

О. М. Пугач\*, С. М. Пугач, В. Л. Дем'яохін, В. М. Буканов, О. В. Гриценко

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна*

\*Відповідальний автор: o.m.pugach@gmail.com

**ВАЛІДАЦІЯ ПАКЕТА ПРОГРАМ MСРV  
З БЕЗПЕРЕРВНОЮ ЗА ЕНЕРГІЄЮ БІБЛІОТЕКОЮ МІКРОСКОПІЧНИХ КОНСТАНТ**

Представлено результати робіт з валідації пакета програм MСРV для розрахунку переносу випромінювання в біякорпусному просторі реактора типу ВВЕР-1000 з використанням безперервної за енергією бібліотеки мікроскопічних констант. Валідацію виконано на основі експериментальних даних, отриманих у макетному та натурних експериментах. Показано можливість використання пакета програм MСРV для моделювання поширення нейтронів і гамма-квантів у складному гетерогенному середовищі ядерного реактора і отримання валідованих значень функціоналів нейтронного та гамма-потоків у біякорпусному просторі ВВЕР-1000.

*Ключові слова:* програма розрахунку переносу випромінювання, валідація, ВВЕР-1000, MСРV.

**1. Вступ**

Конструкційні елементи ядерного енергетичного реактора під час експлуатації піддаються дії нейтронного і гамма-випромінювання, що призводить до змін механічних властивостей металу, з якого вони виготовлені. Це впливає на термін безпечної експлуатації енергоблока. Тому важливим та достатньо складним етапом роботи з науково-технічного обґрунтування можливості продовження терміну роботи енергоблока на понад-проектний період є визначення радіаційного навантаження конструкційних елементів реакторної установки, насамперед, внутрішньокорпусних пристроїв та корпусу реактора (КР).

Конструкція ВВЕР, а саме цього типу реактори експлуатуються в Україні, не дає змоги експериментально визначити радіаційне навантаження його конструкційних елементів. Для вирішення цієї задачі необхідне застосування спеціальних методик, які в якості обов'язкового елемента включають розрахунки переносу випромінювання, а саме нейтронів і гамма-квантів.

Складовою частиною методики, що вже багато років використовується спеціалістами Інституту ядерних досліджень (ІЯД) НАН України для визначення радіаційного навантаження в конструкційних елементах ВВЕР-1000 [1], є пакет програм MСРV [2], що використовує метод Монте-Карло в багатогруповому наближенні теорії переносу нейтронів.

У той же час сучасні світові підходи до транспортних розрахунків вимагають, щоб відповідна програма мала можливість розраховувати перенесення не лише нейтронів, а також і гамма-квантів. Крім того, вона повинна мати можливість використовувати не лише багатогрупові, але й безпе-

рервні за енергією бібліотеки мікроскопічних констант.

Тому нами було виконано комплекс робіт з відповідного вдосконалення пакета програм MСРV, перш за все, блока взаємодії. Сьогодні він має можливість використовувати файли в ACE-форматі [3] з будь-якої бібліотеки оцінених ядерних даних.

Згідно із сучасними поглядами на верифікацію і валідацію будь-яких програмних засобів, наприклад, викладених у запропонованій нами схемі для транспортної програми [4], будь-які зміни у програмі вимагають її повторної перевірки. Тому нами було проведено верифікацію математичних і розрахункових моделей усіх удосконалених елементів пакета програм MСРV, а також валідацію удосконаленого пакета програм MСРV з використанням даних із бібліотек: ENDF/B-VII.1 [5] для нейтронів і MCPLIB02 [6] для гамма-квантів. Ці бібліотеки широко використовуються в роботах, пов'язаних із дозиметрією реакторів.

