

ОЦІНКА ВПЛИВУ РІЗНИХ КОМПОНОВОК ПАЛИВНИХ ЗАВАНТАЖЕНЬ НА РАДІАЦІЙНЕ НАВАНТАЖЕННЯ ВНУТРІШНЬОКОРПУСНИХ ПРИСТРОЇВ РЕАКТОРА ВВЕР-1000

При експлуатації енергоблоків атомних електричних станцій в понадпроектний строк дуже важливо враховувати вплив експлуатаційних чинників, таких як нейтронне опромінення, підвищена температура та циклічне навантаження, на корпус реактора та внутрішньокорпусні пристрої, які призводять до змін властивостей металу. Також не варто забувати, що кожна зміна потужності реактора викликає значну зміну гамма-випромінювання, що, у свою чергу, сприяє циклічному навантаженню шахти внутрішньокорпусної та вигородки. Насамперед, це виражається у зниженні опору крихкому руйнуванню, що часто називають окрихчуванням, а також викликає збільшення радіаційного навантаження на корпус реактора та внутрішньокорпусні пристрої.

Впровадження паливних завантажень, які забезпечують мінімальний витік нейтронів з активної зони, є одним із ключових заходів для зменшення радіаційного впливу на розглянуті елементи внутрішньокорпусних пристроїв. Це досягається за рахунок розміщення вигорілого палива на периферії активної зони та свіжого палива в її центральній частині. Різна конфігурація паливних завантажень у ядерних реакторах має значний вплив на нерівномірність енерговиділень, що може призвести до додаткових ризиків для безпеки.

У даній статті були розглянуті різні варіанти конфігурації активної зони реактора при використанні тепловидільних збірок типу ТВЗА та ТВЗ-WR. Також виконано порівняння впливу використання цих збірок на радіаційне навантаження вигородки при розглянутих варіантах компоновки паливних завантажень. У результаті проведених розрахунків було отримано значення флюенсу швидких нейтронів в обраних розрахункових точках вигородки активної зони реактора ВВЕР-1000 та в центрі шахти внутрішньокорпусної. Крім того, було отримано розподіл енерговиділень вигородки в аксіальному шарі максимального навантаження.

Ключові слова: шахта внутрішньокорпусна, реактор ВВЕР-1000, вигородка, енерговиділення, паливні завантаження, ТВЗ-WR, ТВЗА.

Вступ

Атомні електричні станції (АЕС) відіграють ключову роль у забезпеченні енергетичної незалежності та стабільності сучасного суспільства. Однак, зростання тривалості експлуатації енергоблоків, зокрема реакторів ВВЕР-1000, ставить нові виклики в питаннях безпеки та контролю стану металу корпусу реактора та внутрішньокорпусних пристроїв, зокрема вигородки та шахти внутрішньокорпусної (ШВК). Одним із важливих аспектів, що потребує ретельного аналізу, є вплив різних компоновок паливних завантажень на радіаційне навантаження внутрішньокорпусних пристроїв (ВКП).

Розуміння механізмів, через які паливні завантаження впливають на радіаційне навантаження, є критично важливим для оцінки безпеки експлуатації АЕС. Зміни в конфігурації паливних завантажень суттєво впливають на рівень нейтронного опромінення та значення енерговиділень у вигородці. У цій статті буде проведено детальний аналіз впливу різних компоновок паливних завантажень на рівень радіаційного навантаження.

Аналіз літературних джерел

Дослідження впливу різних компоновок паливних завантажень на радіаційне навантаження в реакторах ВВЕР-1000 є важливим аспектом забезпечення безпеки ядерних установок. Згідно з даними Westinghouse [1], проектування паливних завантажень базується на адаптованих методах, таких як розрахунковий комплекс АРА-Н, що дозволяє моделювати різні конфігурації паливних завантажень. Це впливає на нейтронний потік та, відповідно, на радіаційне навантаження.

Мета роботи

Метою даного дослідження є створення компоновок паливних завантажень з найбільш оптимальним розміщенням палива, яке дозволить зменшити радіаційне навантаження на внутрішньокорпусні пристрої.

