

В. І. Борисенко¹, В. В. Горанчук¹, Е. М. Чалий², В. В. Стаднік²

¹Інститут проблем безпеки АЕС НАН України, вул. Лисогірська, 12, Київ, 03028, Україна

²ВП «Науково-технічний центр» ДП «НАЕК «Енергоатом», вул. Гоголівська, 22–24, Київ, 01054, Україна

Вибір оптимальних умов опромінення зразків у матеріалознавчому каналі ядерного реактора ВВР-М

Ключові слова:

дослідницький ядерний реактор ВВР-М, активна зона, матеріалознавчий канал, щільність потоку нейтронів, твел, тепловидільна збірка.

Представлено методологію вибору оптимальних умов опромінення зразків у матеріалознавчому каналі дослідницького ядерного реактора ВВР-М. Розв'язання такого завдання є необхідним для обґрунтування можливості проведення опромінення зразків у матеріалознавчому каналі за заданих умов опромінення. У цьому випадку умови опромінення передбачають не тільки значення висотного розподілу щільності нейтронного потоку, а також і спектр нейтронів, і температуру зразка в матеріалознавчому каналі. Такий підхід оптимізує роботу ВВР-М шляхом розташування в матеріалознавчому каналі максимально можливої кількості зразків для опромінення. Також оптимізація роботи ВВР-М полягає у виборі місця розташування дослідного каналу в активній зоні ВВР-М, де протягом запланованого часу опромінення буде досягнуто максимальну щільність потоку швидких нейтронів або нейтронів інших енергій залежно від поставленого завдання. Для досліджень застосовано нейтронно-фізичну модель дослідницького ядерного реактора ВВР-М у розрахунковому коді SCALE. Коректність визначення нейтронно-фізичних характеристик у матеріалознавчому каналі ВВР-М підтверджено результатами валідації, проведеної на попередньому етапі досліджень. Показано, що для забезпечення необхідної точності визначення параметрів нейтронного потоку в матеріалознавчому каналі необхідно обов'язково враховувати вигорання палива, а також реальну схему перестановки тепловидільних збірок по активній зоні ВВР-М для різних паливних завантажень. Наведено результати розрахунків важливих нейтронно-фізичних характеристик моделі ядерного реактора ВВР-М для паливного завантаження, яке експлуатується сьогодні, на основі яких можна оптимізувати вибір місця розташування матеріалознавчого каналу в активній зоні ВВР-М.

Вступ

У статті наведено основні результати застосування методології вибору оптимальних умов опромінення зразків у матеріалознавчому каналі дослідницького ядерного реактора ВВР-М. Для досліджень застосовано нейтронно-фізичну модель ядерного реактора ВВР-М у розрахунковому коді SCALE [1]. Підтвердженням

коректності визначення нейтронно-фізичних характеристик (НФХ) у дослідних каналах ВВР-М є результати валідації нейтронно-фізичних моделей ВВР-М та установки SF-9 [2, 3]. Дослідження проведено для визначення оптимального місця розташування дослідного каналу в активній зоні ВВР-М для забезпечення необхідних умов опромінення зразків щодо спектра та щільності потоку нейтронів у матеріалознавчому каналі.

© В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, Е. М. Чалий, В. В. Стаднік, 2020

Для моделювання було обрано всі паливні завантаження з моменту початку використання тепловідільних збірок (ТВЗ) зі збагаченням по ^{235}U 19,7%. Кількість ТВЗ поступово збільшувалася від 72 ТВЗ у паливному завантаженні № 396 (рис. 1) до 129 ТВЗ у паливному завантаженні № 402.

ТВЗ реактора ВВР-М складається із трьох трубчатих твелів: два внутрішніх — кільцеві, зовнішній — шестигранний (рис. 2). Висота паливної частини ТВЗ 50 см.

