

А. М. Пугач*, С. М Пугач, В. Л. Демехин, В. Н. Буканов, А. В. Гриценко

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев, Украина

*Ответственный автор: apugach@kinr.kiev.ua

**ВАЛИДАЦИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ MСРV,
АДАПТИРОВАННОГО ДЛЯ РАСЧЕТОВ ПЕРЕНОСА НЕЙТРОНОВ
В ОКОЛОКОРПУСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ РЕАКТОРА ВВЭР-440**

Представлены результаты работ по валидации пакета программ MСРV, используемого в методике определения условий облучения корпусов и образцов-свидетелей реакторов типа ВВЭР-440 украинских АЭС. Валидация выполнена на основе экспериментальных данных, полученных в макетном и натуральных экспериментах. Показана возможность использования пакета программ MСРV для моделирования распространения нейтронов в сложной гетерогенной среде ядерного реактора и получения достоверных значений функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус и образцы-свидетели реактора ВВЭР-440.

Ключевые слова: условия облучения, программа расчета переноса нейтронов, валидация, ВВЭР-440.

1. Введение

Дозиметрия корпуса реактора (КР) и образцов-свидетелей (ОС) металла корпуса являются важными составными частями научно-технической поддержки безопасной эксплуатации ядерной энергетической установки. От достоверности данных об условиях облучения КР и ОС в значительной мере зависит надежность оценки технического состояния корпуса и прогнозирования его эксплуатационного ресурса.

Поэтому для выполнения работ по подтверждению достоверности результатов расчетов переноса нейтронов и определения условий облучения корпуса ВВЭР и ОС нами была предложена схема процедуры верификации программного средства [1], которая далее была развита в схему процесса верификации и валидации [2]. Согласно предложенной схеме валидация определяется как подтверждение адекватности результатов математического моделирования экспериментальным данным путем их сравнения и является по сути непрерывным процессом.

Первые результаты валидации пакета программ MСРV [3], разработанного специалистами Института ядерных исследований НАН Украины и используемого при мониторинговании радиационной нагрузки корпусов ВВЭР, были представлены в работе [4].

В данной работе представлен следующий блок результатов валидации пакета программ MСРV.

2. Валидация пакета MСРV на основе результатов макетного эксперимента

Макетный эксперимент был реализован на исследовательском реакторе нулевой мощности

LR-0 Института ядерных исследований (г. Ржеж, Чехия). Этот реактор проектировался для исследований нейтронно-физических параметров активной зоны (АКЗ) реакторов типа ВВЭР. Технологическое оборудование реактора LR-0 позволяет создавать различные макеты АКЗ реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000 и исследовать характеристики поля нейтронов в АКЗ, а также в пространстве между АКЗ и биологической защитой. При этом конфигурация макета изменяется в зависимости от решаемой задачи.

В рамках проекта REDOS реализовано две модели реактора типа ВВЭР-440: первая – без кассет-экранов (КЭ) [5], вторая – с КЭ на периферии АКЗ [6].

Спектры нейтронов, пространственные и спектральные индексы являются основными данными этого макетного эксперимента [7].

Пространственные индексы (коэффициенты ослабления) определяются как отношения интегральных потоков нейтронов выше определенных энергий в различных точках макета. Эти индексы показывают ослабление интегральных потоков нейтронов слоями воды и/или железа между внешними поверхностями шахты и КР.

Спектральные индексы определяются как отношения интегральных потоков выше различных энергий нейтронов в одной и той же точке макета, т.е. они характеризуют форму спектра в этой точке.

В рамках данной работы перед выполнением расчетов на основе информации, представленной в [5, 6], была разработана расчетная модель макета и введена в транспортную программу пакета MСРV.

© А. М. Пугач, С. М Пугач, В. Л. Демехин,
В. Н. Буканов, А. В. Гриценко, 2019

В ходе выполнения расчетов, связанных с проверкой правильности работы пакета MСРV, расчетные детекторы располагались во всех точках макета, где проводились измерения. Полученные с помощью пакета MСРV спектры

нейтронов сравнивались с измеренными (рис. 1). Анализ результатов сравнения показал хорошую согласованность расчетных и экспериментальных данных.