Обрані компоновки паливних завантажень

На рисунках 1, 2 та 3 зображено компонування паливних завантажень у 60°-му секторі симетрії активної зони реактора (АкЗ). Колір комірки відповідає року роботи тепловидільної збірки (ТВЗ) в активній зоні: синій - ТВЗ 1-го року експлуатації, блакитний - 2-го року, блідо-червоний - 3-го і червоний - ТВЗ 4-го року. Для коректної оцінки впливу використання різного палива (ТВЗА та ТВЗ-WR), вирішено розглянути паливні кампанії, що зображені на рис. 1 та 2, відповідно. А також для порівняння компоновок 4-ох та 2-ох ТВЗ 1-го року експлуатації у периферійному ряді (рис. 2 та рис. 3) з повним завантаженням паливом компанії Westinghouse.

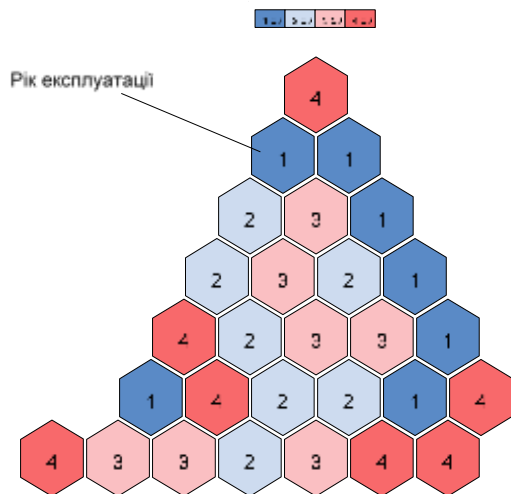


Рисунок 1 – Картограма паливного завантаження з використанням 4-ох свіжих касет в периферійному ряді (ТВЗА)

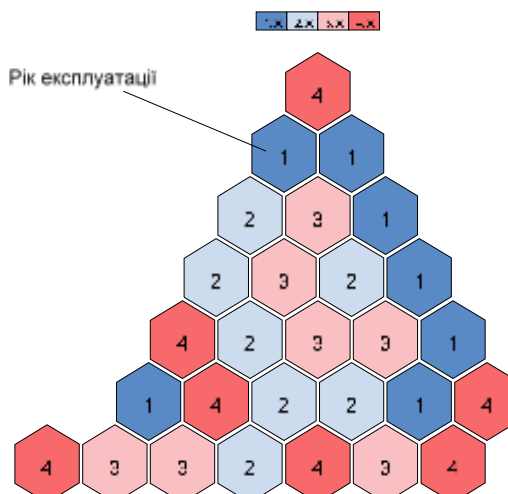


Рисунок 2 – Картограма паливного завантаження з використанням 4-ох свіжих касет в периферійному ряді (ТВЗ-WR)

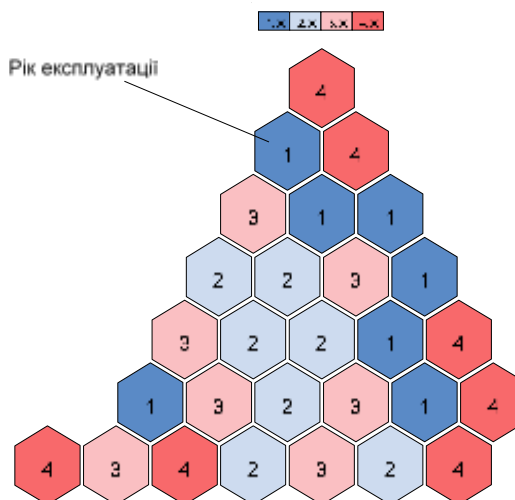


Рисунок 3 – Картограма паливного завантаження з використанням 2-ох свіжих касет в периферійному ряді (ТВЗ-WR)

Проаналізувавши картограми паливних завантажень, можна зробити припущення, що використання меншої кількості свіжих ТВЗ 1-го року експлуатації в крайньому ряді та заміни їх на вигорілі ТВЗ 4-го року експлуатації, як на рис. 2.6, призведе до зниження радіаційного навантаження на корпус реактора (КР) та елементи ВКП, головним чином, на вигорідку реакторної установки (РУ) ВВЕР-1000.

Порівняння результатів розрахунку флюенсу та енерговиділень

Наступні розрахунки підтвердили, що застосування згаданого вище компонування палива в АкЗ, з використанням більшої кількості вигорілого палива замість свіжого по периферії, призводить до зменшення впливу нейтронних потоків на елементи ВКП.