Під час моделювання паливних кампаній ВВР-М кожна ТВЗ розбивалася на 5 рівнів за висотою (висота одного рівня 10 см) для розрахунку висотного

вигорання та виведення інформації про важливі для подальшого аналізу параметри нейтронно-фізичної моделі. Результати моделювання представлено для трьох різних конфігурацій:

конфігурація № 1 — визначення НФХ ВВР-М для паливного завантаження № 402;

конфігурація № 2 — визначення НФХ ВВР-М з дослідним каналом, розташованим за результатами аналізу НФХ конфігурації № 1;

конфігурація № 3 — визначення НФХ ВВР-М з дослідним каналом, розташованим за результатами аналізу НФХ конфігурацій № 1 і 2.

Конфігурація № 1

На рис. 3 представлено картограму паливного завантаження № 402 ВВР-М, а також розташування органів регулювання системи управління та захисту (ОР СУЗ). Значення числа в кожній комірці ТВЗ визначає номер паливної кампанії ТВЗ. Так, число 1 у комірці відповідає тим ТВЗ, що були завантажені останіми.

Протягом завантажень № 396–402 було завантажено 129 ТВЗ, що відповідає масі урану 27,31 кг. У результаті вигорання на початок паливного завантаження № 402 залишилося 26,71 кг (таблиця).

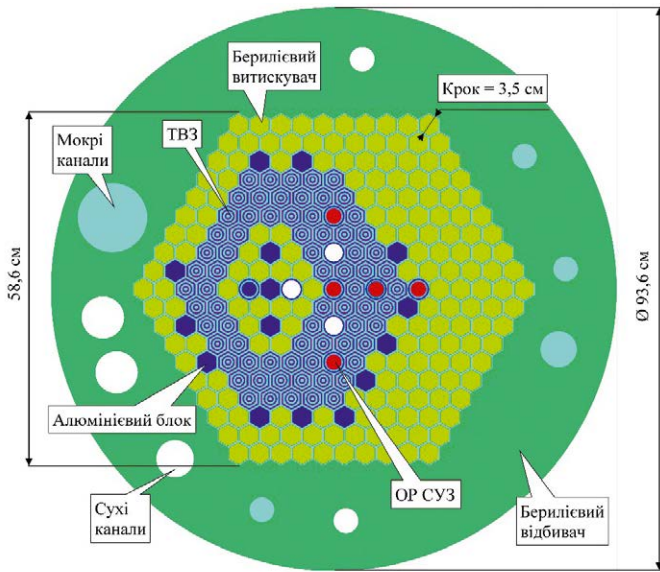


Рис. 1. Модель у кодї SCALE. Завантаження № 396. Переріз на рівні середини паливного стовпа