**2. Валідація пакета MСРV з використанням безперервної за енергією бібліотеки мікроскопічних констант на основі результатів макетного експерименту**

З метою перевірки результатів розрахунків переносу нейтронів у складному середовищі ВВЕР-1000, отриманих за допомогою пакета програм MСРV з використанням безперервної за енергією бібліотеки мікроскопічних констант, було виконане порівняння їх з розрахунковими й експериментальними даними, отриманими на дослідницькому реакторі нульової потужності LR-0 Інституту ядерних досліджень (м. Ржеж, Чеська Республіка) у рамках проекту REDOS [7]. Кон-

струкція реактора LR-0 дає змогу створити повномасштабну модель сектора ВВЕР у радіальному напрямку від активної зони до біологічного захисту. Експериментальні дані, отримані на такому макеті ВВЕР-1000, дають можливість дослідити зміну характеристик поля нейтронів від активної зони (АКЗ) до зовнішньої поверхні корпусу реального реактора.

Спектри нейтронів і гамма-квантів, оцінені просторові та спектральні індекси є основними даними цього макетного експерименту. Порівняння результатів розрахунків переносу нейтронів і гамма-квантів з цими даними дає змогу судити, наскільки правильно відповідна програма здійснює розрахунки у складному залізо-водному середовищі, що імітує середовище ВВЕР-1000.

Спектральні індекси визначаються як відношення інтегральних потоків вище різних енергій

нейтронів в одній і тій же точці установки, тобто вони характеризують форму спектра в цій точці.

Просторові індекси (коефіцієнти ослаблення) визначаються як відношення інтегральних потоків нейтронів вище певних енергій у різних точках установки. Ці індекси показують ослаблення інтегральних потоків нейтронів шарами води і/або заліза між зовнішніми поверхнями шахти і КР.

Експериментальні просторові індекси оцінювалися комбінацією вимірювань, виконаних нейтронним спектрометром і системою моніторингу потужності реактора.

Виходячи з інформації, наведеної у [8], було розроблено розрахункову модель макета (рис. 1) через адаптації розрахункової моделі реакторної установки з ВВЕР-1000 до конструкційних особливостей реактора LR-0.

