порогової напруги, дрейфу вихідного сигналу та логічних помилок у роботі цифрових схем.

Генерація гальмівного випромінювання (Bremsstrahlung): Гальмування високоенергетичних електронів у металевих корпусах приладів (матеріали з високим атомним номером  $Z$ , наприклад, нержавіюча сталь) супроводжується ефективною генерацією вторинних  $\gamma$ -квантів. Це створює локальне підвищення дозового навантаження на внутрішні плати електроніки, яке не враховується при розрахунку зовнішнього поля.

Одночасна дія змодельованого спектру та термодинамічних параметрів аварії (температура до  $160^\circ\text{C}$ , тиск до  $0,5$  МПа) має неадитивний характер. Температура збільшує рухливість полімерних ланцюгів, прискорюючи радикальні реакції, ініційовані випромінюванням. Відсутність у кваліфікаційному тесті адекватної  $\beta$ -компоненти (яка відповідає за розігрів поверхні та ініціацію дефектів) може призвести до хибно-позитивних результатів оцінки ресурсу [55].

### 2.2.5.3 Висновки щодо умов кваліфікації

Проведений аналіз спектральних характеристик дозволяє сформулювати вимоги до випробувального обладнання:

1. Для коректного відтворення поверхневих пошкоджень необхідно використовувати джерела електронів (прискорювачі), що забезпечують спектр, близький до розрахованого розподілу Фермі (рис. 2.1), або вводити коригуючі коефіцієнти запасу при випробуваннях на  $\gamma$ -установках [56].

2. Для підтвердження стійкості екранованого обладнання (датчиків у корпусах) енергія електронів прискорювача повинна бути не меншою за граничну енергію основних дозоутворюючих нуклідів ( $E_{beam} \geq E_{max} \approx 4\text{MeV}$ ), виявлену в консервативній моделі (рис. 2.2), для перевірки відсутності ефектів "прострілу" захисту.

### 2.3 Висновки розділу

У другому розділі дисертаційної роботи виконано системний аналіз умов радіаційного впливу на обладнання ядерних енергоустановок, яке розміщується під ГО реакторних установок типу ВВЕР, у разі аварії з втратою теплоносія (ЛОСА), а також проаналізовано адекватність існуючих підходів до кваліфікації обладнання на такі умови.

Проведено детальний аналіз чинної нормативної та методичної бази з кваліфікації обладнання АЕС, який показав, що традиційні підходи до радіаційних випробувань, засновані переважно на застосуванні ізотопних джерел  $^{60}\text{Co}$ , мають виражений консервативний характер та не повною мірою відображають реальні фізичні умови аварійного опромінення під ГО.

На основі аналізу продуктів поділу та їхнього внеску в сумарну активність при аварії ЛОСА встановлено, що радіаційне поле під ГО формується змішаним  $\beta$ - $\gamma$ -випромінюванням, у якому істотну роль відіграють як короткоживучі інертні гази та ізомери йоду, так і середньо- та довгоживучі радіонукліди церію, лантану, рутенію та цезію.

За результатами чисельного моделювання методом Монте-Карло отримано енергетичні спектри  $\beta$ -частинок і  $\gamma$ -квантів, характерні для аварій з втратою теплоносія у реакторах типу ВВЕР. Показано, що спектр має дві принципово різні зони впливу:

- низькоенергетичну область (до 0,5–1,0 МеВ), яка визначає формування високих поверхневих доз та інтенсивну деградацію полімерних і кабельних матеріалів;
- високоенергетичну область (до 3–4 МеВ), наявність якої зумовлює проникнення  $\beta$ -частинок крізь металеві корпуси та захисні оболонки обладнання, що не відтворюється при випробуваннях з використанням джерел  $^{60}\text{Co}$ .

Встановлено, що стандартні  $\gamma$ -джерела не забезпечують коректного відтворення просторового розподілу поглинутої дози, характерного для аварійного

$\beta$ - $\gamma$ -поля, що може призводити до недооцінки деградації поверхневих шарів матеріалів, зниження механічної міцності, втрати діелектричних властивостей та функціональної працездатності елементів КВП та А.

Обґрунтовано доцільність використання пучків прискорених електронів як імітатора аварійного  $\beta$ -випромінювання.

Запропоновано критерій еквівалентності радіаційного впливу, заснований на порівнянні інтегральних поглинутих доз у змішаному  $\beta$ - $\gamma$ -полі аварійного викиду та у полі імітатора, з урахуванням спектральних характеристик частинок і масових енергетичних коефіцієнтів поглинання. Такий підхід забезпечує фізично обґрунтоване зіставлення реальних аварійних умов з умовами прискорених випробувань.

Сформульовано основні вимоги до параметрів експериментального стенду для кваліфікації обладнання АЕС на умови жорсткого навколишнього середовища, включаючи мінімальні енергії електронів, однорідність опромінення, контроль розподілу дози по глибині та методи верифікації дозових навантажень.

Показано, що запропонований підхід до радіаційних випробувань дозволяє істотно скоротити тривалість кваліфікаційного циклу (у 10–15 разів) порівняно з традиційними методами, що є особливо важливим у контексті програм подовження строку експлуатації енергоблоків АЕС та підвищення рівня їх експлуатаційної безпеки.

Узагальнюючи, другий розділ створює науково-методичну основу для подальшого розвитку експериментальних методів оцінки радіаційної стійкості обладнання ядерних енергоустановок та обґрунтовує необхідність переходу від суто консервативних підходів до фізично коректного моделювання аварійних умов опромінення, що безпосередньо реалізується у наступних розділах дисертаційної роботи.

### 3 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ СТЕНД НА БАЗІ РАДІАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ З ПРИСКОРЮВАЧЕМ ЕЛЕКТРОНІВ

#### 3.1 Технічні характеристики радіаційної установки Інституту ядерних досліджень Національної академії наук України

Радіаційна установка Інституту ядерних досліджень (ІЯД) Національної академії наук (НАН) України створена на базі лінійного резонансного прискорювача електронів з діапазоном регулювання енергії прискорених електронів від 2,5 до 5 МеВ. Ця установка відноситься до III категорії, до якої належать об'єкти, на яких розташовані промислові джерела іонізуючого випромінювання та прискорювачі електронів з енергією до 25 МеВ [57]. Установка відповідає вимогам всіх необхідних нормативних документів для можливості проведення робіт із радіаційними технологіями [4, 57].

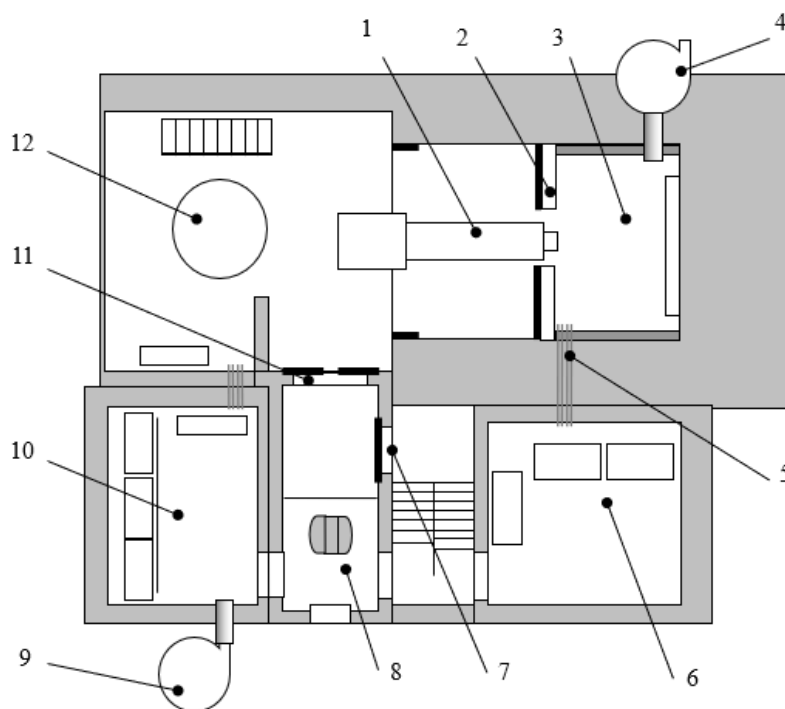
В основі радіаційної установки лежить електрофізичний пристрій - лінійний прискорювач електронів "Електроніка У-005". Розташування елементів радіаційної установки показано на рисунку 3.1 [31].

Основні технічні характеристики прискорювача наведено в таблиці 3.1 [31]

Установка складається з лінійного прискорювача електронів із спеціально розділеними системами оперативного управління та аварійного захисту, системами життєзабезпечення та охолодження, системами технологічної дозиметрії та радіаційного контролю. Також є спеціальна транспортна лінія для подачі зразків в реакційну камеру під час безперервної роботи установки. Все обладнання та системи встановлені в спеціальному приміщенні будівлі зі спроектованим протирадіаційним захистом. Крім того, з метою підвищення радіаційної безпеки персоналу, було проведено спеціальні дослідження радіаційного поля в самій будівлі та за її межами в різних режимах роботи прискорювача. В результаті проведених досліджень в приміщенні, де встановлений прискорювач, було спроектовано та встановлено додаткові бар'єри протирадіаційного захисту [32].

Таблиця 3.1 – Основні технічні характеристики лінійного прискорювача електронів "Електроніка У-005"

| Характеристики прискорювача                   | Значення                    | Примітки                            |
|---|-----------------------------|-------------------------------------|
| Середня енергія електронів, МеВ               | 4                           | 2,5 ÷ 5                             |
| Ширина енергетичного спектру, %               | 5 ÷ 10                      |                                     |
| Тривалість імпульсів пучка, мкс               | 1 ÷ 5                       | на рівні 0,5 А                      |
| Струм пучка в імпульсі 4 мкс, А               | 0,75                        |                                     |
| Частота повторення імпульсів, Гц              | 1 ÷ 200                     | або одиночні                        |
| Довжина розгортки пучка, м                    | 0,4                         | зі сканером                         |
| Переріз пучка, м                              | $(5 \div 30) \cdot 10^{-3}$ | на виході з прискорювача            |
| Потужність дози, Гр/год.                      | $14,4 \cdot 10^6$           | максимальна                         |
| Час безперервної роботи, год.                 | $\leq 8$                    | через дрейф параметрів прискорювача |
| Споживання потужності від силової мережі, кВт | 75                          |                                     |



1 - прискорювач; 2 - внутрішні двері реакційної камери; 3 - реакційна камера установки; 4 - витяжна вентиляція; 5 - проходки сигнальних та силових мереж; 6 - зал контролю експериментів; 7 - входні двері в бокс; 8 - лабіринт транспортної лінії; 9 - приточна вентиляція; 10 - пульт управління; 11 - дисциплінуючий бар'єр; 12 - резервуар водяного охолодження.

Рисунок 3.1 – Структурна схема радіаційної науково-технологічної електрофізичної установки ІЯД

Джерелом іонізуючого випромінювання є прискорювач електронів з потужністю пучка 5 кВт серії «Електроніка», що відноситься до лінійно-резонансного типу прискорювачів електронів. Енергію прискорених електронів можна регулювати в діапазоні від 2,5 до 5 МеВ. Це джерело дає можливість опромінювати великі зразки дозою до 100 кГр/год. Таких параметрів достатньо для моделювання радіофізичних і радіохімічних явищ, що відбуваються в елементах обладнання АЕС під час їх експлуатації в реальних умовах [22 - 27].

У системах цього прискорювача використовується велика кількість готових промислових вузлів, що забезпечує низькі витрати на експлуатацію радіаційної установки [58-63].

Крім того, можливе використання конверсійних мішеней різних типів, які дають можливість отримувати інші види іонізуючого випромінювання для проведення спеціальних технологічних досліджень і радіаційних випробувань.

Для забезпечення стабільності та контролю фізичних параметрів установки використовуються спеціальні системи контролю, регулювання та стабілізації. До таких систем належать електротехнічні системи, системи життєзабезпечення та інженерні системи управління власної розробки [64, 65]. Усі системи управляються та контролюються цифровими та аналоговими схемами з панелі керування. До основних технічних характеристик радіаційної установки ІЯД НАН України відносяться:

1. Забезпечується можливість опромінення зразків в реакційній камері інтенсивними пучками прискорених електронів з енергією від 3 до 6 МеВ і регулювання їх інтенсивності [59, 61, 64];
2. Пучки прискорених електронів, що генеруються прискорювачем, імпульсні осесиметричні, завжди мають стаціонарне положення [31, 60, 62];
3. Прилад містить засоби вимірювання інтегральної інтенсивності пучка прискорених електронів та засоби оперативних технологічних вимірювань [60, 65].
4. Метрологічна точність вимірювання інтенсивності випромінювання становить 5% у будь-якому місці контрольованого простору (1,8 м<sup>3</sup>) [64, 65].

5. Динамічний діапазон вимірювальної системи призначений для контролю регулювання загальної інтенсивності первинного пучка прискорених електронів від 10 до 1500 мА за імпульс (більше 100 разів) [64, 65].

6. Технічні засоби вимірювання просторово-часових характеристик пучка прискорених електронів забезпечують похибки вимірювання менше  $3\div 5\%$  (амплітудні) і  $5\div 10\%$  (часові) [65].

### 3.2 Принцип формування змішаних радіаційних полів

В секторі радіаційних технологій на базі лінійного прискорювача електронів з середньою енергією 4 МеВ було створено дослідницький комплекс, де реалізуються методики досліджень і випробувань з впливом інтенсивних радіаційних полів великих об'ємів. При аналізі їх відповідності рекомендованим умовам кваліфікації було визначено, що необхідно вирішити низку проблем:

1. Розробка методики формування змішаних радіаційних полів з можливістю зміни компонентного складу випромінювання.
2. Оцінка похибок вимірювань в змішаних радіаційних полях.
3. Визначення потужності дози від електронів, що падають по нормалі на піддослідне до обладнання.
4. Визначення вкладу в поглинуту дозу електронів, що падають під кутами від 0 до  $120^\circ$ .
5. Можливості вимірювати параметри складових змішаних  $\beta$ -,  $\gamma$ -полів.

Вирішення вказаних здійснювалось на основі аналізу основних принципів формування змішаних  $\beta$ - $\gamma$  радіаційних полів та особливостей цих процесів.

На установці ІЯД формування полів здійснюється в два етапи. На першому етапі (рис. 3.2) формується рівномірне поле опромінювання електронами. На цьому етапі вузький пучок електронів від прискорювача ( $2\text{--}3\text{ см}^2$ ) трансформується в широкий потік електронів перерізом до  $100\times 100\text{ см}$ .

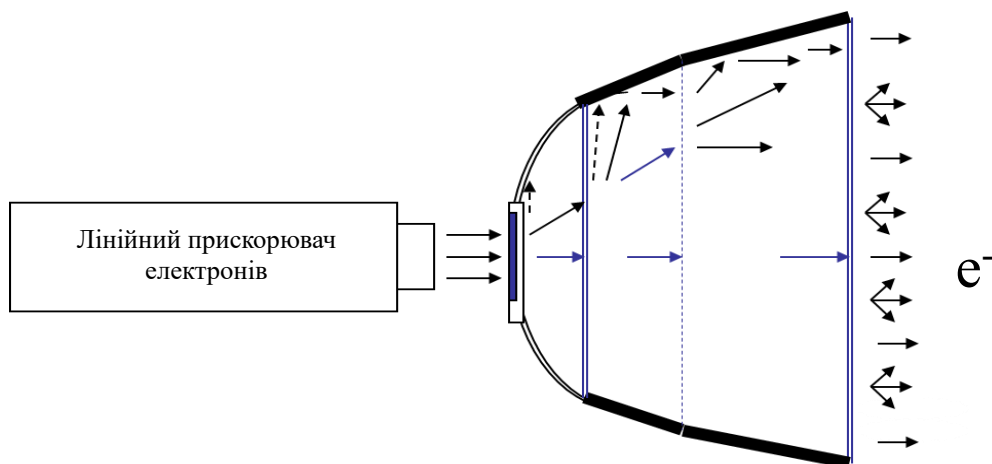


Рисунок 3.2 – Перший етап формування інтенсивних радіаційних полів.

Вже на цьому етапі проводилось дослідження розподілу поля. Виміряне за допомогою прецизійної системи радіаційного контролю поле наведене на рис. 3.3. Вже на першому етапі таке поле може бути використане для усіх експериментальних і промислових радіаційних технологій з застосуванням мегавольтних електронів.

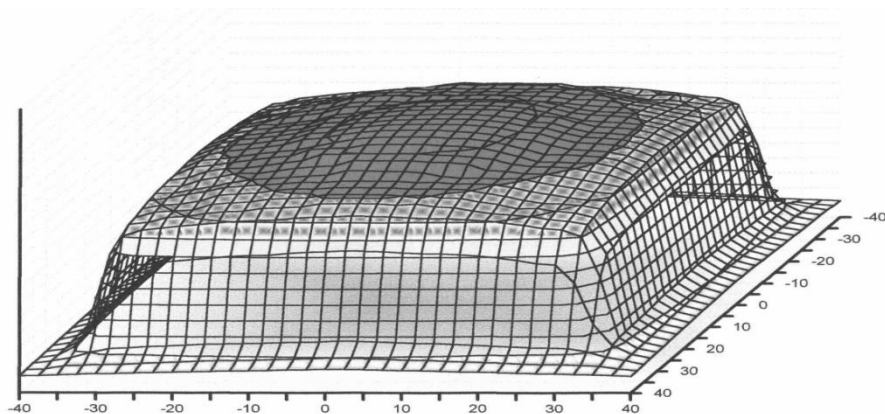


Рисунок 3.3 – Радіаційне поле, що формується на першому етапі.

На другому етапі здійснюється формування змішаних радіаційних полів з необхідним співвідношеннями  $\gamma$ - і  $\beta$ -компоненти. Схема формування наведена на рис. 3.4. Отримання  $\gamma$ -компонента формується напівпрозорою гальмівною мішенню з вольфраму з коефіцієнтом перекриття 0,5, встановленою на виході системи формування за рахунок гальмівного випромінювання [66] (рис. 3.5).

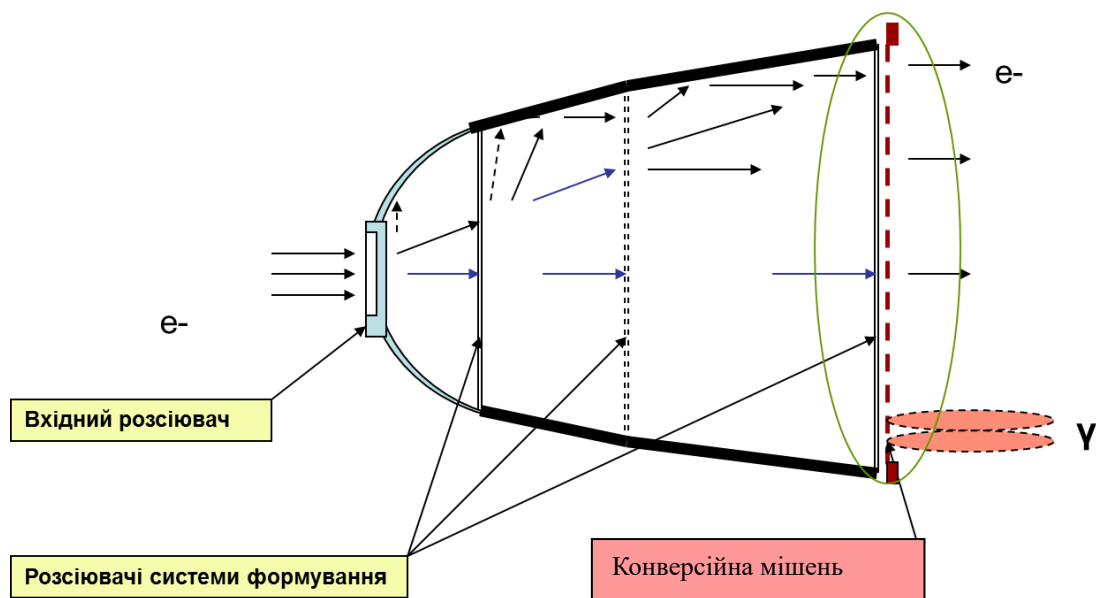


Рисунок 3.4 – Другий етап формування змішаних інтенсивних радіаційних полів



Рисунок 3.5 – Напівпрозора конверсійна мішень

Варто зазначити, що оригінальною особливістю цієї методики формування радіаційного поля є реалізація фактично анізотропного джерела радіації. Однак для дозиметрії такого джерела не підходять стандартні засоби технологічної дозиметрії, які використовуються на установках такого типу. Для вирішення проблеми

дозиметрії необхідно було розробити нові датчики електронної і  $\gamma$ -компоненти радіаційного поля, які були б придатні до використання при випробуваннях з характерним інтенсивним радіаційним полем.

### 3.3 Засоби контролю поля іонізуючих випромінювань в реакційній камері

Принципова відмінність використання прискорювача електронів для формування радіаційного поля в реакційній камері від інших варіантів створення радіаційних полів на випробувальних стендах для полягає в можливості створення великих за розміром стаціонарних полів випромінювання з характеристиками, максимально наближеними до умов, які можуть виникати на реальних об'єктах. Від точності їх створення найбільшою мірою залежать отримані результати та їх відповідність вимогам забезпечення подальшої надійної роботи обладнання АЕС.

#### 3.3.1 Стаціонарні засоби контролю інтенсивного поля випромінювання в просторі реакційної камери

Для технологічної дозиметрії в реакційній камері лінійного прискорювача електронів використовуються промислові засоби, найбільш поширеними і зручними з яких є хімічні дозиметри зарубіжного виробництва. Проте фотохімічні дозиметри цього типу не дозволяють визначити поглинену дозу при тривалому зберіганні. Таким чином, точність ( $\pm 30\%$ ) забезпечується лише протягом  $4 \div 5$  днів з моменту опромінення [31, 32]. Ще однією проблемою використання таких дозиметрів є їх висока вартість та проблеми з постачанням, що збільшує вартість технологічної дозиметрії при випробуванні обладнання.

Оперативним засобом контролю інтегральних характеристик пучка прискорених електронів є датчик магнітної індукції [60], призначений для вимірювання струму прискорених електронів в імпульсі до 0,7 А. Такий датчик магнітної індукції розташований на краю випускного вікна прискорювача (рис. 3.6) і дозволяє контролювати стабільність потоку пучка прискорених електронів під час

опромінення. Робота датчика заснована на принципі створення струму в обмотці за рахунок магнітної індукції банчу, що пролітає через кільце з обмотками. Датчик працює в аперіодичному режимі для контролю форми та амплітуди струму пучка прискорених електронів. Сигнал вимірюється за допомогою стробоскопічних перетворювачів напруги, осцилографів і магнітоелектричних приладів типу М95.

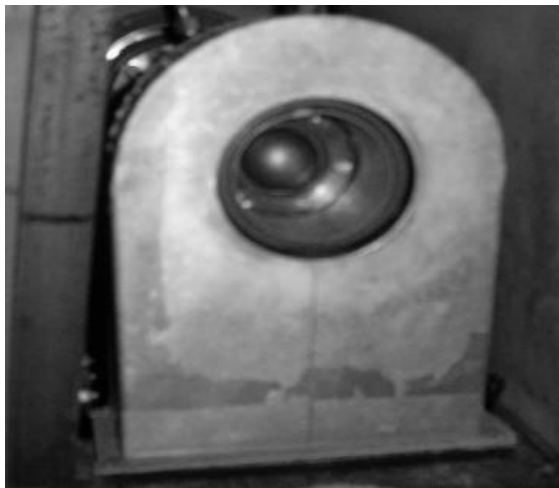


Рисунок 3.6 – Датчик магнітної індукції (індукційний датчик)

Під час випробувань обладнання АЕС на радіаційну стійкість необхідно переконатися, що енергії частинок, що прискорюються в лінійному прискорювачі електронів та потрапляють в реакційну камеру, відповідають енергіям частинок, які можуть бути в місці розташування та експлуатації кожного конкретного обладнання. Для моніторингу розподілу енергії прискорених електронів використовуються спеціально розроблені датчики енергетичного спектру пучка (рис. 3.7, 3.8) [60, 61].

Електронний датчик енергії з хімічним детектором використовує принцип збільшення глибини проникнення прискорених електронів залежно від енергії. Плівковий дозиметр розташований за алюмінієвою пластиною спеціальної конфігурації. Чим більша енергія прискорених електронів, тим більшу товщину алюмінію вони можуть пройти і змінити колір хімічного дозиметра. Інтенсивність зміни кольору хімічного дозиметра може бути використана для визначення розподілу енергії прискорених електронів.

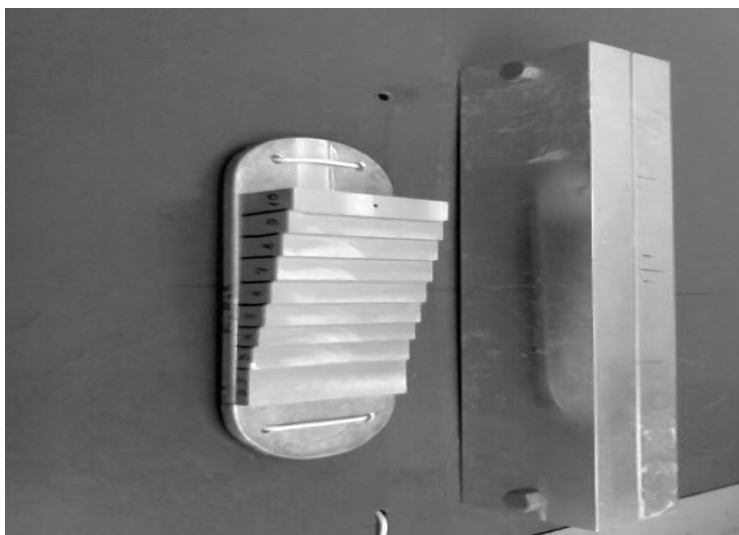


Рисунок 3.7 – Датчик енергії електронів з хімічним дозиметром

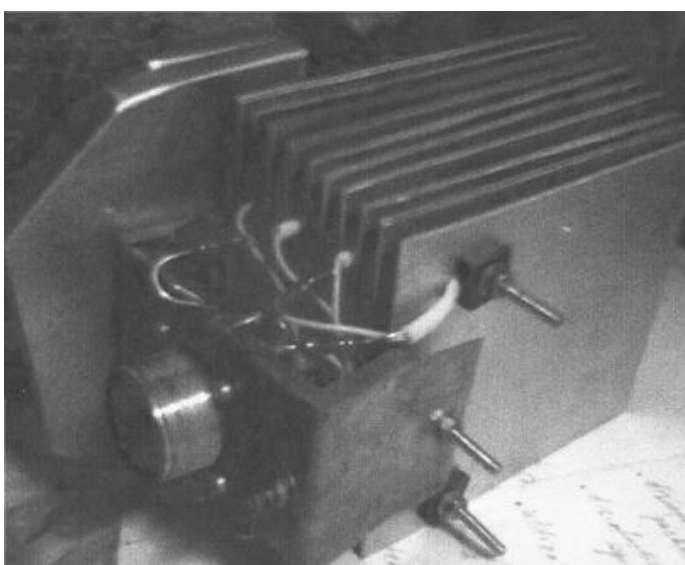


Рисунок 3.8 – Датчик електронного приладу вимірювання спектру пучка прискорених електронів

Принцип роботи електронного пристрою вимірювання спектру пучка прискорених електронів також ґрунтується на збільшенні глибини проникнення частинок, що прискорюються, зі збільшенням енергії. Товщина кожної алюмінієвої пластини забезпечує поглинання електронів з енергією 1 MeV. Електрони з більш високою енергією проходять через одну пластину та поглинаються іншою. Залежно від кількості заряду, який накопичується на пластині при поглинанні електронів, визначається енергетичний спектр пучка. Такий пристрій дозволяє виміряти

максимальну енергію та оцінити енергетичний спектр пучка прискорених електронів<sup>2</sup>, що випромінюється в діапазоні 1-10 МеВ з похибкою менше 10%.

Апаратно-енергетичні системи дозиметрії, контролю та обробки інформації на установці створені з використанням типових стандартів [63]. Описаний комплекс оперативного контролю та технологічної дозиметрії дозволяє оператору радіаційного обладнання контролювати та оптимізувати процеси опромінення зразків з метрологічною точністю виділення дози не гірше за 5 % на зразках розмірами до 80 см × 80 см [64, 65].

Аналізуючи нормативні документи з нормативними вимогами до проведення кваліфікаційних випробувань обладнання [8-10, 12, 13, 18, 27], можна дійти невтішного висновку, що дана установка дозволяє створювати необхідні інтенсивні і рівномірні поля випромінювання. Характеристики та можливості методики задовольняють усім вимогам, оскільки забезпечують дозу опромінення до 1 кГр/год та можливість отримання поглиненої дози 0,1 - 1 МГр при стабільних польових характеристиках випромінювання. Також забезпечується можливість створення великого об'ємного поля випромінювання зі змішаними компонентами ( $\beta$ -,  $\gamma$ -компонентами). Існуючі системи забезпечують технологічну дозиметрію, контроль та діагностику радіаційних полів.

### 3.3.2 Механічний пристрій для переміщення датчиків випромінювання

Для перевірки параметрів радіаційного поля, що створюється в реакційній камері радіаційної установки з прискорювачем електронів, використовується штатна система дозиметрії та вимірювань характеристик поля, заснована на традиційних методах і спеціальних технічних засобах оригінальної розробки [65, 67].

Система використовує спеціально спроектоване та розроблене обладнання для аналізу просторового розподілу пучка прискорених електронів в реакційній камері. Кінематична схема приладу заснована на електромеханічних приводах, які можуть переміщувати в трьох площинах платформу, на якій закріплені датчики вимірювання іонізуючого випромінювання (рис. 3.9).

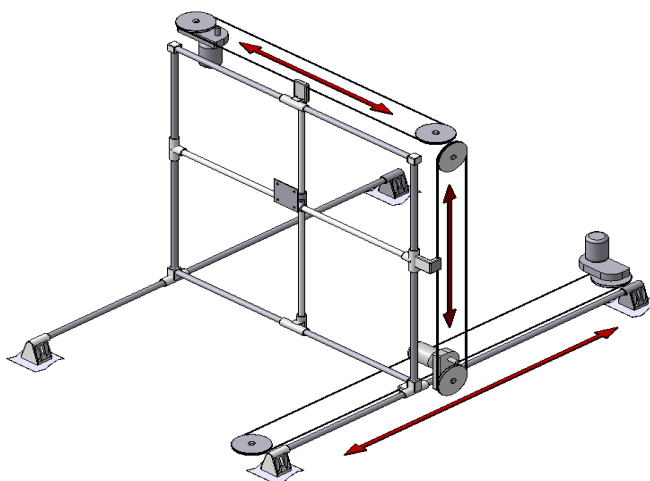


Рисунок 3.9 – Кінематична схема механічного пристрою для переміщення датчиків випромінювання.

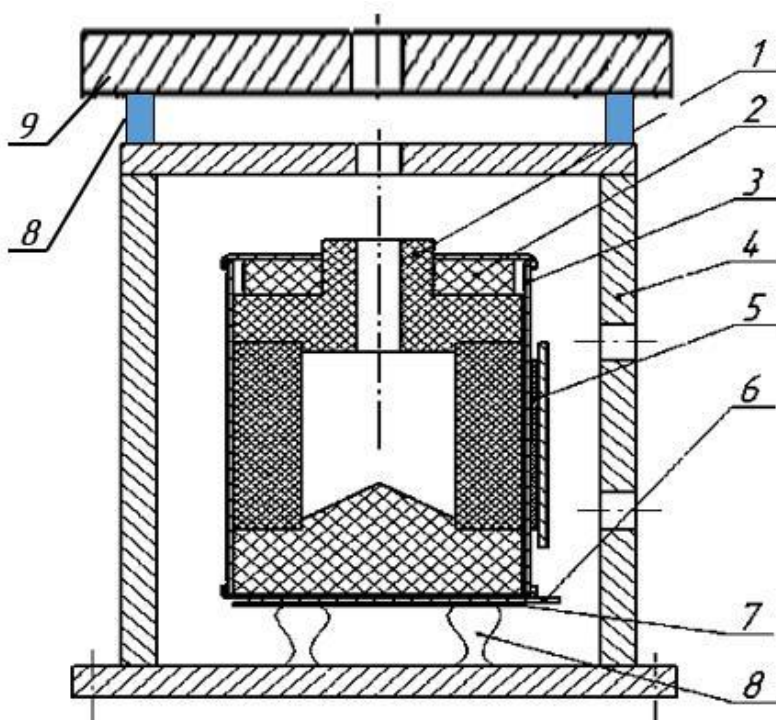
При вимірюванні розподілу поля випромінювання за допомогою цих приводів платформа рухається в потрібному напрямку. Контроль руху платформи здійснюється за допомогою точних датчиків положення і кінцевих вимикачів.

З його допомогою датчики вимірювання характеристик радіаційного поля можна переміщати в будь-яке місце контрольованого простору в межах 900x900x1500 мм.

### 3.3.3 Засоби контролю поля прискорених електронів

Основним засобом контролю інтенсивності пучка прискорених електронів є стандартизований циліндр Фарадея (ЦФ) з апертурою  $1 \text{ см}^2$  і кутом огляду приблизно 3 градуси (рис. 3.10). Цей ЦФ розроблено з урахуванням усіх вимог, необхідних для забезпечення необхідної точності при вимірюванні пучків прискорених електронів з енергією від 4 до 5 MeV і щільністю до  $0,1 \text{ мА/см}^2$ . Вимірювання базуються на поглинанні зарядженої складової потоку випромінювання, або Спеціальна конструкція датчика, що використовується [58], гарантує похибку вимірювання менше 0,5% у заданому діапазоні енергій пучка прискорених електронів.