Розрахунки виконувались за допомогою розрахункового пакету DOORS [2], а також згідно методичних рекомендацій спеціалістів Брукхевенської національної лабораторії (BNL), Аптон, Нью-Йорк, США [3], [4]. На рисунку 4 зображено положення точок, за якими виконувалися розрахунки та розрахункові точки у ШВК. Результати розрахунків відображено в таблицях 1-3 та на рисунках 5-8.

Таблиця 1 – Порівняння результатів розрахунків азимутального розподілу флюенсу в шарі максимального радіаційного навантаження на внутрішній поверхні вигордки

Розрахункова точка (нумерація точок згідно рис. 4)	Флюенс $E \geq 0,5 \text{ MeV}$, н/см ²			$\delta = \frac{TB3-WR^{(рис.2/рис.3)}}{TB3A} - 1, [\%]$
	TB3A (рис.1)	TB3-WR (рис.2)	TB3-WR (рис.3)	
1	1,055E+21	1,146E+21	1,216E+21	8,7/15,3
2	1,176E+21	1,211E+21	1,334E+21	2,9/13,4
3	7,898E+20	7,489E+20	8,785E+20	5,2/11,2
4	5,363E+20	4,806E+20	5,804E+20	10,4/8,2
5	5,970E+20	5,036E+20	6,175E+20	15,6/3,4
6	5,526E+20	4,440E+20	5,586E+20	19,7/1,1
7	9,372E+20	7,138E+20	9,417E+20	23,8/0,5
8	1,645E+21	1,136E+21	1,662E+21	31,0/1,0
9	1,445E+21	9,299E+20	1,447E+21	35,6/0,1
11	1,059E+21	6,890E+20	1,045E+21	34,9/1,3
12	1,634E+21	1,116E+21	1,634E+21	31,7/0,0
13	2,385E+21	1,886E+21	2,390E+21	20,9/0,2
15	1,608E+21	1,493E+21	1,599E+21	7,2/0,6
16	1,338E+21	1,271E+21	1,331E+21	5,0/0,6
17	1,742E+21	1,698E+21	1,731E+21	2,5/0,6
18	2,476E+21	2,455E+21	2,472E+21	0,9/0,2
19	1,739E+21	1,698E+21	1,731E+21	2,3/0,4
20	1,335E+21	1,271E+21	1,331E+21	4,8/0,4
21	1,604E+21	1,494E+21	1,600E+21	6,9/0,3
23	2,378E+21	1,889E+21	2,393E+21	20,5/0,6
24	1,627E+21	1,117E+21	1,634E+21	31,4/0,5
25	1,054E+21	6,899E+20	1,046E+21	34,6/0,8
27	1,436E+21	9,308E+20	1,445E+21	35,2/0,6
28	1,636E+21	1,138E+21	1,662E+21	30,4/1,6
29	9,286E+20	7,108E+20	9,406E+20	23,4/1,3
30	5,454E+20	4,393E+20	5,571E+20	19,4/2,2
31	5,901E+20	5,004E+20	6,160E+20	15,2/4,4
32	5,320E+20	4,805E+20	5,768E+20	9,7/8,4
33	7,845E+20	7,498E+20	8,691E+20	4,4/10,8
34	1,156E+21	1,198E+21	1,302E+21	3,6/12,6
35	1,022E+21	1,118E+21	1,171E+21	9,4/14,5

У представлених результатах найбільше зниження рівня флюенсу спостерігається при використанні як компоновки, з використанням меншої кількості свіжих ТВЗ (1-го року експлуатації) у периферійному ряді (рис. 2 та рис. 3), так і повного завантаження паливом ТВЗ-WR. Це підтверджує припущення щодо зменшення радіаційного навантаження на КР та елементи ВКП при їх застосуванні.

Щодо енерговиділень у вигордці РУ ВВЕР-1000, на рисунку 9 зображено два розподіли для демонстрації характерних відмінностей застосування різної компоновки паливних завантажень при використанні палива ТВЗ-WR (розподіл енерговиділень при використанні палива ТВЗА буде подібним до ТВЗ-WR, де також застосовано 4 свіжі касети в периферійному ряді).

Результати демонструють відмінність розподілу енерговиділення в районі розрахункових точок 13 та 23 (нумерація точок згідно рис. 4 (а)), зокрема суттєве зменшення максимальних значень енерговиділення, за рахунок заміни двох з чотирьох касет свіжого палива по периферії на вигорілі ТВЗ 4-го року експлуатації.