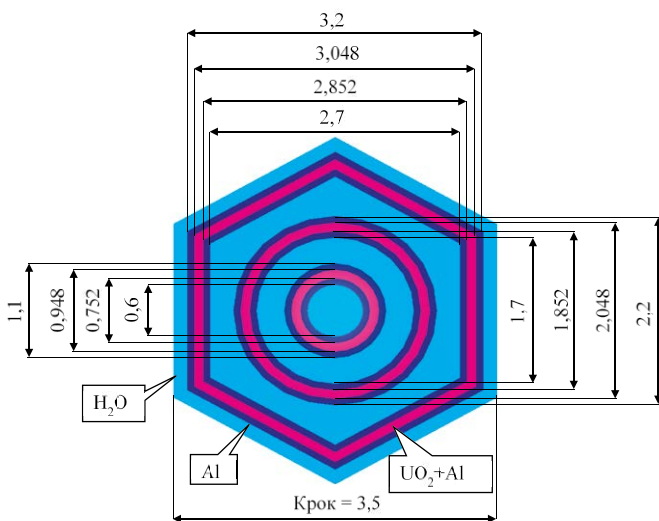


Рис. 2. Модель ТВЗ у кодї SCALE

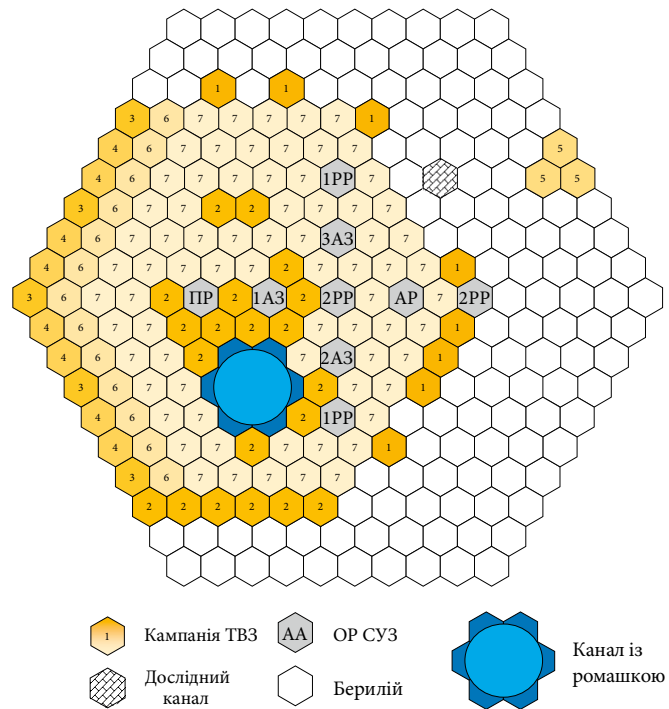


Рис. 3. Картограма паливного завантаження № 402 ВВР-М

**Зміна кількості урану
протягом паливних кампаній № 396–402**

| Ізотоп | Завантажено, кг | Залишилося | |
|-----------------------------------|-----------------|------------|-------|
| | | кг | % |
| ^{235}U | 5,38 | 5,09 | 94,56 |
| ^{238}U | 21,93 | 21,62 | 98,60 |
| $^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$ | 27,31 | 26,71 | 97,81 |

На рис. 4–6 представлено відносні кількості ^{235}U , ^{238}U та урану відповідно, що залишилися в кожній ТВЗ відносно до початкової концентрації на рівні середини ТВЗ (область висотою 10 см) для паливного завантаження № 402.

Розглянуто два положення ОР СУЗ.

Положення 1: 1А3, 2А3, 3А3, ПР — у верхньому положенні; 2РР, 2РР, АР — 50%; 1РР, 1РР — у нижньому положенні.

Положення 2: 1А3, 2А3, 3А3, 2РР, 2РР — у верхньому положенні; АР — 50%; 1РР, 1РР, ПР — у нижньому положенні.

Щільність потоку швидких нейтронів з $E > 0,4 \text{ MeV}$ при положенні ОР СУЗ № 1 і тепловій потужності ВВР-М 0,57 МВт на рівні середини активної зони представлено на рис. 7, а при положенні ОР СУЗ № 2 — на рис. 8.

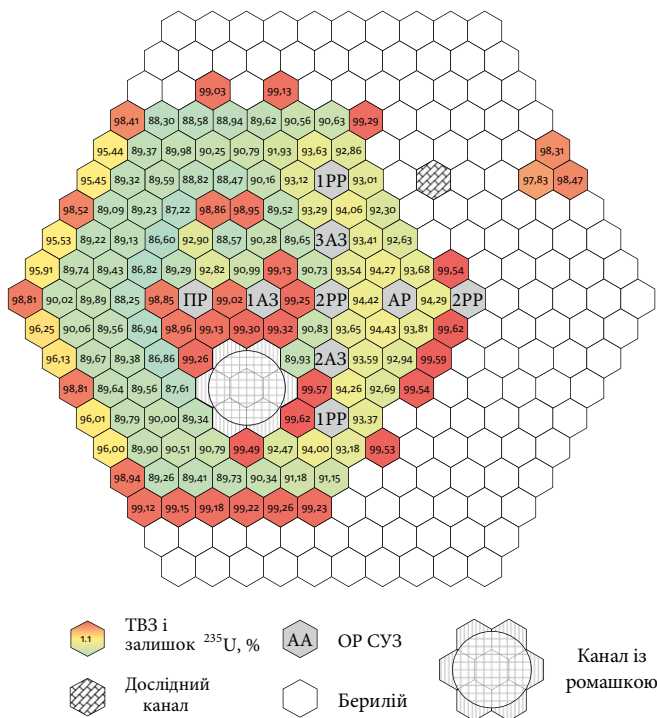


Рис. 4. Маса ^{235}U (%), що залишилася від початкової маси на паливне завантаження № 402 ВВР-М

Проведено порівняння щільності потоку швидких нейтронів ($E > 0,4 \text{ MeV}$) у матеріалознавчому каналі для моделей з урахуванням вигорання і без (рис. 9).