Під час роботи цього пристрою було виявлено, що типові цифрові фільтри мають труднощі з вимірюванням потоків частинок при високій інтенсивності через вплив струмів вторинного променя та нагрівання поглинаючого матеріалу. Таким приладом неможливо виміряти анізотропні поля випромінювання, тому модернізована система вимірювання випромінювання доповнена новим ЦФ з апертурою  $10 \text{ см}^2$  і кутом огляду до  $120$  градусів. Схема нового циліндра наведена на рис. 3.11.



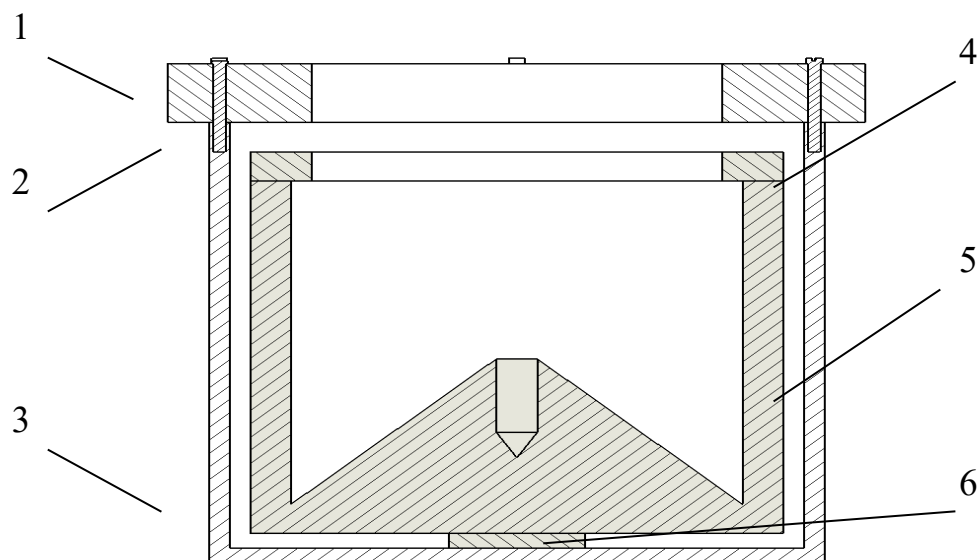
1 – графітовий поглинач; 2 – магнітне кільце; 3 – внутрішній кожух; 4 – зовнішній захист; 5 – терморезистор; 6 – контактна пластина; 7 – пластина жорсткості; 8 – ізолятори; 9 – заземлений коліimator.

Рисунок 3.10 – ЦФ з кутом зору до  $3^0$ .

### 3.3.1 Засоби контролю поля $\gamma$ -випромінювання

До складу штатної дозиметричної системи входить також набір датчиків іонізуючого випромінювання клінічного дозиметра (рис. 3.12), які закріплені та розташовані у певних контрольних точках. Сам клінічний дозиметр встановлюється у приміщенні поруч із пультом управління. Сигнал від датчиків

передається кабелями через спеціально екранований підсилювач. Така схема підключення дозволяє встановити датчики на максимальній відстані та передавати сигнал без суттєвих спотворень.



1 – Кришка корпусу; 2 – Кріплення; 3 – Корпус; 4 – Кришка графітового поглинач; 5 – графітовий поглинач; 6 – ізолятор.

Рисунок 3.11 – ЦФ з кутом зору до  $120^\circ$ .



Рисунок 3.12 – Набір датчиків випромінювання.

### 3.3.1.1 Обґрунтування необхідності удосконалення системи радіаційного контролю

Проведення кваліфікаційних випробувань обладнання, важливого для безпеки АЕС, вимагає створення радіаційних полів з чітко визначеними та контрольованими параметрами. На дослідницько-промислових установках на базі лінійних прискорювачів електронів такі випробування проводяться в умовах змішаних полів високої інтенсивності, що складаються з гальмівного випромінювання та розсіяних електронів [68]. Специфіка роботи імпульсних прискорювачів (тривалість імпульсу 1–5 мкс, енергія електронів до 4 МеВ) накладає суттєві обмеження на використання штатних засобів дозиметрії.

Аналіз експлуатації існуючої системи радіаційного контролю виявив низку технічних проблем, що унеможливають отримання достовірних даних у всьому діапазоні робочих потужностей установки.

По-перше, штатні дозиметричні прилади, такі як клінічний дозиметр 27012, розраховані переважно на роботу в стаціонарних полях або полях низької інтенсивності. Такий клінічний дозиметр здатний вимірювати потужні радіаційні поля з потужністю дози  $\gamma$ -випромінювання до 3300 Р/хв. Їхня конструкція передбачає використання відносно коротких з'єднувальних кабелів (до 15 м) між детектором та вимірювальним пультом. Це змушує розміщувати попередні підсилювачі та вхідні каскади електроніки в безпосередній близькості до зони опромінення або в зонах з високим рівнем розсіяного випромінювання. Як наслідок, напівпровідникові компоненти зазнають радіаційної деградації, що призводить до дрейфу «нуля», спотворення корисного сигналу та передчасного виходу обладнання з ладу [68].

По-друге, висока миттєва щільність потоку частинок під час імпульсу прискорювача призводить до ефекту насичення газорозрядних детекторів, що працюють у лічильному режимі (зокрема, лічильників Гейгера-Мюллера). При потужностях дози, що перевищують 100 Р/хв (а в зоні пучка вони досягають  $2 \cdot 10^6$  Гр/год), «мертвий час» лічильника стає співмірним з інтервалом між подіями

іонізації, що робить імпульсний метод реєстрації непридатним для кількісних вимірювань [68].

По-третє, робота потужних високочастотних систем прискорювача генерує значний рівень електромагнітних завад. При передачі слабких аналогових сигналів від іонізаційних камер довгими лініями зв'язку (понад 25 м, що необхідно для винесення операторського пульта в безпечну зону), корисний сигнал «губиться» на фоні наведених шумів. Це критично знижує точність вимірювань, особливо на краях діаграми спрямованості пучка, де інтенсивність поля менша.

Враховуючи вищезазначене, виникає необхідність у розробці та впровадженні методу вимірювання, який би поєднував високу радіаційну стійкість детектора, несприйнятливість до імпульсних перевантажень та можливість передачі сигналу на значні відстані без використання попередніх підсилювачів у радіаційно небезпечній зоні. Перспективним напрямком вирішення цієї задачі є використання промислових газорозрядних лічильників типу СИ-5007 (рис. 3.13) у струмовому (інтегральному) режимі включення, що дозволить уникнути ефектів насичення та забезпечити лінійність вимірювань у полях високої інтенсивності [4].

Його параметри, що наведені в таблиці 3.2, є привабливими для використання при відтворенні радіаційних полів для кваліфікації обладнання АЕС.

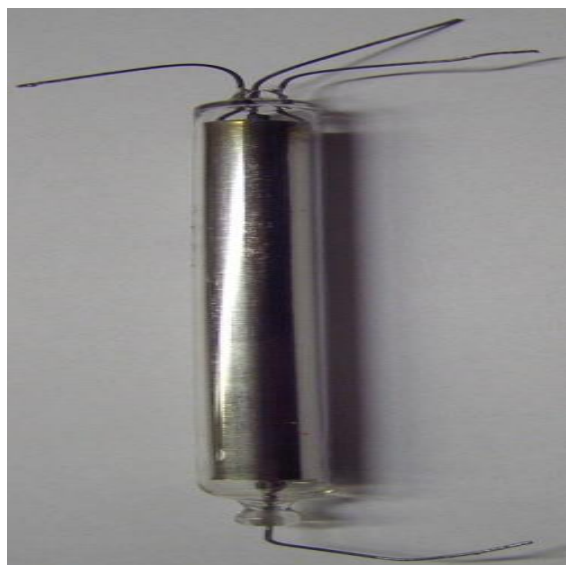


Рисунок 3.13 – Загальний вигляд пропорційного лічильника СИ 5007

Таблиця 3.2 – Параметри пропорційного лічильника СИ-5007

| Параметр  | Значення      |
|---|---------------|
| Ефективність реєстрації   | більше 110    |
| Максимальне навантаження (імп/с)  | більше $10^4$ |
| Фронт наростання імпульсу (мкс)   | менше 2       |
| Фонова швидкість лічення (імп/с)  | 0,8-1,5       |
| Ресурс  | не менше      |
| Похибка визначення енергії<br>(в межах 20-100 кеВ)<br>(в межах 100-800 кеВ) | 5<br>10       |

### 3.3.1.2 Методологія вимірювання та опис технічної реалізації системи

В основу розробленої системи покладено принцип реєстрації інтегрального струму іонізації, що виникає в об'ємі газорозрядного детектора під дією інтенсивного випромінювання. На відміну від традиційного імпульсного методу, де реєструються окремі акти взаємодії частинок з речовиною, запропонований підхід («струмовий режим») дозволяє оперувати усередненою величиною струму, яка є пропорційною потужності поглиненої дози.

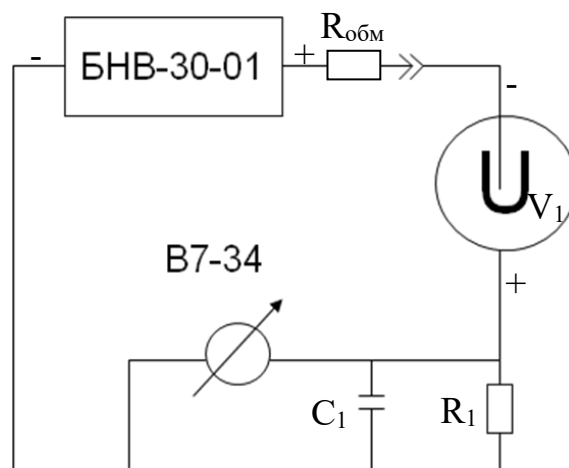
Вибір первинного перетворювача. У якості детектора випромінювання обрано промисловий пропорційний лічильник СИ-5007 (або його аналоги з відповідними характеристиками). Вибір саме цього типу приладу для задач кваліфікації обладнання АЕС зумовлений сукупністю таких факторів:

1. Конструктивна надійність: Скляний корпус та відсутність органічних матеріалів у конструкції електродів забезпечують високу радіаційну стійкість.
2. Склад газової суміші: На відміну від галогенних лічильників Гейгера-Мюллера, де ресурс обмежений дисоціацією гасячої домішки, пропорційні лічильники цього типу мають ресурс понад  $10^{10} - 10^{11}$  імпульсів, що в струмовому режимі еквівалентно сотням годин роботи в полях високої інтенсивності без деградації чутливості [68].

3. Малі габарити: Це дозволяє проводити локальні вимірювання градієнтів поля (топографування) всередині технологічних об'ємів зі складним доступом.

Схемотехнічна реалізація «оберненого включення». Для реалізації струмового режиму було розроблено спеціалізовану схему включення детектора, яка в технічній літературі отримала назву «оберненої» через специфіку знімання корисного сигналу (рис. 3.14).

Традиційна схема включення газорозрядних лічильників передбачає ємнісний зв'язок для виділення коротких імпульсів на фоні високої напруги. У запропонованому рішенні коло вимірювання гальванічно зв'язане з ланцюгом живлення, що перетворює детектор на своєрідну іонізаційну камеру з внутрішнім газовим підсиленням.



БНВ-30-01 – Джерело високої напруги;  $R_{обм}$  - обмежувачий резистор;

В7-34 – цифровий вольтметр-електрометр;

$V_1$  – пропорційний лічильник СИ5007;

$R_1$  – вимірювальний резистор 2,0 МОм;

$C_1$  – інтегруючий конденсатор

Рисунок 3.14 – Принципова схема включення лічильника СИ-5007 у режим вимірювання струму («обернене включення»)

При такій конфігурації високовольтний потенціал прикладається до анода лічильника, а вимірювання проводяться у низьковольтній частині кола (катодному ланцюзі), що суттєво спрощує вимоги до ізоляції вимірювальної апаратури.

Ключовою особливістю даної методології є характер вихідного сигналу. У полях високої інтенсивності (зона пучка прискорювача) потік частинок настільки щільний, що окремі розряди в лічильнику зливаються у квазістаціонарний струм. Вихідний сигнал  $U_{\text{вих}}$  являє собою повільно змінну напругу постійного струму (DC), а не високочастотні імпульси. Це дає вирішальну перевагу при проектуванні системи комунікацій:

Нівелювання впливу ємності кабелю: Паразитна ємність довгого коаксіального кабелю не спотворює форму сигналу, оскільки вимірюється амплітуда постійної складової.

Завадостійкість: Використання інтегруючого ланцюга ( $R_1$  та ємність кабелю) дозволяє ефективно фільтрувати високочастотні електромагнітні наведення від клістронів та модуляторів прискорювача.

Завдяки цьому стало можливим винесення реєструючої електроніки на відстань понад 25 метрів із зони радіаційного впливу в пультову кімнату, що повністю виключає радіаційне пошкодження напівпровідникових компонентів вимірювального тракту [68].

Робочий струм лічильника  $I_c$  у даному режимі визначається законом Ома для ділянки кола і пов'язаний з вимірюваною напругою  $U_{\text{вих}}$  співвідношенням:

$$I_c = \frac{U_{\text{вих}}}{R_1}$$

Вважається, що струм  $I_c$  є функцією від потужності поглиненої дози  $P_D$ :

$$I_c = k \cdot P_D^n,$$

де  $k$  – коефіцієнт чутливості детектора,

$n$  – показник лінійності (для ідеальної іонізаційної камери  $n=1$ ).

Перевірка лінійності ( $n$ ) та визначення коефіцієнта  $k$  для конкретної геометрії вимірювань є предметом калібрувальних експериментів.

### 3.3.1.3 Експериментальне дослідження метрологічних та експлуатаційних характеристик

Для верифікації запропонованого методу та визначення оптимальних режимів роботи вимірювального тракту було проведено комплекс стендових та натурних випробувань на базі прискорювача електронів ІЯД НАН України. Основними завданнями етапу були: підтвердження лінійності перетворення в широкому динамічному діапазоні, визначення робочої точки на вольт-амперній характеристиці та оцінка впливу інтенсивного опромінення на електричну міцність детектора.

Дослідження лінійності відгуку в діапазоні малих та середніх потужностей. На першому етапі проводилося градуювання вимірювального каналу шляхом порівняння показів розробленої системи з показами еталонного клінічного дозиметра 27012 (Німеччина), який є сертифікованим засобом вимірювання. Експеримент проводився на периферії пучка гальмівного випромінювання, де потужність дози не перевищувала 150 Р/хв (тут і далі позасистемні одиниці (Рентген) використовуються, оскільки шкали використовуваного обладнання проградуєвані у цих величинах), що відповідає робочому діапазону еталонного приладу (рис. 3.15).

Отримані результати продемонстрували строгу лінійну залежність вихідної напруги на навантажувальному резисторі від потужності експозиційної дози.

Як видно з графіка, експериментальні точки з високою точністю апроксимуються лінійною функцією (коефіцієнт детермінації  $R^2 \rightarrow 1$ ). Відсутність гістерезису та відхилень від лінійності свідчить про те, що в даному діапазоні струм витоку ізоляції та темнові струми детектора є нехтувано малими порівняно з іонізаційним струмом. Це дозволяє використовувати систему для точного

моніторингу "хвостів" радіаційних полів без додаткової складної математичної обробки сигналу.

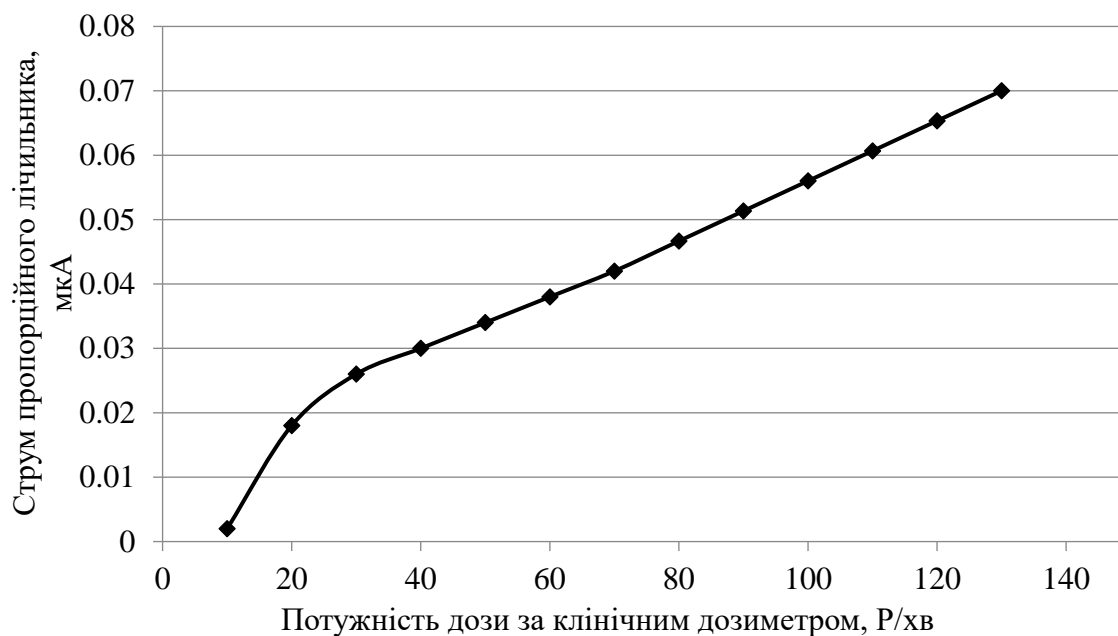


Рисунок 3.15 - Градувальна характеристика вимірювального каналу в діапазоні малих потужностей дози

Результати цих досліджень [68] підтверджують принципову працездатність ПЛ для вимірювання параметрів сильних радіаційних полів. Було експериментально підтверджено робочий стан (не насичення) лічильника та лінійність його характеристики при напрузі на вимірювальному резисторі 0,1471В в діапазоні від 0,3 Гр/хв до 1,4 Гр/хв.

#### 3.3.1.4 Дослідження працездатності ПЛ в змішаних радіаційних полях

Останній етап досліджень можливостей такого методу вимірювання інтенсивних змішаних радіаційних полів має на меті адаптацію установки під кваліфікацію великогабаритного обладнання АЕС. В роботах [68, 69] було показано, що при проведенні кваліфікаційних випробувань обладнання АЕС необхідно забезпечувати відповідність умов випробувань реальним умовам експлуатації обладнання в місці його розташування. А для цього необхідно

створити змішане (у відповідних співвідношеннях)  $\beta$ -,  $\gamma$ -поле. Тому проблеми вимірювань є вирішальними для формування необхідних радіаційних умов випробування. Необхідно було встановити границі можливостей радіометричного приладу з ПЛ в аналоговому режимі роботи і підтвердити його працездатність при формуванні характеристик радіаційного поля у відповідності з нормативним вимогами. Для цього було удосконалено систему сканування [68]. В удосконаленій системі  $\beta$ -компонента (струм прискорених електронів) визначається за допомогою спеціально розробленого широкоапертурного ЦФ з кутом зору 110 градусів. Для вимірювання  $\gamma$ -складової планується скористатися пропорційним лічильником з оберненою схемою підключення (рис 3.16).

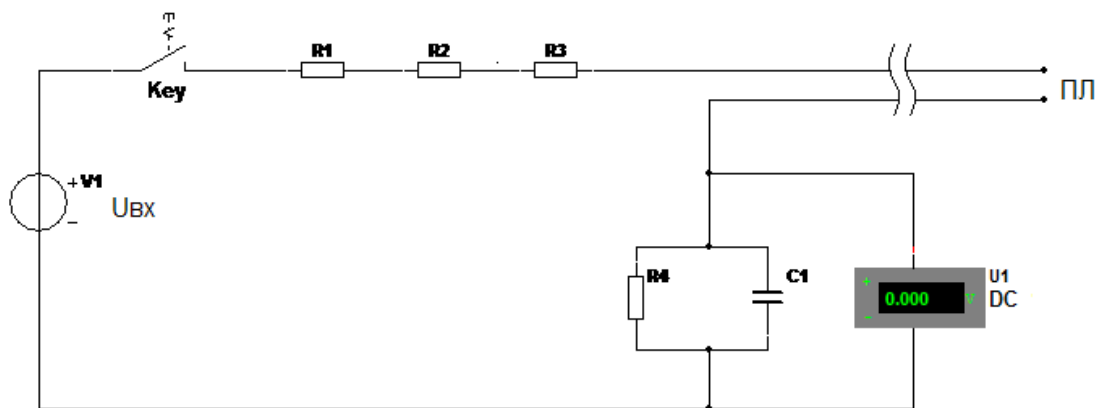


Рисунок 3.16 – Схема підключення ПЛ для вимірювання  $\gamma$ -компоненти радіаційного поля в реакційній камері установки

Для кваліфікаційних функціональних випробувань обладнання АЕС були досліджені граничні можливості радіометричного приладу з ПЛ для встановлення його придатності для формування характеристик радіаційного поля у відповідності з нормативним вимогами.

При дослідженнях ПЛ встановили біля випускного вікна прискорювача, поряд з індукційним датчиком струму випущеного пучка (рис. 3.17). Формування  $\gamma$ -компоненти поля здійснювалося за рахунок конверсії прискорених електронів на

металевих мішенях. Метою було пошук можливостей оптимізації схеми підключення датчика в запланованому діапазоні режимів роботи установки.

Формування  $\gamma$ -компоненти здійснювалось за допомогою алюмінієвої (повне перекриття) та вольфрамової мішені з коефіцієнтом перекриття пучка 0,5. Встановлена залежність інтенсивності  $\gamma$ -компоненти від загального струму пучка прискорювача (первинного пучка). Ці залежності, показані на рис. 3.18.

Для оптимізації режиму роботи ПЛ в схемі технологічної дозиметрії необхідно було визначити оптимальну напругу його живлення. Першочерговим завданням було визначення вольт-амперної характеристики ПЛ в холостому режимі роботи (без радіаційного поля). Результати вимірювань представлені на рисунку 3.19.



Рисунок 3.17 – Схема розміщення ПЛ

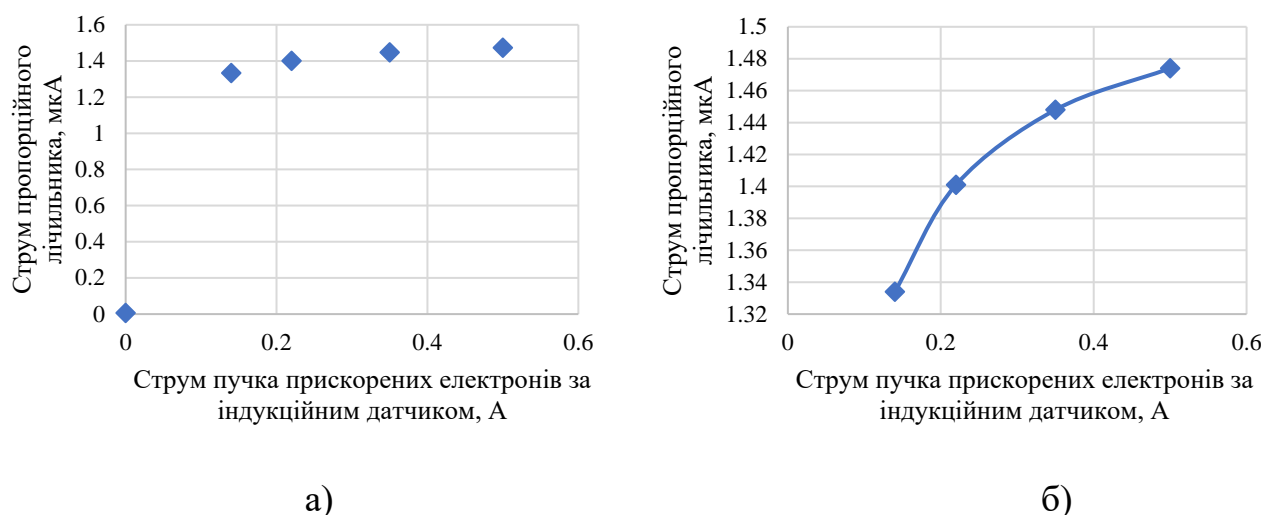


Рисунок 3.18 – Функція відгуку пропорційного лічильника на зміну інтенсивності радіаційного поля (струму пучка): а) – в усьому діапазоні, б) – в робочому діапазоні.

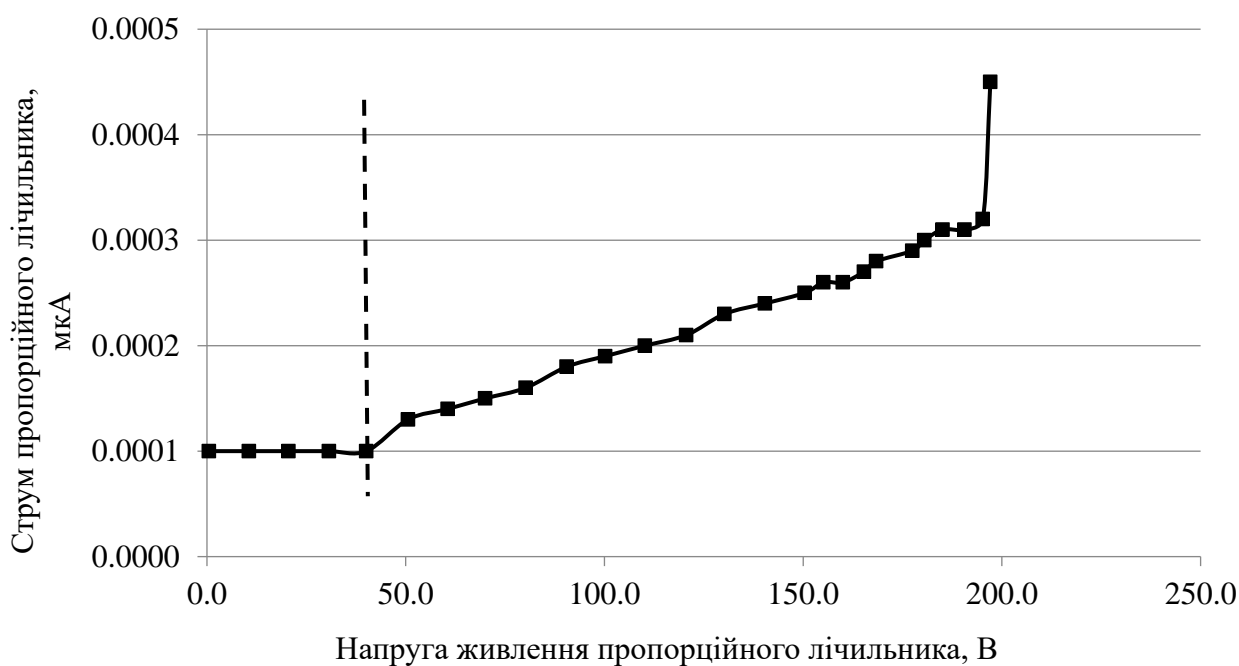


Рисунок 3.19 – Вольт-амперна характеристика пропорційного лічильника без радіаційного поля

Аналізуючи отримані дані можна зробити висновок, що при напрузі вище 195 В відбувається насичення ПЛ, тобто, для встановлення режиму датчика на

лінійну ділянку його характеристики, робоча напруга повинна знаходитись в середині інтервалу  $40 \div 195$  В.

Наступним етапом було вимірювання вольт-амперної характеристики в робочому режимі. Показником інтенсивності радіації були показання індукційного датчика струму пучка прискорювача.

ПЛ для досліджень було встановлено в реакційній камері біля випускного вікна прискорювача. Для виключення впливу на нього потоку прискорених електронів, перед ПЛ було встановлено заземлений алюмінієвий екран товщиною  $\delta = 40$  мм для повного поглинання електронів пучка. Формування  $\gamma$ -поля здійснювалося за рахунок конверсії прискорених електронів на вольфрамовій мішені.

Параметри пучка прискорених електронів:

- струм пучка за показаннями індукційного датчика  $I_{\text{ІД}} = 0,4$  А;
- струм пучка за показаннями ЦФ  $I_{\text{ЦФ}} = 17$  нА;
- середня енергія прискорених електронів  $E = 4$  МеВ.

Результати вимірювань представлені на рисунку 3.20.

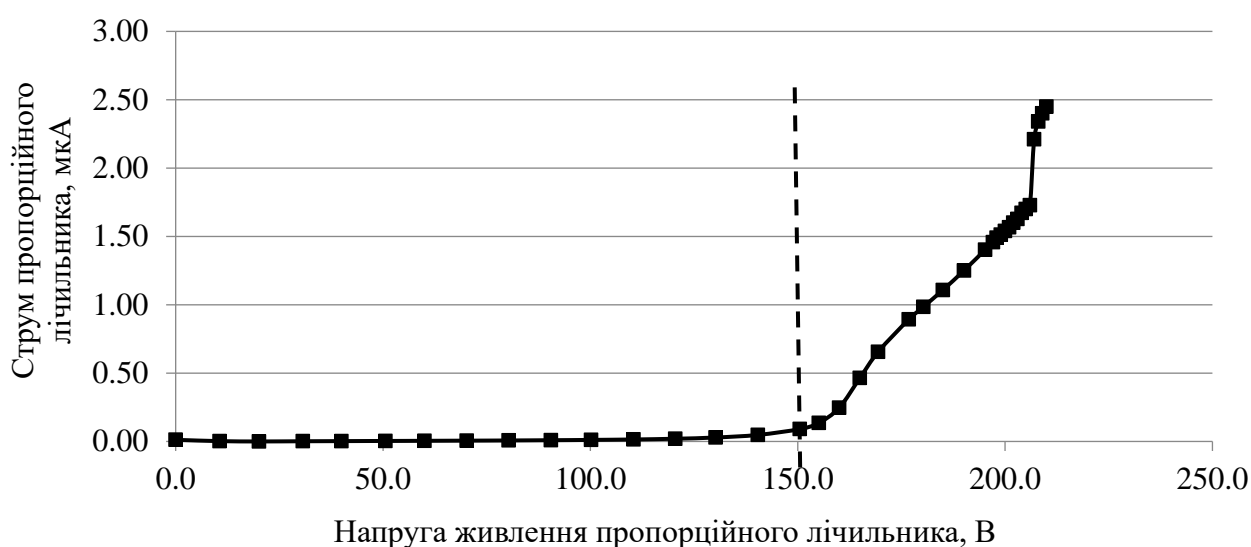


Рисунок 3.20 – Вольт-амперна характеристика пропорційного лічильника в робочому режимі

Вольт-амперна характеристика ПЛ має класичний вигляд для газонаповнених детекторів:

- у діапазоні напруг до  $\sim 140\text{--}150$  В струм лічильника практично дорівнює нулю, що відповідає області рекомбінації та іонізаційній області;
- при напругах  $U \approx 150\text{--}200$  В спостерігається різке зростання струму, що свідчить про перехід детектора в пропорційний режим;
- за напруг  $U > 200$  В фіксується подальше нелінійне зростання струму, що вказує на наближення до області обмеженої пропорційності та можливий початок вторинних процесів.

За графіком чітко ідентифікується порогова напруга пропорційного режиму:

$$U_{\text{пор}} \approx (150 \pm 5) \text{ В},$$

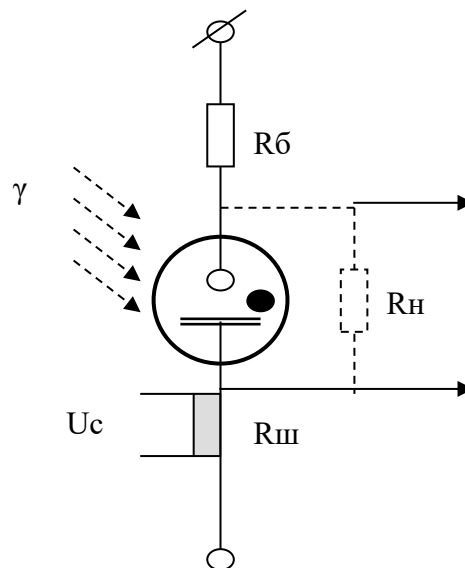
що узгоджується з типовими значеннями для ПЛ аналогічної конструкції та складу газової суміші.

В інтервалі приблизно  $160\text{--}190$  В крива має плавний, майже лінійний характер зростання струму, що є оптимальним робочим діапазоном для використання ПЛ у складі цифрового радіометра.

З аналізу наведених функцій можна зробити припущення про можливість здійснювати вимірювання не в аналоговому режимі, а в цифровому. Про це свідчать той факт, що початок лінійного відрізка вольт-амперної характеристики ПЛ без радіаційного поля (штрихова лінія на рис. 3.19) і з радіаційним полем (штрихова лінія на рис. 3.20) відрізняється майже на  $100\text{В}$ . Для розуміння цього варіанту використання датчика можна скористатися еквівалентною схемою вимірювання, наведеною на рис. 3.21.

Методика цифрового вимірювання невідомого радіаційного поля в місці розташування датчика базується на фіксації напруги (на  $R_H$ ) в момент виникнення іонного струму через ПЛ на шунті  $R$  ( $U_c$ ).

Отримані в експериментах вольт-амперні характеристики свідчать що найближчим аналогом для аналізу метрологічних характеристик ПЛ є газовий стабілітрон. Ці прилади, при зворотному включенні напруги живлення, характеризуються наявністю границь напруги живлення, при перевищенні яких струм через прилад різко зростає і обмежується лише величиною баластного резистору, тобто відбувається «пробій» робочого проміжку стабілітрона. У випадку ж роботи пропорційного лічильника такого типу в радіаційному полі величина напруги пробією залежить не лише від складу газової суміші в камері датчика, але також і від інтенсивності потоку іонізуючого випромінювання. І цей ефект визначає можливість використання ПЛ, як елемента, чутливого до радіації.