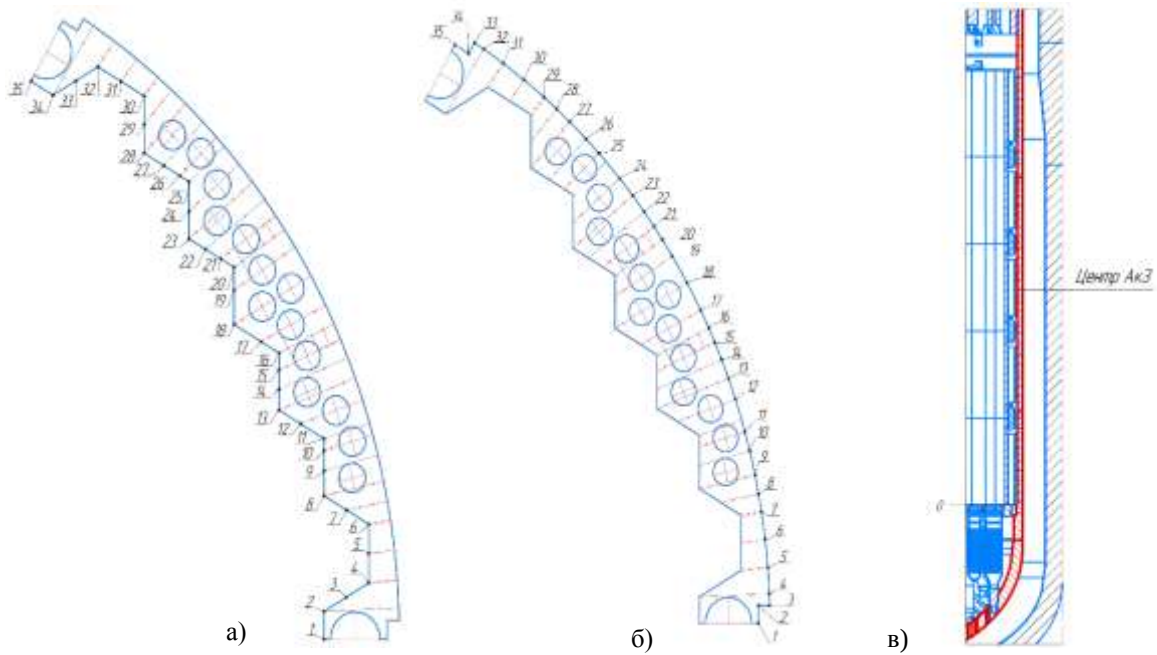


Рисунок 4 – Точки реєстрації відносних потоків нейтронів на внутрішній (а) та зовнішній (б) поверхнях вигордки, розрахункові точки в ШВК (в)

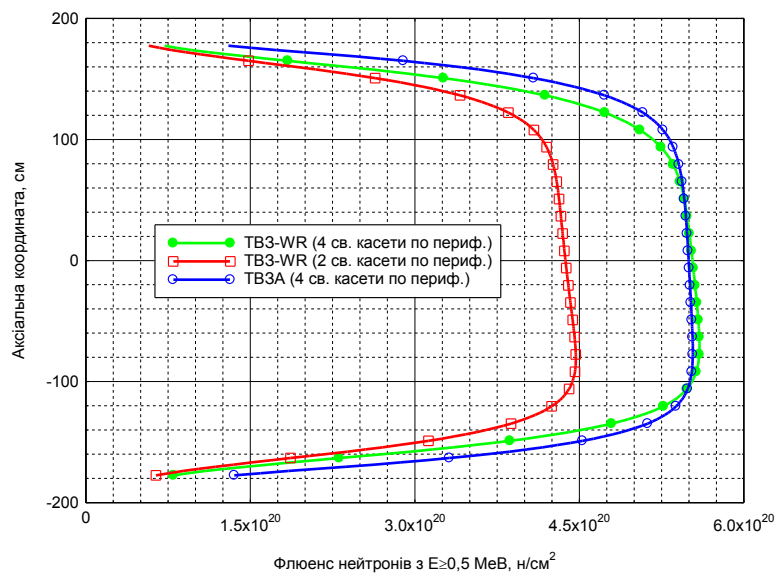


Рисунок 5 – Аксiальний розподіл флюенсу на внутрішній поверхні вигордки в напрямку точки б згідно з нумерацією рис. 4

Таблиця 2 – Порівняння результатів розрахунків азимутального розподілу флюенсу на внутрішній поверхні шахти внутрішньокорпусної на рівні середини активної зони

