

DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.058

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В НЕЙТРОННІЙ РАДІОГРАФІЇ

Прохорець С. І.

ННЦ ХФТІ, Харків, Україна

Анотація. Розглянуто особливості математичного моделювання основних систем нейтронно-радіографічної установки, коли установка описується в термінах набору підсистем або агрегатів і взаємозв'язків між ними.

Ключові слова: нейтрон, нейтронна радіографія, математичне моделювання

Вступ. Проблеми підвищення якості, надійності й довговічності технічних виробів, машин, деталей, матеріалів і складних споруд набувають особливого значення в сучасних умовах. Вирішення цих проблем в значній мірі залежить від наявності ефективних засобів і методів контролю. Найбільший інтерес у виробничих умовах представляють методи контролю без порушення контрольованих об'єктів. До таких методів відноситься дефектоскопія матеріалів і виробів із застосуванням гамма- і рентгенівського випромінювань або гальмівного випромінювання прискорювачів електронів. Одним з нових методів неруйнуючого контролю, який інтенсивно розвивається в багатьох розвинених в промисловому відношенні країнах світу, є нейтронна радіографія [1]. В Україні в даний час немає жодної радіографічної установки, хоча її реалізація дозволила б йти в ногу з світовим розвитком науки і техніки.

Практична реалізація методу нейтронної радіографії дозволить створити в Україні новий інструментальний засіб неруйнуючого аналізу відповідальних виробів атомної промисловості. Впровадження радіографії, а потім і томографії, в нейтронних пучках дозволить отримати новий інструментарій для інспекції широкого кола виробів, що містять одночасно легкі й важкі елементи та їх ізотопи.

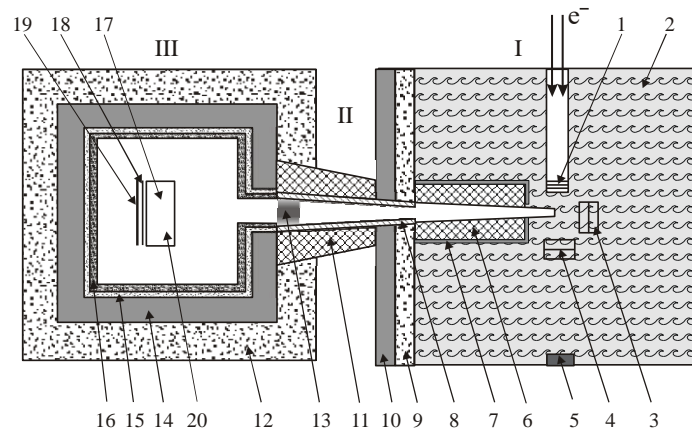


Рисунок 1 - Схема моделі НР-приладу

- I – нейтроноутворююча мішень; II – система формування пучка сповільнених нейтронів;
III – нейтронографічна камера; 1 – Та-мішень; 2 – бак із сповільнювачем;
3, 4 – берилієві відбивачі; 5 – монітор пучка; 6 – коліматор; 7 – Pb-захист навколо коліматора;
8 – шар Cd; 9, 12 – борований поліетилен; 10, 11, 14 – Pb;
13 – гамма-фільтр; 15 – Sn; 16 – Ni(Cr); 17 – індикатор чистоти пучка (ІЧП);
18 – конвертор Gd(Dy); 19 – рентгенівська плівка; 20 – прилад типу ШД-1

Розглянуто особливості основних систем нейтронографічної установки на прискорювачі електронів. До основних систем (елементів) установки відносяться: джерело випромінювання – джерело прискорених електронів, які генерують нейтрони в результаті взаємодії з матеріалом мішені, нейтроноутворююча мішень, система формування потоку нейтронів і позиційно-чутливий детектор нейтронографічного зображення (див. рис.).

Таке представлення нейтронографічної установки дозволяє представити її структурну схему у вигляді набору підсистем або агрегатів і взаємозв'язків між ними. Як джерело випромінювань, в результаті взаємодії якого з речовиною виникають нейтрони, використовується прискорювач електронів. Взаємозв'язками в такій системі є взаємодія пучка електронів з певною енергією і струмом з нейтроноутворюючою мішенню і проходження виникаючих нейтронів і гамма-квантів послідовно крізь тракт формування нейтронів і об'єкт дослідження до детектора. У першому наближенні в розглянутій системі функціонування будь-яка з підсистем не залежить від подальшої, тому математичне моделювання для оптимізації їх характеристик зводиться до автономного моделювання підсистем [2]. Тому моделювання можна починати з будь-якої підсистеми, на вхід якої поступає інформація

тільки з одного джерела. У представленій системі такий випадок можна реалізувати якщо припустити, що гамма-фон від нейтронної мішені зневажливо малий, тобто вплив гамма-фону на подальші підсистеми можна не враховувати. Таке представлення складної системи дозволяє використовувати для характеристики підсистем, що надходять до неї, інформацію у вигляді таблиць, графіків і т.д. і математичне моделювання.