$\gamma$  – потік  $\gamma$ -випромінювань;

$R_b$  – баластний резистор;

$R_H$  – шунтовий опір;

$U_c$  – напруга на шунті;

$R$  – шунт.

Рисунок 3.21 – Еквівалентна схема вимірювання.

На рисунку 3.22 показано вольт амперні характеристики вакуумованих іонних приладів групи стабілітронів.

Принцип стабілізації ґрунтується на пороговому механізмі електричного пробою розрідженого газу в колбі стабілітрону. Поріг визначається типом газу (чи їх суміші). При перевищенні потенціалу на аноді стабілітрону напруги його запалювання ( $U_{ст}$ ), через стабілітрон виникає струм іонізації. Процес нелінійний і це використовується для стабілізації напруги на навантаженні ( $R_n$ ). Стабілізація відбувається за рахунок зміни падання напруги на баластному резисторі ( $R_b$ ) – принцип паралельного стабілізатора. В залежності від типу газу чи його суміші виробляли стабілітрони з різними напругами стабілізації ( виникнення тліючого розряду). Таким чином напруга на навантаженні практично не залежить від коливань напруги живлення ( $U_{ж}$ ). Більш докладний аналіз матеріалів показав, що стабілізатори мали виключно цільове призначення і при їх розрахунку враховувались лише фактори перших порядків (напруга запалювання газової суміші, тиск, температура). Було відомо, що іонізація газу в стабілізаторах можлива і від джерел високочастотних коливань. Але через непридатність цього ефекту для практичного використання, такі механізми не враховувались, тим більше, що типові напруги стабілізації розпочиналися з сотні вольт, а такі ВЧ перешкоди були малоімовірні.

При залученні цього механізму для аналізу процесів в ПЛ, вважалося, що  $\gamma$ -випромінювання також є електромагнітними хвилями (пікометрового діапазону) і повинні іонізувати газові суміші в колбі таких відпаяних іонних приладів. Тим більше, що склад газу в колбі ПЛ вже розрахований на роботу з ІВ пікометрового діапазону.

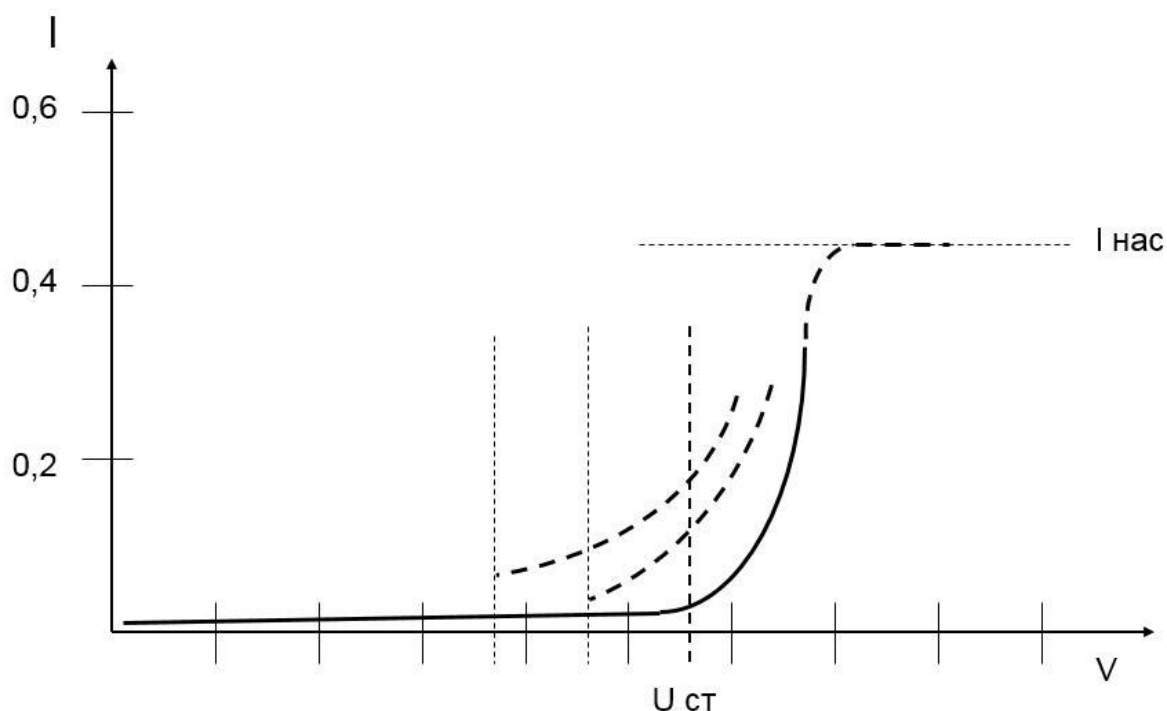


Рисунок 3.22 – Вольт амперні характеристики стабілітрону

На рис. 3.21 показано яким чином можна отримати сигнал про величину зовнішнього іонізуючого фактору. Для цього послідовно з ПЛ можна включити вимірювальний резистор (шунт), а напругу живлення застабілізувати. В такому варіанті зміна струму через ПЛ буде відбуватися виключно під впливом інтенсивності потоку іонізуючого  $\gamma$ -випромінювання через площу ПЛ. Сигналом про це може бути величина напруги іонізації в момент виникнення іонного струму через ПЛ. Аналоговий принцип на даний час вже добре опрацьований.

### 3.3.1.5 Схеми цифрового радіометру на основі ПЛ

Аналіз форми отриманих функціональних залежностей свідчить, що можливі два варіанта використання такого ПЛ як датчика – для системи радіаційних вимірювань з аналоговою обробкою сигналів, а також і для створення цифрового приладу-радіометру  $\gamma$ -компоненти радіаційного поля.

Застосовуючи до розробки модель іонного радіаційно-чутливого опору було розроблено проєкт більш сучасного засобу вимірювань – схему цифрового радіометра (рис. 3.23).

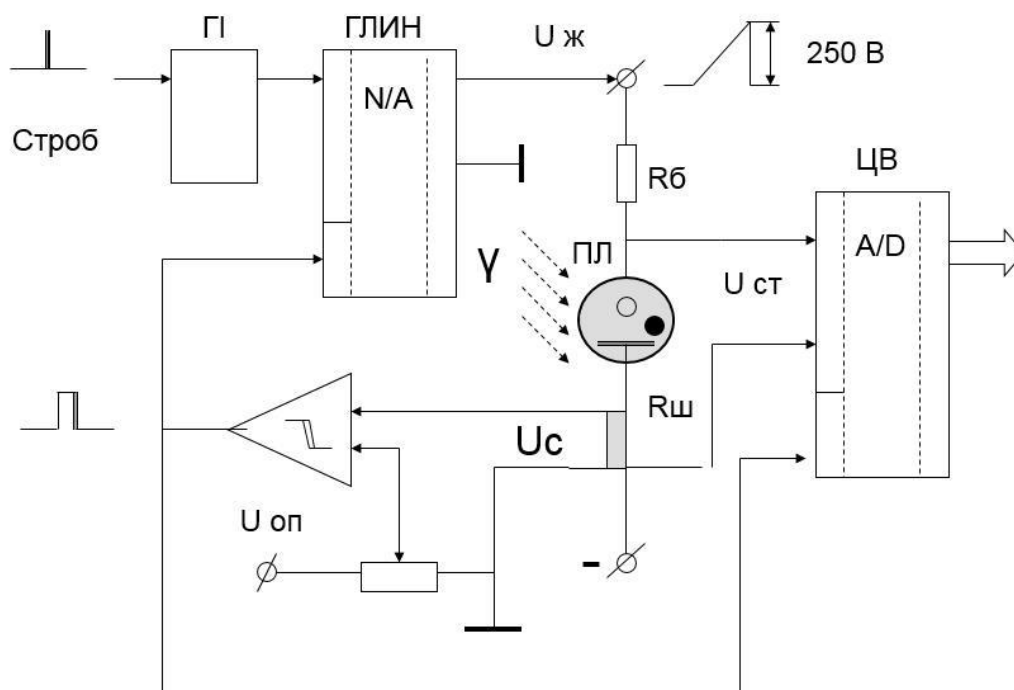


Рисунок 3.23 – Проект цифрового радіометра

В її основі компаратор напруги, який управляє тактовим генератором і АЦП. Тактовий генератор забезпечує дискретну зміну «маркера» на шкалі абсцис вимірювальної системи (фактично – плавно піднімає напругу джерела живлення). Компаратор спрацьовує, коли на вимірювальному резисторі (шунті) виникає сигнал перевищення опорної напруги. В цей момент запускається АЦП і здійснюється вимірювання напруги джерела живлення. Отримана величина відповідає потенціалу іонізації газової суміші в ПЛ, яка (як вже було показано) відповідає інтенсивності потоку радіації.

Для підтвердження можливості використання ПЛ в схемі цифрового радіометру було проведено експеримет, в ході якого ПЛ було встановлено біля ЦФ і екрановано алюмінієвим екраном (рис. 3.17).

Зміни інтенсивності струму пучка прискорених електронів визначалися за показами ЦФ та ІД. Змішане поле формувалося за допомогою алюмінієвого екрану на повне перекриття та вольфрамової конверсійної мішені екрану зі щільністю перекриття 0,5.

Було проведено наступні вимірювання:

1. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 0 нА без конверсійної мішені;
2. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 20 нА без конверсійної мішені;
3. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 5 нА без конверсійної мішені та 3 нА з конверсійною мішенню;
4. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 10 нА без конверсійної мішені та 6 нА з конверсійною мішенню;
5. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 15 нА без конверсійної мішені та 9 нА з конверсійною мішенню;
6. Струм пучка прискорених електронів за показами ЦФ був рівний 20 нА без конверсійної мішені та 12 нА з конверсійною мішенню.

В ході експерименту було знято серію вольт-амперних характеристик ПЛ при різних інтенсивностях радіаційного поля (рис. 3.24).

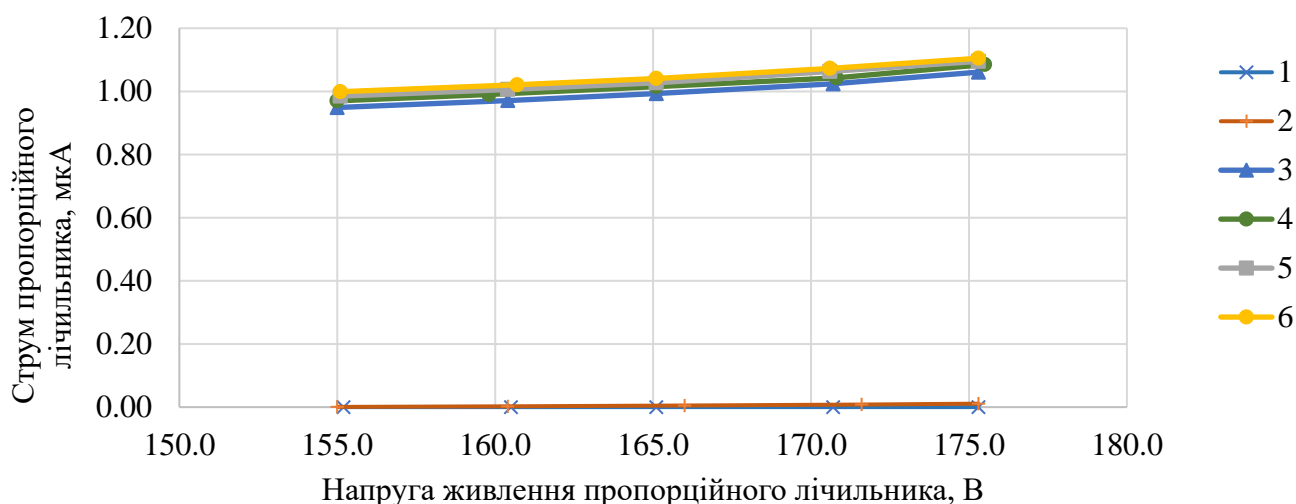


Рисунок 3.24 – Вольт-амперні характеристики ПЛ при різних інтенсивностях радіаційного поля

Серії експериментальних точок, отриманих при різних значеннях струму пучка за ЦФ ( $I_{\text{ЦФ}}$ ), демонструють монотонне зростання струму ПЛ зі збільшенням напруги живлення при фіксованій інтенсивності  $\gamma$ -поля.

Для кожної серії характерна майже паралельна залежність, що свідчить про лінійний відгук ПЛ на зміну потужності дози в досліджуваному діапазоні [68].

На рисунку 3.25 наведено більш деталізовані графіки для експериментів без конверсійної мішені.

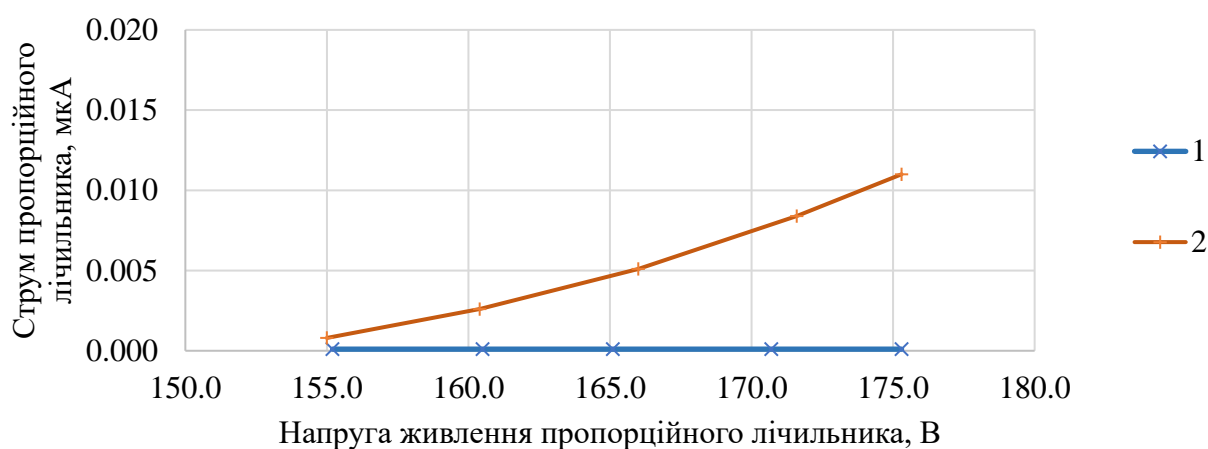


Рисунок 3.25 – Вольт-амперні характеристики ПЛ без конверсійної мішені

Порівняння режимів без конверсійної мішені ( $I_{\text{ЦФ}}$  задане, але  $I_{\text{ПЛ}} \approx 0$ ) та з конверсійною мішенню однозначно показує, що струм ПЛ формується саме  $\gamma$ -випромінюванням, утвореним у результаті гальмівної конверсії електронів на вольфрамовій мішені. Внесок прямих електронів у сигнал ПЛ ефективно усунуто завдяки алюмінієвому екрану товщиною 40 мм. Збільшення струму ПЛ при  $I_{\text{ЦФ}} = 20$  нА зумовлене незначною конверсією пучка прискорених електронів на тонкому випускному вікні прискорювача [68].

На рисунку 3.26 наведено більш деталізовані графіки для експериментів з конверсійною мішенню.

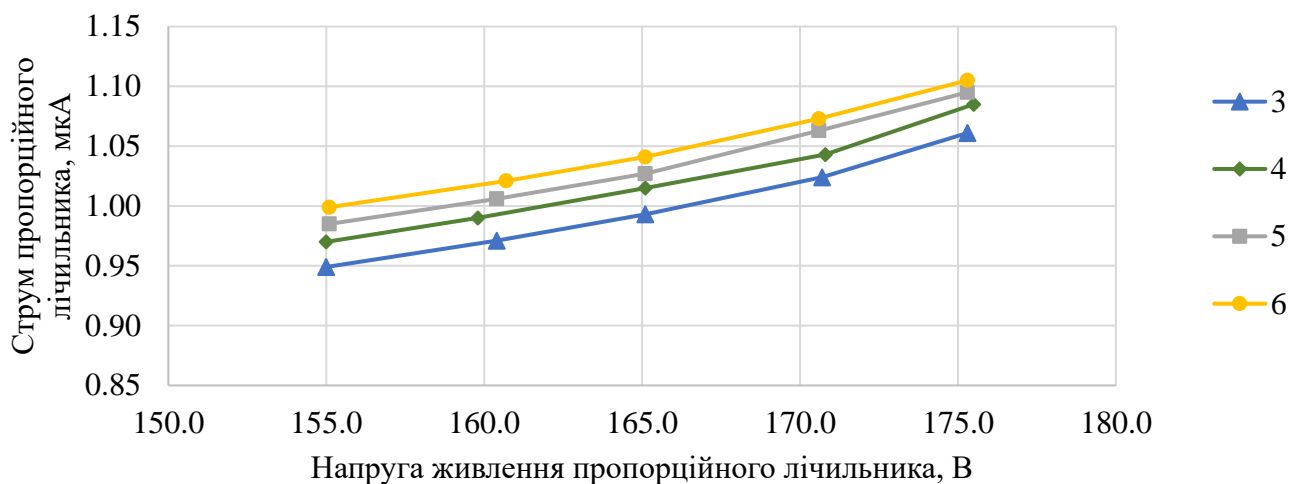


Рисунок 3.26 – Вольт-амперні характеристики ПЛ з конверсійною мішенню

Для однакових напруг живлення спостерігається зростання  $I_{пл}$  зі збільшенням  $I_{цф}$  (з КМ), що підтверджує:

- пропорційність сигналу ПЛ інтенсивності змішаного ( $\gamma$ -домінуючого) поля;
- коректність використання ПЛ як первинного перетворювача в схемі цифрового радіометра.

Аналізуючи отримані результати можна підтвердити, що алюмінієвий екран товщиною  $\delta = 40$  мм забезпечує повне поглинання електронів з енергією до 4 МеВ, що виключає прямий вплив пучка на ПЛ. Це підтверджується майже нульовими показами  $I_{пл}$  при відсутності конверсійної мішені.

Одночасне використання індукційного датчика та ЦФ дозволяє впевнено контролювати інтенсивність пучка та коректно інтерпретувати зміну  $\gamma$ -поля.

Малий розкид експериментальних точок у кожній серії ВАХ свідчить про хорошу стабільність як джерела випромінювання, так і електроніки вимірювального каналу.

Пропорційний лічильник впевнено працює в пропорційному режимі при напругах живлення  $U \approx 160\text{--}190$  В. Струм ПЛ є пропорційним інтенсивності радіаційного поля в досліджуваному діапазоні, що підтверджує можливість його використання у схемі цифрового радіометра [68].

### 3.3.2 Модернізована система контролю параметрів поля іонізуючих випромінювань в реакційній камері

Додатково систему було доповнено датчиком  $\gamma$ -випромінювання (ДГВ) на основі пропорційного лічильника (ПЛ), включеним в інверсну схему, для контролю інтенсивності  $\gamma$ -складової поля випромінювання (рис. 3.27).

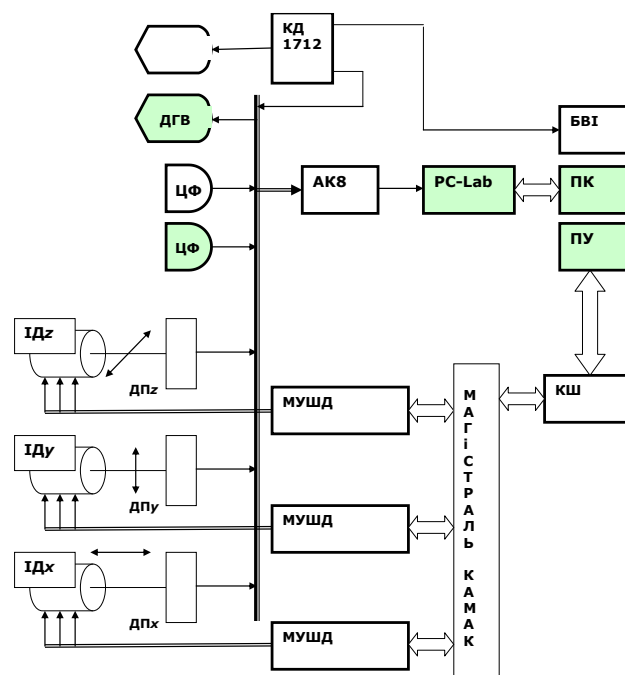


Рисунок 3.27 – Структура модернізованої системи радіаційних вимірювань

Нова система суттєво відрізняється від попередніх [67] активним використанням компютеризованих засобів вимірювань, в її склад включено суттєво розширену з цією метою систему приладів серії PC-Lab 2000 SE. Контроль інтенсивності пучка здійснюється за допомогою двох ЦФ та пропорційного лічильника.

Для реєстрації результатів вимірювань сигнали надходять через схеми підсилення вхідного сигналу на основі операційних підсилювачів до величини, яка значно перевищуватиме рівень шуму установки, яка конструктивно характеризується високим рівнем електричних та електромагнітних перешкод.

носій запису. Завдяки модернізації з'явилася можливість отримувати інформацію в найбільш зручному для аналізу вигляді.

Затвердження модернізованої схеми проведено в рамках експерименту, спрямованого на визначення характеристик простору радіаційного обладнання та підтвердження можливості його використання для кваліфікаційних випробувань елементів АЕС (наприклад, електроприводів з великими клапанами, об'ємом до 1 м<sup>3</sup>).

### 3.4 Вимірювання характеристик змішаних полів в реакційній камері лінійного прискорювача електронів

#### 3.4.1 Характеристики поля прискорених електронів

В експерименті з визначення метрологічних характеристик радіаційної установки для проведення випробувань електрообладнання атомних електростанцій в реальних відтворених умовах їх експлуатації визначали розподіл струму пучка на відстані 2000 мм від вихідного вікна. При проведенні експерименту біля випускного вікна прискорювача було встановлено алюмінієвий розсіювач. Під час експерименту було визначено максимальне значення струму пучка прискорених електронів в імпульсі за показами ІД у вихідному вікні, що дорівнювало 0,5 А [69].

Приблизний спектр пучка прискорених електронів, визначений за показами датчику електронного приладу вимірювання спектру пучка, показаний на рисунку 3.28.

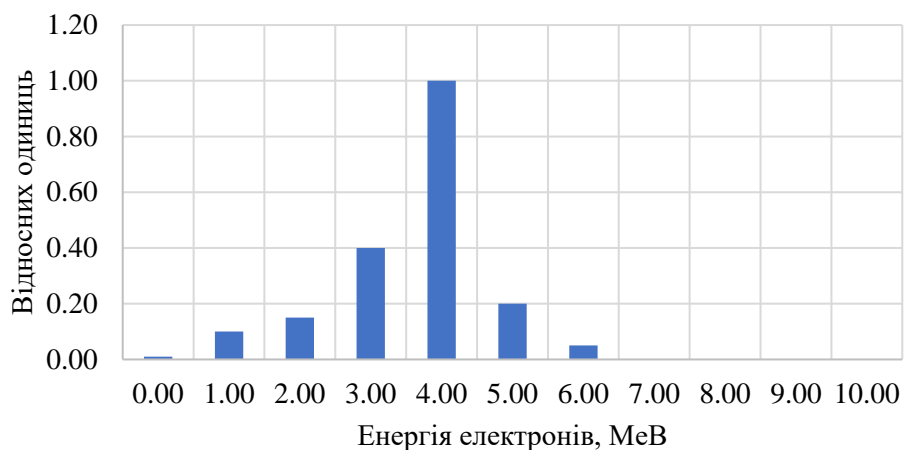


Рисунок 3.28 – Приблизний спектр пучка прискорених електронів

Сканування проводилося за допомогою скануючого пристрою. Результати вимірювання розподілу поля випромінювання в різних формах наведені на рис. 3.29 - 3.32.

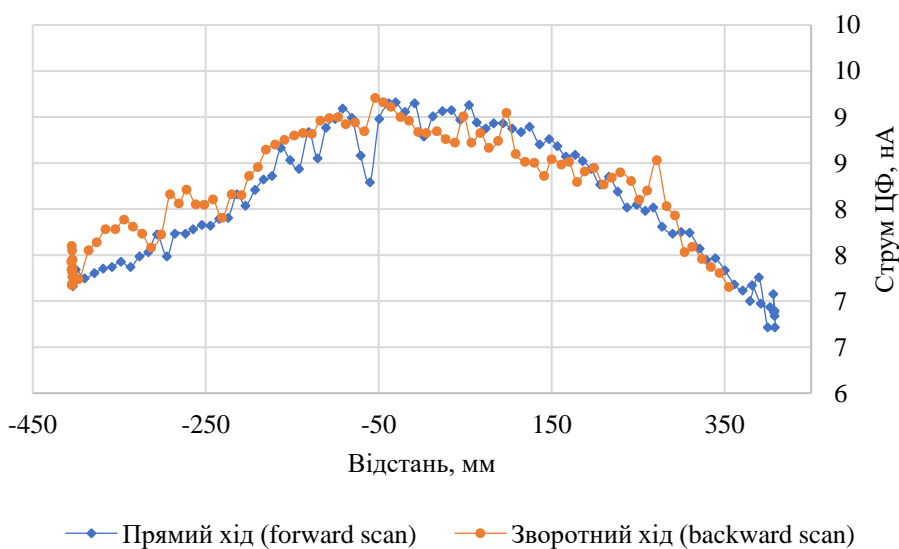


Рисунок 3.29 – Горизонтальна розгортка струму пучка прискорених електронів на висоті 400 мм від осі

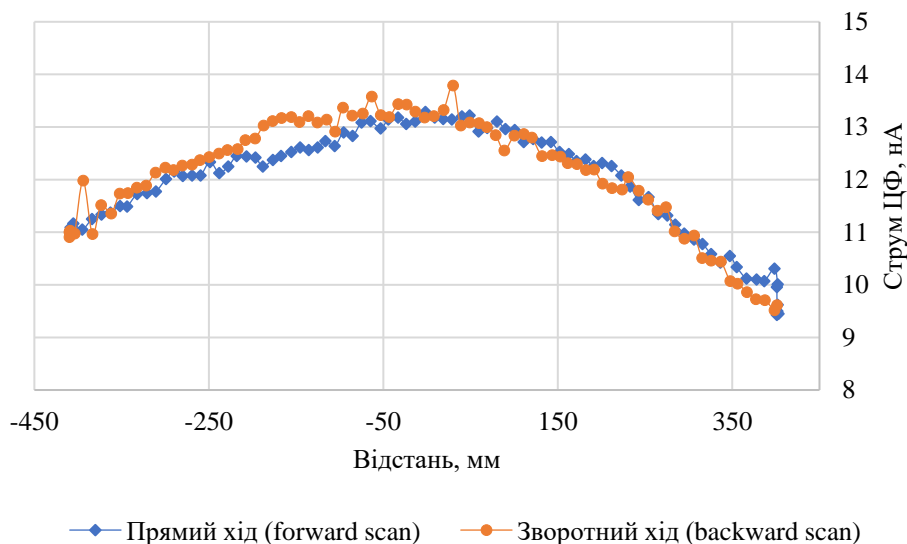


Рисунок 3.30 – Горизонтальна розгортка струму пучка прискорених електронів по осі

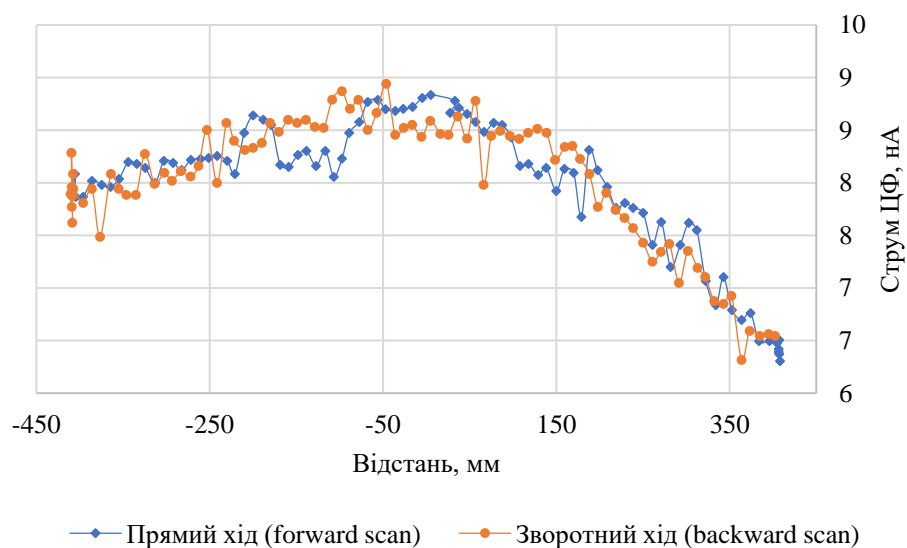
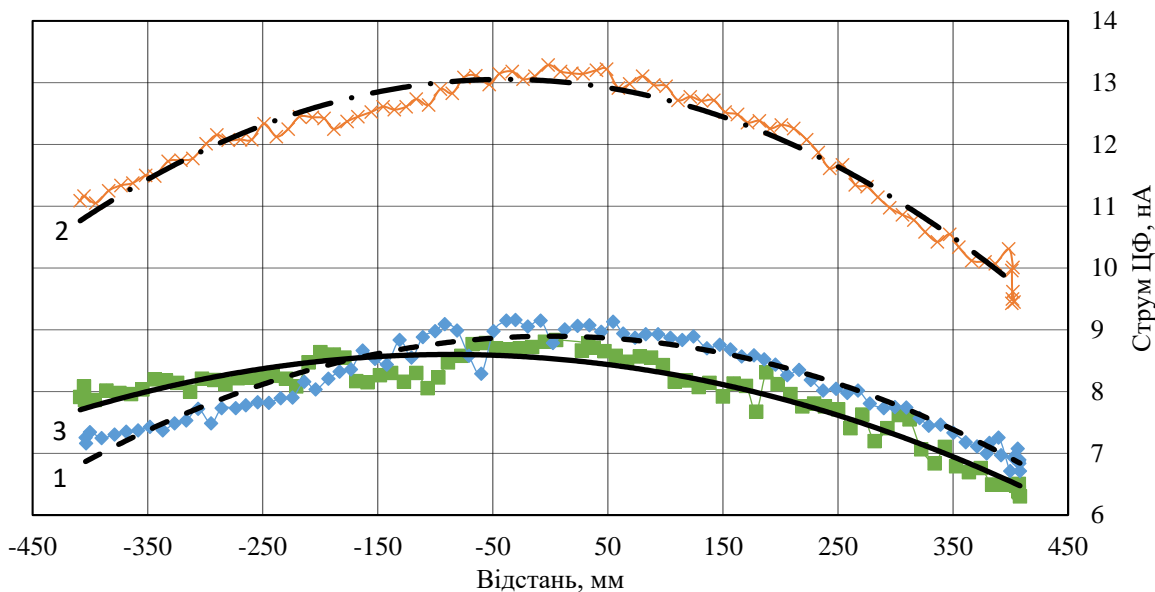


Рисунок 3.31 – Горизонтальна розгортка струму пучка прискорених електронів на висоті -400 мм від осі

Метою експериментальних досліджень було визначення просторового розподілу інтенсивності електронного пучка в реакційній камері лінійного прискорювача електронів та кількісна оцінка похибок відповідних вимірювань.



1 – горизонтальна розгортка струму пучка при максимальному верхньому положенні ЦФ; 2 – положення ЦФ по осі пучка; 3 – максимальне нижнє положення.

Рисунок 3.32 – Горизонтальна розгортка струму пучка

Вимірювання виконувались за допомогою ЦФ з вхідним отвором діаметром 1 см, який переміщувався уздовж поперечного перерізу реакційної камери. Реєстрація струму електронного пучка здійснювалась у двох напрямках переміщення:

- прямий хід (forward scan);
- зворотний хід (backward scan).

Такий підхід дозволив експериментально врахувати вплив гістерезису механічної системи позиціювання, нестабільності пучка та флуктуацій електронного струму, що є загальноприйнятою практикою в пучковій діагностиці [42, 70].

Вимірювання проводились у трьох характерних площинах реакційної камери:

- центральна площина;
- крайня верхня область;
- крайня нижня область.

В кожній просторовій точці середнє значення струму пучка визначалось як арифметичне середнє між показами при прямому та зворотному ході:

$$\bar{I}(x) = \frac{I_{\text{прям}}(x) + I_{\text{звор}}(x)}{2}$$

Такий підхід дозволяє мінімізувати систематичні складові похибки, пов'язані з:

- люфтом та нелінійністю переміщення;
- короткочасною нестабільністю режиму прискорювача;
- електричними шумами вимірювального тракту [71].

Статистична складова похибки визначалася за напіврізницею між показами при прямому та зворотному ході:

$$\Delta I_{\text{ст}}(x) = \frac{|I_{\text{прям}}(x) - I_{\text{звор}}(x)|}{2}$$

Відносна статистична похибка:

$$\delta I_{\text{ст}}(x) = \frac{\Delta I_{\text{ст}}(x)}{\bar{I}(x)} 100\%$$

Аналіз даних для центральної площини показав:

- середній струм пучка  $I_{\text{ц}} \approx 11,9$  нА;
- середня абсолютна статистична похибка  $\langle \Delta I_{\text{ст}} \rangle_{\text{ц}} \approx (0,1 - 0,15)$  нА;
- середня відносна похибка  $\langle \delta I_{\text{ст}} \rangle_{\text{ц}} \approx (0,8 - 1,3)\%$ .

Максимальні значення похибок спостерігаються в периферійних зонах пучка, що пов'язано зі зменшенням щільності струму та зростанням впливу флуктуацій [72].

Для крайнього верхнього поля реакційної камери отримано:

- середній струм пучка  $I_B \approx 8,4$  нА;
- середня абсолютна статистична похибка  $\langle \Delta I_{ст} \rangle_B \approx (0,12 - 0,20)$  нА;
- середня відносна похибка  $\langle \delta I_{ст} \rangle_B \approx (1,4 - 2,5)\%$ .