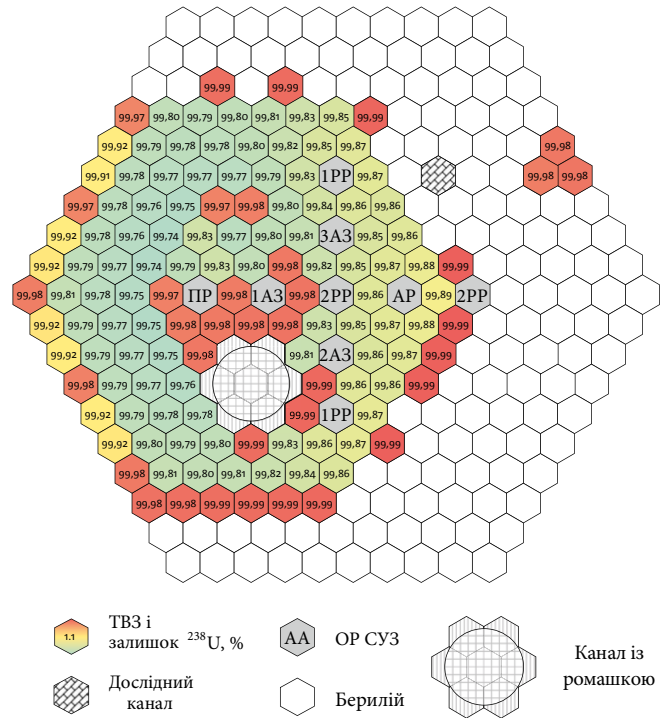


Рис. 5. Маса ^{238}U (%), що залишилася від початкової маси на паливне завантаження № 402 ВВР-М

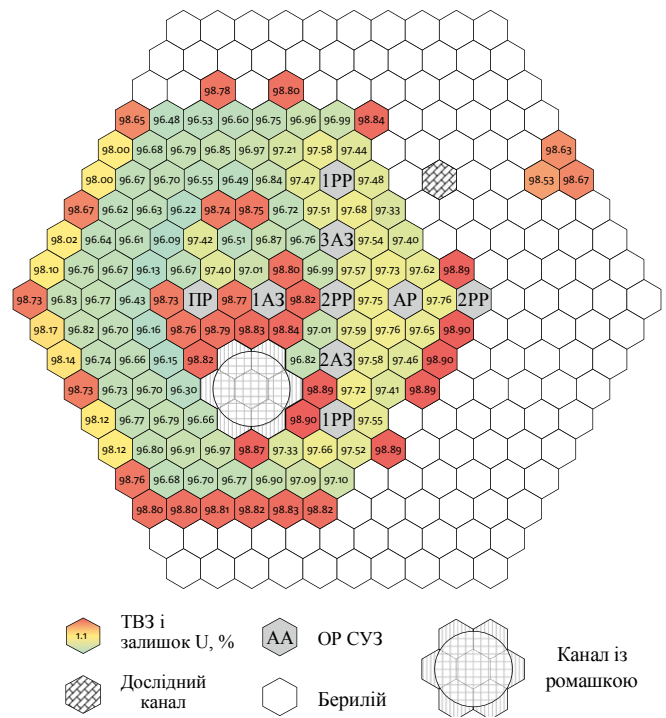


Рис. 6. Маса урану (%), що залишилася від початкової маси на паливне завантаження № 402 ВВР-М