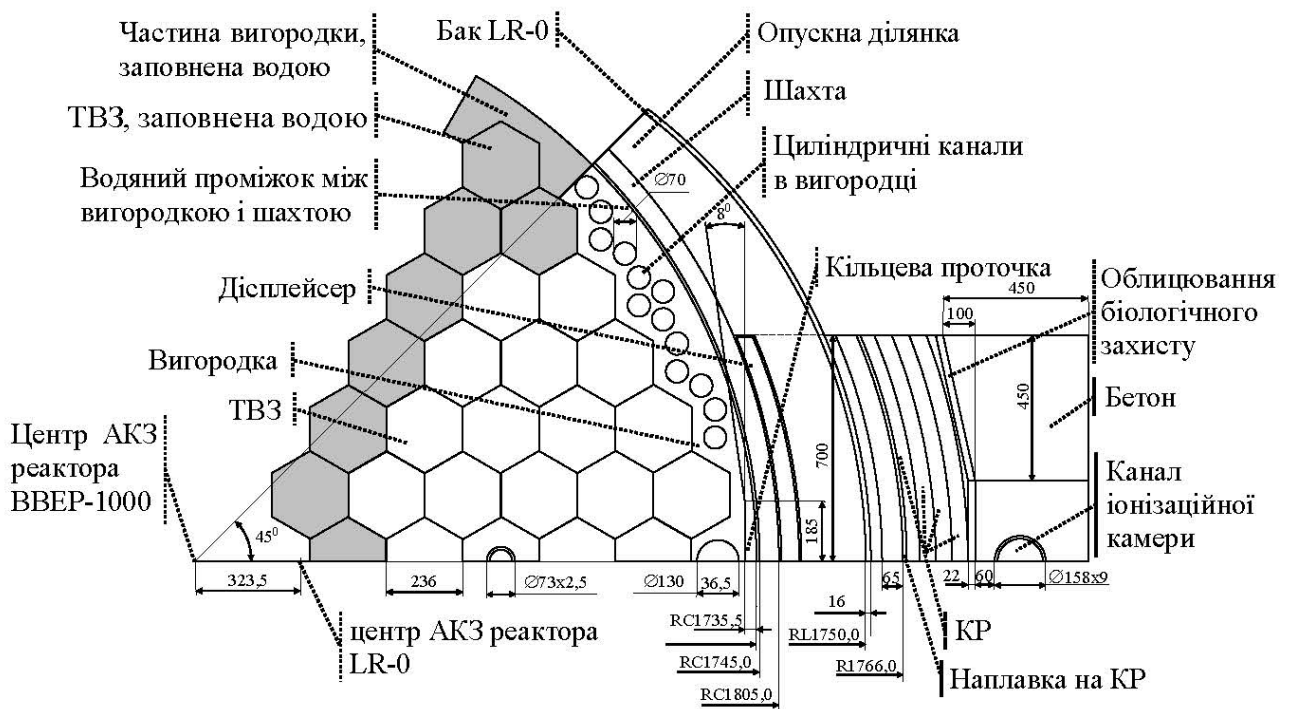


Рис. 1. Частина горизонтального розрізу розрахункової моделі LR-0.  
 RL – радіус відносно центра бака LR-0, RC – радіус відносно центра АКЗ ВВЕР-1000.  
 Вказані геометричні параметри вважаються незмінними за висотою.

Оскільки всі вимірювання виконувалися тільки на осі симетрії макета, а завантаження АКЗ було дзеркально-симетричним, то розрахункова модель являє собою тридцятиградусний сектор симетрії з використанням дзеркального відображення на нижній границі, яка відповідає осі макета. В якості лівої границі розрахункової моделі вибрано ламану, яка відповідає границі 60-градусного сектора симетрії. Простір між лівою границею моделі та гранями касет макета заповнено водою, а на самій границі використовується умова абсолютного поглинання.

При розрахунках переносу нейтронів і гамма-квантів транспортною програмою пакета MСРV реєстрація історій змодельованих частинок виконувалася в об'ємних детекторах на підставі оцінки по пробігу.

У ході виконання розрахунків, пов'язаних з перевіркою правильності роботи пакета MСРV, розрахункові детектори розташовувалися в усіх точках макета, де проводилися вимірювання. Отримані за допомогою пакета MСРV спектри нейтронів і гамма-квантів порівнювалися з отриманими на макеті (рис. 2), а також з результатами

розрахунків іншими програмами [9] (рис. 3). На представлених рисунках видно добру узгодже-

ність отриманих результатів як з експериментальними, так і з результатами інших розрахунків.

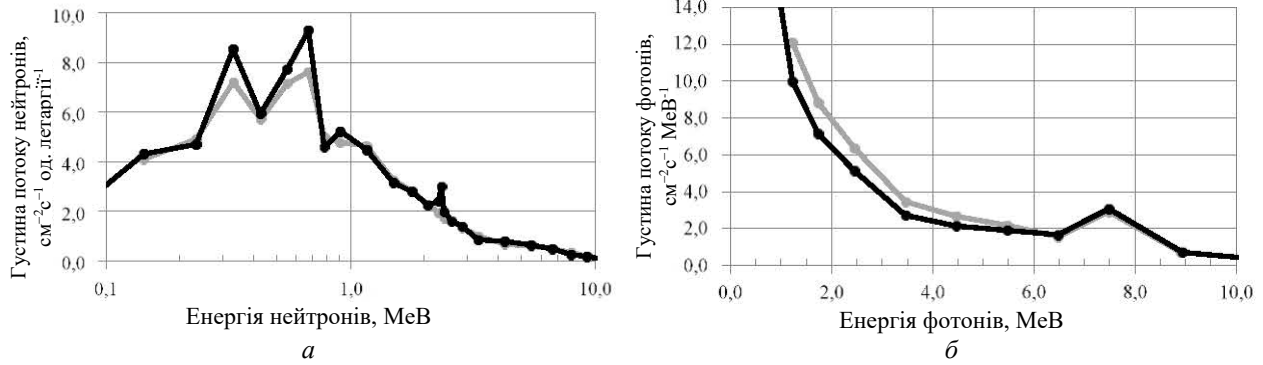


Рис. 2. Спектри нейтронів (а) і гамма-квантів (б), отримані в експерименті (—○) та у розрахунку пакетом MCPV (—●) посередині товщини імітатора КР, нормовані на відповідні значення потоків нейтронів з енергією вище 1 MeV на зовнішній поверхні імітатора КР.