Збільшення відносної похибки пояснюється менш однорідною структурою пучка у крайових областях, а також впливом розсіювання електронів на конструктивних елементах камери [73].

Для крайнього нижнього поля реакційної камери встановлено:

- середній струм пучка  $I_H \approx 8,1$  нА;
- середня абсолютна статистична похибка  $\langle \Delta I_{ст} \rangle_H \approx (0,15 - 0,25)$  нА;
- середня відносна похибка  $\langle \delta I_{ст} \rangle_H \approx (1,8 - 3,0)\%$ .

Порівняно з верхньою областю, нижня частина камери характеризується дещо вищим рівнем нестабільності, що може бути пов'язано з гравітаційними деформаціями елементів юстування та асиметрією електромагнітної системи [74].

До систематичних похибок віднесено:

- калібрувальну похибку вимірювального підсилювача струму;
- похибку визначення площі вхідного отвору ЦФ;
- втрати електронів у вхідному каналі.

Сумарна систематична похибка оцінюється за кореневою сумою квадратів:

$$\Delta I_{сист} = \sqrt{\sum_i (\Delta I_i)^2}$$

Для використаного вимірювального комплексу не перевищує 2.5 %, що узгоджується з даними літератури [посилання 42, 75].

Повна похибка визначалась як:

$$\Delta I_{повн} = \sqrt{(\Delta I_{ст})^2 + (\Delta I_{сист})^2}$$

Для всіх трьох експериментів значення повної відносної похибки не перевищує  $\approx 3\%$  у центральній площині та  $\approx 4\%$  у крайових областях камери.

Запропонована методика двонапрямого сканування забезпечує надійну оцінку статистичної похибки вимірювань інтенсивності електронного пучка.

Найменші похибки спостерігаються в центральній площині реакційної камери, що підтверджує стабільність формування пучка. Зростання похибок у крайових областях обумовлене фізичними особливостями просторового розподілу пучка та конструктивними факторами камери.

Отримані значення повної похибки не перевищують допустимих меж для експериментів з дослідження радіаційних процесів у реакційній камері лінійного прискорювача електронів. Результати можуть бути використані для подальших розрахунків потужності дози опромінення та валідації чисельних моделей.

Після сканування поля реакційної камери в крайньому верхньому, центральному та крайньому нижньому положеннях здійснювалось сканування по всій площині реакційної камери (рис. 3.33 та 3.34).

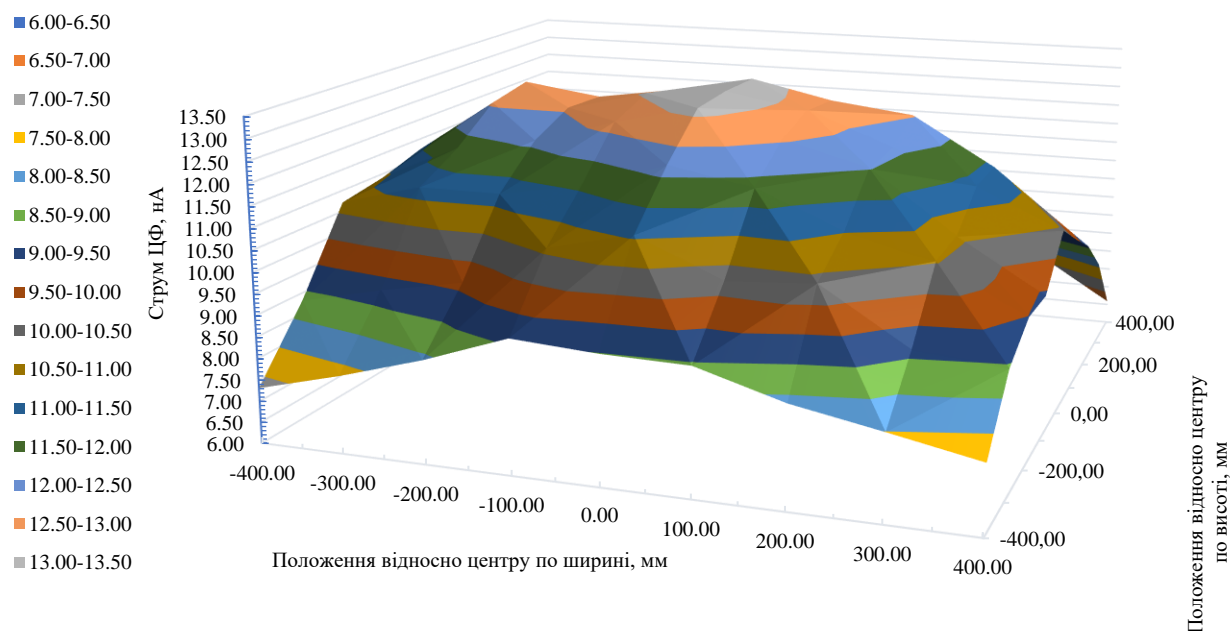


Рисунок 3.33 – Об’ємний розподіл радіаційного поля в реакційній камері установки за показами ЦФ

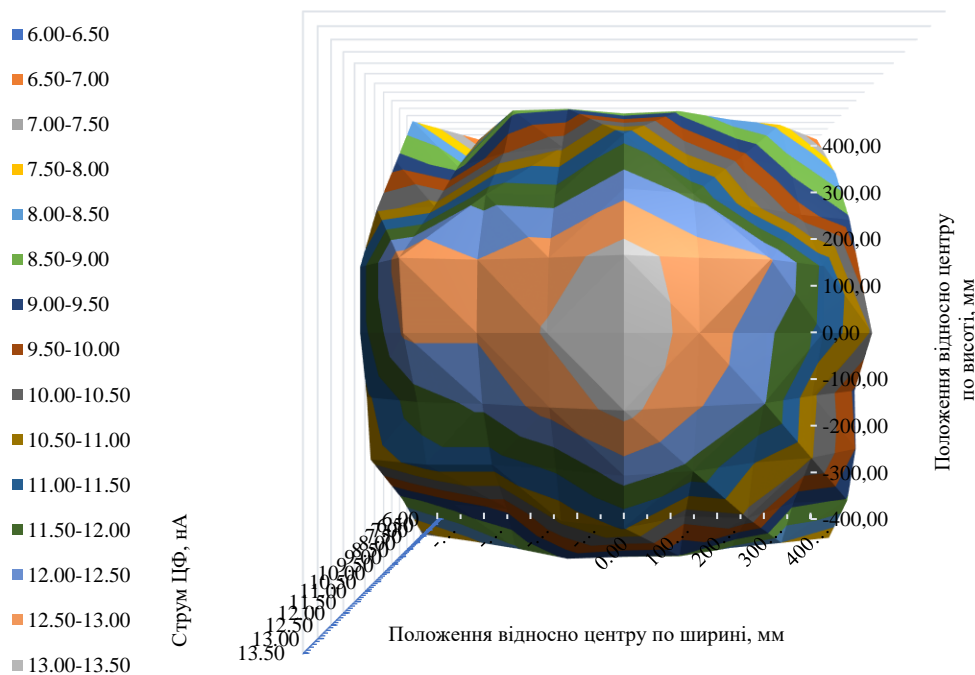


Рисунок 3.34 – Розподіл радіаційного поля в реакційній камері установки за показами ЦФ (вид від випускного вікна прискорювача)

З отриманих результатів [69] можна зробити висновок про максимальну нерівномірність струму пучка прискорених електронів, що падає по нормалі. Враховуючи те, що електронний промінь осесиметричний, максимальна нерівномірність при радіусі 800 мм не перевищує 25%, при радіусі 500 мм ця нерівномірність становить 12%.

Для більш коректного розуміння характеристик поля іонізуючого випромінювання необхідно визначити потужності дози.

При опроміненні графітового поглинача пучком електронів з енергією 4 МеВ передача енергії середовищу відбувається переважно через механізм іонізаційних втрат. ЦФ забезпечує повне поглинання заряду пучка, що дозволяє встановити прямий зв'язок між електричним струмом та щільністю потоку частинок. Вибір графіту як наповнювача мінімізує похибки від зворотного розсіювання електронів завдяки низькому атомному номеру матеріалу ( $Z=6$ ) [42].

Першим етапом є визначення щільності потоку частинок ( $\Phi$ ) шляхом перетворення виміряного струму  $I_{цф}$  у кількість електронів, що падають на одиницю площі за одиницю часу:

$$\Phi = \frac{I_{цф}}{e \cdot S},$$

де  $I_{цф}$  – струм пучка (А або Кл/с);

$e$  – елементарний заряд ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл);

$S$  - площа вхідного отвору ( $1 \text{ см}^2$ ).

Наступним етапом є визначення енергії, що передається матеріалу. Потужність поглиненої дози ( $P_D$ ) визначається як добуток потоку частинок на масову гальмівну здатність матеріалу [72]:

$$P_D = \Phi \cdot \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_{col},$$

де  $\left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_{col}$  - масова іонізаційна гальмівна здатність для графіту при енергії

4 МеВ, що становить  $1,788 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$  згідно з базою даних ESTAR [76].

Останнім етапом є перетворення одиниць у систему СІ (Грей) для отримання результату в Гр/с необхідно перевести:

- енергію з МеВ у Джоулі ( $1 \text{ MeV} = 1,602 \cdot 10^{-13} \text{ Дж}$ );
- масу з грамів у кілограми.

Так, наприклад, при струмі  $I_{цф} = 13 \text{ нА}$  отримаємо розрахункову потужність дози:

$$\begin{aligned} P_D &= \frac{I_{цф}}{e \cdot S} \cdot \left( \frac{1}{\rho} \cdot \frac{dE}{dx} \right)_{col} \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \cdot 10^3 = \\ &= 8,118 \cdot 10^{10} \cdot 1,788 \cdot 1,602 \cdot 10^{-13} \cdot 10^3 = 23,2 \text{ Гр/с} = 83,7 \text{ кГр/год} \end{aligned}$$

Результати розрахунків для такого значення струму співпадають з розрахованою потужністю дози за емпіричною формулою [77]:

$$P = 0.2 \cdot I_b = 0.2 \cdot 13 = 2.6[\text{кРад/с}] = 93.6[\text{кГр/год}]$$

Відносна похибка розрахунків знаходиться в межах 6%.

На рисунках 3.35 та 3.36 наведено розрахований розподіл потужностей дози в реакційній камері.

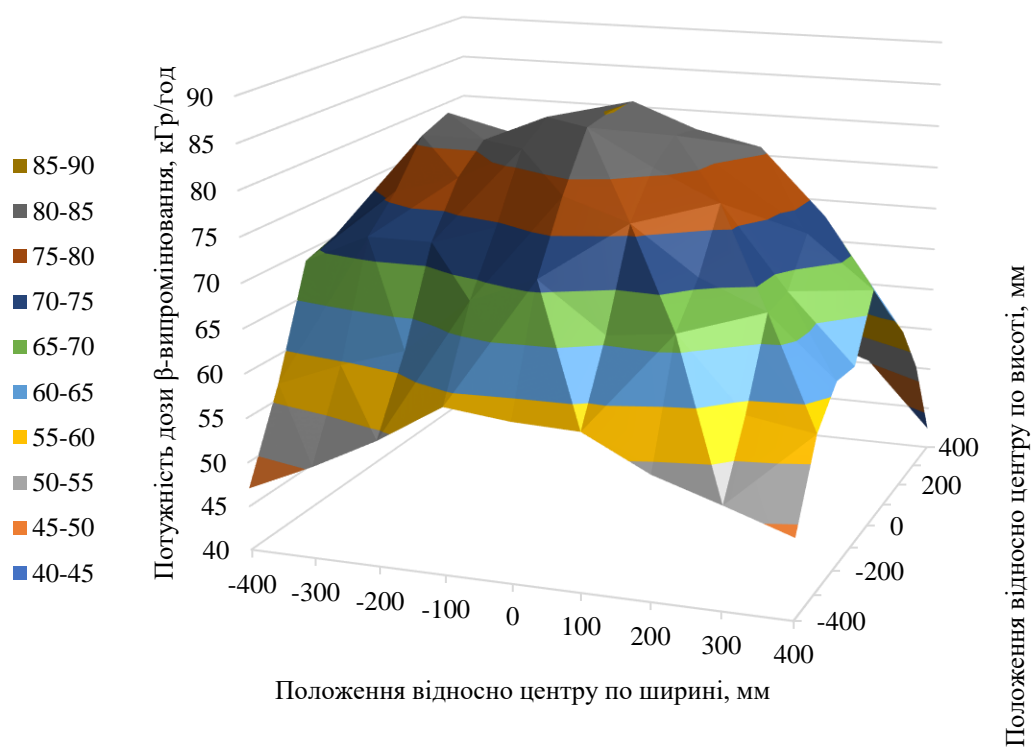


Рисунок 3.35 – Розрахований об’ємний розподіл потужностей дози β-випромінювання в реакційній камері

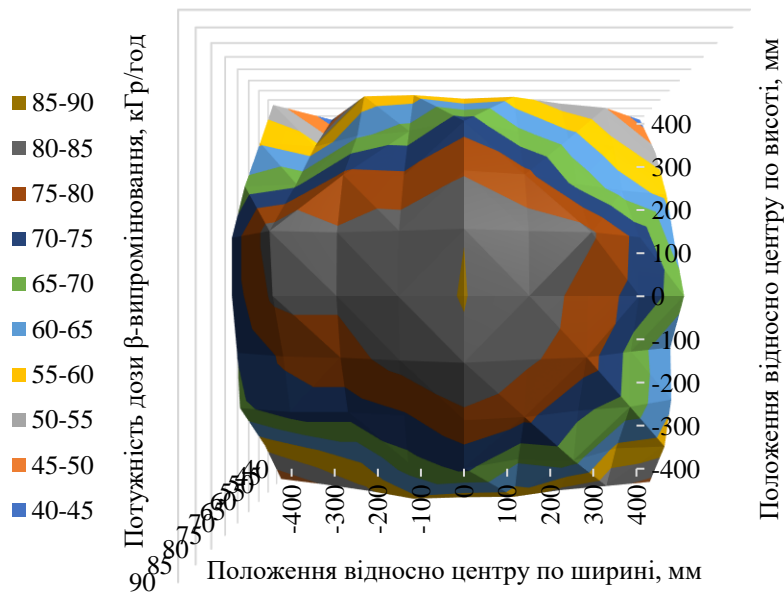


Рисунок 3.36 – Розрахований розподіл потужностей дози  $\beta$ -випромінювання в реакційній камері

Така потужність дози повністю гарантує дотримання нормативних рекомендацій щодо проведення функціональних радіаційних випробувань та кваліфікації виробу для використання на атомних електростанціях [68, 69]. Максимальна відносна похибка виміру при довірчому інтервалі 0,99 становить 18,90%.

Окрему увагу при проведенні експериментальних досліджень було приділено аналізу просторового розподілу потужності поглиненої дози (ППД) фотонного випромінювання, що генерується при гальмуванні електронного пучка в випускному вікні прискорювача, елементах конструкції реакційної камери та безпосередньо в об'ємі реакційної камери.

В ході експерименту було визначено розподіл потужності дози за рахунок  $\gamma$ -компоненти. На основі отриманих даних побудовано графічні залежності розподілу потужності дози  $\gamma$ -випромінювання по ширині та висоті реакційної камери (рис. 3.37 та 3.38).

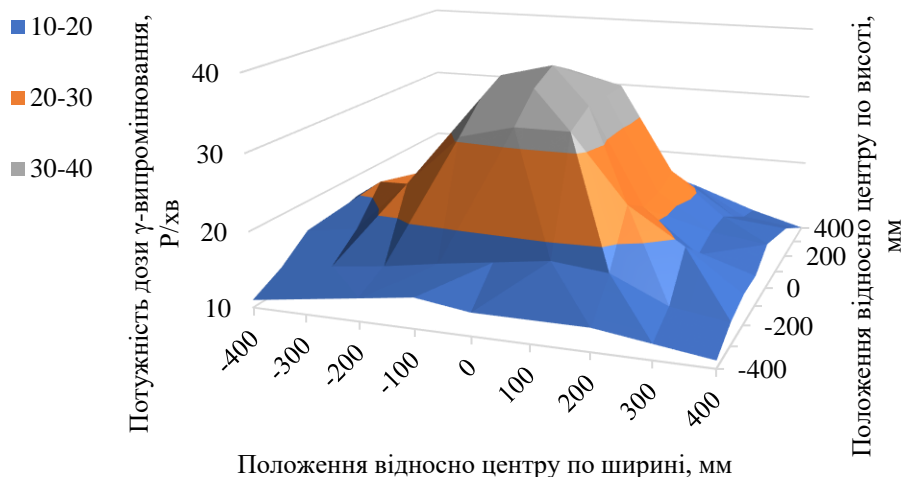


Рисунок 3.37 - Об'ємний розподіл фонові потужності дози  $\gamma$ -випромінювання за показами ПЛ

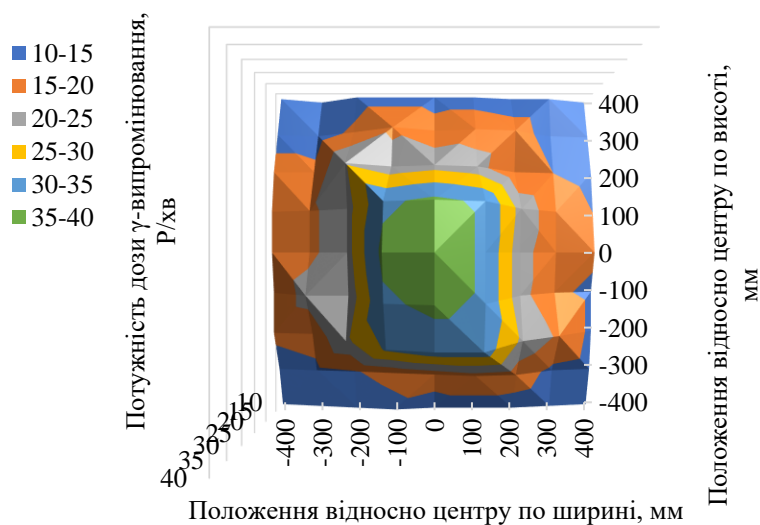


Рисунок 3.38 – Розподіл фонові потужності дози  $\gamma$ -випромінювання за показами ПЛ

Експериментально встановлено, що розподіл  $\gamma$ -квантів характеризується вищою проникною здатністю порівняно з первинним пучком прискорених електронів, проте має виражену кутову анізотропію, зумовлену діаграмою спрямованості гальмівного випромінювання при енергіях 4–5 МеВ. Згідно з [68], основна частина енергії фотонів концентрується в напрямку поширення первинних

електронів, що підтверджується піковими значеннями ППД на центральній осі камери.

Спостерігається плавне зниження інтенсивності випромінювання при віддаленні від геометричного центру камери, що корелює з законом обернених квадратів відстані з урахуванням ефектів багатократного розсіювання від стінок установки. Дана закономірність є критично важливою для забезпечення рівномірності опромінення великогабаритного обладнання АЕС під час кваліфікаційних випробувань [4, 31].

Використання пропорційного лічильника в струмовому режимі дозволило усунути ефект "забивання" (мертвого часу), характерний для лічильного режиму в полях високої інтенсивності. Отримані вольт-амперні характеристики детектора в різних точках камери демонструють лінійну залежність струму від густини потоку  $\gamma$ -квантів, що забезпечує похибку вимірювань у межах 10-12% при потужностях дози понад 10 Гр/год.

Комплексний аналіз розподілу ППД електронної та  $\gamma$ -складових дозволяє оптимізувати розміщення об'єктів у реакційній камері для досягнення заданого рівня радіаційного навантаження, що відповідає регламентам [22, 23, 26, 27] та вітчизняним нормам [8, 12, 13] проведення випробувань радіаційної стійкості обладнання.

Таким чином, на даному етапі можна дійти висновку, що радіаційна установка ІЯД НУН України з лінійним прискорювачем електронів «Електроніка У-005» може бути використана для функціональних радіаційних випробувань елементів атомних електростанцій, габаритні розміри з них не перевищують 800 мм. Прикладом такого пристрою може бути електропривод типу М 76341, який застосовується в клапанах систем аварійного газовідведення першого контуру, захисту першого контуру від надлишкового тиску та розташування клапанних систем. У таких умовах нерівномірність опромінення становитиме менше 25%.

### 3.4.2 Характеристики змішаного $\beta$ - та $\gamma$ -поля

Для забезпечення умов випробувань, що максимально наближені до реально оцінених умов радіаційного впливу при аваріях з втратою теплоносія на АЕС, у роботі було реалізовано режим формування змішаного  $\beta$ - та  $\gamma$ -випромінювання. Експериментальна конфігурація передбачала встановлення в реакційній камері, за розсіюючим алюмінієвим екраном, конверсійної мішені, виготовленої з вольфрамового дроту діаметром 1 мм з геометричним коефіцієнтом перекриття  $k=0,5$ .

На основі проведених експериментальних вимірювань за допомогою ЦФ та ПЛ (у струмовому режимі) було отримано просторові розподіли потужності поглиненої дози (ППД) обох компонентів (рис. 3.39 – 3.42).

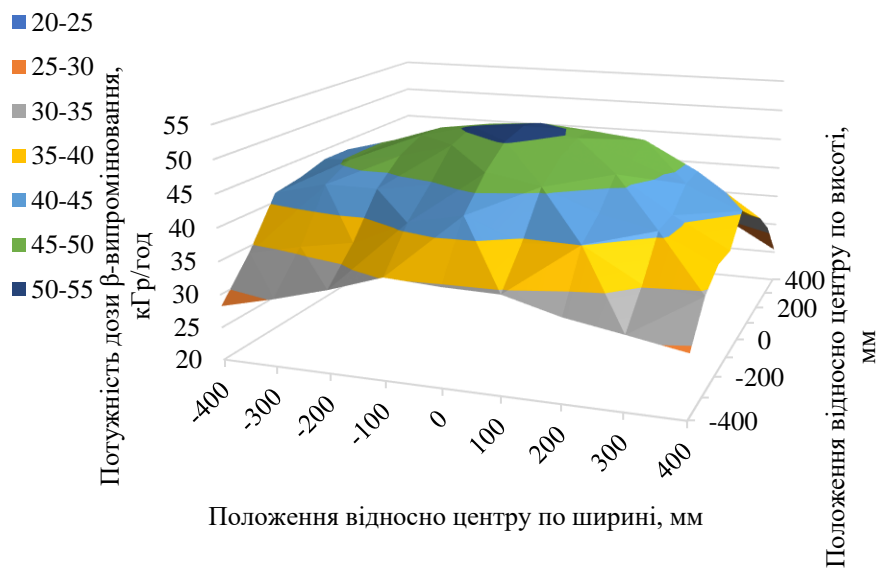


Рисунок 3.39 – Розрахований об’ємний розподіл потужностей дози  $\beta$ -випромінювання за показами ЦФ в реакційній камері з конверсійною мішенню

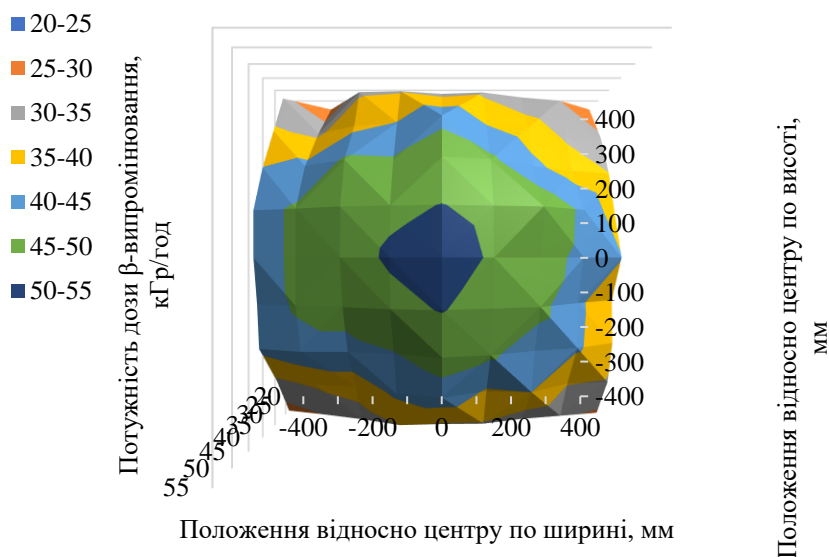


Рисунок 3.40 – Розрахований розподіл потужностей дози  $\beta$ -випромінювання за показами ЦФ в реакційній камері з конверсійною мішенню

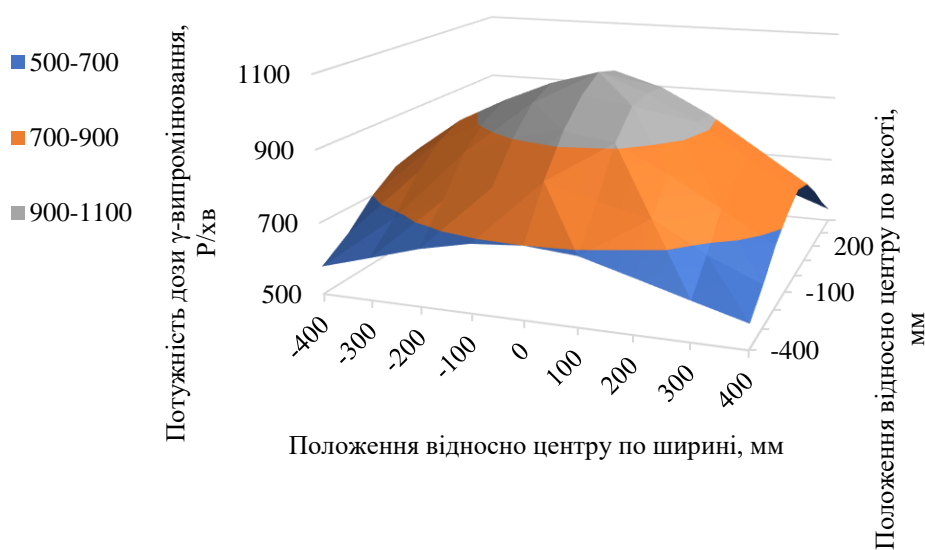


Рисунок 3.41 – Об'ємний розподіл фонової потужності дози  $\gamma$ -випромінювання за показами ПЛ з конверсійною мішенню

За результатами аналізу представлених графічних залежностей встановлено, що використання вольфрамової конверсійної мішені з перекриттям 0,5 дозволяє сформувати змішане поле, де  $\beta$ -компонента (первинні прискорені електрони) забезпечує високу поверхневу потужність дози, тоді як  $\gamma$ -компонента (гальмівне випромінювання) створює необхідний рівень об'ємного опромінення. Згідно з

результатами вимірювань, внесок  $\gamma$ -випромінювання у сумарну потужність дози безпосередньо за мішенню зростає в  $n$  разів порівняно з режимом без мішені, що пояснюється високим атомним номером вольфраму ( $Z=74$ ) та інтенсивною генерацією фотонів [4, 66, 68].

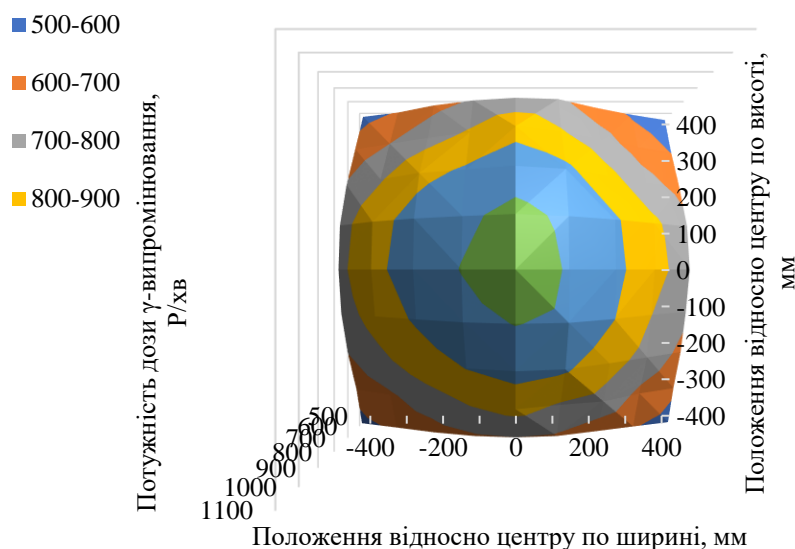


Рисунок 3.42 – Об’ємний розподіл фонові потужності дози  $\gamma$ -випромінювання за показами ПЛ з конверсійною мішенню

Графіки розподілу  $\beta$ -компоненти свідчать про те, що електронна складова зазнає значного розсіювання на краях вольфрамової проволочки. Це призводить до певної гомогенізації поля на відстанях  $L > 15$  см від мішені, попри дискретну структуру самої конверсійної мішені. Енергетичний спектр електронів при цьому зміщується в область нижчих енергій через втрати в матеріалі мішені.

На відміну від  $\beta$ -випромінювання,  $\gamma$ -складова демонструє високу стабільність ППД по глибині реакційної камери. Це підтверджує можливість використання даної конфігурації стенда для моделювання глибокого радіаційного пошкодження внутрішніх вузлів електротехнічного обладнання.

Вибір коефіцієнта перекриття 0,5 виявився оптимальним для балансування дозових навантажень. Як показано на графіках, такий підхід дозволяє уникнути повного екранування електронного пучка, зберігаючи при цьому достатню

щільність потоку гальмівних  $\gamma$ -квантів для виконання вимог стандартів щодо кваліфікації обладнання АЕС за сумарною інтегральною дозою [31, 68, 69].

### 3.4.3 Порівняння отриманих результатів

Зіставлення експериментальних даних, отриманих у пунктах 3.4.1 та 3.4.2, дозволяє провести комплексний аналіз трансформації структури радіаційного поля при переході від безпосереднього опромінення пучком прискорених електронів до використання комбінованої системи «розсіювач–конвертор».

Основними відмінними характеристиками досліджених режимів є:

#### 1. Компонентний склад та енергетичний розподіл:

– У режимі чистого  $\beta$ -поля (п. 3.4.1) основне дозове навантаження формується первинними електронами з енергією 4–5 МеВ. Поле характеризується високою лінійною передачею енергії у поверхневих шарах об'єкта, проте швидким спадом ППД при заглибленні в матеріал (ефективний пробіг в алюмінії до 8–10 мм).

– У режимі змішаного поля (п. 3.4.2), завдяки вольфрамовій мішені ( $k=0,5$ ), спектр випромінювання стає складнішим: до електронної складової додається потужний фотонний компонент гальмівного випромінювання. Це дозволяє моделювати умови «радіаційного старіння» по всьому об'єму складних багатокомпонентних виробів.

#### 2. Просторова ізотропність:

– Для електронного пучка характерна висока чутливість до розсіювання на повітряному проміжку, що призводить до розмиття меж пучка, але зберігає виражену осьову концентрацію енергії.

– Змішане поле демонструє кращу рівномірність об'ємного розподілу дози. Встановлено, що впровадження дротяної конверсійної мішені відіграє роль додаткового дефлектора, який за рахунок кутового розподілу гальмівних фотонів нівелює «провали» інтенсивності на периферії реакційної камери, збільшуючи корисний об'єм зони опромінення на 15–20%.

3. Ефективність конверсії та дозові рівні: Експериментально підтверджено, що використання вольфрамового дроту товщиною 1 мм забезпечує оптимальний баланс: при збереженні достатньої інтенсивності  $\beta$ -складової, рівень  $\gamma$ -фону зростає на порядки порівняно з природним гальмівним фоном від вихідного вікна прискорювача, алюмінієвого розсіювача та стінок реакційної камери. Це дозволяє досягати інтегральних доз у сотні кГр за економічно обґрунтований час експозиції.

Режим чистого електронного поля є доцільним для дослідження поверхневих ефектів та радіаційної стійкості тонкоплівкових матеріалів і покриттів. Водночас, сформоване змішане  $\beta$ -  $\gamma$ -поле з використанням розробленої вольфрамової конверсійної мішені є найбільш адекватною моделлю для проведення повномасштабних кваліфікаційних випробувань електротехнічного обладнання АЕС, оскільки воно поєднує поверхневу деструкцію полімерів з об'ємною деградацією напівпровідникової бази та ізоляції.

### 3.5 Висновки до розділу

У третьому розділі проведено комплексне дослідження та вдосконалення технічних засобів експериментального стенда для моделювання радіаційних впливів на обладнання АЕС.

В ході проведених досліджень було встановлено, що радіаційно-технологічний комплекс на базі лінійного прискорювача електронів «Електроніка У-005» (ІЯД НАН України) за своїми технічними характеристиками повністю відповідає вимогам до проведення кваліфікаційних випробувань кабельної продукції АЕС. Енергія електронів у діапазоні 4–5 МеВ забезпечує наскрізне опромінення ізоляції кабелів низької та середньої напруги без активації струмопровідних жил (енергія нижча за поріг фотоядерних реакцій для міді та алюмінію). Установка забезпечує регулювання енергії електронів у діапазоні 2,5–5 МеВ та потужність дози до 100 кГр/год, що дозволяє адекватно моделювати радіаційні умови експлуатації ядерних енергоустановок.

Розроблено та реалізовано методику формування інтенсивних радіаційних полів у великому об'ємі. На першому етапі забезпечується трансформація вузького пучка ( $1-2 \text{ см}^2$ ) у широке рівномірне поле перерізом до  $100 \times 100 \text{ см}$ . На другому етапі, шляхом використання оригінальної напівпрозорої вольфрамкової конверсійної мішені з коефіцієнтом перекриття  $0,5$ , реалізовано можливість створення змішаних  $\beta$ - $\gamma$  полів з контрольованим компонентним складом.