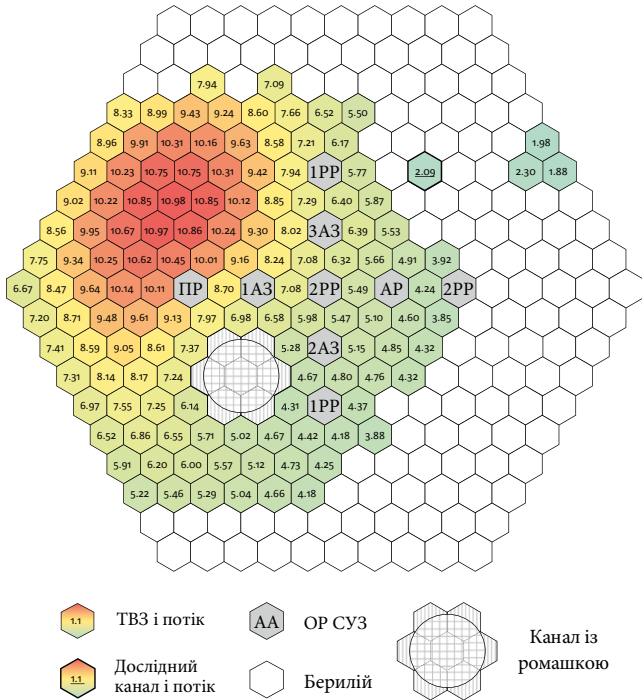


Рис. 7. Щільність потоку швидких нейтронів при положенні ОП СУЗ № 1 ($10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)

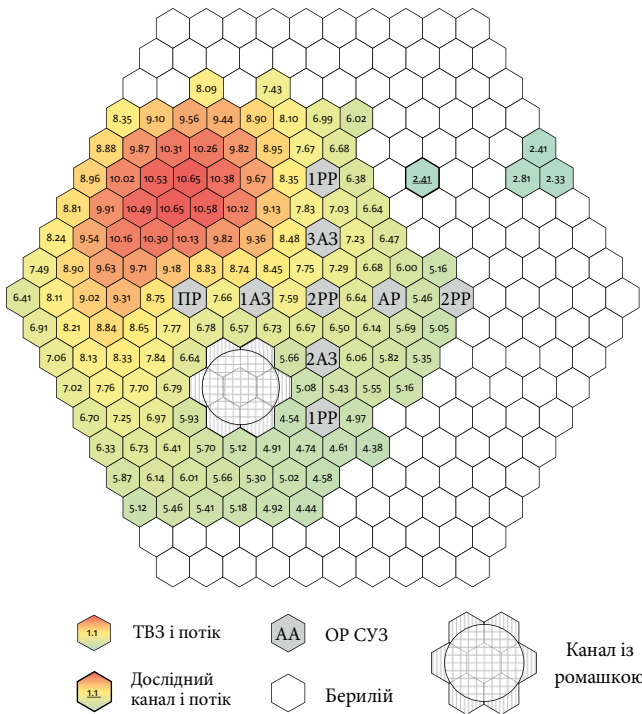


Рис. 8. Щільність потоку швидких нейтронів при положенні ОП СУЗ № 2 ($10^{12} \text{ н} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$)

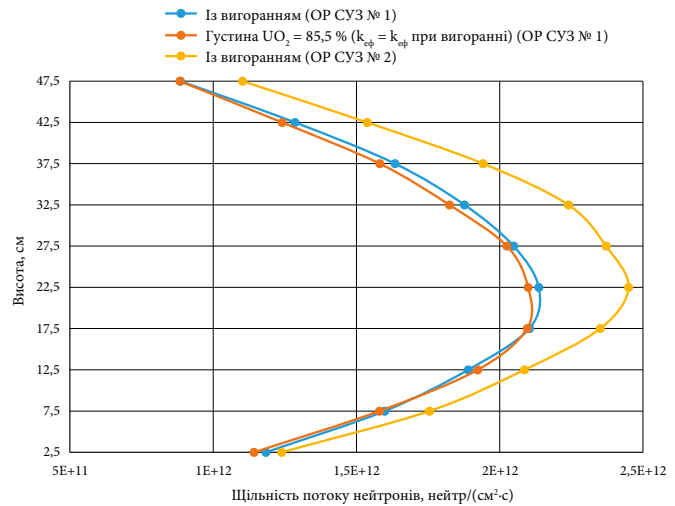


Рис. 9. Щільність потоку швидких нейтронів ($E > 0,4 \text{ MeV}$) у матеріалознавчому каналі за конфігурації активної зони № 1