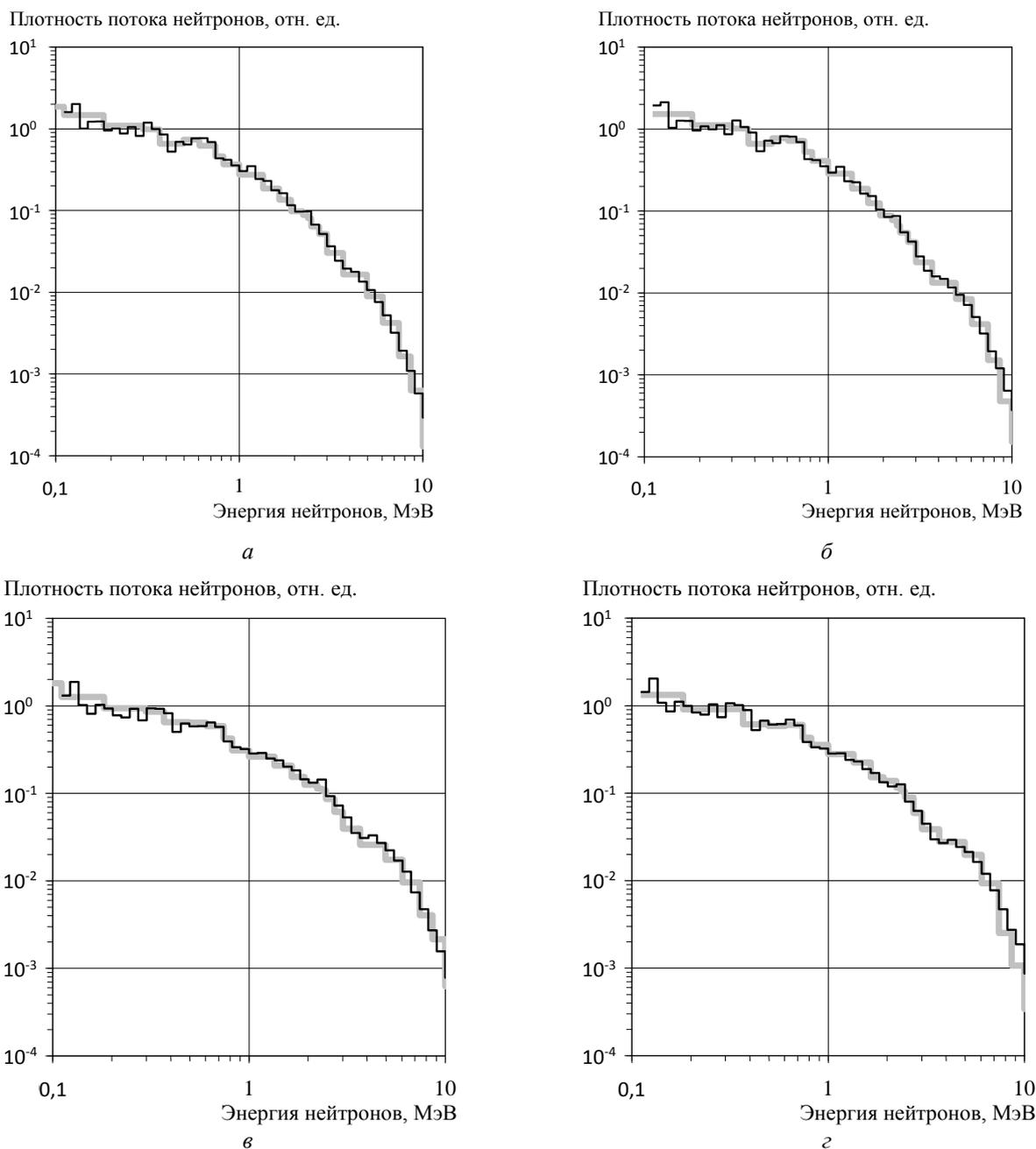


Рис. 1. Спектры нейтронов, полученные в эксперименте (—) и в расчете пакетом MСРV (---) в различных точках макета реактора ВВЭР-440, реализованного на реакторе LR-0: внешняя поверхность шахты при отсутствии (*a*) и наличии (*б*) КЭ в АКЗ; внутренняя поверхность КР при отсутствии (*в*) и наличии (*г*) КЭ в АКЗ.