Розрахункова координата, градус	Флюенс $E \geq 0,5 \text{ MeB}$, н/см ²			$\delta = \frac{\text{TB3-WR}(\text{рис.2/рис.3})}{\text{TB3A}} - 1, [\%]$
	TB3A (рис.1)	TB3-WR (рис.2)	TB3-WR (рис.3)	
0	8,286E+19	7,831E+19	9,070E+19	5,5/9,5
8	1,872E+20	1,539E+20	1,923E+20	17,8/2,7
10	1,836E+20	1,446E+20	1,860E+20	21,2/1,3
20	1,277E+20	9,467E+19	1,253E+20	25,9/1,9
30	9,146E+19	8,640E+19	9,108E+19	5,5/0,4

Розрахункова координата, градус	Флюенс $E \geq 0,5$ MeB, н/см ²			$\delta = \frac{TB3-WR^{(рис.2/рис.3)}}{TB3A} - 1, [\%]$
	TB3A (рис.1)	TB3-WR (рис.2)	TB3-WR (рис.3)	
40	1,271E+20	9,473E+19	1,253E+20	25,5/1,4
50	1,816E+20	1,438E+20	1,855E+20	20,8/2,1
52	1,852E+20	1,530E+20	1,917E+20	17,4/3,5
60	8,181E+19	7,785E+19	8,940E+19	4,8/9,3

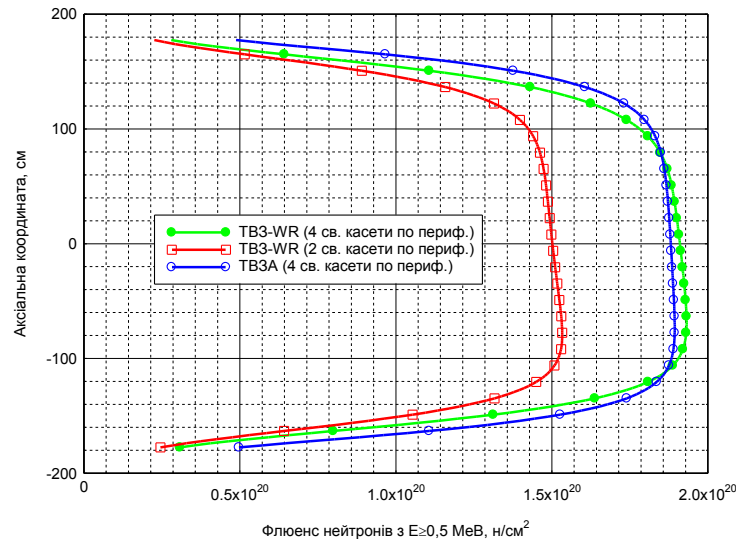


Рисунок 6 – Аксиальний розподіл флюенсу на зовнішній поверхні вигорідки в напрямку точки 6 згідно з нумерацією рис. 4

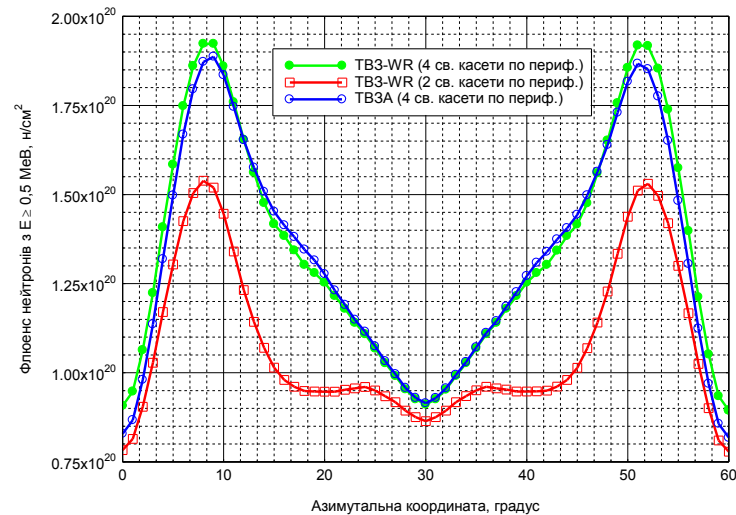


Рисунок 7 – Азимутальний розподіл флюенсу нейтронів на внутрішній поверхні шахти внутрішньокорпусної на рівні середини активної зони