Запропоновано та технічно реалізовано метод «оберненого включення» промислових пропорційних лічильників (типу СИ-5007) у струмовому (інтегральному) режимі, що дозволило уникнути обмежень стандартних дозиметричних засобів в умовах імпульсного випромінювання високої щільності.

Експериментально підтверджено лінійну залежність потужності поглинутої дози від струму пучка прискорювача, що дозволяє керувати режимами випробувань з високою точністю. Розрахункові значення потужності дози, отримані за емпіричною формулою, співпадають з результатами прямих вимірювань графітовим калориметром та плівковими дозиметрами в межах відносної похибки  $6-10\%$ , що є достатнім для технологічної дозиметрії.

Результати вимірювань поля іонізуючих випромінювань в реакційній камері показали, що запропонована схема опромінення забезпечує коефіцієнт нерівномірності розподілу дози по довжині зразка не більше  $\pm 10\%$ . Для мінімізації похибки дозиметрії (до рівня  $\pm 15\%$  при довірчій ймовірності  $0,95$ ) впроваджено протокол перехресного калібрування з використанням плівкових детекторів.

Комплексні пуско-налагоджувальні випробування підтвердили стабільність роботи радіаційної установки в часі та відповідність умов експерименту вимогам національних та міжнародних стандартів [25, 26]. Це дозволяє реалізувати методику імітації "м'яких" та "жорстких" (ЛОСА) аварійних режимів. Забезпечено можливість набору інтегральної дози до  $10^6 \text{ Гр}$  (еквівалент  $30-60$  років експлуатації та аварії) за  $10-20$  годин безперервної роботи, що підтверджує ефективність експрес-методики.

## 4 МОДЕЛЮВАННЯ ПУЧКА ПРИСКОРЕНИХ ЕЛЕКТРОНІВ

«Електроніка У-005» є резонансним прискорювачем, тому пучок являє собою послідовність імпульсів прискорених електронів (банчів), які йдуть один за одним з частотою повторення циклів прискорення. Послідовне групування кластерів забезпечується синхронізацією системи інжекції електронів і генерації хвиль у магнетронному генераторі. Зміна швидкості поширення прискорювальної мікрохвильової хвилі в мембранному хвилеводі вздовж початкової області хвилеводу дозволяє оптимізувати режим прискорення та значно зменшити втрати інжекттованих електронів у прискорювальний блок. У лінійних прискорювачах біжучої хвилі кількість електронів, захоплених перед прискоренням, може досягати 90-96% від кількості електронів, вилучених з інжектора. Слід зазначити, що величина потоку прискорених електронів характеризується середніми та імпульсними значеннями.

### 4.1 Моделювання пучка прискорених електронів

Для попереднього визначення характеристик пучка прискорених електронів, який формується на виході з лінійного прискорювача було зроблено чисельне моделювання просторово-енергетичних характеристик електронного та  $\gamma$ -випромінювання. Моделювання виконано з використанням програмного комплексу TOPAS (Tool for Particle Simulation) версії 3.9 [78, 79], який є параметризованою надбудовою над бібліотекою Geant4. Фізичні процеси переносу та взаємодії частинок з речовиною описувались стандартними електромагнітними моделями GEANT4 [80, 81], валідованими для енергій до декількох десятків MeV.

Для моделювання пучка прискорених електронів, що виходить з випускного вікна прискорювача використовуються файли констант, матеріалів та фізичних процесів GEANT4 [80, 81].

Для створення моделі також визначаються складні речовини та елементи, з якими можуть взаємодіяти електрони, позитрони,  $\gamma$ -кванти та мюони на можливих напрямках їх руху (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 – Характеристики речовин та елементів для підготовки файлу констант

| № | Речовина/елемент | Густина, г/см <sup>3</sup> | Зарядове число, Z | Атомна маса, A, (а.о.м.) | Вагова доля елементів речовини, w |
|---|------------------|----------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Повітря          | 1,29E-3                    | 7                 | 14,000                   | 0,7550                            |
|   |                  |                            | 8                 | 16,000                   | 0,2320                            |
|   |                  |                            | 18                | 39,948                   | 0,0130                            |
| 2 | Поліетилен       | 9,20E-1                    | 6                 | 12,000                   | 0,8563                            |
|   |                  |                            | 10                | 10,080                   | 0,1437                            |
| 3 | Алюміній         | 2,70                       | 13                | 26,982                   | 1                                 |
| 4 | Титан            | 4,54                       | 22                | 47,888                   | 1                                 |
| 5 | Мідь             | 8,96                       | 29                | 63,546                   | 1                                 |
| 6 | Вольфрам         | 19,30                      | 74                | 183,850                  | 1                                 |
| 7 | Свинець          | 11,35                      | 82                | 207,200                  | 1                                 |

Для моделювання пучка прискорених електронів в програмному коді було створено модель реакційної камери прискорювача. Весь простір розбито на 11 шарів по осі Z однакової довжини, всі шари заповнені повітрям. Прийнято, що з випускного вікна прискорювача електронів виходять моноенергетичні електрони з енергією 5 MeV, діаметр пучка – 10мм.

Отримані розподіли пучка прискорених електронів в координатах YZ та XYZ представлені відповідно на рисунках 4.1 та 4.2

На рисунках відображено траєкторії частинок, що виходять із випускного вікна прискорювача. Спостерігається поступове розширення пучка в міру його проходження крізь повітряне середовище реакційної камери.

Збільшення поперечного перерізу пучка зумовлено процесами багаторазового кулонівського розсіювання електронів на ядрах атомів газів повітря. У координатах XYZ чітко простежується конусоподібна форма пучка, що свідчить про збереження осьової симетрії, проте щільність частинок на периферії суттєво

знижується. Це обґрунтовує необхідність врахування градієнта потужності дози при розміщенні експериментальних зразків відносно центральної осі.

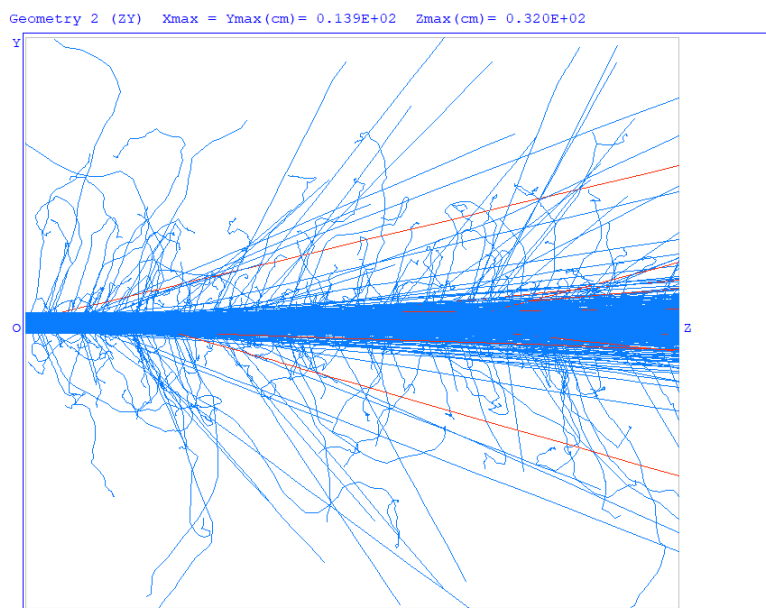


Рисунок 4.1 – Розподіл пучка прискорених електронів в координатах YZ

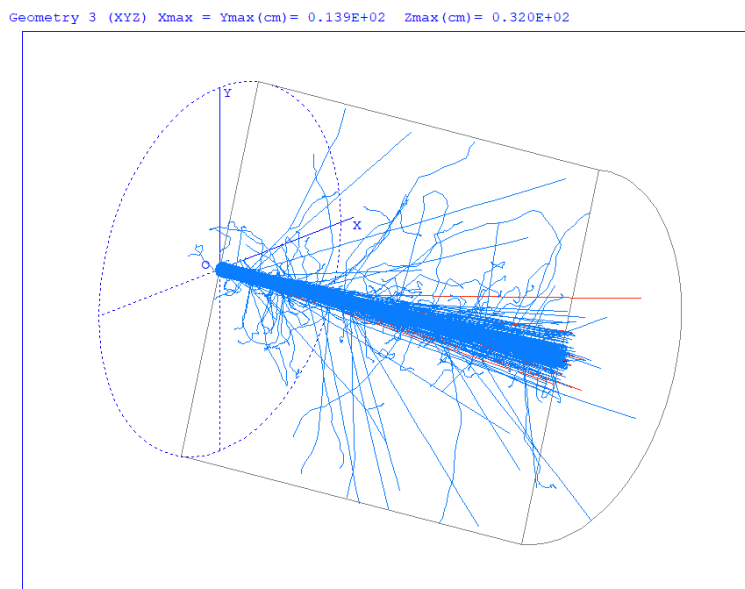
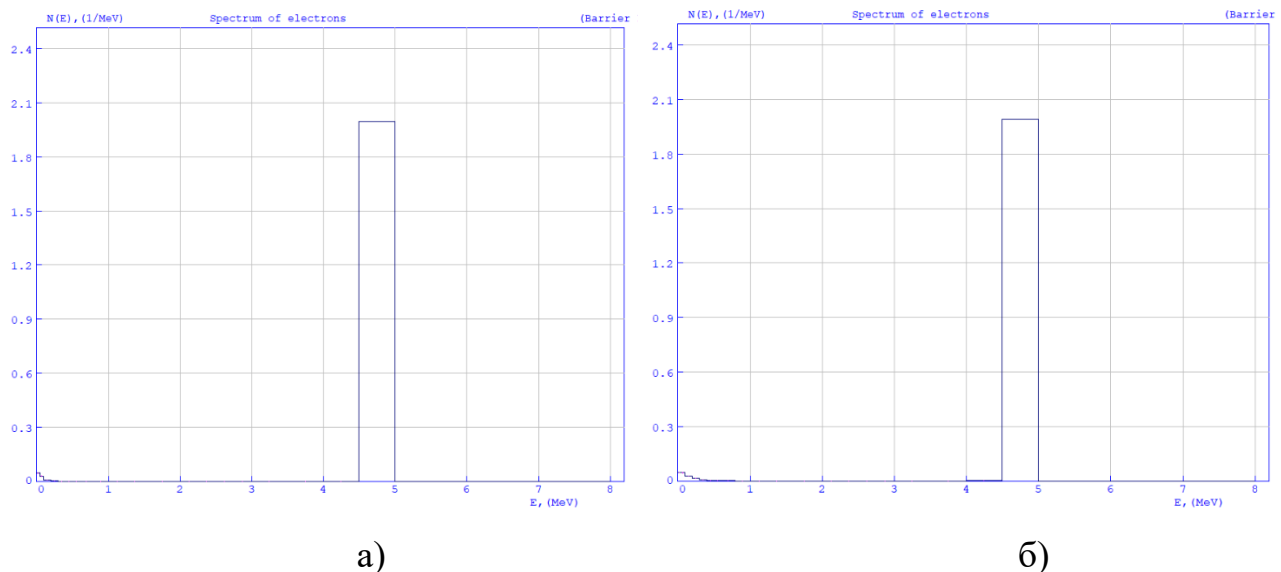


Рисунок 4.2 – Розподіл пучка прискорених електронів в координатах XYZ

В результаті проведеного моделювання були отримані енергетичні спектри розподілу енергій прискорених електронів та  $\gamma$ -квантів одразу після випускного вікна прискорювача та на крайній точці побудованої геометрії реакційної камери.

Отримані спектри для електронів та  $\gamma$ -квантів зображені на рисунках 4.3 та 4.4 відповідно.



а – випускне вікно прискорювача, б – крайня точка геометрії моделі

Рисунок 4.3 – Спектри енергій прискорених електронів

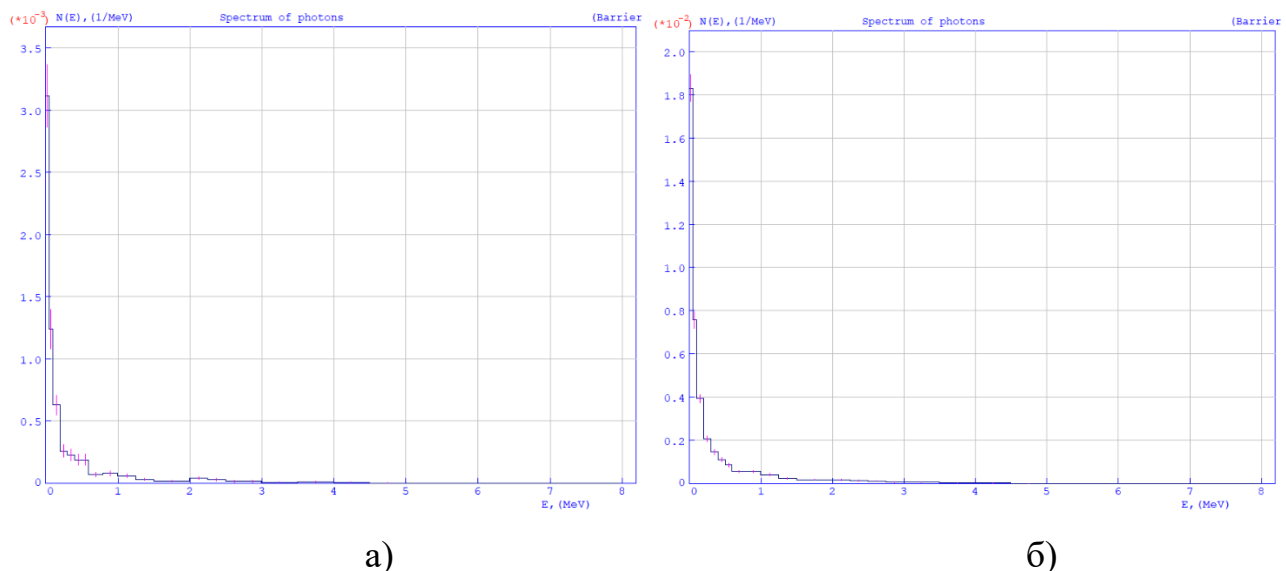
Графік енергетичного спектра прискорених електронів на певній відстані від випускного вікна має вигляд кривої з вираженим максимумом у районі номінальної енергії (близько 4–5 MeV).

Наявність «хвоста» спектра в області низьких енергій пояснюється іонізаційними втратами енергії електронів при взаємодії з випускним вікном та молекулами повітря. Чим більшу відстань проходить пучок, тим ширшим стає енергетичний пік (ефект енергетичного розмиття). Дані спектральні характеристики є вхідними параметрами для розрахунку глибинного розподілу поглиненої дози в матеріалах [31, 67].

Спектр  $\gamma$ -квантів суттєво відрізняється від електронного і має неперервний спадний характер, де максимальна енергія фотонів відповідає максимальній енергії первинних електронів.

Цей розподіл відповідає класичній теорії гальмівного випромінювання, що виникає при сповільненні електронів у кулонівському полі ядер. Основна частина

фотонів генерується в області низьких та середніх енергій. Наявність цієї складової у моделюванні підтверджує, що навіть за відсутності спеціальної конверсійної мішені, в реакційній камері присутній  $\gamma$ -фон, зумовлений гальмуванням електронів у фользі випускного вікна прискорювача та конструкційних елементах стенда.



а – випускне вікно прискорювача, б – крайня точка геометрії моделі  
Рисунок 4.4 – Спектри енергій  $\gamma$ -квантів гальмівного випромінювання

#### 4.1.1 Моделювання реакційної камери радіаційної установки та системи формування широкого поля опромінення

В роботах [30, 31, 32] було розроблено систему формування широкого поля опромінення в реакційній камері радіаційної установки. Для формування такого поля використовується ефект розсіювання пучка прискорених електронів при проходженні через речовину. Запропоновано використовувати тонкі алюмінієві екрани для розсіювання пучка прискорених електронів. Оптимальна товщина таких алюмінієвих екранів для розсіювання пучка прискорених електронів знаходиться в межах 0,1 – 4 мм. При використанні таких розсіювачів змінюється енергетичний спектр пучка прискорених електронів та їх кутовий розподіл.

Для повернення частини прискорених електронів, які після проходження алюмінієвого розсіювача відхиляються на кути більше  $45^\circ$  запропоновано [30, 31, 32] використовувати алюмінієві відбивачі товщиною від 5 до 10 мм.

Для зниження потужності дози опромінення за межами реакційної камери додатково запропоновано встановити екрани радіаційного захисту зі свинцю.

З метою оцінки просторового розподілу потоків іонізуючого випромінювання та параметрів поглинутої дози в умовах опромінення, характерних для випробувань обладнання ядерних енергоустановок, було розроблено тривимірну модель реакційної камери лінійного прискорювача електронів у середовищі TOPAS.

Розрахункова область моделювання представлена об'ємом типу World у вигляді прямокутного паралелепіпеда з лінійними розмірами  $6 \times 6 \times 12$  м<sup>3</sup>, заповненого повітрям. Такий вибір габаритів забезпечує відсутність граничних ефектів та вторинних відбиттів частинок від меж моделі, що є критичним для коректного відтворення каскадних процесів електрон-фотонного характеру.

Уздовж осі Z сформовано послідовність з одинадцяти плоских об'ємів (Slab01–Slab11), кожен з яких має товщину 100 мм. Ці об'єми використовуються як віртуальні контрольні шари, що дозволяють:

- здійснювати поетапний аналіз еволюції спектрів електронів і  $\gamma$ -квантів;
- визначати ослаблення та розширення пучка;
- оцінювати зміну просторового розподілу енерговиділення вздовж реакційної камери.

Таким чином реалізовано підхід дискретизації простору опромінення, який є стандартним при моделюванні радіаційних полів у великих об'ємах.

Схема моделі в координатах YZ представлений на рисунку 4.5.

На виході прискорювача змодельовано випускне вікно товщиною 0,4 мм, розташоване поблизу початку координатної системи. Наявність цього елемента дозволяє коректно врахувати початкове розсіювання електронів та генерацію

вторинного гальмівного випромінювання ще на етапі виходу пучка в повітряне середовище реакційної камери.

Включення випускного вікна до моделі є принциповим з точки зору відтворення реальних умов експлуатації прискорювача, оскільки саме на цьому етапі формується початкова кутова та енергетична розбіжність пучка.

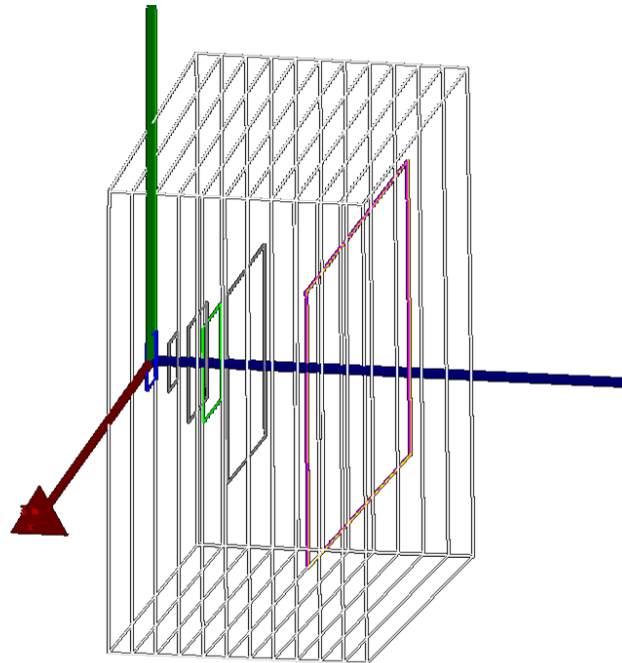


Рисунок 4.5 – Модель реакційної камери в YZ координатах

Джерело випромінювання в моделі представлено у вигляді моноенергетичного пучка прискорених електронів із номінальною енергією 5 MeV, що відповідає типовим режимам роботи промислових і дослідницьких лінійних прискорювачів, які застосовуються для радіаційних випробувань обладнання ядерних енергоустановок.

Пучок електронів задається як паралельний, з фіксованим напрямком поширення вздовж додатного напрямку осі Z. Кутовий розподіл частинок відсутній, що дозволяє:

- виключити вплив початкової кутової розбіжності;

- однозначно інтерпретувати подальше розширення пучка як наслідок взаємодії з матеріалами та середовищем;
- коректно аналізувати ефективність розсіювачів і конверторів, передбачених у геометрії моделі.

Початковий поперечний розподіл електронів у пучку є рівномірним (Flat) та обмежений еліптичною апертурою з радіусами 5 мм по осях X та Y, що відповідає діаметру пучка 10 мм. Така конфігурація адекватно відтворює геометричні характеристики реального пучка на виході з прискорювача після формуючих елементів.

Початкова точка інжекції пучка розташована перед випускним вікном реакційної камери, що забезпечує коректний облік:

- початкових втрат енергії;
- первинного розсіювання електронів;
- генерації гальмівного випромінювання.

Для забезпечення статистичної достовірності результатів у кожному розрахунковому запуску моделюється не менше  $10^5$  історій частинок. Такий обсяг статистики є достатнім для отримання стабільних просторових і енергетичних розподілів у контрольних шарах та області зразків.

Для моделювання процесів трансформації електронного пучка в змішане  $\beta$ - $\gamma$  поле в моделі передбачено декілька тонких розсіювальних елементів, розташованих у різних контрольних шарах:

- алюмінієві розсіювачі різної апертури, що імітують поступове розширення пучка;
- тонкий вольфрамовий елемент, який виконує функцію гальмівного конвертора та є джерелом інтенсивного фотонного випромінювання.

Послідовне розташування цих елементів дозволяє сформувати радіаційне поле зі складною просторово-енергетичною структурою, характерною для експериментальних стендів з дослідження радіаційної стійкості матеріалів та електронних компонентів.

У зоні Slab09 змодельовано два тонкі зразки, розташовані з малим осьовим зміщенням один відносно одного. Така конфігурація дозволяє:

- аналізувати вертикальні та поперечні градієнти поглинутої дози;
- порівнювати дозові навантаження при незначній зміні положення зразка;
- оцінювати вплив просторової неоднорідності поля на результати випробувань.

Отримані в ході моделювання розподіли енерговиділення та флюенсу частинок можуть бути безпосередньо використані для розрахунку поглинутої дози, потужності дози та дозових коефіцієнтів, необхідних для прогнозування деградації функціональних характеристик обладнання ядерних енергоустановок.

Для коректного відтворення процесів переносу заряджених частинок і фотонів у реакційній камері в моделі використано модульну фізичну схему Geant4, реалізовану в середовищі TOPAS. Обрано стандартний стандартний електромагнітний список фізики бібліотеки Geant4 [80, 81], який забезпечує підвищену точність моделювання електрон-фотонних взаємодій у діапазоні енергій до кількох десятків MeV.

Зазначений фізичний набір включає повний комплекс електромагнітних процесів, зокрема:

- іонізаційні втрати енергії електронів;
- багаторазове кулонівське розсіювання;
- генерацію гальмівного випромінювання;
- фотоелектричний ефект;
- комптонівське розсіювання;
- народження електрон-позитронних пар (у фотонній складовій поля).

Використання саме конфігурації opt3 є компромісом між обчислювальною ефективністю та фізичною достовірністю результатів і відповідає загальноприйнятій практиці моделювання радіаційних полів для задач дозиметрії та оцінки радіаційної стійкості матеріалів.

Обрані фізичні моделі та параметри пучка забезпечують адекватне відтворення реальних умов опромінення, характерних для випробувань матеріалів і електронних компонентів в умовах впливу змішаного  $\beta$ - $\gamma$  випромінювання. Це дозволяє використовувати результати моделювання для:

- кількісної оцінки поглинутої дози та потужності дози;
- аналізу внеску електронної та фотонної складових у деградацію властивостей обладнання;
- масштабування режимів опромінення з урахуванням енергетичних і геометричних параметрів пучка.

Розроблена модель реакційної камери забезпечує відтворення ключових фізичних процесів формування змішаного радіаційного поля, включаючи розсіювання електронів, генерацію гальмівного випромінювання та просторовий перерозподіл енергії.

#### 4.1.2 Підбір оптимальної конфігурації розсіювачів

Підбір конфігурації розсіювачів виконано з метою забезпечення керованого формування змішаного електронно-фотонного поля в реакційній камері та досягнення прийняттого компромісу між трьома ключовими вимогами:

- розширення електронного пучка до робочої апертури опромінення (без локальних «гарячих плям»);
- ефективна генерація гальмівного випромінювання (створення керованої  $\gamma$ -складової);
- обмеження паразитних ефектів: надмірного розсіювання, зростання частки зворотно розсіяних частинок та «засмічення» поля вторинними компонентами, що погіршує відтворюваність умов випробувань.

Для якісної інтерпретації фізики процесів застосовано трекову візуалізацію для 50 історій, що дозволяє наочно відслідкувати: ступінь кутового розсіювання електронів, появу та просторовий розподіл фотонів гальмівного випромінювання, наявність зворотного розсіювання. Зазначений етап має ілюстративно-

діагностичний характер і не підміняє подальший кількісний аналіз дозових величин (який виконується на статистиці  $10^5$  і більше історій).

У початковій конфігурації всі елементи (камера, розсіювачі, зразки) задані як повітряні об'єми, тобто відсутні ефективні центри взаємодії для розсіювання та генерації фотонів. На трековій картині спостерігається переважно «балістичний» проліт первинних електронів із мінімальним розходженням пучка та практично відсутньою фотонною компонентою (рис. 4.6).

Така конфігурація не забезпечує ані потрібного розширення пучка, ані формування керованої  $\gamma$ -складової, оскільки у повітрі для 5 MeV електронів процеси розсіювання/випромінювання є відносно слабкими на характерних довжинах тракту, тому без матеріальних елементів поле не «формується» конструктивно [72, 82], тому використовується лише як референтна для порівняння.

У конфігураціях з одним та двома алюмінієвими розсіювачами на візуалізації чітко видно збільшення кутової розбіжності електронів після проходження тонких Al-елементів, що є наслідком багаторазового кулонівського розсіювання [72, 82]. При цьому фотонна компонента залишається відносно малою (відсутній високоефективний конвертор із великим Z).

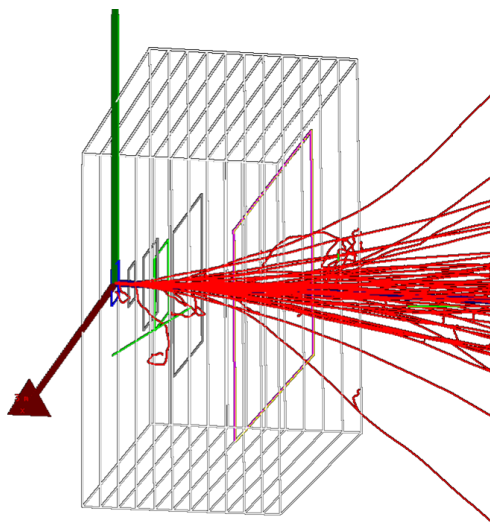


Рисунок 4.6 – Трекова візуалізація руху частинок у реакційній камері (усі елементи моделі задані як повітряні об'єми)

При використанні одного розсіювача формується початкове розширення пучка, однак розподіл ще відносно «вузький» – поле в зоні зразків може залишатися неоднорідним при великих площах опромінення (рис. 4.7).

При використанні двох розсіювачів розширення суттєвіше, пучок стає «пласкішим» у сенсі поперечного розподілу треків. Однак  $\gamma$ -складова все ще формується слабо, що обмежує можливість моделювання змішаного електронно-фотонного поля, характерного для реальних випробувань радіаційної стійкості матеріалів/електроніки.

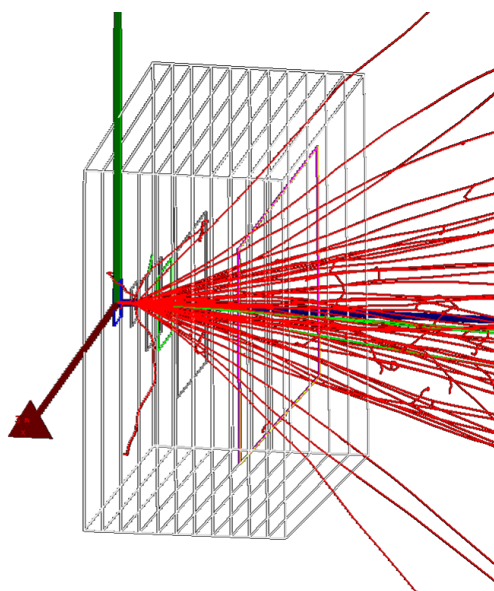


Рисунок 4.7 – Трекова візуалізація для конфігурації з одним алюмінієвим розсіювачем

Проміжний висновок: Al-розсіювачі ефективні саме як елементи геометричного формування електронної складової, але самі по собі не забезпечують потрібного рівня  $\gamma$ -поля [72].

Додавання вольфрамового елемента (W) принципово змінює картину: спостерігається інтенсивна генерація фотонів, а також зростання частки вторинних електронів і зворотного розсіювання поблизу області конверсії. Це відповідає фізиці гальмівного випромінювання, інтенсивність якого зростає з атомним номером матеріалу (високий  $Z$ ) і з енергією електронів [42, 72, 73]. Використання

конверсійної мішені з геометричним коефіцієнтом перекриття 0,5 забезпечує керовану конверсію пучка прискорених електронів у  $\gamma$ -кванти без повного «запирання» електронної складової.

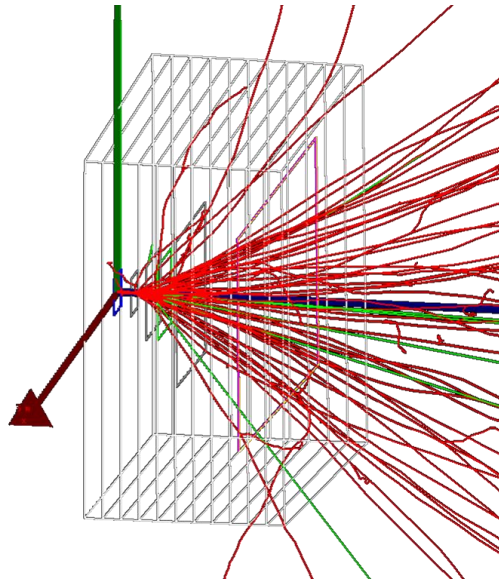


Рисунок 4.8 – Трекова візуалізація для конфігурації з двома алюмінієвими розсіювачами

У випадку використання лише вольфрамової конверсійної мішені поле формується з помітною фотонною складовою, однак без попереднього «підготування» електронного пучка алюмінієвими розсіювачами зберігаються ознаки нерівномірного просторового розподілу та підвищеної частки зворотного/бічного розсіювання (рис. 4.9).

Встановлення перед конверсійною мішенню алюмінієвого розсіювача призводить до більш «робочого» режиму конверсії: зона генерації  $\gamma$ -квантів розвантажується від надмірної локальної щільності потоку, а сумарне поле стає більш придатним для опромінення зразків. Разом з тим, відсутність повної послідовності формування (два алюмінієва розсіювачі) перед конверсійною мішенню зберігає ризики неоднорідності для більших апертур (рис. 4.10).

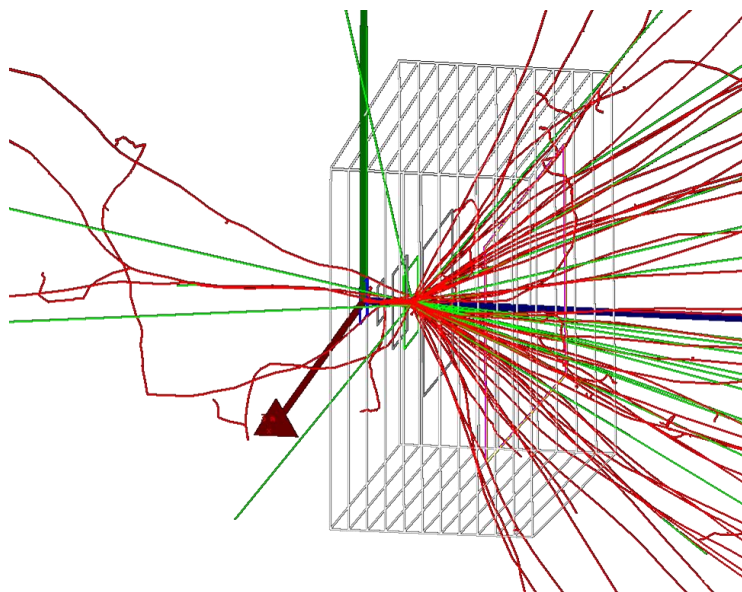


Рисунок 4.9 – Трекова візуалізація для конфігурації з вольфрамовою конверсійною мішенню без попередніх алюмінієвих розсіювачів

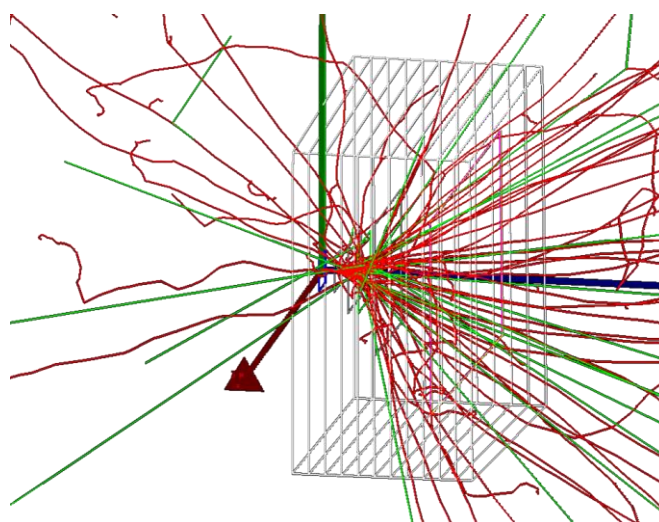


Рисунок 4.10 – Трекова візуалізація для конфігурації алюмінієвим розсіювачем перед вольфрамовою конверсійною мішенню

При використанні двох алюмінієвих розсіювачів та конверсійної мішені спостерігається найбільш збалансована картина (рис. 4.11):

- електронний пучок попередньо «розкритий» двома алюмінієвими розсіювачами (кероване багаторазове розсіювання);
- у зоні вольфрамової конверсійної мішені формується виражена фотонна складова (конверсія електронів у гальмівне випромінювання);

– після конверсійної мішені у напрямку до зразків зберігається достатня колімація та відсутні ознаки надмірного додаткового «розвалу» поля.