На основе полученных в транспортном расчете групповых потоков определялись пространственные и спектральные индексы. В табл. 1 представлены диапазоны относительных отклонений расчетных данных, полученных различными

организациями [8], от экспериментальных. Как видно из таблицы, результаты, полученные с помощью пакета программ MСРV, не хуже результатов, полученных такими известными программами, как DORT, TORT и MCNP.

Таблица 1. Диапазон относительных отклонений расчетных значений пространственных и спектральных индексов от экспериментальных для различных программных комплексов, %

Организация, страна	Программа/библиотека	Отсутствие КЭ в АКЗ	Наличие КЭ в АКЗ
ИЯИ НАН Украины	MCPV	-23,0 ... 5,0	-19,9 ... 3,5
SKODA, Чехия	TORT/BUGLE-96T	-21,0 ... 9,0	-14,0 ... 11,0
FANP, Германия	SYNTH/BUGLE-96	-18,0 ... 18,0	-
NRI, Чехия	MCNP/ENDF/B-VI	-24,0 ... 22,0	-33,0 ... 13,0
INRNE, Болгария	MCNP/ENDF/B-VI	-25,0 ... 13,0	-9,0 ... 15,0
	TORT/BGL1000	-21,0 ... 23,0	-9,0 ... 12,0
FZR, Германия	TRAMO/47n/20g ENDF/B-VI	-23,0 ... 29,0	-
	TRAMO/640n/94g ENDF/B-VI	-23,0 ... 30,0	-
KFKI AEKI, Венгрия	MCNP/ENDF/B-VI	-21,0 ... 14,0	-15,0 ... 6,0

Таким образом, валидация пакета программ MCPV на основе данных макетного эксперимента показывает возможность использования пакета для расчетов переноса нейтронов в околореакторном пространстве реактора ВВЭР-440. Полученные в ходе макетного эксперимента данные (пространственные и спектральные индексы) являются по своей сути относительными и не позволяют произвести оценку достоверности результатов определения абсолютных значений функционалов нейтронного потока. Поэтому для валидации пакета программ MCPV, адаптированного для расчета переноса нейтронов в околореакторном пространстве реакторов

ВВЭР-440, были использованы результаты дозиметрических измерений на действующих энергоблоках.

3. Валидация пакета MCPV на основе результатов дозиметрических измерений нейтронно-активационных детекторов, расположенных в контейнерах с ОС

В рамках программы ОС металла корпуса ВВЭР-440, реализуемой на энергоблоке № 1 Ровенской АЭС [9], гирлянды с образцами располагаются в каналах для ОС на внешней поверхности шахты напротив АКЗ (рис. 2).

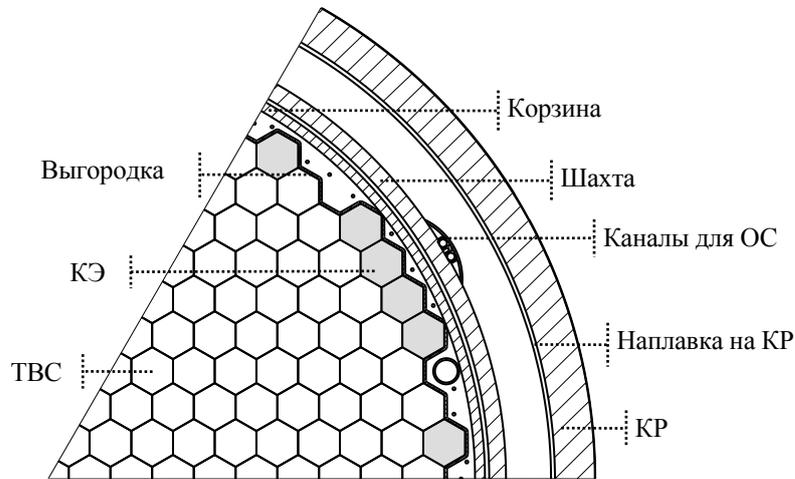


Рис. 2. Схема размещения канала для ОС в реакторе напротив активной зоны (вид сверху).