Вихід нейтронів залежить від багатьох керованих параметрів, найбільш важливими з яких є енергія та струм прискорених електронів, відстань від центру нейтроноутворюючої мішені до коліматора-формувача, довжина коліматора-формувача, товщина й атомний номер матеріалу мішені. Для моделювання виходу нейтронів залежно від керованих параметрів використовуються програми на підставі коду MCNPX, що враховують процеси народження нейтронів $e^- \rightarrow \gamma + n$ і $e^- \rightarrow \gamma + 2n$ в нейтроноутворюючій мішені з важких хімічних елементів: свинець, вольфрам, тантал, уран.

Збільшення потоку нейтронів можна досягти в результаті використання підкритичної збірки, керованої прискорювачем електронів. Таке управління визначає протікання процесу розмноження нейтронів тільки за наявності зовнішнього підсвічування частинками з прискорювача. Підкритична збірка, керована прискорювачем електронів, має дві головні складові – нейтроноутворюючу мішень і реакторну збірку, в якій проводиться посилення потоку нейтронів з мішені. Підкритична збірка працює на підставі ділення речовини, що входить до її складу. Розрахунки посилення потоку нейтронів, проведені для гомогенної та гетерогенної збірок з коефіцієнтом розмноження $0,95 \div 0,97$, відповідають збільшенню потоку нейтронів з мішені порядку $20 \div 30$ разів.

Для неруйнуючого контролю різних об'єктів використовуються теплові нейтрони, тому коліматор-формувач для моделювання представлений у вигляді довгого полого циліндра з кришкою, що розташована з боку нейтроноутворюючої мішені. Особливість такої схеми формування потоку нейтронів полягає в тому, що нейтрони не тільки рухаються в уповільнюючому середовищі, але й переходять з одного середовища в інше, при цьому має місце

відбиття потоку нейтронів. Таким чином, нейтрон зазнає ланцюжок взаємодій, тому його історія розглядається на підставі розрахунків цілого ряду процесів (пружна й непружна взаємодії, захват і т.д.) за програмами, що розроблені на підставі коду MCNP. При проведенні оптимізаційних розрахунків системи формування потоку нейтронів як критерій якості розглядається потік нейтронів в тепловому діапазоні енергій на виході коліматора-формувача та на об'єкті дослідження.

Для математичного моделювання процесів нейтронної радіографії використовують математичні моделі [3], які описують фізичні процеси взаємодії нейтронів, електронів і гамма-квантів з речовиною нейтроноутворюючої мішені, яка в сукупності з прискорювачем електронів є джерелом нейтронів, і тракту формування потоку теплових нейтронів. Математичні моделі повинні описувати геометричні параметри нейтроноутворюючої мішені, тракту формування нейтронного потоку у вигляді порожнистого циліндру з передньою кришкою та кадмієвою вставкою. Вони також повинні враховувати хімічний склад як нейтроноутворюючої мішені (тантал, вольфрам, свинець, уран), так і простого пристрою, що формує потік теплових нейтронів, протяжного циліндру з поліетилену. Математичні моделі формалізують процес народження й транспорту нейтронів в товстій мішені. Вони дають можливість розглянути процес народження нейтрону (електрон \rightarrow фотон \rightarrow нейтрон) і його транспорту з урахуванням пружної й непружної взаємодій з середовищем. Геометричний блок програмного комплексу визначає місцезнаходження частинки після взаємодії і простежує її траєкторію в тривимірному об'єкті. Для розробки математичних і фізичних моделей тривимірних об'єктів ми використовуємо програмні коди MCNP і GEANT4.

Висновки

Розрахунок нейтронних процесів, особливо в складних технічних об'єктах, потребує розвитку як обчислювальної бази, так і освоєння та розвитку сучасних методів моделювання та програмного забезпечення, а також вдосконалення існуючих. Складність обумовлена як хімічним складом середовища так і

геометричними розмірами, наприклад, товщиною фізичного захисту ядерного об'єкта.

ЛІТЕРАТУРА

1. Тюфяков Н.Д., Штань А.С. Основи нейтронної радіографії. - М.: Атомиздат, 1975. - 256 с.
2. Дихненко Л.М., Кузьмін І.В. Петров Е.Г. та ін. Основи моделювання складних систем. Київ: Вища школа, 1981. - 360 с.
3. Прохорець С.І., Прохорець І.М., Хажмурадов М.А. Математичні моделі проходження нейтронів через речовину // Радіоелектроніка та інформатика. 2003. №1. С. 124-128.

MATHEMATICAL MODELING OF PROCESSES IN NEUTRON RADIOGRAPHY

Prokhorets S. I.

Abstract. *The features of the mathematical modeling of the main systems of the neutron radiography facility are examined, when facility is described in terms of a set of subsystems or aggregates and interrelationships between them.*

Keywords: *neutron, neutron radiography, mathematical modeling*

REFERENCES.

1. Tyufyakov N.D., Shtan' A.S. Fundamentals of neutron radiography. – М.: Atomizdat, 1975. – 256 s.
2. Dykhnenko L.M., Kuzmin I.V. Petrov E.G. et al. Fundamentals of modeling complex systems. Kyiv: Vyscha shkola, 1981. – 360 p. (in Russian)
3. Prokhorets S.I., Prokhorets I.M., Khazhmuradov M.A. Mathematical models of neutron passing through matter // Radioelectronics and Informatics.– 2003. – №1.– С. 124-128.