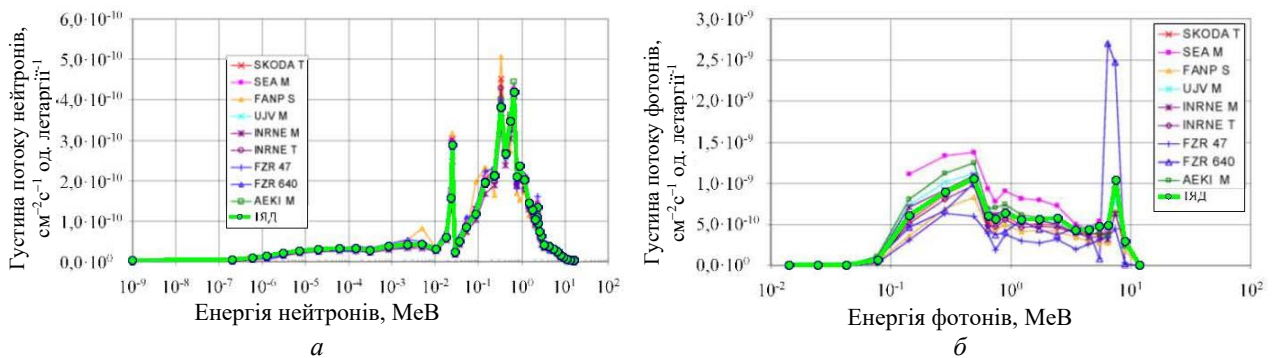


Рис. 3. Розрахункові спектри нейтронів (а) і гамма-квантів (б), отримані посередині товщини імітатора КР для джерела нейтронів потужністю 1 нейтр./с. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

На основі отриманих у транспортному розрахунку потоків визначалися просторові та спектральні індекси. У табл. 1 представлено відносні відхилення розрахункових значень спектральних

індексів, отриманих учасниками проекту REDOS [9] та за допомогою пакета програм MCPV, від експериментальних.

Таблиця 1. Діапазон відносних відхилень розрахункових значень спектральних індексів від експериментально отриманих для різних програмних комплексів, %

Організація, країна	Програма / бібліотека	Нейтрони	Гамма-кванти
ІЯД НАН України, Україна	MCPV / ENDF/B-VII.1	-5,3 ... 13,9	-24,9 ... 0,2
	MCPV / 51n ENDF/B-VI	-6,7 ... 12,7	-
SKODA, Чехія	TORT / BUGLE-96T	-9,4 ... 9,0	-25,8 ... -4,9
SEA, Іспанія	MCNP / ENDF/B-VI	0,0 ... 16,9	-14,9 ... 12,4
FANP, Німеччина	DORT Synthesis / BUGLE-96	-12,1 ... 10,2	-20,8 ... -0,3
UJV, Чехія	MCNP / ENDF/B-VI	-5,3 ... 11,9	-22,1 ... 4,9
INRNE, Болгарія	MCNP / ENDF/B-VI	-8,8 ... 13,1	-20,0 ... 8,3
	TORT / BGL1000	-6,6 ... 11,9	-28,8 ... 8,6
FZR, Німеччина	TRAMO / 47n/20g ENDF/B-VI	-8,6 ... 8,7	-23,3 ... -0,7
	TRAMO / 640n/94g ENDF/B-VI	-2,9 ... 13,7	-23,7 ... 5,2
KFKI AEKI, Угорщина	MCNP / ENDF/B-VI	-4,9 ... 9,3	-21,4 ... 4,2

Як видно з рисунків і табл. 1, результати, отримані за допомогою пакета програм MCPV, добре узгоджуються як з експериментальними даними, так й з результатами, отриманими учасниками проекту REDOS за допомогою визнаних програм.