Комплект ОС IA-ЛК-3, включающий две гирлянды контейнеров 3-1 и 3-2, был загружен в реактор ВВЭР-440 энергоблока № 1 после проведения восстановительного отжига его корпуса посреди 28-й топливной кампании, а извлечен и доставлен в ИЯИ НАН Украины для испытаний после окончания 32-й кампании.

С помощью специальной методики, подобной той, что используется для определения ориентации контейнерных сборок в реакторе ВВЭР-1000

[10], была определена ориентация каждого контейнера относительно АКЗ. Полученные данные были учтены в расчетной модели реакторной установки реактора ВВЭР-440 энергоблока № 1 Ровенской АЭС.

Для дозиметрического сопровождения в некоторых контейнерах с ОС были установлены капсулы с нейтронно-активационными детекторами (НАД) из ниобия, железа и меди. После извлечения комплекта ОС IA-ЛК-3 из реактора и разбор-

ки контейнеров были выполнены спектрометрические измерения облученных НАД. Сравнение расчетных значений удельных активностей продуктов реакции активации $^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$, $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$ и $^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$ с полученными экспериментально являлось одним из этапов валидации пакета MСРV.

Наиболее простым методом анализа массива

отношений расчетных и экспериментальных данных есть анализ средних отношений. Для выявления возможных особенностей этих отношений более оптимальным является сравнение средних отношений, полученных для НАД из разных материалов, которые располагались в одной гирлянде контейнеров с ОС. Результаты такого сравнения приведены в табл. 2.

Таблица 2. Усредненные отношения расчетных и экспериментально полученных удельных активностей продуктов реакций активации НАД, сопровождавших облучение ОС в реакторе энергоблока № 1 Ровенской АЭС, и их среднеквадратичные отклонения

№ гирлянды	Реакция активации		
	$^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$
1-1*	0,94 ± 0,13	1,04 ± 0,13	1,01 ± 0,10
3-1	0,99 ± 0,03	1,06 ± 0,05	0,98 ± 0,03
3-2	0,99 ± 0,02	1,06 ± 0,05	0,98 ± 0,05

* Экспериментальные данные представлены в работе [11].

Заметно больший разброс отношений расчетных и экспериментальных данных для гирлянды 1-1 обусловлен тем, что специалисты НИЦ «Курчатовский институт», выполнявшие работу [11], не смогли сориентировать контейнеры с ОС.

Как видно из табл. 2, средние отношения расчетных и экспериментально полученных удельных активностей для каждой гирлянды отличаются от единицы менее чем на 7 %. Следовательно, пакет программ MСРV адекватно отображает реальную ситуацию с полем нейтронов в местах расположения ОС в действующих реакторах ВВЭР-440.

4. Валидация пакета MСРV на основе результатов дозиметрических измерений у внешней поверхности КР действующего энергоблока

Согласно стандарту предприятия [13], в соответствии с которым выполняются работы по определению радиационной нагрузки корпуса ВВЭР-440, результатами дозиметрических измерений у внешней поверхности КР являются удельные активности продуктов реакций активации

НАД из ниобия, железа, титана и меди на момент конца облучения.

Методика получения экспериментальных данных, реализованная в ИЯИ НАН Украины, с обоснованием их достоверности приведена в работе [14].

Сравнение рассчитанных с помощью пакета MСРV значений удельных активностей продуктов реакций активации НАД с полученными экспериментально было выполнено для энергоблоков № 1 и № 2 Ровенской АЭС. Следует заметить, что в АКЗ реактора энергоблока № 1 вместо части ТВС на периферии установлены КЭ.

Анализ полученных результатов показывает, что средние отношения расчетных и полученных экспериментально удельных активностей отличаются от единицы менее чем на 20 % (табл. 3), что согласно требованиям [12, 13] является допустимым и, следовательно, пакет программ MСРV достаточно адекватно отображает реальную ситуацию с полем нейтронов в околокорпусном пространстве действующих реакторов ВВЭР-440.