У моделі без урахування вигорання густина палива підбиралася так, щоб забезпечити значення ефективного коефіцієнта розмноження нейтронів k_{ef} рівним k_{ef} у моделі з вигоранням. Для моделі без вигорання густина UO_2 становила 85,5 % від значення свіжого палива, при цьому, як було зазначено в таблиці, для моделі з вигоранням урану залишилося 97,8 % від початкового значення. Максимальне відхилення в щільності нейтронного потоку між моделями становило до 4 %.

Конфігурація № 2

Місце розташування дослідного каналу в активній зоні ВВР-М визначено за результатами аналізу НФХ конфігурації № 1. Побудовано модель нової конфігурації активної зони ВВР-М із розташуванням матеріалознавчого каналу в активній зоні ВВР-М замість однієї ТВЗ. Проведено дослідження щодо визначення щільності потоку швидких нейтронів для конфігурації № 2 (рис. 10 і 11).

Проведено порівняння щільності потоку швидких нейтронів ($E > 0,4 \text{ MeV}$) у матеріалознавчому каналі для моделей з урахуванням вигорання і без (рис. 12). У моделі без урахування вигорання густину палива підбирали так, щоб забезпечити значення ефективного коефіцієнта розмноження рівним моделі з вигоранням. Для моделі без вигорання густина UO_2 становила 85,5 % від значення свіжого палива. Відхилення в щільності нейтронного потоку між моделями становило до 3 %.

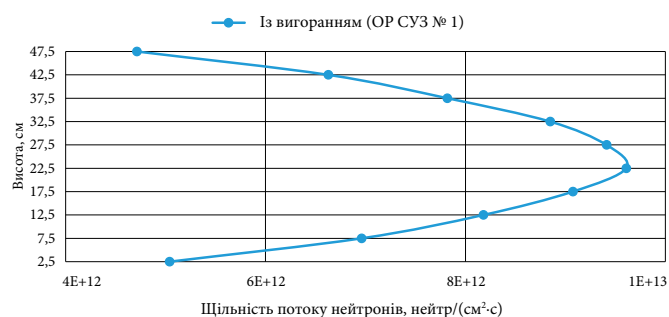


Рис. 14. Щільність швидких нейтронів ($E > 0,4$ MeV) у матеріалознавчому каналі за конфігурації активної зони № 3 та положення ОР СУЗ № 2

Таким чином, проведені дослідження дають змогу визначити місце розташування матеріалознавчого каналу в активній зоні ВВР-М для досягнення найоптимальніших умов опромінення зразків. У результаті проведених досліджень обрано конфігурацію № 2, яка забезпечує в матеріалознавчому каналі найбільшу щільність потоку швидких нейтронів.

Висновки

Для визначення нейтронно-фізичних характеристик у матеріалознавчому каналі, розташованому в активній зоні ВВР-М, застосовано нейтронно-фізичну модель ВВР-М у розрахунковому коді SCALE. Проведені розрахункові дослідження дають змогу визначити оптимальне місце розташування дослідного каналу в активній зоні ВВР-М, що дозволяє мінімізувати час опромінення для досягнення заданих умов опромінення зразків. Для тривалих за часом періодів опромінення зразків проведено дослідження зміни конфігурації нейтронного потоку за переміщення ОР СУЗ, розміщених поблизу місця розташування матеріалознавчого каналу. У моделі враховано детальне навантаження ВВР-М під час роботи з початку експлуатації ТВЗ зі збагаченням 19,7%. Результати досліджень представлено для паливного завантаження № 402, яке експлуатується з початку 2020 р.