Це відповідає вимогам до відтворюваного змішаного поля для стендових випробувань радіаційної стійкості: є і електронна, і  $\gamma$ -складова, а просторовий розподіл в зоні зразків є більш керованим [42, 72, 73].

У конфігурації з додатковим алюмінієвим розсіювачем, розташованим після конверсійної мішені, тобто вже після формування змішаного поля, на трековій картині це проявляється як:

- додаткове розсіювання залишкової електронної складової та частини вторинних електронів;
- зростання кількості треків із великими кутами (паразитна «аура» поля);
- збільшення частки зворотного/бічного розсіювання та непродуктивних траєкторій.

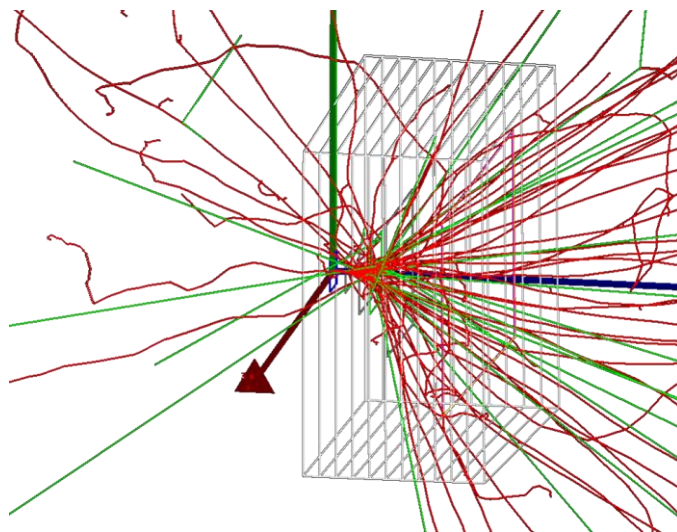


Рисунок 4.11 – Трекова візуалізація для конфігурації з двома алюмінієвими розсіювачами перед вольфрамовою конверсійною мішенню

Фізично це означає, що додатковий розсіювач за конверсійною мішенню не «покрощує» формування поля, а скоріше додає некерований етап розсіювання вже сформованого змішаного потоку (рис. 4.12), що може погіршувати однорідність

опромінення та підвищувати залежність результатів від дрібних геометричних факторів (положення зразків, межі апертури тощо) [42, 72, 73].

Конфігурація лише з алюмінієвими розсіювачами демонструє, що навіть за суттєвого розширення електронного пучка (три Al-розсіювачі) відсутність високоефективного конвертора (W) не забезпечує необхідної генерації  $\gamma$ -складової. Таким чином, дана схема не відповідає меті формування змішаного поля (рис. 4.13).

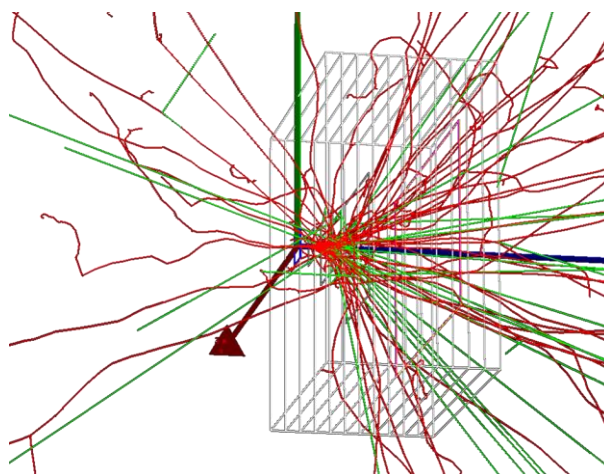


Рисунок 4.12 – Трекова візуалізація для конфігурації з двома алюмінієвими розсіювачами перед вольфрамовою конверсійною мішенню та додатковим розсіювачем за конверсійною мішенню

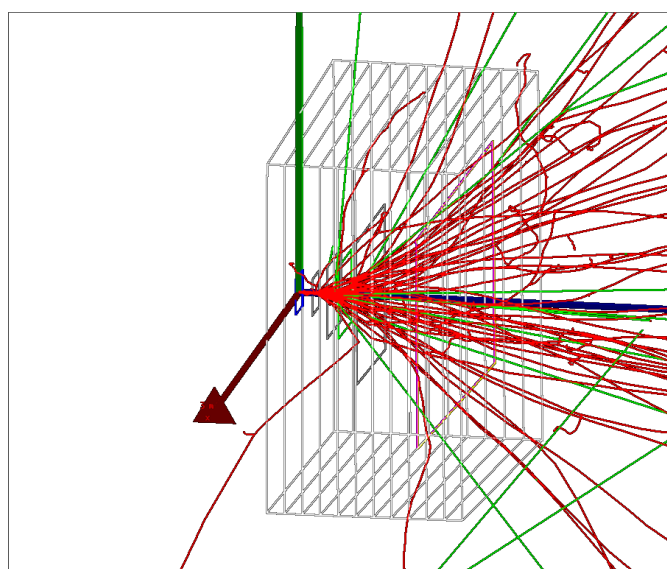


Рисунок 4.13 – Трекова візуалізація для конфігурації з трьома алюмінієвими розсіювачами без вольфрамової конверсійної мішені

За результатами порівняльного аналізу трекових візуалізацій встановлено:

- алюмінієві розсіювачі є ефективними для керованого розширення електронного пучка за рахунок багаторазового кулонівського розсіювання [72, 73];
- вольфрамова конверсійна мішень з коефіцієнтом перекриття 0,5 принципово необхідна для формування вираженої фотонної складової через механізм гальмівного випромінювання, що зростає для матеріалів з високим  $Z$  [42, 72, 73].

Таким чином, оптимальною для подальших кількісних розрахунків дозових характеристик та випробувань радіаційної стійкості обрана конфігурація з двома алюмінієвими розсіювачами та вольфрамовою конверсійною мішенню.

#### 4.1.3 Моделювання параметрів радіаційного поля в реакційній камері прискорювача

Для підтвердження коректності статистичної збіжності результатів Монте-Карло моделювання та вибору раціонального обсягу обчислень виконано серію розрахунків із різною кількістю первинних історій  $n$  (число змодельованих первинних електронів), із реєстрацією поглиненої дози в контрольних точках/об'ємах: AlScatter1, Sample1 та Sample2. На рис. 4.14 наведено залежності сумарної поглиненої дози від кількості симуляцій у логарифмічному масштабі.

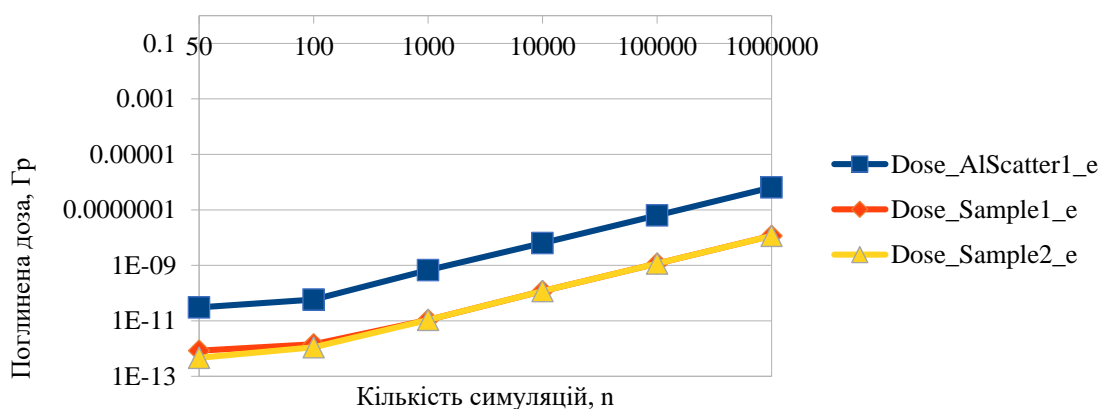


Рисунок 4.14 – Залежність поглиненої дози в контрольних точках від кількості симуляцій  $n$

Як видно з рис. 4.14, для всіх трьох контрольних позицій із ростом  $n$  спостерігається монотонне зростання оцінюваної дози. Така поведінка є фізично очікуваною у випадку, коли виводиться сумарна (накопичена) доза за весь набір історій, тобто величина пропорційна числу первинних частинок. У лог–лог представленні ця пропорційність проявляється як ділянка, близька до лінійної, після зменшення впливу статистичних флуктуацій на малих

З рис. 4.14 видно, що залежності для контрольних точок мають регулярний характер і відповідають очікуваному режиму пропорційності «накопичена доза  $\sim n$ ». При цьому:

- співвідношення доз між Sample1 та Sample2 зберігає сталість із ростом  $n$ , що є непрямою ознакою стабілізації просторового розподілу енерговиділення в зоні зразків;

- для контрольної точки AlScatter1 доза є вищою, що відповідає її розташуванню поблизу елементів формування/розсіювання пучка, де інтенсивніші процеси енерговиділення та генерації вторинних частинок.

У межах прийнятої методики подальші розрахунки параметрів поля виконуються при  $n=100000$  як при статистично достатньому рівні для отримання відтворених середніх значень дозових величин, з урахуванням того, що контроль статистичної невизначеності в Монте-Карло дозиметрії виконується стандартними підходами «history-by-history» та аналізом статистичної похибки дозових оцінок.

Для детального аналізу параметрів радіаційного поля у кожному з об'ємів визначались: поглинена доза від електронної складової, поглинена доза від  $\gamma$ -квантів, сумарна поглинена доза, а також середні енергії електронів і фотонів, розраховані як відношення енергетичного флюенсу до флюенсу частинок.

В моделюванні реакційної камери без розсіювачів та конверсійної мішені поле формується переважно електронною складовою;  $\gamma$ -внесок малий. Уздовж осі спостерігається плавна еволюція дозових і спектральних характеристик, без локальних «аномалій», що відповідає очікуваній фізиці переносу електронів у

газоподібному середовищі (іонізаційні втрати, розсіювання, генерація вторинних частинок) та вторинній природі фотонів [83].

Спостерігається зростання (або близький до монотонного тренд) уздовж осі, що відповідає накопиченню енерговиділення в контрольних об'ємах на шляху переносу електронів і вторинних електронів у повітрі (рис. 4.15).

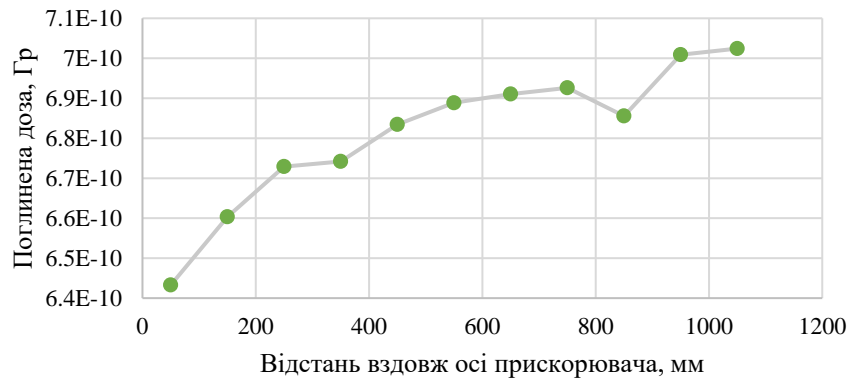


Рисунок 4.15 – Поглинена доза за рахунок  $\beta$ -частинок без розсіювачів та конверсійної мішені

Абсолютні значення поглиненої дози від  $\gamma$ -квантів (рис. 4.16) на кілька порядків нижчі за електронні, що типово для режиму, де фотони виникають як вторинне гальмівне випромінювання і слабо взаємодіють у повітрі.



Рисунок 4.16 – Поглинена доза за рахунок  $\gamma$ -квантів без розсіювачів та конверсійної мішені

Сумарна поглинена доза (рис. 4.17) практично повторює електронний тренд ( $\gamma$ -внесок додається, але не визначає рівень).

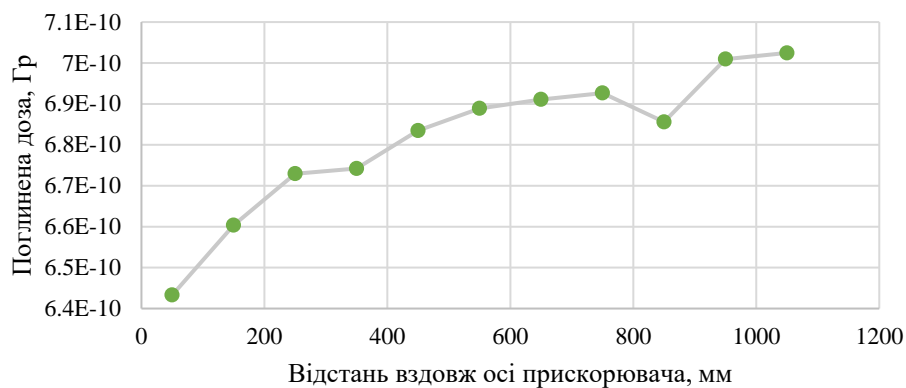


Рисунок 4.17 – Сумарна поглинена доза без розсіювачів та конверсійної мішені

Спостерігається поступове зниження середньої енергії електронів вздовж осі, що відповідає іонізаційним втратам та розсіюванню електронів у середовищі (рис. 4.19).

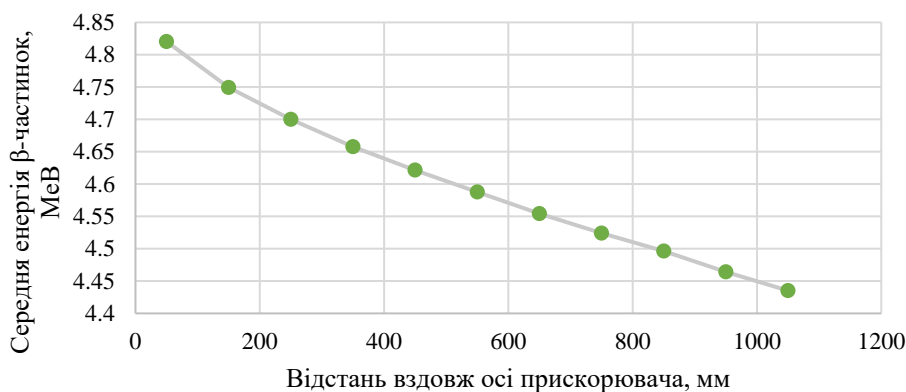


Рисунок 4.19 – Середня енергія  $\beta$ -частинок без розсіювачів та конверсійної мішені

Для оцінки просторової однорідності випромінювального поля на підході до останнього шару (зони розміщення зразків) побудовано 2D-розподіли сумарної

кількості частинок у поперечній площині  $(x,y)$  відносно геометричного центру. Такі карти відображають ступінь колімації/розширення пучка та наявність паразитних вторинних компонент, що є критично важливим для інтерпретації дозових градієнтів у зоні опромінення.

Для середньої енергії  $\gamma$ -квантів спостерігається помірне зростання/стабілізація (рис. 4.20), що узгоджується із збільшенням жорсткості фотонного поля у більш віддалених об'ємах через селекцію низькоенергетичних фотонів (розсіювання/поглинання) та домінування більш проникних компонент.

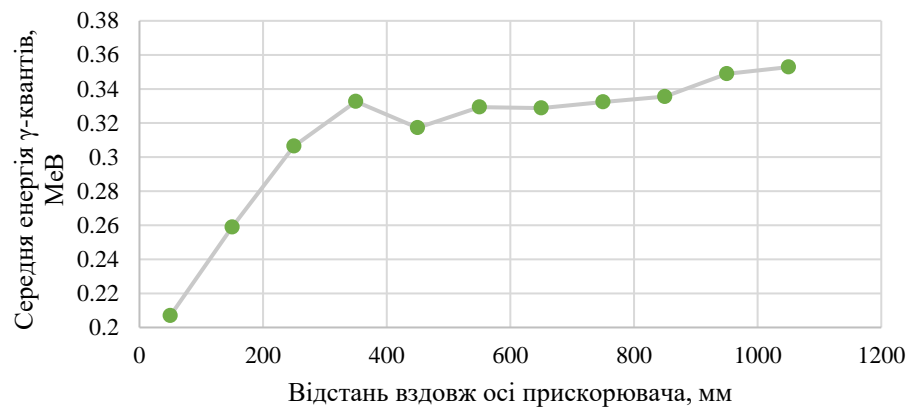


Рисунок 4.20 – Середня енергія  $\gamma$ -квантів без розсіювачів та конверсійної мішені

На розподілі електронів (рис. 4.21) спостерігається різко виражений центральний максимум при практично нульових значеннях на переважній частині площі. Це означає, що за відсутності матеріальних елементів формування (розсіювачів) електронний пучок зберігає високу колімацію, а розширення в повітрі за рахунок багаторазового кулонівського розсіювання є недостатнім для формування рівномірного поля на даній відстані. Така картина повністю узгоджується з базовою фізикою переносу заряджених частинок у речовині: у газоподібному середовищі при енергіях порядку кількох MeV основні втрати визначаються іонізацією, а кутове розсіювання накопичується поступово і не призводить до «плаского» профілю без спеціальних розсіювачів.

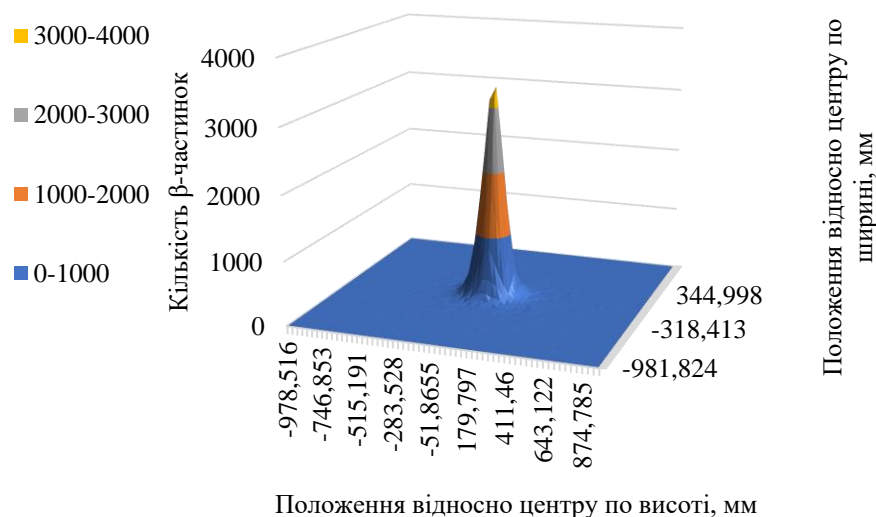


Рисунок 4.21 – Розподіл кількості  $\beta$ -частинок по площині перед останнім шаром без розсіювачів та конверсійної мішені

Розподіл  $\gamma$ -квантів (рис. 4.22) також має центральний максимум, проте абсолютні значення значно нижчі, а фон характеризується слабкими флуктуаціями. Така структура є очікуваною, оскільки за відсутності конверсійної мішені фотонна складова формується переважно як вторинне гальмівне випромінювання та фотони, розсіяні в середовищі (переважно комптонівське розсіювання), а їхня ймовірність взаємодії в повітрі порівняно мала. Відповідно, спектрально-кутовий склад фотонів і їх просторовий розподіл у даній конфігурації визначаються передусім геометрією первинного електронного пучка, а не спеціально сформованим  $\gamma$ -джерелом.

Сукупність двох розподілів показує, що без розсіювачів і конверсійної мішені поле перед зоною зразків є висококонцентрованим у центрі, тобто не відповідає вимогам до просторової однорідності опромінення (для випробувань стійкості). Отримана картина є фізично коректною та підтверджується загальновідомими закономірностями втрат енергії, багаторазового розсіювання та механізмів формування вторинного фотонного поля.

З розподілів  $\beta$ -частинок та  $\gamma$ -квантів для інших варіантів формування поля в реакційній камері лінійного прискорювача електронів (рис. 4.24–4.27) видно, що

найбільша рівномірність забезпечується при використанні двох алюмінієвих розсіювачів.

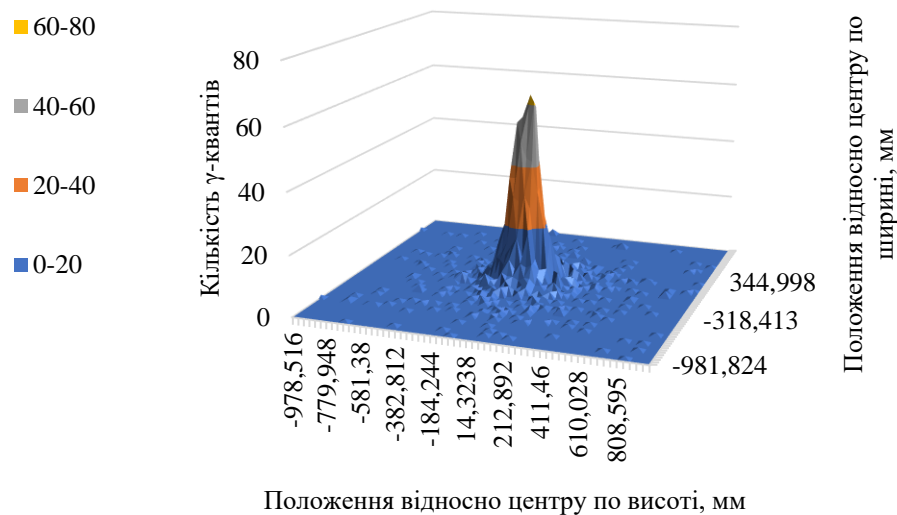


Рисунок 4.23 – Розподіл кількості  $\gamma$ -квантів по площині перед останнім шаром без розсіювачів та конверсійної мішені

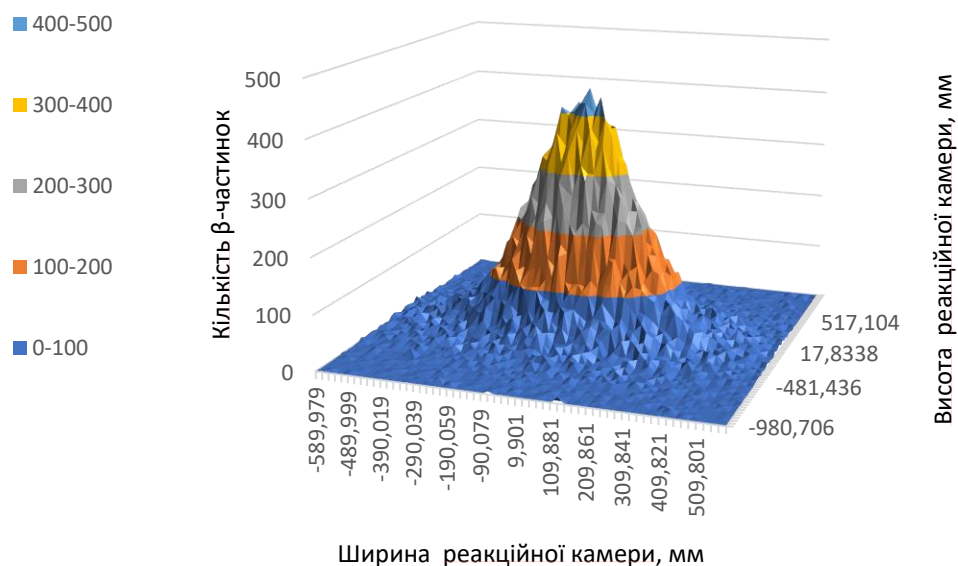


Рисунок 4.24 – Розподіл кількості  $\beta$ -частинок по площині перед останнім шаром з одним алюмінієвим розсіювачем

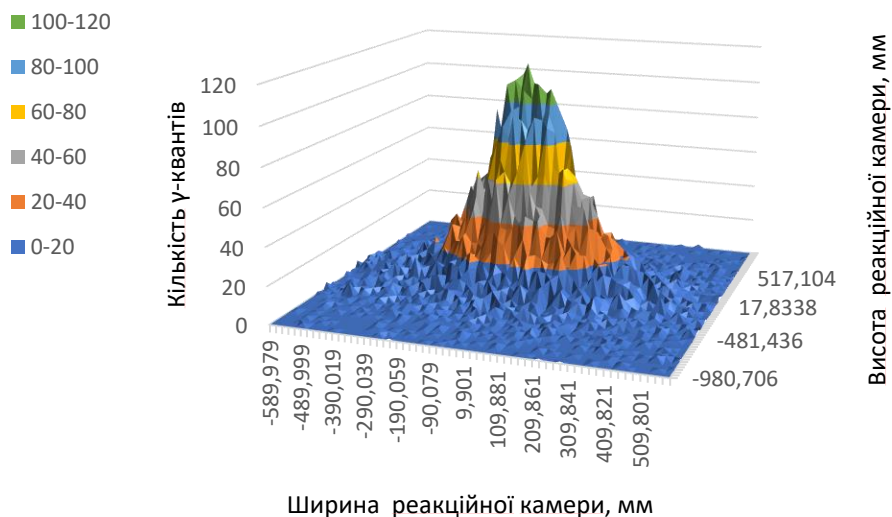


Рисунок 4.25 – Розподіл кількості  $\gamma$ -квантів по площині перед останнім шаром з одним алюмінієвим розсіювачем

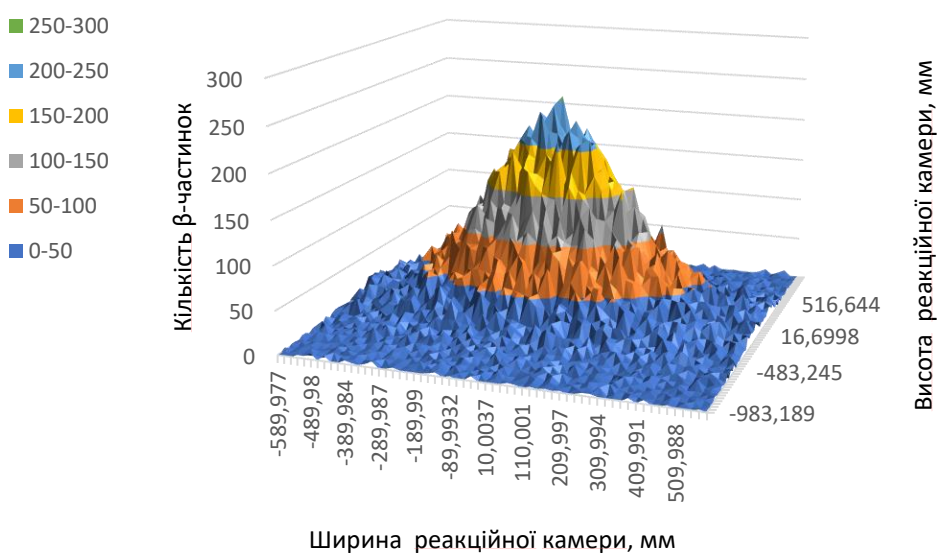


Рисунок 4.26 – Розподіл кількості  $\beta$ -частинок по площині перед останнім шаром з двома алюмінієвими розсіювачем

Для формування необхідного радіаційного поля оптимальною було визначено конфігурацію з двома алюмінієвими розсіювачами та вольфрамовою конверсійною мішенню.

При моделюванні реакційної камери в такому випадку з'являються локальні ефекти формування поля, пов'язані з матеріальними елементами [83]:

- алюмінієві розсіювачі забезпечують багаторазове кулонівське розсіювання і додаткові втрати енергії електронів;
- вольфрамова конверсійна мішень забезпечує інтенсивну генерацію гальмівного випромінювання (високий  $Z$ ) і перерозподіл енергії від електронної складової у фотонну.

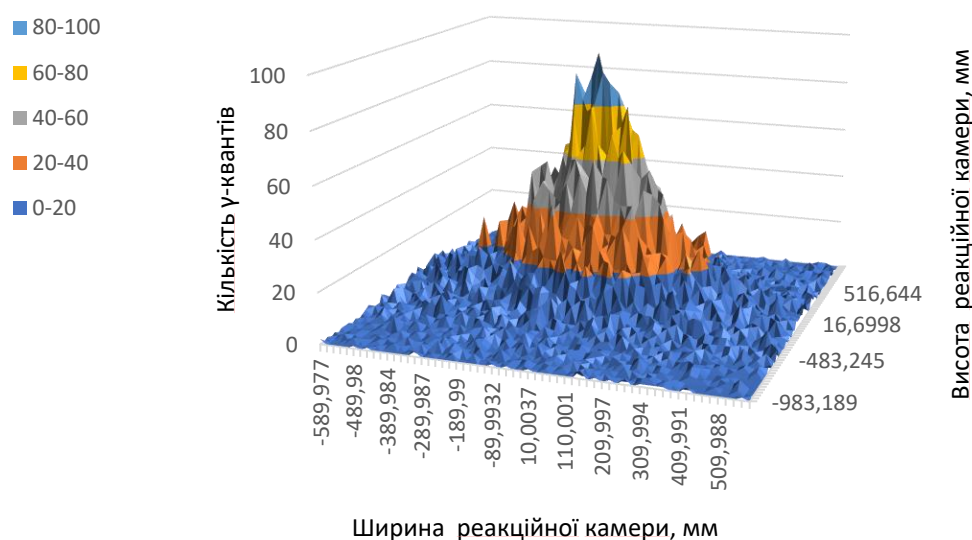


Рисунок 4.27 – Розподіл кількості  $\gamma$ -квантів по площині перед останнім шаром з двома алюмінієвим розсіювачем

Для поглиненої дози від електронів (рис. 4.28) спостерігається максимум у зоні перших шарів (після розсіювачів), далі — монотонний спад уздовж осі. Це фізично відповідає: локальному зростанню енерговиділення/розсіювання після Al, зменшенню енергій електронного спектра та частковому відбору енергії на випромінювання/вторинні процеси після W [83].

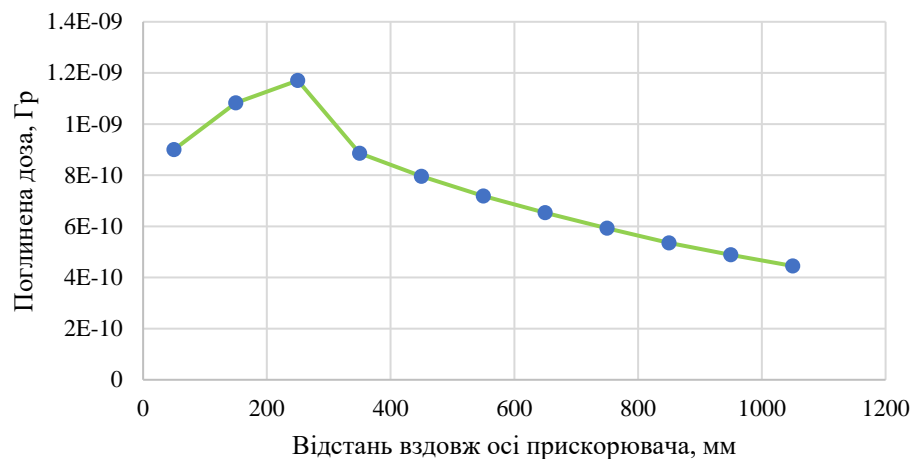


Рисунок 4.28 – Поглинена доза за рахунок прискорених електронів

Спостерігається підвищення поглиненої дози від  $\gamma$ -квантів та максимум у області, що відповідає зоні конверсії ( $W$ ), з подальшим зменшенням через геометричне розходження та ослаблення в середовищі (рис. 4.29). Такий профіль є типовим для гальмівного випромінювання в мішені з високим  $Z$ .

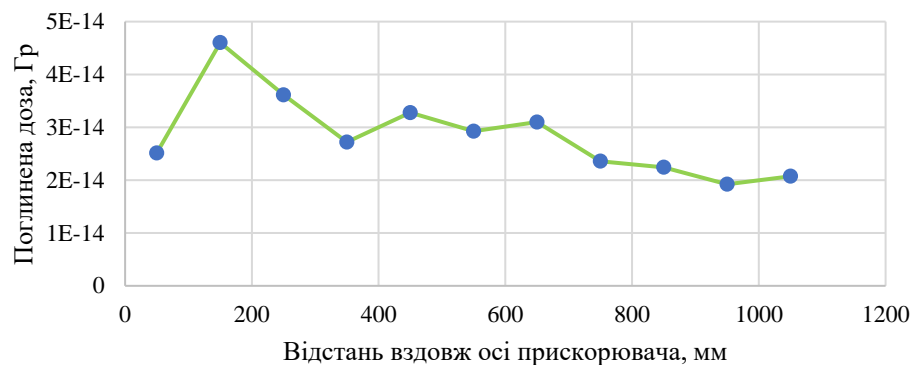


Рисунок 4.29 – Поглинена доза за рахунок  $\gamma$ -квантів

Сумарна поглинена доза (рис. 4.30) визначається електронною складовою, але в області  $W$ -мішені та за нею проявляється відносно більша роль фотонного внеску (сумарний профіль «підтримується»  $\gamma$ -складовою).