Таблиця 3 – Порівняння результатів розрахунків азимутального розподілу флюенсу на зовнішній поверхні шахти внутрішньокорпусної на рівні середини активної зони

Розрахункова координата, градус	Флюенс $E \geq 0,5$ MeB, н/см ²			$\delta = \frac{TB3-WR^{(рис.2/рис.3)}}{TB3A} - 1, [\%]$
	TB3A (рис.1)	TB3-WR (рис.2)	TB3-WR (рис.3)	
0	3,778E+19	3,515E+19	4,110E+19	7,0/8,8
8	7,085E+19	5,815E+19	7,288E+19	17,9/2,9

Розрахункова координата, градус	Флюєнс $E \geq 0,5$ MeV, н/см ²			$\delta = \frac{TB3-WR^{(рис.2/рис.3)}}{TB3A} - 1, [\%]$
	TB3A (рис.1)	TB3-WR (рис.2)	TB3-WR (рис.3)	
10	7,054E+19	5,557E+19	7,159E+19	21,2/1,5
20	4,962E+19	3,706E+19	4,874E+19	25,3/1,8
30	3,692E+19	3,458E+19	3,677E+19	6,3/0,4
40	4,940E+19	3,708E+19	4,874E+19	24,9/1,3
50	6,985E+19	5,530E+19	7,142E+19	20,8/2,3
52	7,010E+19	5,785E+19	7,263E+19	17,5/3,6
60	3,733E+19	3,496E+19	4,058E+19	6,3/8,7

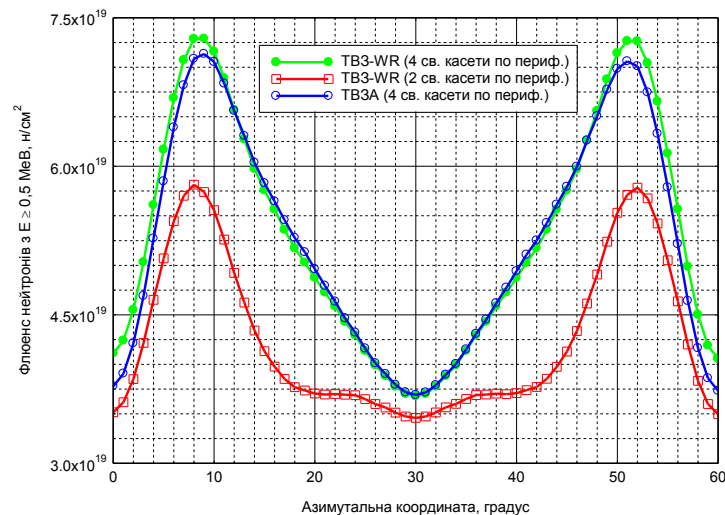
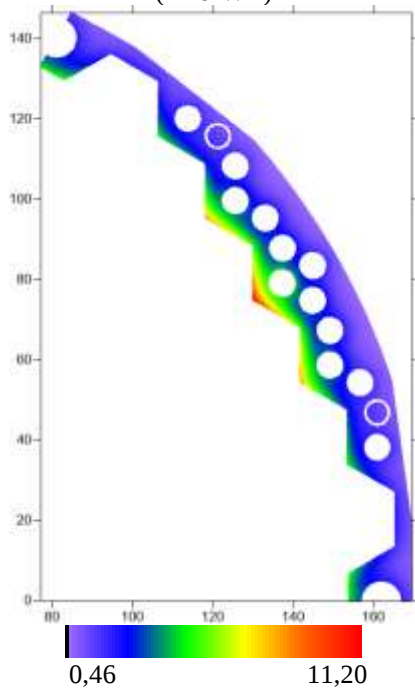


Рисунок 8 – Азимутальний розподіл флюєнсу нейтронів на зовнішній поверхні шахти внутрішньокорпусної на рівні середини активної зони

2 свіжі касети в периферійному ряді
(TB3-WR)



4 свіжі касети в периферійному ряді
(TB3-WR)