Наведено результати визначення нейтронно-фізичних характеристик у коді SCALE, що обґрунтовують оптимальне місце розташування матеріалознавчого каналу в активній зоні ВВР-М для проведення опромінення зразків.

Список використаної літератури

1. SCALE-4.4a: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing

Evaluation, NUREG-CR-0200, Rev. 6. — Oak Ridge National Laboratory, 1998.

2. Борисенко В. І. Валідація моделі реактора ВВР-М, розробленої в коді SCALE / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук // Ядерна енергетика та довкілля. — 2020. — Вип. 3 (18). — С. 42–47.
3. Результати валідації розрахункових кодів SCALE і MCNP на даних критичних бенчмаркекспериментів на установці SF-9 / В. І. Борисенко, В. В. Горанчук, Ю. Ф. Піонтковський, І. О. Тітінець // Ядерна енергетика та довкілля. — 2019. — Вип. 1 (13). — С. 17–22.

V. I. Borysenko¹, V. V. Goranchuk¹, E. M. Chalyi², V. V. Stadnik²

¹Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants, NAS of Ukraine, 12, Lysogir'ska st., Kyiv, 03028, Ukraine

²SS "Scientific and Technical Center", SE "NNEGC 'Energoatom'", 22–24, Gogoliv'ska st., Kyiv, 01054, Ukraine

Choosing the Optimal Conditions for Irradiation of Specimens in the Material Testing Channel of the VVR-M Nuclear Reactor

The methodology for choosing the optimal conditions for irradiation of specimens in the material testing channel of the VVR-M research nuclear reactor is presented in the article. The solution to such a problem is necessary to justify the possibility of irradiation of specimens in the material testing channel under given irradiation conditions. In this case, the irradiation conditions include not only the height distribution of the neutron flux density, but also the spectrum of neutrons and the temperature of the specimen in the material testing channel. This approach optimizes the work of VVR-M reactor by placing the maximum possible number of specimens in the material testing channel for irradiation. Also, the optimization of the VVR-M operation involves choosing the location of the research channel in the VVR-M core, where, during the planned irradiation time, the maximum flux density of fast neutrons or neutrons of other energies will be reached, depending on the task.

The neutron-physical model of the research nuclear reactor VVR-M in the calculation code SCALE was used for research. The reliability in the determination of neutron-physical characteristics in the VVR-M material testing channel is confirmed by the results of validation carried out at the previous stage of research. It is

shown that in order to ensure the necessary accuracy in the determination of the neutron flux parameters in the material testing channel, it is necessary to take into account the fuel burnup, as well as the actual scheme of fuel assemblies rearranging in the VVR-M core for various fuel loads.

The results of calculations of important neutron-physical characteristics of the model of a VVR-M nuclear reactor for fuel loading, which is in operation today, on the basis of which it is possible to optimize the choice of the location of the material testing channel in the VVR-M core are presented in the article.

Keywords: VVR-M research nuclear reactor, reactor core, material testing channel, neutron flux density, fuel element, fuel assembly.

References

1. SCALE-4.4a: A Modular Code System for Performing Standardized Computer Analyses for Licensing Evaluation, NUREG-CR-0200, Rev. 6. — Oak Ridge National Laboratory, 1998.
2. Borysenko V. I., Goranchuk V. V. (2020). [Validation of SCALE Model of VVR-M Reactor]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia* [Nuclear Power and the Environment], vol. 3(18), pp. 42–47. (in Ukr.)
3. Borysenko V. I., Goranchuk V. V., Piontkovskyi Yu. F., Titimets I. O. (2019). [Validation results of SCALE and MCNP calculation codes on data of benchmark critical experiments at SF-9 installation]. *Yaderna enerhetyka ta dovkillia* [Nuclear Power and the Environment], vol. 1(13), pp. 17–22. (in Ukr.)

Надійшла 16.11.2020
Received 16.11.2020