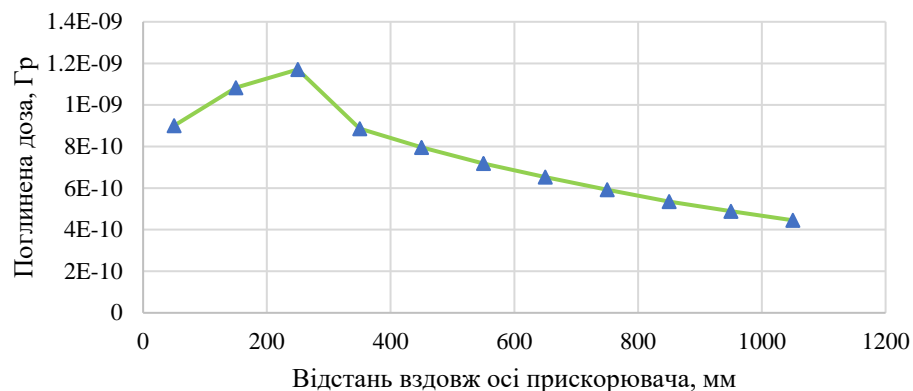


Рисунок 4.30 – Сумарна поглинена доза

Для середньої енергії електронів характерне різке падіння в початкових об'ємах (втрати в Al + перерозподіл енергії внаслідок взаємодій), далі — стабілізація на нижчому рівні, що відповідає переносу більш м'якого електронного спектра та вторинних електронів (рис. 4.31).

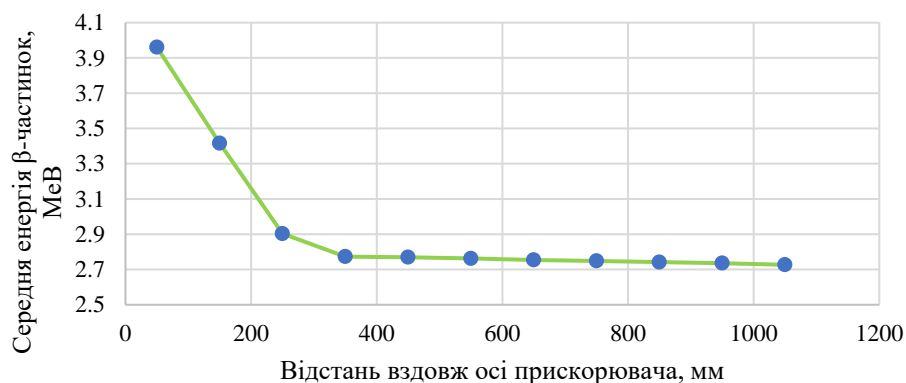


Рисунок 4.31 – Середня енергія електронів

Спостерігається зростання до плато (~стабілізація) середньої енергії  $\gamma$ -квантів (рис. 4.32), що узгоджується з формуванням гальмівного спектра у W-мішені та просторовою селекцією менш енергійних фотонів у міру віддалення від джерела [83].

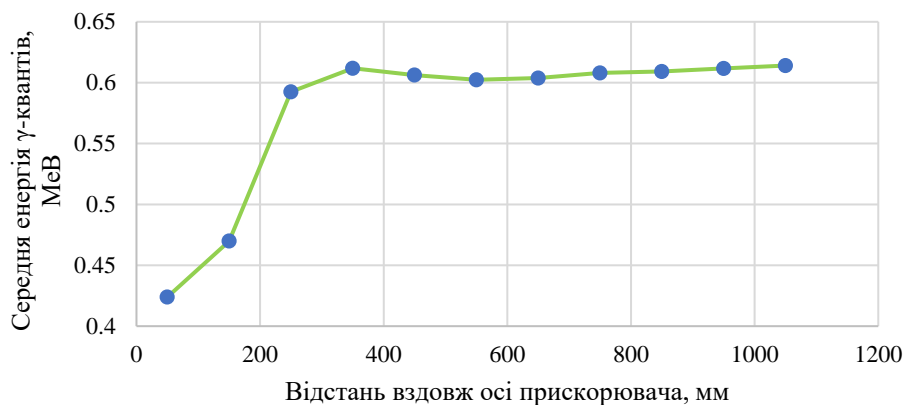


Рисунок 4.32 – Середня енергія  $\gamma$ -квантів

У порівнянні з моделюванням без розсіювачів та конверсійної мішені, де спостерігався різкий піковий профіль, в моделюванні реакційної камери з розсіювачами та конверсійною мішенню розподіл електронів (рис. 4.33) має вигляд широкого центрального плато/куполу з поступовим спадом до периферії. Це є прямим наслідком багаторазового кулонівського розсіювання в алюмінієвих розсіювачах (2 мм), яке збільшує кутову розбіжність і формує значно більш рівномірний поперечний розподіл перед зоною зразків. Така поведінка є фізично очікуваною для заряджених частинок у речовині та узгоджується з класичною картиною множинного розсіювання і втрат енергії електронів.

Практичний висновок: застосування двох Al-розсіювачів забезпечує перехід від вузького пучка до розширеного поля у робочій площині, що методично підвищує однорідність опромінення та відтворюваність умов випробувань.

Розподіл  $\gamma$ -квантів (рис. 4.34) також характеризується центральним максимумом, однак він є більш вузьким (порівняно з електронним «куполом») і з більш вираженою концентрацією поблизу осі. Це відповідає фізиці формування фотонного поля: основний внесок  $\gamma$ -квантів забезпечує гальмівне випромінювання у вольфрамовій конверсійній мішені (високий  $Z$ ), яке має переважно передньонаправлений характер у лабораторній системі, тоді як подальше розширення профілю відбувається за рахунок комптонівського розсіювання і геометричного розходження.

Практичний висновок: фотонна складова перед останнім шаром формується коректно — як похідна від конверсії у W-мішені — і демонструє очікувану «більш осьову» просторову структуру порівняно з електронами.

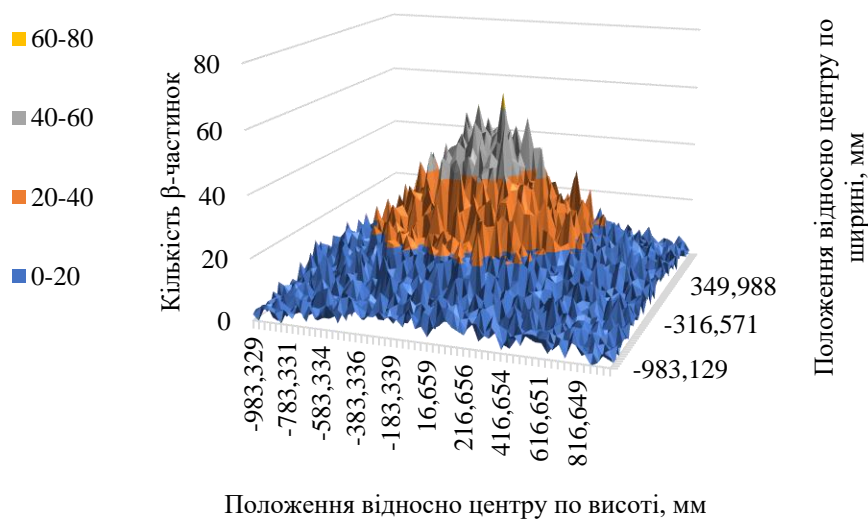


Рисунок 4.33 – Розподіл кількості β-частинок по площині перед останнім шаром

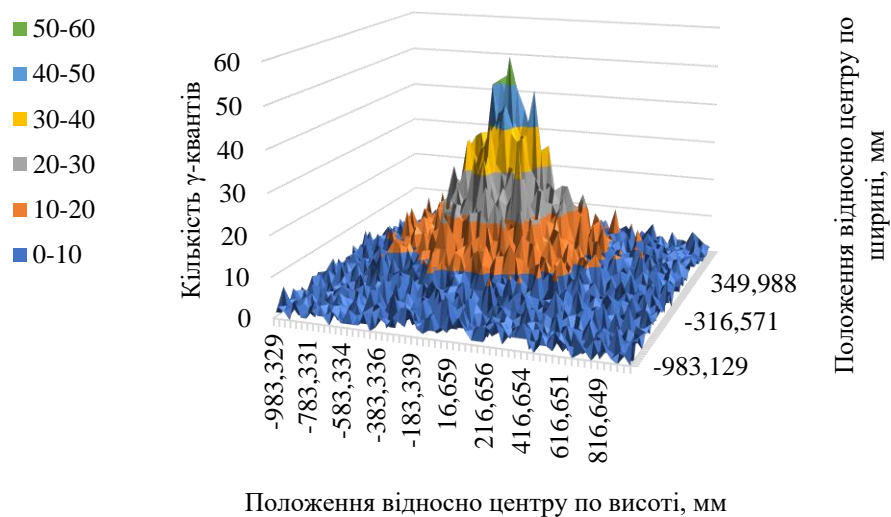


Рисунок 4.34 – Розподіл кількості γ-квантів по площині перед останнім шаром

Таким чином застосування комбінації з двох алюмінієвих розсіювачів та вольфрамової конверсійної мішені призводить до якісно іншого просторового профілю: електронний розподіл з різко пікового стає ширшим і ближчим до робочої однорідності, а  $\gamma$ -розподіл набуває характерного центрального максимуму, узгодженого з фізикою гальмівного випромінювання у матеріалі з високим атомним номером. Це підтверджує, що введення Al-розсіювачів та W-конверсійної мішені є фізично обґрунтованим кроком для формування змішаного поля заданої структури.

#### 4.1.4 Моделювання випробувань кабелів в змішаних радіаційних полях

Для оцінювання дозового навантаження елементів кабельної продукції в умовах змішаного поля, сформованого в реакційній камері лінійного прискорювача електронів, виконано серію Монте-Карло-розрахунків у середовищі TOPAS (на базі Geant4) з використанням електромагнітної моделі перенесення частинок (модуль `g4em-standard_opt3`) [78–81]. Первинним джерелом задавався паралельний пучок електронів з енергією 5 MeV та плоским просторовим розподілом у межах еліптичного апертурного відсікання (діаметр 10 мм), що відповідає прийнятій схемі опромінення в камері та забезпечує відтворюваність умов порівняння конфігурацій.

Модель об'єкта дослідження включала кабель із мідною центральною жилою (Sample2) та полімерною ізоляцією (Sample1). Розглянуто варіанти ізоляції з поліетилену (PE) товщиною 2, 4 та 6 мм, а також ізоляції з полівінілхлориду (PVC) товщиною 2 мм; геометрія центральної жили в усіх випадках залишалась сталою. Кабель розташовувався в області опромінення, сформованій системою з двох послідовних алюмінієвих розсіювачів і вольфрамової конверсійної мішені з коефіцієнтом перекриття 0,5, що забезпечувало наявність як електронної, так і  $\gamma$ -складової поля в зоні зразка.

Оцінювання радіаційних параметрів виконувалось окремо для двох контрольних об'єктів: Sample1 (ізоляція) та Sample2 (центральна жила). Дозові величини (поглинена доза від електронів,  $\gamma$ -квантів і сумарна) визначались як інтегральні характеристики енерговкладу в відповідних об'єктах.

На рис. 4.35 наведено залежність сумарної поглиненої дози в ізоляції кабелю (Sample1) від товщини поліетиленової ізоляції (2, 4, 6 мм) та контрольну точку для ПВХ ізоляції товщиною 2 мм. Для PE спостерігається монотонне зниження сумарної дози зі збільшенням товщини. Така тенденція відповідає очікуваній фізиці перенесення електронів: зі зростанням товщини полімеру зростають втрати енергії на іонізацію та ефекти багаторазового розсіювання, що зменшує енерговклад у контрольному об'ємі ізоляції на заданій геометричній позиції [83].

Для PVC (2 мм) сумарна доза в ізоляції приблизно на 7.0% менше порівняно з PE (2 мм). Різниця узгоджується з відмінностями матеріальних параметрів (склад/густина), які впливають на поглинання енергії фотонної складової та вторинні процеси в полімері; відповідні табличні характеристики для полімерів наведені в NIST [76].

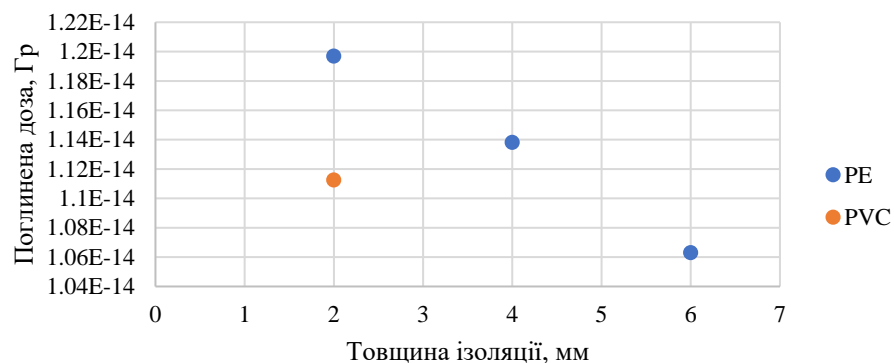


Рисунок 4.35 – Залежність сумарної поглиненої дози в ізоляції кабелю (Sample1) від товщини поліетиленової ізоляції (2, 4, 6 мм) та контрольне значення для ПВХ-ізоляції товщиною 2 мм

На рис. 4.36 показано сумарну поглинену дозу в центральній жилі (Sample2). Для PE залежність є значно більш крутою порівняно з ізоляцією. Такий характер спадання є фізично обґрунтованим: додаткова товщина ізоляції зсуває жилу далі від області максимальної щільності потоку вторинних електронів, а також збільшує ймовірність енергетичного виснаження та кутового розкиду електронів до досягнення провідника [83].

Для PVC (2 мм) сумарна доза в жилі приблизно на 9,5% менша відносно PE (2 мм), що підтверджує відмінність режиму формування поля в полімері при іншому складі ізоляції.

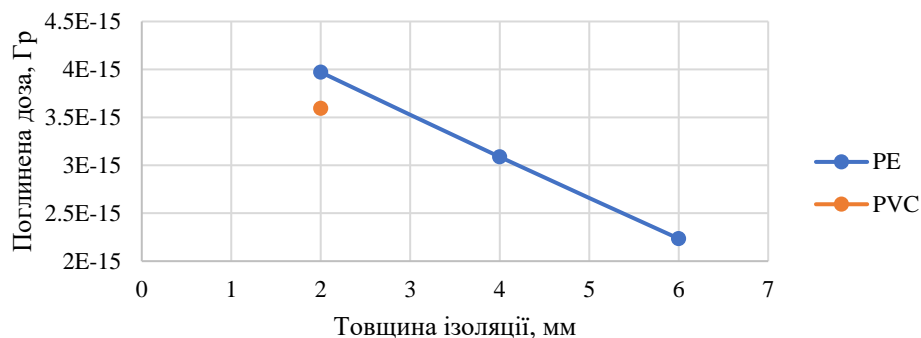


Рисунок 4.36 – Залежність сумарної поглиненої дози в центральній жилі кабелю (Sample2) від товщини поліетиленової ізоляції (2, 4, 6 мм) та контрольне значення для ПВХ-ізоляції товщиною 2 мм

На рис. 4.37 наведено порівняння сумарної дози в ізоляції та жилі. Видно, що зі збільшенням товщини ізоляції відбувається системне «відсікання» електронної складової на шляху до провідника, тоді як ізоляція залишається основним об'ємом енерговкладу в даній конфігурації.

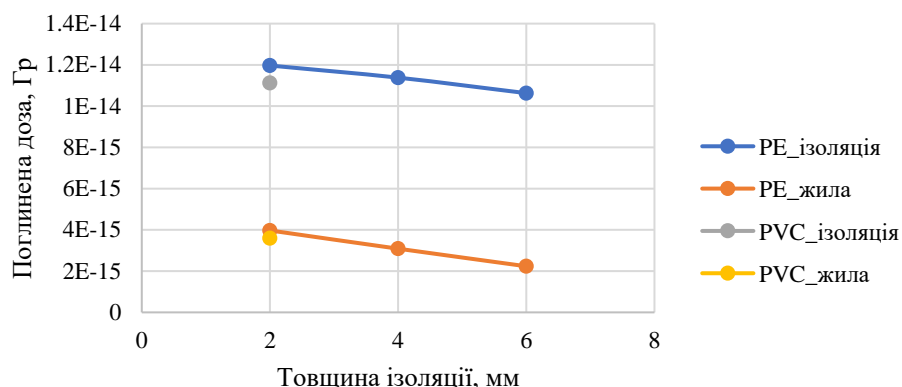


Рисунок 4.37 – Порівняння сумарної поглиненої дози в ізоляції (Sample1) та центральній жилі (Sample2) кабелю залежно від товщини поліетиленової ізоляції; додатково наведено контрольні точки для ПВХ-ізоляції товщиною 2 мм

Рис. 4.38 демонструє, що для ізоляції PE сумарна доза практично повністю визначається електронною компонентою. Візуально  $\gamma$ -внесок майже непомітний на лінійній шкалі, що є нормальним для даного режиму (переважання електронного енерговкладу при заданій енергії первинних електронів та геометрії).

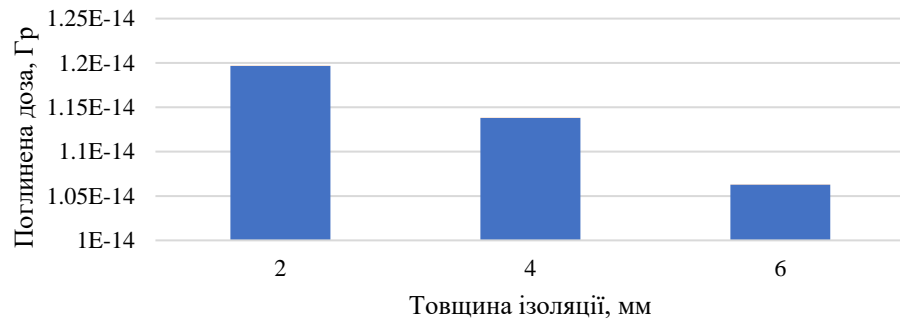


Рисунок 4.38 – Структура поглиненої дози в ізоляції кабелю (Sample1): внески електронної та  $\gamma$ -складових (stacked) залежно від товщини поліетиленової ізоляції (2, 4, 6 мм)

На рис. 4.39–4.42 показані розраховані значення поглинених доз в результаті моделювання опромінення кабелів в змішаному  $\beta$ - та  $\gamma$ -полі в реакційній камері.

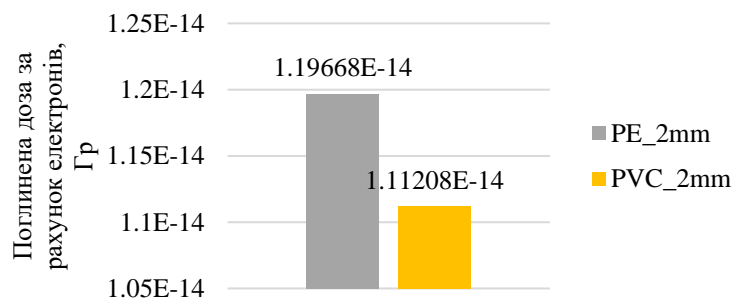


Рисунок 4.39 – Доза, поглинена в ізоляції за рахунок  $\beta$ -частинок

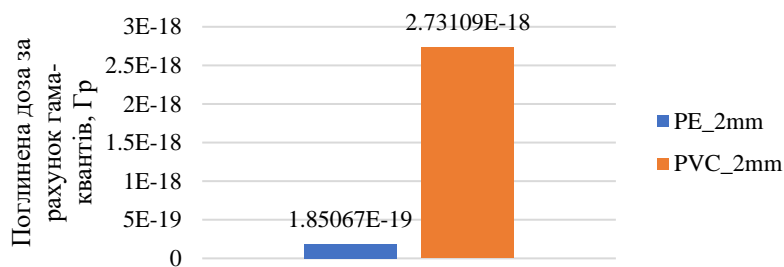


Рисунок 4.40 – Доза, поглинена в ізоляції за рахунок  $\gamma$ -квантів

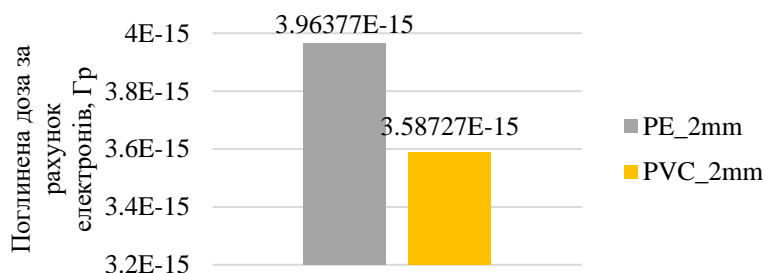


Рисунок 4.41 – Доза, поглинена в центральній жилі за рахунок  $\beta$ -частинок

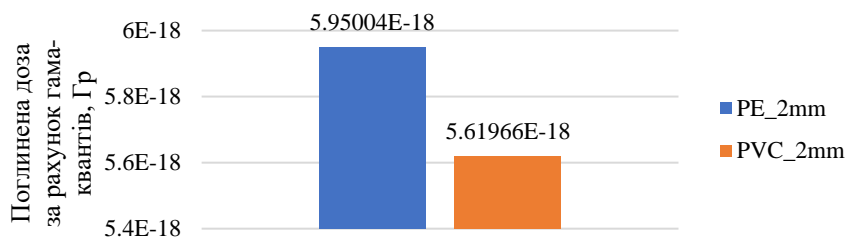


Рисунок 4.42 – Доза, поглинена в центральній жилі за рахунок гамма-квантів

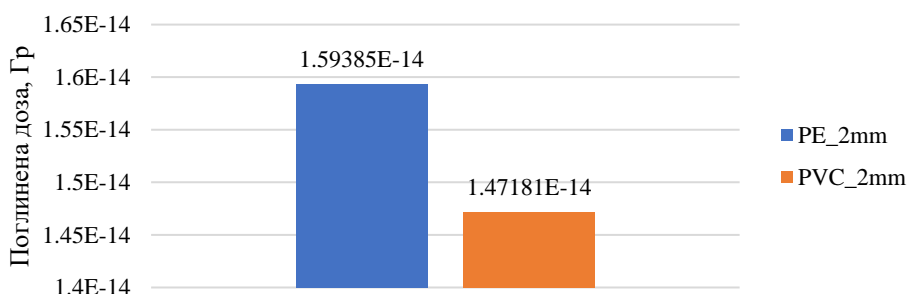


Рисунок 4.43 – Сумарна поглинена доза в кабелі під дією змішаного поля

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що домінуючий внесок у дозу як в ізоляції, так і в жилі формує електронна складова.

Перехід від PE 2 мм до PVC 2 мм у рамках моделі призводить до зменшення електронної дози:

- в ізоляції приблизно на 7%;
- в жилі приблизно на 10%.

Тобто PVC проявляє себе як дещо «ефективніша» ізоляція в сенсі зниження дозового навантаження на провідник за рахунок електронів.

Для  $\gamma$ -складової в ізоляції спостерігається істотне зростання при PVC, однак через надмалий абсолютний рівень це не змінює загальної дозової картини: сумарна доза визначається електронами.

Сумарна доза в кабелі для PVC 2 мм є нижчою приблизно на 8%, що узгоджується зі зменшенням електронної складової.

#### 4.2 Висновки до розділу

У четвертому розділі проведено комплексне чисельне моделювання просторово-енергетичних характеристик радіаційних полів та процесів їх взаємодії з конструкційними елементами кабельної продукції.

На основі отриманих результатів зроблено такі висновки:

1. Верифіковано розрахункову модель реакційної камери лінійного прискорювача електронів «Електроніка У-005» за допомогою методу Монте-Карло. Отримані спектральні розподіли електронів та гальмівного випромінювання корелюють з технічними параметрами установки та результатами проведених вимірювань, що підтверджує адекватність обраного інструментарію TOPAS (на базі Geant4) для вирішення задач радіаційної стійкості.

2. Встановлено закономірності формування змішаного поля всередині камери. Показано, що при енергіях первинних електронів 4–5 МеВ основна частка поглиненої дози формується електронною компонентою, проте внесок гальмівного  $\gamma$ -випромінювання забезпечує об'ємне опромінення зразків, нівелюючи ефекти повного поглинання електронів у масивних деталях.

3. Досліджено радіальну та кутову дивергенцію пучка, що дозволило визначити межі робочої зони з нерівномірністю дозового поля не більше 10%. Це є теоретичним обґрунтуванням для оптимального позиціонування об'єктів для проведення випробувань на радіаційну стійкість в реакційній камері прискорювача.

4. Порівняльний аналіз конфігурацій системи формування поля показав, що алюмінієві розсіювачі ефективно забезпечують кероване розширення електронного пучка, однак не формують необхідного рівня  $\gamma$ -складової без введення високоефективного конвертора. Найбільш раціональною для подальших кількісних розрахунків прийнято конфігурацію з двома алюмінієвими розсіювачами та вольфрамовою конверсійною мішенню з коефіцієнтом перекриття 0,5, яка забезпечує відтворюване змішане  $\beta$ - та  $\gamma$ -поле.

5. На прикладі моделювання випробувань кабельної продукції встановлено, що домінуючий внесок у поглинуту дозу як в ізоляції, так і в центральній жилі формує електронна складова; зі збільшенням товщини поліетиленової ізоляції сумарна доза знижується, причому у жилі спад є більш вираженим. Виявлено ефект зростання дози на межі поділу середовищ «полімер–мідь» за рахунок зворотного розсіювання електронів від важкої центральної жили, що може призводити до прискореної деградації прилеглого шару ізоляції.

6. Порівняльний аналіз матеріалів ізоляції (поліетилен та полівінілхлорид) показав, що при однаковій геометрії (товщина 2 мм), використання ПВХ призводить до зниження дози в ізоляції на  $\sim 7\%$  та в жилі на  $\sim 10\%$  порівняно з ПЕ. Це пояснюється вищою гальмівною здатністю ПВХ через наявність атомів хлору.

## 5 ПРАКТИЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ

### 5.1 Об'єкти та умови експериментальних досліджень

Експериментальні дослідження, результати яких наведені в цьому розділі, спрямовані на експериментальну перевірку положень, викладених у розділах 1–4 дисертації, щодо визначального впливу потужності дози іонізуючого випромінювання та матеріалу ізоляції на радіаційну стійкість кабельних ліній систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок [84 - 86].

Основним об'єктом досліджень є коаксіальний кабель типу РК 75-9-13 з поліетиленовою ізоляцією між центральною жилою та екраном. Додатково використано результати аналогічного випробування коаксіального кабелю з мінеральною ізоляцією (тип кабелю за маркуванням не встановлено), що дозволяє виконати порівняльний аналіз впливу матеріалу ізоляції на характер радіаційної деградації.

Основні параметри досліджуваних зразків:

- довжина зразка між точками підключення: 5 м;
- схема вимірювань: вимірювання струму між центральною жилою та екраном;
- прикладена напруга: 2 кВ постійного струму;
- середовище в реакційній камері: атмосферне повітря;
- температурний контроль: не здійснювався.

Опромінення проводилось у реакційній камері лінійного прискорювача електронів з енергією електронів у діапазоні 4-5 МеВ.

Формування радіаційного поля в реакційній камері лінійного прискорювача електронів здійснювалось із застосуванням комбінованої системи розсіювання та конверсії пучка. Первинний пучок прискорених електронів проходив через два алюмінієві розсіювачі, призначені для просторового розширення та часткової

деградації енергії електронів, після чого взаємодіяв з вольфрамовою конверсійною мішенню з коефіцієнтом перекриття 0,5, що забезпечувало одночасне формування інтенсивного електронного ( $\beta$ ) поля та гальмівного  $\gamma$ -випромінювання. Таким чином, зразки кабелів опромінювались у змішаному  $\beta$ - $\gamma$  радіаційному полі, характерному для умов, що можуть реалізовуватись у герметичній оболонці реакторних установок під час аварій.

Потужність поглиненої дози електронного випромінювання змінювалась у широкому діапазоні (до кількох сотень кГр/год), що відповідає консервативним сценаріям аварійних та післяаварійних умов експлуатації обладнання в герметичній оболонці реакторних установок [22, 25].

Контроль потужності поглиненої дози під час експериментів здійснювався за  $\beta$ -складовою радіаційного поля, що зумовлено особливостями застосованих дозиметричних засобів та високою інтенсивністю електронного компонента. При цьому  $\gamma$ -складова, сформована внаслідок гальмівного випромінювання у вольфрамовій мішені, безпосередньо не вимірювалась, але її наявність та внесок у загальний радіаційний вплив враховувались на рівні постановки експерименту та інтерпретації результатів. Такий підхід дозволяє розглядати отримані залежності як результати дії змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля з контрольованою та відтвореною електронною компонентою, що є методично коректним для дослідження функціональної деградації кабельної ізоляції.

## 5.2 Методика вимірювання струмів витоку ізоляції

Для оцінки радіаційної стійкості кабелів у даній роботі використано струм витоку між центральною жилою та екраном як інтегральний електрофізичний показник стану ізоляції. Такий підхід широко застосовується при кваліфікації кабельної продукції систем керування і контролю, оскільки працездатність таких кабелів визначається не досягненням електричного пробного, а збереженням достатньо високого опору ізоляції при робочій напрузі [27, 87].

Вимірювання струму протікань через ізоляцію здійснювалось за схемою з шунтуючим опором 1 МОм, представленою на рис. 5.1.

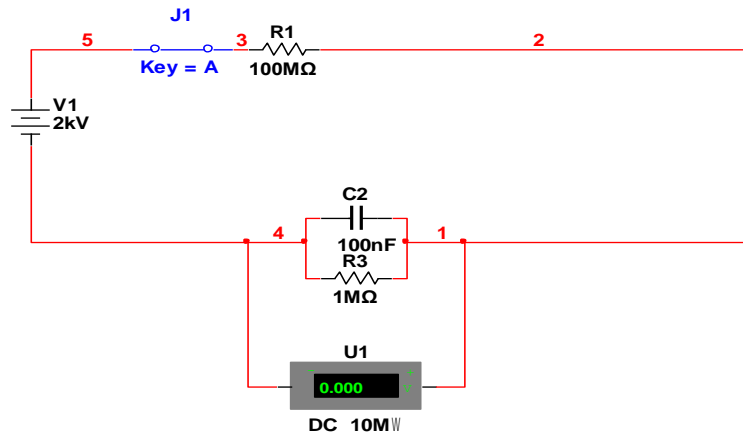


Рисунок 5.1 – Схема вимірювання струму протікань через ізоляцію

Вимірювання виконувались у трьох режимах:

1. без прикладеної напруги — для виявлення радіаційно-індукованої провідності (Radiation Induced Conductivity, RIC);
2. при прикладеній напрузі 2 кВ під час монотонного збільшення потужності дози;
3. при прикладеній напрузі 2 кВ під час зменшення потужності дози після досягнення максимального рівня опромінення.

Зміна потужності дози здійснювалась безперервно («на ходу»), з короткою витримкою та контролем показів у кожній контрольній точці. Така методика дозволяє дослідити як миттєву залежність струму від потужності дози, так і ефекти гістерезису, пов'язані з накопичувальною деградацією ізоляційного матеріалу [88].

### 5.3 Результати експериментальних вимірювань

#### 5.3.1 Результати експериментальних вимірювань для кабелю РК 75-9-13

За результатами випробування коаксіального кабелю РК 75-9-13 з поліетиленовою ізоляцією отримано залежності струму витoku від потужності поглиненої дози електронного випромінювання (рис. 5.2).

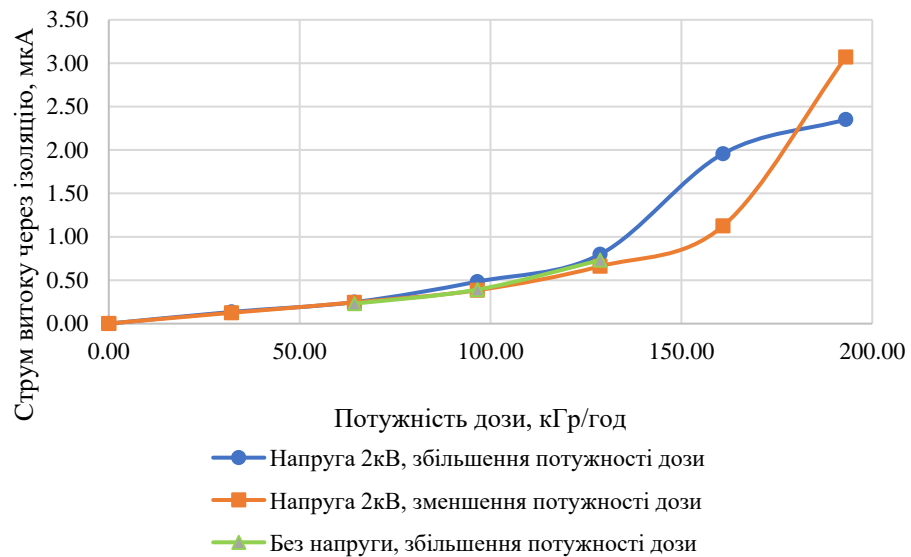


Рисунок 5.2 – Залежності струму витoku від потужності поглиненої дози для кабелю РК 75-9-13

У режимі без прикладеної напруги зафіксовано наявність ненульового струму, величина якого зростає зі збільшенням потужності дози. Це відповідає формуванню в поліетиленовій ізоляції радіаційно-індукованої провідності, зумовленої генерацією носіїв заряду внаслідок іонізації матеріалу [89].

При прикладеній напрузі 2 кВ залежність струму витoku має нелінійний характер. До певного рівня потужності дози спостерігається відносно плавне зростання струму, після чого відбувається різкий перехід у режим прискореного зростання. Порівняння гілок при збільшенні та зменшенні потужності дози виявляє чітко виражений гістерезис, що свідчить про наявність незворотних змін у структурі ізоляційного матеріалу.