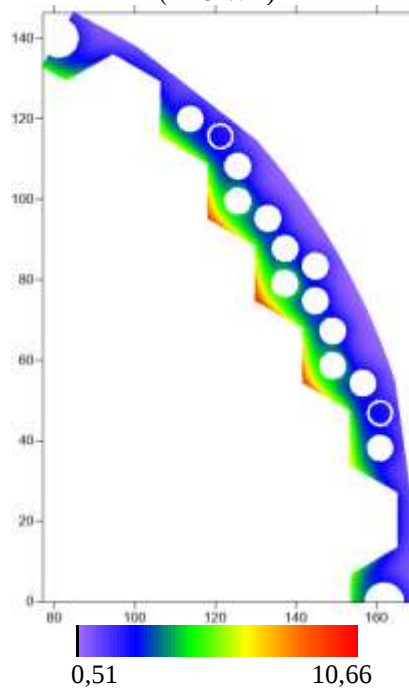


Рисунок 9 – Радіальний розподіл енерговиділення у вигородці на аксіальних рівнях максимального значення

Висновки

Порівняння компоновок з різною кількістю свіжого палива у периферійному ряді ТВЗ показало значний вплив цього фактору на радіаційне навантаження. Зменшення кількості ТВЗ 1-го року експлуатації в крайніх рядах призводить до суттєвого зниження радіаційного навантаження на елементи ВКП, зокрема на вигородку та ШВК.

Найбільше зниження рівня флюенсу спостерігається при використанні по периферії меншої кількості свіжих ТВЗ 1-го року експлуатації та повного завантаження паливом ТВЗ-WR. Розподіл енерговиділення демонструє відмінності між різними компоновками паливних завантажень. Заміна свіжих ТВЗ 1-го року експлуатації у периферійному ряді на вигорілі ТВЗ 4-го року експлуатації призводить до зниження максимальних значень енерговиділення.

V. Konshin¹, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2591-3589

B. Hodunok¹, master student, ORCID 0009-0001-9413-8515

M. Ieremenko², Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0002-5411-7920

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

²State enterprise «State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety»

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DIFFERENT CORE LAYOUT ON THE RADIATION LOAD OF VVER-1000 REACTOR INTERNAL DEVICES

When operating the power units of nuclear power plants beyond their projected lifespan, it is crucial to consider the impact of various operational factors, such as neutron irradiation, elevated temperatures, and cyclic loading, on the reactor core and internal structures. These factors lead to significant changes in the properties of the metal used in these components. It is also important to note that each change in reactor power results in a considerable variation in gamma radiation, which, in turn, contributes to the cyclic loading of the core baffle and the reactor barrel. This effect is primarily manifested in the reduced resistance to brittle fracture, commonly referred to as embrittlement, and it also leads to an increase in radiation exposure for the reactor core and internal devices.

The implementation of core layouts that minimize neutron leakage from the active zone is one of the key measures to reduce the radiation impact on the discussed elements of internal structures. This is achieved by strategically placing spent fuel assemblies still in operation at the periphery of the active zone and fresh fuel in the central region. Different configurations of fuel loadings in nuclear reactors significantly influence the unevenness of energy release, which can introduce additional safety risks.

In this article, various configurations of the reactor's active zone have been examined using thermal power assemblies of the types TVSA and FA-WR. Additionally, a comparison was made regarding the influence of these assemblies on the radiation exposure of the shielding structures under the considered fuel loading configurations. As a result of the calculations performed, values for the fast neutron flux were obtained at selected calculation points within the active zone of the VVER-1000 reactor and at the center of the internal core shaft. Furthermore, the distribution of power outputs from the core baffle in the axial layer of maximum loading was also determined.

Key words: reactor barrel, reactor VVER-1000, internal devices, fluence, energy release, core baffle, FA-WR.

References

1. VVER Core Design and Safety Analyses | Westinghouse Nuclear. *Shaping Tomorrow's Energy* | Westinghouse Nuclear.
URL: <https://westinghousenuclear.com/data-sheet-library/vver-core-design-and-safety-analyses/>.
2. DOORS 3.2: One-, Two- and Three-Dimensional Discrete Ordinates Neutron/Photon Transport Code System. RSIC Code package CCC-650 URL: <https://rsicc.ornl.gov/codes/ccc/ccc6/ccc-650.html>.
3. John F. Carew, Arnold L. Aronson Method for Calculating Pressure Vessel Fluence. A Training Course for the Ukrainian State Scientific & Technical Center. Informal Technical Report. Vol 1. BNL, Upton, New York 11973-5000, 2001.
4. John F. Carew, Arnold L. Aronson Method for Calculating Pressure Vessel Fluence. A Training Course for the Ukrainian State Scientific & Technical Center. Informal Technical Report. Vol 2. BNL, Upton, New York 11973-5000, 2001.

Надійшла: 30.04.2025

Received: 30.04.2025