Таблица 3. Усредненные отношения расчетных и полученных экспериментально удельных активностей продуктов реакций активации НАД, облучавшихся у внешней поверхности КР энергоблоков № 1 и № 2 Ровенской АЭС, и их среднеквадратичные отклонения

№ энергоблока Ровенской АЭС	Реакция активации			
	$^{93}\text{Nb}(n, n')^{93\text{m}}\text{Nb}$	$^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$	$^{nat}\text{Ti}(n, x)^{46}\text{Sc}$	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$
1	1,06 ± 0,07	1,16 ± 0,06	1,10 ± 0,06	1,05 ± 0,06
2	1,01 ± 0,07	1,15 ± 0,08	1,11 ± 0,08	1,05 ± 0,07

5. Выводы

Согласно схеме процесса верификации и валидации программных средств, используемых при мониторинге радиационной нагрузки КР, на основе данных макетного эксперимента и результатов дозиметрических измерений у внешней поверхности шахты и у внешней поверхности КР выполнена валидация пакета

программ MСРV, адаптированного для расчета переноса нейтронов в реакторе ВВЭР-440.

Анализ результатов валидации показал возможность использования пакета для моделирования распространения нейтронов в сложной гетерогенной среде ядерного реактора ВВЭР и, в конечном счете, получения достоверных значений функционалов нейтронного потока в его околорпусном пространстве.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. В.Н. Буканов, В.Л. Демехин, И.И. Липский. Основные положения процедуры верификации программных средств, используемых при дозиметрии корпуса реактора. *Ядерна фізика та енергетика* 1(23) (2008) 62.
2. В.Л. Демехин, В.В. Илькович, В.Н. Буканов. Верификация и валидация: процесс vs процедура. *Ядерна фізика та енергетика* 14(2) (2013) 150.
3. В.Н. Буканов и др. Пакет программ MСРV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000. Препринт Ин-та ядерных исслед. НАН Украины КИЯИ05-6 (Киев, 2005) 28 с.
4. В.Н. Буканов и др. Валидация пакета программ MСРV. *Ядерна фізика та енергетика* 10(2) (2009) 165.
5. В. Osmera, S. Zaritsky. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor, Mock-up No. 1 Description. Report of NRI Řež No. UJV-11811-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/23-2002 (2002).
6. В. Osmera, S. Zaritsky. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor, Mock-up No. 2 Description. Report of NRI Řež No. UJV-11812-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/24-2002 (2002).
7. В. Osmera, S. Zaritsky, M. Holman. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor Experimental Data. Report of NRI Řež No. UJV-11813-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/25-2002 (2002).
8. В. 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 електрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Комплект гирлянд с образцами-свидетелями для сопровождения эксплуатации корпуса реактора блока № 1 Ривненской АЭС на период после восстановительного отжига. Формуляр 180.1/Д1050-2010 (2010).
10. СОУ 73.1-23724640-001-2011. Система якості. Дозиметрія зразків-свідків металу корпусу реактора ВВЕР-1000. Ін-т ядерних дослідж. НАН України (К., 2011) 30 с.
11. Анализ результатов исследований. Выпуск заключительного отчета по исследованию ОС комплекта ІА-ЛК-1. Отчет по этапу 1.8 контракта № 806/08624243/00432 от 13.03.2012 г. НИЦ КИ. Инв. № 220-13/492 от 19.08.2013 г. (Москва, 2013) 80 с.
12. *Regulatory Guide 1.190. "Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence". US Nuclear Research Commission (2001) 53 p.*
13. СОУ 73.1-23724640-002-2011. Система якості. Визначення радіаційного навантаження корпусу реактора ВВЕР-440. Ін-т ядерних дослідж. НАН України (К., 2011) 27 с.
14. 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.

О. М. Пугач*, С. М. Пугач, В. Л. Демьохін, В. М. Буканов, О. В. Гриценко

Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ, Україна

*Відповідальний автор: arugach@kinr.kiev.ua

ВАЛІДАЦІЯ ПАКЕТА ПРОГРАМ MСРV, АДАПТОВАНОГО ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ПЕРЕНОСУ НЕЙТРОНІВ У БІЛЯКОРПУСНОМУ ПРОСТОРІ РЕАКТОРА ВВЕР-440

Представлено результати робіт по валидації пакета програм MСРV, що використовується в методиці визначення умов опромінення корпусів та зразків-свідків реакторів типу ВВЕР-440 українських АЕС. Валидацію виконано на базі експериментальних даних, отриманих у макетному та натурному експериментах. Показано можливість використання пакета програм MСРV для моделювання розповсюдження нейтронів у складному гетерогенному середовищі ядерного реактора та отримання достовірних значень функціоналів нейтронного потоку, що впливає на корпус і зразки-свідки реактора ВВЕР-440.