Подальшу валідацію удосконаленого пакета MCPV було виконано з використанням даних, отриманих у білякорпусному просторі діючого ВВЕР-1000.

### 3. Валідація пакета MСРV з використанням безперервної за енергією бібліотеки мікроскопічних констант на основі результатів дозиметричних вимірювань біля зовнішньої поверхні КР

Конструкційні особливості реакторів типу ВВЕР-1000 практично виключають можливість дозиметрії гамма-квантів, тому єдиним варіантом перевірки достовірності результатів розрахунку переносу випромінювання в білякорпусному просторі ВВЕР-1000, є порівняння розрахованих значень, отриманих за допомогою пакета MСРV, з результатами дозиметричних вимірювань нейтронів біля зовнішньої поверхні КР.

Згідно зі стандартом [1], відповідно до якого виконуються роботи з визначення умов опро-

мінення і радіаційного навантаження КР ВВЕР-1000, результатами дозиметричних вимірювань біля зовнішньої поверхні КР є питомі активності продуктів реакцій активації нейтронно-активаційних детекторів (НАД) з ніобію, заліза, титану і міді на момент кінця опромінювання.

Методику отримання експериментальних даних, реалізовану в ІЯД НАН України, з обґрунтуванням їхньої достовірності наведено в роботі [10].

Враховуючи особливості умов опромінювання НАД біля зовнішньої поверхні КР діючого енергоблока, можна визначити продукти реакції активації детекторів, які можна виміряти після опромінювання протягом паливної кампанії. У табл. 2 представлено ядерно-фізичні характеристики таких продуктів реакцій активації НАД.

Таблиця 2. Ядерно-фізичні характеристики продуктів реакцій активації НАД, що опромінюються біля зовнішньої поверхні КР ВВЕР-1000

Елемент	Реакція	Ефективний поріг, МеВ	Період напіврозпаду продукту реакції, доба	Енергія гамма-квантів, кеВ	Квантовий вихід, %
Ніобій	$^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}$	теплові	$7,41 \cdot 10^4$	702,65 871,09	99,80 99,80
	$^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}^*$	0,8	5891,32	16,61 18,62	9,25 1,79
Тантал**	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$	теплові	114,43	1121,29 1189,04 1221,40 1231,00	35,24 16,49 27,23 11,62
Залізо	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}^*$	3,0	312,20	834,85	99,98
Титан	$^{nat}\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}^*$	3,9	83,79	889,23 1120,55	99,98 99,99
Мідь	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}^*$	5,6	1925,28	1173,24 1332,50	99,85 99,98

Примітки. \* Використовуються для забезпечення достовірності визначення радіаційного навантаження КР ВВЕР-1000 [7]; \*\* завжди присутній у НАД з ніобію, вміст вказується у сертифікаті на НАД.

Результати порівняння розрахованих за допомогою пакета MСРV значень питомих активностей продуктів реакцій активації НАД з отриманими

експериментально для ряду паливних кампаній діючих енергоблоків АЕС України з реактором типу ВВЕР-1000 представлено в табл. 3.

Таблиця 3. Усереднені відношення розрахункових і експериментально отриманих питомих активностей продуктів реакцій активації НАД, що опромінювалися біля зовнішньої поверхні КР діючих енергоблоків АЕС України, та їх середньоквадратичні відхилення