### 5.3.2 Порівняльні результати для кабелю з мінеральною ізоляцією

Додатково проаналізовано результати випробування коаксіального кабелю з мінеральною ізоляцією між центральною жилою та екраном (точний тип кабелю за маркуванням не встановлено). Довжина зразка становила 5 м, напруга між провідниками — 2 кВ. Умови опромінення відповідали умовам дослідження кабелю РК 75-9-13.

Отримана залежність струму витоку від потужності поглиненої дози (рис. 5.3) має нелінійний характер, однак порогова область зростання струму зміщена в область значно вищих потужностей дози (приблизно 230–260 кГр/год). Максимальне зафіксоване значення струму витоку при потужності дози близько 300 кГр/год не перевищує 0,13 мкА.

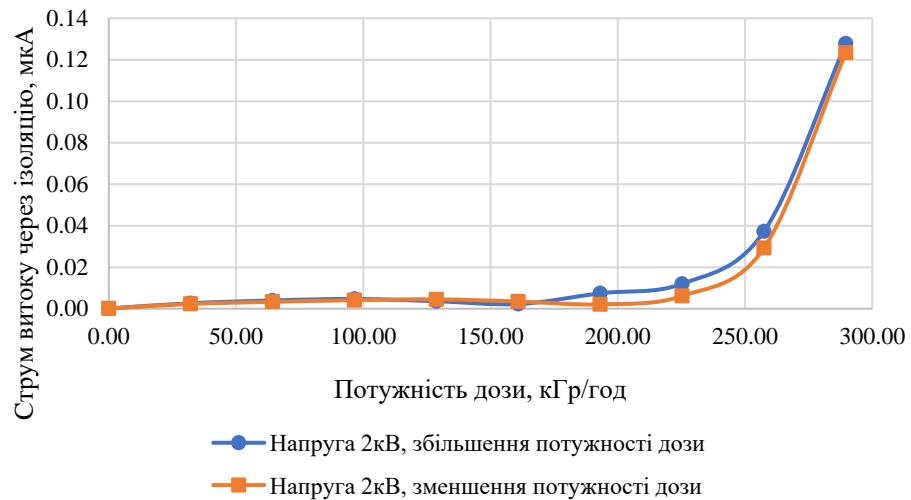


Рисунок 5.3 – Залежності струму витоку від потужності поглиненої дози для коаксіального кабелю з мінеральною ізоляцією (тип не ідентифікований за маркуванням)

Гістерезис між гілками при збільшенні та зменшенні потужності дози виражений значно слабше, ніж для поліетиленової ізоляції, що узгоджується з відсутністю радіаційно-хімічної деструкції, характерної для полімерних матеріалів [22].

#### 5.4 Аналіз та фізична інтерпретація результатів

Отримані експериментальні результати свідчать, що електрофізичні властивості ізоляції в умовах інтенсивного змішаного опромінення визначаються сумісною дією двох механізмів.

Першим механізмом є радіаційно-індукована провідність (RIC), яка проявляється безпосередньо під час опромінення та визначається швидкістю генерації носіїв заряду. Для цього режиму характерна степенева залежність ефективної провідності від потужності дози  $\sigma \propto P_D^m$  з показником  $m$  порядку 1–2 [88, 89].

Другим механізмом є накопичувальна радіаційна деградація ізоляційного матеріалу. Для поліетилену вона включає радіаційно-окиснювальну деструкцію макромолекулярних ланцюгів, формування пасток заряду та зміну морфології матеріалу, що особливо інтенсивно відбувається за наявності кисню та при підвищеній температурі [85].

#### 5.5 Співставлення експерименту з розрахунково-експериментальною моделлю

Необхідно зазначити, що співставлення експериментальних результатів з розрахунково-експериментальною моделлю виконувалось для умов впливу змішаного  $\beta$ – $\gamma$  радіаційного поля. Хоча контроль потужності дози в експериментах здійснювався за електронною ( $\beta$ ) складовою, наявність  $\gamma$ -випромінювання, сформованого вольфрамовою конверсійною мішенню, відіграла важливу роль у формуванні накопичувальних радіаційних пошкоджень ізоляції. У цьому випадку  $\beta$ -складова визначає миттєву радіаційно-індуковану провідність, тоді як  $\gamma$ -складова забезпечує об'ємний та квазіоднорідний внесок у сумарну поглинену дозу [84].

Для співставлення експериментальних результатів з моделлю використано напівемпіричний підхід радіаційно-індукованої електропровідності, згідно з яким ефективна провідність ізоляції визначається степеневою залежністю від потужності дози. Оскільки для фіксованої геометрії кабелю струм витoku пропорційний ефективній провідності, аналіз експериментальних залежностей дозволяє оцінити ефективний показник ступеня  $m$ .

Для кабелю РК 75-9-13 у діапазоні потужностей дози до приблизно 130 кГр/год отримано  $m \approx 1,5$ –2, що відповідає режиму домінування RIC. У

діапазоні 130–160 кГр/год спостерігається різке зростання ефективного показника до  $m \approx 4$ , що інтерпретується як перехід у режим, де визначальним стає внесок накопичувальної деградації ізоляції. Ці результати узгоджуються з чисельним моделюванням розподілу потужності дози в ізоляції, виконаним у розділі 4 [78 - 81].

Саме дія змішаного  $\beta$ - $\gamma$  поля дозволяє пояснити експериментально зафіксований гістерезис залежності струму витоку від потужності дози, а також зміну ефективного показника ступеня  $m$  при переході через порогову область. У разі дії лише  $\beta$ -випромінювання очікується домінування оборотної радіаційно-індукованої провідності, тоді як наявність  $\gamma$ -складової призводить до накопичення необоротних дефектів та радіаційно-окиснювальної деградації полімерної ізоляції. Це узгоджується з результатами експериментів для кабелю РК 75-9-13 та з суттєво менш вираженими необоротними ефектами для кабелю з мінеральною ізоляцією.

#### 5.6 Визначення критичної потужності дози для втрати ізоляційної здатності

Для кількісної оцінки радіаційної стійкості кабелів у роботі введено функціональний критерій втрати ізоляційної здатності, який базується на допустимому струмі витоку при робочій напрузі. За критичний прийнято рівень струму витоку  $I_{кр} = 1$  мкА при напрузі 2 кВ, що відповідає еквівалентному опору ізоляції  $2 \cdot 10^9$  Ом для зразка довжиною 5 м [87].

Для кабелю РК 75-9-13 встановлено, що критичний рівень струму досягається при потужності дози приблизно 135 кГр/год при зростанні та близько 155 кГр/год при зменшенні потужності дози. З урахуванням гістерезису та експериментальної невизначеності критичну потужність дози доцільно оцінювати як  $P_{Дкр} \approx (145 \pm 15)$  кГр/год.

Для кабелю з мінеральною ізоляцією в межах дослідженого діапазону потужностей дози до 300 кГр/год критерій функціональної втрати ізоляційної здатності не досягнуто, що дозволяє зробити висновок про значно вищу радіаційну стійкість такої ізоляції.

## 5.7 Практичне значення отриманих результатів

Отримані експериментальні результати підтверджують, що при високих потужностях дози, характерних для аварійних режимів, визначальним фактором деградації кабельних ліній є не лише сумарна поглинена доза, а й потужність дози та матеріал ізоляції [86].

Показано, що полімерна ізоляція (поліетилен) в умовах інтенсивного електронного опромінення за наявності кисню та без температурного контролю демонструє відносно низьку радіаційну стійкість, тоді як мінеральна ізоляція забезпечує істотно більший запас працездатності. Використання струму витоку як функціонального критерію дозволяє безпосередньо пов'язати результати експериментальних досліджень з вимогами до безпечної експлуатації обладнання ядерних енергоустановок та може бути застосоване при розробці і коригуванні методик кваліфікаційних випробувань кабельної продукції.

Слід підкреслити, що переважна більшість кваліфікаційних та дослідницьких випробувань кабельної продукції, результати яких наведені в літературі, виконувалась з використанням ізотопних  $\gamma$ -джерел на основі  $^{60}\text{Co}$  або  $^{137}\text{Cs}$  [22, 25]. Такий підхід не враховує наявність електронної ( $\beta$ ) складової радіаційного поля, яка, як показано в розділі 2 дисертації, є характерною для реальних умов аварійного та післяаварійного опромінення в герметичній оболонці реакторних установок.

Отримані в даній роботі результати демонструють, що випробування кабелів у змішаному  $\beta$ - $\gamma$  полі дозволяє виявити ефекти, які залишаються незафіксованими при традиційних  $\gamma$ -випробуваннях з низькою потужністю дози. Зокрема, наявність інтенсивної  $\beta$ -складової призводить до зростання миттєвого струму витоку та суттєвого зниження функціонального запасу ізоляційної здатності при високих потужностях дози. Це підтверджує необхідність урахування змішаного характеру радіаційного поля при експериментальному обґрунтуванні радіаційної стійкості кабельних ліній систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення достовірності оцінки радіаційної стійкості кабельної продукції та елементів обладнання ядерних енергоустановок шляхом переходу від суто консервативних  $\gamma$ -випробувань до фізично коректного відтворення аварійних умов опромінення із урахуванням змішаного  $\beta$ - $\gamma$  характеру радіаційного поля.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Виконано системний аналіз чинної нормативної та методичної бази кваліфікації обладнання АЕС (ІЕС/ІЕЕЕ та національні нормативні документи), який показав, що традиційні підходи, засновані на ізотопних джерелах  $^{60}\text{Co}$ , мають виражений консервативний характер і не повною мірою відображають реальні фізичні умови аварійного опромінення під ГО, зокрема через недооблік електронної ( $\beta$ ) складової.

2. Для умов аварії з повною втратою теплоносія (типу LOCA) в реакторних установках ВВЕР виконано чисельне моделювання та аналіз спектральних характеристик аварійного випромінювання, побудовано розподіли виходу  $\gamma$ -квантів і  $\beta$ -частинок та сформульовано вимоги до випробувального обладнання, що забезпечують коректне відтворення поверхневих пошкоджень та перевірку екранованих елементів.

3. Вперше розроблено та реалізовано метод формування керованих змішаних  $\beta$ - та  $\gamma$ -полів із контрольованим компонентним складом (двоетапна схема з використанням напівпрозорої вольфрамової конверсійної мішені) на базі експериментального стенду з лінійним прискорювачем електронів, який забезпечує формування інтенсивних радіаційних полів у великому об'ємі.

4. Забезпечено метрологічну придатність експериментів в умовах інтенсивних (у т.ч. імпульсних) полів: технічно реалізовано метод «оберненого включення» промислових пропорційних лічильників у струмовому режимі та експериментально підтверджено лінійну залежність потужності поглинутої дози

від струму пучка; розрахункові значення потужності дози узгоджуються з результатами калориметрії та плівкової дозиметрії в межах 6–10%, що є достатнім для задач технологічної дозиметрії випробувань.

5. Вперше проведено комплексне чисельне моделювання (метод Монте-Карло) просторово-енергетичних характеристик змішаного  $\beta$ - та  $\gamma$ -поля в реакційній камері радіаційної установки та процесів взаємодії випромінювання з елементами кабельної продукції; верифіковано модель реакційної камери, підтверджено адекватність використання TOPAS (на базі Geant4) для задач оцінки радіаційної стійкості та визначено межі робочої зони з нерівномірністю дозового поля не більше 10%.

6. Експериментально встановлено, що електрофізичні властивості полімерної ізоляції в умовах інтенсивного змішаного опромінення визначаються сумісною дією радіаційно-індукованої провідності (миттєвий ефект, залежний від потужності дози) та накопичувальної радіаційної деградації (необоротні зміни матеріалу), накладання яких зумовлює появу характерного перегину на залежностях та формування гістерезису; для кабелів з мінеральною ізоляцією необоротні ефекти виражені суттєво слабше через відсутність хімічних механізмів деградації.

7. Запропоновано та експериментально обґрунтовано функціональний критерій втрати ізоляційної здатності кабелів за струмом витoku ( $I_{кр} = 1 \text{ мкА}$  при  $U_{вим} = 2 \text{ кВ}$ ). Для кабелю РК 75-9-13 встановлено критичну потужність дози  $P_{Дкр} = (145 \pm 15) \text{ кГр/год}$ , тоді як для кабелю з мінеральною ізоляцією в межах дослідженого діапазону потужностей дози до 300 кГр/год критичний рівень не досягався, що підтверджує вищий функціональний запас стійкості такого типу ізоляції.

Отримані результати підтверджують, що випробування у змішаному  $\beta$ – $\gamma$  полі дозволяє виявляти деградаційні ефекти, які можуть залишатися незафіксованими при традиційних  $\gamma$ -випробуваннях з низькою потужністю дози; отже, облік змішаного характеру поля є необхідним для коректного

експериментального обґрунтування радіаційної стійкості кабельних ліній систем, важливих для безпеки ядерних енергоустановок.

Практичне значення результатів полягає у можливості використання запропонованого критерію та визначених критичних потужностей дози як інженерних вхідних даних для задач кваліфікації, оптимізації програм випробувань і обґрунтування продовження терміну експлуатації кабельних ліній та спорідненого обладнання атомних електростанцій.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку: закон України №39/95-ВР від 8.02.1995. Відомості Верховної Ради України. 1995. № 12, ст. 81. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/39/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 10.10.2024).

2. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21.04.2023 № 373-р. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text> (дата звернення: 15.05.2024).

3. Про затвердження Загальних положень безпеки атомних станцій: наказ Держатомрегулювання № 162 від 19.11.2007. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-08#Text> (дата звернення: 30.05.2025).

4. Про затвердження Норм радіаційної безпеки України (НРБУ-97) : наказ МОЗ України № 208 від 14.07.1997 [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/v0208282-97> (дата звернення: 25.02.2026).

5. Про дозвільну діяльність у сфері використання ядерної енергії: Закон України №1370-XIV від 11.01.2000. Відомості Верховної Ради України. 2000. № 9, ст. 68. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1370-14#Text> (дата звернення: 22.02.2026).

6. Slugen V., Simeg Veternikova J., Domankova M., et al. VVER long-term operation – A review based on the material studies results from past and ongoing EU-supported research projects. Nuclear Engineering and Design. 2025. Vol. 435. Art. 113949. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2025.113949.

7. Бережний А.І., Севбо О.Є., Семенюк І.О. Розробка вимог до використання імовірнісних методів для оптимізації технічного обслуговування та ремонтів обладнання. Ядерна та радіаційна безпека. 2009. Т. 12, № 3(43). С. 40–45. DOI: 10.32918/nrs.2009.12-3(43).08.

8. СОУ НАЕК 179:2025. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Кваліфікація обладнання енергоблоків атомних електростанцій. Загальні вимоги. АТ «НАЕК «Енергоатом». Київ : АТ «НАЕК «Енергоатом», 2025. 25 с.

9. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Convention on Nuclear Safety. INFCIRC/449. Vienna: IAEA, 1994. 9 p. [Електронний ресурс] URL: [https://disasterlaw.ifrc.org/sites/default/files/media/disaster\\_law/2020-08/I276EN.pdf](https://disasterlaw.ifrc.org/sites/default/files/media/disaster_law/2020-08/I276EN.pdf) (дата звернення: 12.04.2024).

10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Equipment Qualification in Operational Nuclear Power Plants: Upgrading, Preserving and Reviewing. IAEA Safety Reports Series No. 3 (STI/PUB/1052). Vienna: IAEA, 1998. 120 p. ISBN 9201010982.

11. Остапенко И.А., Горанчук Д.В., Косяк Д.Н. Методы оценки текущего состояния квалификации оборудования АЭС Украины. Восточно-Европейский журнал передовых технологий (Eastern-European Journal of Enterprise Technologies). 2012. Vol. 3, No. 8(57). P. 8–11. DOI: 10.15587/1729-4061.2012.4067.

12. ПМ-Д.0.03.476-09. Программа работ по квалификации оборудования энергоблоков АЭС ГП «НАЭК «Энергоатом». Офиц. изд. К. : НАЭК, 2009. 56 с. (Стандарты ГП «НАЭК «Энергоатом»).

13. СОУ НАЕК 181:2025. Інженерна, наукова та технічна підтримка. Кваліфікація обладнання систем, важливих для безпеки енергоблоків атомних електростанцій, на умови навколишнього середовища. Загальні вимоги. АТ «НАЕК «Енергоатом». Київ : АТ «НАЕК «Енергоатом», 2025. 28 с.

14. НП 306.2.227-2020. Загальні вимоги безпеки до улаштування та експлуатації обладнання й трубопроводів атомних станцій : затв. наказом Держатомрегулювання України від 04.08.2020 № 319 ; зареєстр. в Мін'юсті України 30.09.2020 за № 955/35238. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0955-20> (дата звернення: 26.02.2026).

15. СОУ НАЕК 158:2020. Обеспечение технической безопасности. Технические требования к устройству и безопасной эксплуатации оборудования и

трубопроводов атомных электрических станций с реакторами ВВЭР. Киев: ГП «НАЭК «Энергоатом», 2020. 154 с. [Электронный ресурс] URL: [https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/sou/SOU\\_NAEK\\_158\\_2020.pdf](https://old.energoatom.com.ua/parts/pdf-file/sou/SOU_NAEK_158_2020.pdf) (дата звернення: 26.02.2026).

16. НП 306.2.208-2016. Вимоги до сейсмостійкого проектування та оцінки сейсмічної безпеки енергоблоків атомних станцій : затв. наказом Держатомрегулювання України від 17.10.2016 № 175 ; зареєстр. в Мін'юсті України 07.11.2016 за № 1449/29579. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z1449-16> (дата звернення: 26.02.2026).

17. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Хрін Т.В. Проблеми радіаційних випробовувань кабелів АЕС на установці ІЯД. Вопросы атомной науки и техники. 2007. № 6. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (91). С. 128–130. [Електронний ресурс] URL: [https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT\\_2007\\_6/article\\_2007\\_6\\_128.pdf](https://vant.kipt.kharkov.ua/ARTICLE/VANT_2007_6/article_2007_6_128.pdf) (дата звернення: 26.02.2026).

18. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Assessing and Managing Cable Ageing in Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-3.6 (STI/PUB/1554). Vienna : IAEA, 2012. 96 p. ISBN 978-92-0-128510-2.

19. U2.01/02/D03-T1.3-01-A. Consortium Tecnatom-Nuclear Research Institute. The Current State of The Ukrainian Qualification System in Comparison with European Countries. 2006. 107 p.

20. U2.01/02/D05-T1.5-02-A1. Consortium Tecnatom-Nuclear Research Institute. Methodology of Radiation Parameters Determination for Equipment Qualification. 2006. 172 p.

21. Celina M., Linde E., Brunson D., Quintana A., Giron N. Overview of accelerated aging and polymer degradation kinetics for combined radiation-thermal environments. Polymer Degradation and Stability. 2019. Vol. 166. P. 353–378. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2019.06.007.

22. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Assessment and Management of Ageing of Major Nuclear Power Plant Components Important to Safety: In-containment Instrumentation and Control Cables. IAEA-TECDOC-1188. Vols I–II. Vienna : IAEA, 2000. 198 p. (Vol. I — 100 p.; Vol. II — 98 p.).

23. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Benchmark Analysis for Condition Monitoring Test Techniques of Aged Low Voltage Cables in Nuclear Power Plants: Final Results of a Coordinated Research Project. IAEA-TECDOC-1825. Vienna : IAEA, 2017. 194 p. ISBN 978-92-0-107317-4. [Електронний ресурс] URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1825web.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).

24. Plaček V., Kohout T. Comparison of cable ageing. Radiation Physics and Chemistry. 2010. Vol. 79, Issue 3. P. 371–374. DOI: 10.1016/j.radphyschem.2009.08.031.

25. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION; INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEC/IEEE 60780-323:2016. Nuclear facilities – Electrical equipment important to safety – Qualification. Geneva : IEC, 2016. 65 p. ISBN 9782832231685.

26. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 323-2003 (R2008). IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations. New York : IEEE, 2004. 26 p. ISBN 978-0-7381-3812-1.

27. INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Std 383-2023. IEEE Standard for Qualifying Electric Cables and Splices for Nuclear Facilities. IEEE, 2023. 31 p. ISBN 979-8-8557-0140-1.

28. Випробувальний центр (ВЦ) на базі ПрАТ «КЦКБА». КЦКБА. [Електронний ресурс] URL: [https://kcdbv.com/testing\\_centre](https://kcdbv.com/testing_centre) (дата звернення: 26.02.2026).

29. Томчай С.П. Розробка методів підвищення працездатності систем автоматизованого захисту обладнання АЕС : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14. С. П. Томчай ; Одеський держ. політехнічний ун-т. Одеса, 1996. 14 с.

30. Сахно В.І. Створення електрофізичних радіаційних установок та дослідження змін властивостей матеріалів при промислових радіаційних

технологіях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.16. В. І. Сахно ; Ін-т ядер. дослідж. НАН України. К., 2009. 36 с.

31. Сахно О.В. Дослідження і розробка методів та технічних засобів радіаційних випробувань обладнання АЕС на електрофізичних установках : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14. НАН України, Ін-т ядер. дослідж. Київ, 2008. 120 с.

32. Ковалінська Т.В. Дослідження та модернізація радіаційної установки ІЯД для функціональних випробувань обладнання та нових матеріалів АЕС : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.14. НАН України, Ін-т ядер. дослідж. Київ, 2011. 18 с.

33. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Остапенко І.А., Федоров Д.О. Уроки аварії на АЕС Fukushima-Daichi для безпеки ядерної енергетики України. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2022. № 3(69). С. 107–114. DOI: 10.20535/1813-5420.3.2022.272090.

34. Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Верінов О.М., Філатов В.І., Остапенко І.А. Підвищення безпеки ядерної енергетики з урахуванням уроків важких аварій. Ядерна та радіаційна безпека. 2022. № 3(95). С. 76–81. DOI: 10.32918/nrs.2022.3(95).08.

35. Скалозубов В.І., Кондратюк В.А., Письменний Є.М., Дорож О.А., Остапенко І.А. Метод кваліфікації модернізацій активних систем безпеки для запобігання гідродинамічній нестійкості. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 2(72). С. 95–99. DOI: 10.20535/1813-5420.2.2023.279688.

36. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Specific Safety Requirements. Vienna : IAEA, 2016. 71 p. (STI/PUB/1715). ISBN 978-92-0-109315-8.

37. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-30. Vienna : IAEA, 2014. 24 p. (STI/PUB/1639). ISBN 978-92-0-115413-2.

38. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Design of Reactor Containment Systems for Nuclear Power Plants : Safety Guide. Vienna : International

Atomic Energy Agency, 2004. 127 p. (Safety Standards Series, ISSN 1020–525X ; No. NS-G-1.10). STI/PUB/1189. ISBN 92–0–103604–3.

39. U2.01/02/D05-T1.5-02-A1. Consortium Tecnatom-Nuclear Research Institute. Environmental Qualification Methodology for Safety-Related Equipment. 2006. 172 p.

40. Lamarsh J.R., Baratta A.J. Introduction to Nuclear Engineering: International Edition. Pearson Education, Limited, 2011. 783 p.

41. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Methodology for the Management of Ageing of Nuclear Power Plant Components Important to Safety. Technical Reports Series No. 338. Vienna : IAEA, 1992. ISBN 92-0-102592-0.

42. Knoll G.F. Radiation Detection and Measurement. 4th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2010. 864 p.

43. National Nuclear Data Center (NNDC). Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF). Brookhaven National Laboratory. URL: <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf/> (дата звернення: 11.02.2026)

44. IAEA Nuclear Data Section. Livechart of Nuclides. International Atomic Energy Agency. URL: <https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html> (дата звернення: 11.02.2026).

45. Каденко І.М., Плюйко В.А. Фізика атомного ядра та частинок: підручник. Київ. нац. ун-т ім. Тараса Шевченка. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ : Київський університет, 2019. 463 с. ISBN 978-966-433-022-2.

46. Soffer L., Burson S.B., Ferrell C.M., Lee R.Y., Ridgely J.N. Accident Source Terms for Light-Water Nuclear Power Plants. NUREG-1465. Washington, DC : U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1995. 38 p.

47. Bielajew A.F. Fundamentals of the Monte Carlo method for neutral and charged particle transport [Електронний ресурс] The University of Michigan, Department of Nuclear Engineering and Radiological Sciences. Ann Arbor, MI : The University of Michigan, 2020. 356 p. URL: <https://websites.umich.edu/~nersb590/CourseLibrary/MCbook.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).

48. L'Ecuyer P. Random Number Generation. Handbook of Computational Statistics : Concepts and Methods. eds. J. E. Gentle, W. K. Härdle, Y. Mori. 2nd ed. Berlin; Heidelberg : Springer, 2012. P. 35–71. DOI: 10.1007/978-3-642-21551-3\_3.

49. Lilley J.S. Nuclear Physics: Principles and Applications. Repr. John Wiley & Sons, 2013. 416 p. ISBN 978-1-118-72332-6.

50. International Commission on Radiation Units and Measurements. Report 85: Fundamental Quantities and Units for Ionizing Radiation. Journal of the ICRU. 2011. Vol. 11, Issue 1. P. 1–31. DOI: 10.1093/jicru/ndr011.

51. Krane K.S. Introductory Nuclear Physics. 3rd ed. New York : Wiley, 1987. 864 p. ISBN 978-0-471-80553-3.

52. Tabata T., Andreo P., Shinoda K. An analytic formula for the extrapolated range of electrons in condensed materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 1996. Vol. 119, No. 4. P. 463–470. DOI: 10.1016/S0168-583X(96)00687-8.

53. Gillen K.T., Clough R.L. Time-temperature-dose rate superposition: A methodology for extrapolating accelerated radiation aging data to low dose rate conditions. Polymer Degradation and Stability. 1989. Vol. 24, No. 2. P. 137–168. DOI: 10.1016/0141-3910(89)90108-0.

54. Barnaby H.J. Total-Ionizing-Dose Effects in Modern CMOS Technologies. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2006. Vol. 53, No. 6. P. 3103–3121. DOI: 10.1109/TNS.2006.885952.

55. Subudhi M. Literature Review of Environmental Qualification of Safety-Related Electric Cables. NUREG/CR-6384. Vol. 1, Pts. 1–2. Upton, NY : Brookhaven National Laboratory, 1996. Prepared for U.S. Nuclear Regulatory Commission. 305 p.

56. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 60544-2:2012. Electrical insulating materials - Determination of the effects of ionizing radiation on insulating materials - Part 2: Procedures for irradiation and test. Geneva : IEC, 2012. 45 p.

57. Про затвердження державних санітарних правил «Основні санітарні правила забезпечення радіаційної безпеки України» : наказ МОЗ України від

02.02.2005 № 54. База даних «Законодавство України». Верховна Рада України. [Електронний ресурс] URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0552-05> (дата звернення: 25.02.2026).

58. Сахно В.І., Вишневський І.М., Халова Н.В., Томчай С.П. Радіаційно-технологічна установка з лінійним прискорювачем електронів НЦ «ІЯД» НАН України. Матеріали щорічної наукової конференції Інституту ядерних досліджень НАН України (Київ, 27–30 січня 1998 р.). за ред. Є. М. Вишневського. Київ : Ін-т ядерних досліджень НАН України, 1998. С. 111. (INIS-UA--045).

59. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Хрін Т.В., Халова Н.В. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2007. № 1(19). С. 140–144.

60. Зелінський А.Г., Сахно О.В., Томчай С.П. та інш. Розробка та дослідження параметрів датчика струму пучка електронів радіаційної установки ІЯД. Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. Київ, 2003. №2(10). С. 146-149.

61. Зелинский А.Г. Разработка технических средств измерения энергии ускоренных электронов. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика радиационных повреждений и явлений в твердых телах. 2008. № 2. С. 191–192.

62. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В. та інш. Система вимірювання розподілу полів випромінювання на радіаційній установці ІЯД. Збірник наукових праць Інституту ядерних досліджень. 2004. № 2(13). С. 159–162.

63. Сахно В.І. Діагностика пучка в радіаційно-технологічній установці з лінійним прискорювачем електронів. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-физические исследования. 1999. № 4(35). С. 66–67.

64. Вишневський І.М., Сахно В.І., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Хрін Т.В., Халова Н.В. Спеціалізований стенд для функціональних випробувань кабельних виробів АЕС. Ядерна фізика та енергетика. 2007. № 1(19). С. 140–144.

65. Хрін Т.В. Звіт по темі «Дослідження фізичних процесів і розробка засобів контролю та діагностики потужних радіаційних полів експериментальної

установки ІЯД НАН України» : звіт про НДР. № держреєстрації 0107U007079. № 0208U004792. Київ, 2008. 40 с.

66. Бібік Т.В., Остапенко І.А., Гончарук В.Г. Методика отримання іонізуючого випромінювання на основі ефекту гальмівного випромінювання. Енергетика: економіка, технології, екологія. № 4. 2023. С. 97–102. DOI: 10.20535/1813-5420.4.2023.290936.

67. Вишневський І.М., Хрін Т.В., Сахно В.І., Сахно О.В., Зелінський А.Г., Томчай С.П., Халова Н.В. Дослідження розсіяного випромінювання лінійного прискорювача електронів. Ядерна фізика та енергетика. 2007. № 2(20). С. 126–130.

68. Остапенко І.А., Ковалінська Т.В., Зелінський А.Г., Сахно В.І. Характеристики лічильника СИ5007 в оберненому включенні. Науковий вісник Ужгородського університету. Серія: Фізика. 2015. Вип. 38. С. 141–148. [Електронний ресурс] URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuufiz\\_2015\\_38\\_21](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvuufiz_2015_38_21) (дата звернення: 26.02.2026).

69. Ковалінська Т.В., Остапенко І.А., Сахно В.І. Технологія рівномірного електронного опромінення промислових виробів великих габаритів. Ядерна фізика та енергетика. 2016. Т. 17, № 2. С. 199–203. DOI: 10.15407/jnpae2016.02.199.

70. Leo W. R. Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments : A How-to Approach. 2nd ed. Berlin; Heidelberg : Springer-Verlag, 1994. XVIII, 382 p. ISBN 978-3-540-57280-0.

71. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Dosimetry for Radiation Processing: Final Report of the Co-ordinated Research Project on Characterization and Evaluation of High Dose Dosimetry Techniques for Quality Assurance in Radiation Processing. IAEA-TECDOC-1156. Vienna : IAEA, 2000. 140 p. ISSN 1011-4289.

72. Attix F. H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. New York : Wiley, 1986. XXI, 607 p. ISBN 978-0-471-01146-0.

73. Turner J. E. Atoms, Radiation, and Radiation Protection. 3rd ed. Berlin : Wiley-VCH, 2007. XX, 586 p. ISBN 978-3-527-40606-7.

74. Humphries S., Jr. Charged Particle Beams. New York : Wiley, 1990. XV, 834 p. ISBN 978-0-471-60014-5.

75. ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement. Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995). 1st ed. Geneva : ISO, 2008. 120 p.

76. National Institute of Standards and Technology. ESTAR: Stopping-Power and Range Tables for Electrons. [Електронний ресурс] URL: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html> (дата звернення: 26.02.2026).

77. Ковалінська Т.В. Використання іонізуючого випромінювання в інноваційних технологіях : дис. ... д-ра техн. наук : 01.04.16 – фізика ядра, елементарних частинок і високих енергій. Ін-т ядерних дослідж. НАН України. Київ, 2021. 392 с.

78. Perl J., Shin J., Schumann J., Faddegon B., Paganetti H. TOPAS: An innovative proton Monte Carlo platform for research and clinical applications. Medical Physics. 2012. Vol. 39, No. 11. P. 6818–6837. DOI: 10.1118/1.4758060.

79. TOPAS MC Inc. TOPAS User Guide: documentation for TOPAS Tool for Particle Simulation. Version 3.9. 2024. [Електронний ресурс] URL: <https://www.topasmc.org/user-guides> (дата звернення: 25.02.2026).

80. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. Geant4 – a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2003. Vol. 506, No. 3. P. 250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.

81. Allison J., Amako K., Apostolakis J., et al. Recent developments in Geant4. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. 2016. Vol. 835. P. 186–225. DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.125.

82. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIATION UNITS AND MEASUREMENTS. Radiation Dosimetry: Electron Beams with Energies Between 1 and 50 MeV. ICRU Report 35. Bethesda, MD : ICRU Publications, 1984. X, 157 p. ISBN 0-913394-29-7.

83. Zyla P. A., et al. (Particle Data Group). Review of Particle Physics. Progress of Theoretical and Experimental Physics. 2020. Vol. 2020, Issue 8. 083C01. DOI: 10.1093/ptep/ptaa104.

84. Gillen K. T., Clough R. L. Time-temperature-dose rate superposition: A methodology for extrapolating accelerated radiation aging data to low dose rate conditions. Polymer Degradation and Stability. 1989. Vol. 24, No. 2. P. 137–168. DOI: 10.1016/0141-3910(89)90108-0.

85. Clough R. L. High-energy radiation and polymers: A review of commercial processes and emerging applications. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2001. Vol. 185, Issues 1–4. P. 8–33. DOI: 10.1016/S0168-583X(01)00966-1.

86. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Accident Management Programmes for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Standards Series No. SSG-54. Vienna : IAEA, 2019.

87. International Electrotechnical Commission. IEC 60544-1:2013. Electrical insulating materials – Determination of the effects of ionizing radiation – Part 1: Radiation interaction and dosimetry. Geneva : IEC, 2013. 66 p. ISBN 9782832208946.

88. Celina M., Gillen K. T., Wise J., Clough R. L. Anomalous aging phenomena in a crosslinked polyolefin cable insulation. Radiation Physics and Chemistry. 1996. Vol. 48, No. 5. P. 613–626. DOI: 10.1016/0969-806X(96)00083-7.

89. Kasap S. O. Photoconductivity: Fundamental Concepts. Photoconductivity and Photoconductive Materials: Fundamentals, Techniques and Applications. ed. by S. O. Kasap. John Wiley & Sons, 2022. Ch. 1. DOI: 10.1002/9781119579182.ch1.