Ключові слова: умови опромінення, програма розрахунку переносу нейтронів, валидація, ВВЕР-440.

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: apugach@kinr.kiev.ua

VALIDATION OF THE CODE PACKAGE MCPV ADAPTED FOR NEUTRON TRANSPORT CALCULATION WITHIN WWER-440 REACTOR NEAR-VESSEL SPACE

Results of the validation of the code package MCPV that is used for the irradiation conditions determination methodology of the pressure vessels and surveillance specimens of the WWER-440 type reactors of Ukrainian NPPs were presented. The validation is carried out on the basis of the experimental data obtained in mock-up and full-scale experiments. It is shown the code package MCPV may be used to simulate the neutron transport through complicated heterogeneous environment of the nuclear reactor and to obtain the valid values of the functionals of the neutron flux influencing on the pressure vessel and surveillance specimens of the WWER-440 type reactors.

Keywords: irradiation conditions, neutron transport code, validation, WWER-440.

REFERENCES

1. V. N. Bukanov, V. L. Dyemokhin, I. I. Lipsky. Main positions of V&V procedure for the softwares used at reactor pressure vessel dosimetry. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 1(23) (2008) 62. (Rus)
2. V. L. Diemokhin, V. V. Ilkovych, V. N. Bukanov. Verification and validation: process VS procedure. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 14(2) (2013) 150. (Rus)
3. V.N. Bukanov et al. MCPV software package for calculating neutron flux functionals acting on the WWER-1000 vessel. Preprint of the Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine KINR05-6 (Kyiv, 2005) 28 p. (Rus)
4. V. N. Bukanov, O. V. Grytsenko, V. L. Diemokhin, O. M. Pugach, S. M. Pugach. Validation of the code package MCPV. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 10(2) (2009) 165. (Rus)
5. B. Osmera, S. Zaritsky. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor, Mock-up No. 1 Description. Report of NRI Řež No. UJV-11811-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/23-2002 (2002).
6. B. Osmera, S. Zaritsky. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor, Mock-up No. 2 Description. Report of NRI Řež No. UJV-11812-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/24-2002 (2002).
7. B. Osmera, S. Zaritsky, M. Holman. Project REDOS FIKS-CT-2001-00120, Working Package No.1. WWER-440 Mock-up Experiments in the LR-0 Reactor Experimental Data. Report of NRI Řež No. UJV-11813-R and RRC Kurchatov Institute No. 36/25-2002 (2002).
8. 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).
9. A set of garlands with samples-witness to support the operation of the reactor vessel of Unit 1 of the Rivne NPP for the period after the recovery annealing. Form 180.1 / D1050-2010 (2010). (Rus)
10. Standard of organization of Ukraine 73.1-23724640-001-2011. Quality system. Dosimetry of the samples-witness of the metal of the VVER-1000 reactor vessel. Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, 2011) 30 p. (Ukr)
11. Analysis of research results. Issue of the final report on the study of the OS set IA LC-1. Report on stage 1.8 of the contract No. 806/08624243/00432 dated 13.03.2012. SRC KI. Inventory No. 220-13/492 dated 19.08.2013. (Moskva, 2013) 80 p. (Rus)
12. [Regulatory Guide 1.190. "Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence". US Nuclear Research Commission \(2001\) 53 p.](#)
13. Standard of organization of Ukraine 73.1-23724640-002-2011. Quality system. Determination of the radiation load of the VVER-440 reactor vessel. Institute for Nuclear Research, National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, 2011) 27 p. (Ukr)
14. L. A. Bulavin, D. A. Gavryushenko, P. A. Selishchev, V. M. Sysoev. VVER ex-vessel dosimetry experimental data reliability support. *Yaderna Fizyka ta Energetyka (Nucl. Phys. At. Energy)* 2(24) (2008) 54. (Rus)

Надійшла 12.02.2019

Received 12.02.2019