АЕС - № блока - № паливної кампанії	Реакція активації					
	$^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}$	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$	$^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	$^{nat}\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}$	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$
ХАЕС - 1 - 30	$1,00 \pm 0,05$	$1,01 \pm 0,06$	$0,84 \pm 0,05$	$1,08 \pm 0,04$	$1,16 \pm 0,05$	$1,05 \pm 0,04$
ХАЕС - 2 - 15	$1,00 \pm 0,07$	$0,98 \pm 0,02$	$0,82 \pm 0,06$	$1,08 \pm 0,08$	$1,13 \pm 0,09$	$1,12 \pm 0,08$
РАЕС - 3 - 27	$1,00 \pm 0,08$	$0,93 \pm 0,14$	$0,93 \pm 0,08$	$1,01 \pm 0,10$	$1,09 \pm 0,11$	$0,97 \pm 0,10$
РАЕС - 4 - 08	$1,06 \pm 0,05$	$0,90 \pm 0,09$	$1,01 \pm 0,05$	$1,07 \pm 0,06$	$1,17 \pm 0,07$	$1,06 \pm 0,06$
ПАЕС - 1 - 29	$1,03 \pm 0,05$	$1,04 \pm 0,06$	$0,96 \pm 0,07$	$1,05 \pm 0,05$	$1,15 \pm 0,06$	$1,06 \pm 0,06$
ПАЕС - 2 - 27	$1,02 \pm 0,09$	$1,03 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,08$	$1,01 \pm 0,04$	$1,10 \pm 0,05$	$1,00 \pm 0,06$
ПАЕС - 3 - 25	$1,05 \pm 0,10$	$0,91 \pm 0,08$	$0,87 \pm 0,04$	$1,04 \pm 0,04$	$1,10 \pm 0,05$	$0,98 \pm 0,04$

АЕС - № блока - № паливної кампанії	Реакція активації					
	$^{93}\text{Nb}(n, \gamma)^{94}\text{Nb}$	$^{181}\text{Ta}(n, \gamma)^{182}\text{Ta}$	$^{93}\text{Nb}(n, n')^{93m}\text{Nb}$	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	$^{nat}\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}$	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$
ЗАЕС - 1 - 27	1,01 ± 0,04	0,92 ± 0,05	0,90 ± 0,04	1,04 ± 0,04	1,08 ± 0,05	1,04 ± 0,05
ЗАЕС - 2 - 27	0,97 ± 0,07	0,88 ± 0,03	0,86 ± 0,06	0,95 ± 0,04	1,03 ± 0,04	0,97 ± 0,04
ЗАЕС - 3 - 26	1,08 ± 0,04	1,08 ± 0,01	0,97 ± 0,05	1,12 ± 0,07	1,18 ± 0,07	1,08 ± 0,06
ЗАЕС - 4 - 24	1,05 ± 0,07	0,97 ± 0,09	0,96 ± 0,06	1,07 ± 0,06	1,17 ± 0,06	1,04 ± 0,09
ЗАЕС - 5 - 25	1,03 ± 0,09	0,87 ± 0,09	1,03 ± 0,06	1,02 ± 0,03	1,11 ± 0,03	1,00 ± 0,04
<b>Середнє</b>	<b>1,03 ± 0,07</b>	<b>0,97 ± 0,06</b>	<b>0,94 ± 0,05</b>	<b>1,06 ± 0,05</b>	<b>1,14 ± 0,05</b>	<b>1,04 ± 0,05</b>

Аналіз отриманих результатів показує, що середні відношення розрахункових та отриманих експериментально питомих активностей відрізняються від одиниці менше, ніж на 20 %, що згідно з вимогами [1, 11] є допустимим і, отже, пакет програм MСРV досить адекватно відображає реальну ситуацію із полем випромінювання у білякорпусному просторі діючих ВВЕР-1000.

#### 4. Висновки

Згідно зі схемою процесу верифікації та валідації програмних засобів, що використовуються при моніторингу радіаційного навантаження КР,

на основі даних макетного експерименту і результатів дозиметричних вимірювань біля зовнішньої поверхні корпусу ВВЕР-1000 виконано валідацію удосконаленого пакета програм MСРV, який використовує безперервну за енергією бібліотеку мікроскопічних констант.

Аналіз отриманих результатів показав можливість використання удосконаленого пакета програм MСРV для моделювання поширення нейтронів і гамма-квантів у складному гетерогенному середовищі ядерного реактора типу ВВЕР-1000 і, в кінцевому рахунку, отримання валідованих значень функціоналів нейтронного та гамма-потоків у його білякорпусному просторі.

#### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. СОУ 73.1-23724640-001-2020. Система якості. Визначення умов опромінення і радіаційного навантаження корпусу реактора ВВЕР-1000 (Київ, Ін-т ядерних дослідж. НАН України, 2020) 37 с. / Standard of organization of Ukraine SOU 73.1-23724640-001-2020. Quality system. Determination of irradiation conditions and radiation load of the VVER-1000 reactor vessel (Kyiv, Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2020) 37 p. (Ukr)
2. В.Н. Буканов и др. Пакет программ MСРV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000. Препринт Ин-та ядерных исследований. НАН Украины КИЯИ 05-6 (Киев, 2005) 30 с. / V.N. Bukanov et al. MСРV Program Package for Calculation of Neutron Flux Functionals Impacting the VVER-1000 Reactor Pressure Vessel. Preprint of the Institute for Nuclear Research of the National Academy of Sciences of Ukraine KINR 05-6 (Kiev, 2005) 30 p. (Rus)
3. J.L. Conlin, P. Romano. A Compact ENDF (ACE) Format Specification. Technical Report. Los Alamos National Laboratory. No. LA-UR-19-29016. (Los Alamos, NM, USA, 2019) 55 p.
4. В.Л. Демехин, В.В. Илькович, В.Н. Буканов. Верификация и валидация: процесс vs процедура. Ядерна фізика та енергетика 14(2) (2013) 150. / V.L. Diemokhin, V.V. Ilkovych, V.N. Bukanov. Verification and validation: process vs procedure. Nucl. Phys. At. Energy 14(2) (2013) 150. (Rus)
5. M.B. Chadwick et al. ENDF/B-VII.1 Nuclear data for science and technology: cross sections, covariances, fission product yields and decay data. Nuclear Data Sheets 112(12) (2011) 2887.
6. H.G. Hughes et al. Information on the Photon Library MСPLIB02 Los Alamos National Laboratory Internal Memorandum, X-6: HGH-93-77 and LA-UR-98-539 (Los Alamos, NM, USA, 1996) 10 p.
7. A. Ballesteros et al. Reactor dosimetry: accurate determination and benchmarking of radiation field parameter, relevant for pressure vessel monitoring (REDOS). Final Report, 2005. EUR 21771.
8. B. Ošmera, S. Zaritskij. WWER-1000 mock-up experiment (Rev. 1, May 2002): Report. Nuclear Research Institute Řež plc, Czech Republic. No. RER 4017-04583G. (Řež plc, Czech Republic, 2004) 104 p.
9. B. Böhmer Comparative studies and uncertainty sources: Workshop "RADE 2006", Use of RPV Dosimetry Benchmark's Results for Determining Radiation Embrittlement Damage, Bansko, Bulgaria, 1 - 8 April 2006 – 1 electron optical disk (CD-ROM).
10. В.Н. Буканов и др. Обеспечение достоверности экспериментальных данных, получаемых при дозиметрических измерениях у внешней поверхности корпуса ВВЭР. Ядерна фізика та енергетика 2(24) (2008) 49. / V.N. Bukanov et al. VVER ex-vessel dosimetry experimental data reliability support. Nucl. Phys. At. Energy 2(24) (2008) 49. (Rus)
11. Regulatory Guide 1.190. Computational and dosimetry methods for determining pressure vessel neutron fluence (US Nuclear Research Commission, 2001) 53 p.

**O. M. Pugach\*, S. M. Pugach, V. L. Diemokhin, V. N. Bukanov, O. V. Grytsenko**

*Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine*

\*Corresponding author: o.m.pugach@gmail.com

**VALIDATION OF THE CODE PACKAGE MCPV  
WITH CONTINUOUS-ENERGY DATA LIBRARY**

The results of the validation of the code package MCPV for the calculation of radiation transport within VVER-1000 reactor type near-vessel space using a continuous-energy data library are presented. The validation is carried out based on the experimental data obtained in mock-up and full-scale experiments. It is shown that the code package MCPV can be used to simulate neutrons and gamma quanta transport through the complicated heterogeneous environment of a nuclear reactor and to obtain the valid values of the functionals of the neutron and gamma fluxes within VVER-1000 near-vessel space.

*Keywords:* program of radiation transport calculation, VVER-1000, MCPV.

Надійшла / Received 13.02.2024