

ВЕРИФИКАЦИЯ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА MCU-NR

Алимов Ю.В., Рождественский И.М., Лебедев С.С., Юферева В.А.,
Шульга А.М., Ромадинов А.М., Жирнов А.П.,
(АО «НИКИЭТ», Москва, Россия)

Введение

Программный комплекс (ПК) MCU-NR с банком данных MDBNR61 является развитием аттестованного ПК MCU-RBMK и предназначен для расчетов нейтронно-физических характеристик канальных энергетических реакторов РБМК-1000 на физических и энергетических уровнях мощности, а также оценки мощности эквивалентной дозы (МЭД) от свежих и облученных тепловыделяющих сборок (ТВС) РБМК-1000 и облученных кобальтовых дополнительных поглотителей (ДП).

Методика нейтронно-физического расчета MCU-NR основана на решении газокинетического уравнения переноса нейтронов методом Монте-Карло (статистических испытаний) с непрерывным описанием энергии нейтронов и реалистичным описанием всех элементов активной зоны. Гетерогенная структура всех элементов активной зоны в расчетной модели сохраняется. Методика расчета использует точные приближения, основанные на физических законах, в описании физических процессов (резонансное поглощение, замедление, термализация, угловое распределение в реакциях рассеяния и т.д.).

ПК MCU-NR разработан в НИЦ «Курчатовский институт». Авторами программного средства являются Бикеев А.С., Гуревич М.И., Калугин М.А., Олейник Д.С., Шкаровский Д.А.

В АО «НИКИЭТ» подготовка исходных данных для прецизионных нейтронно-физических расчетов реакторов РБМК-1000 по MCU-NR осуществляется с использованием платформы GENIFER.

1. Верификация полномасштабного расчета РБМК-1000

Проведена верификация расчетов нейтронно-физических характеристик реакторов РБМК-1000 на энергетических и физических уровнях мощности. Для верификационных исследований выбрано 40 реальных состояний энергоблоков Курской, Ленинградской и Смоленской АЭС на энергетических и физических уровнях мощности за период 2020–2022 гг.

Верификация выполнена путем сравнения с экспериментальными данными и с использованием кросс-верификационных расчетов по аттестованному ПК MCU-RBMK.

Верификация расчетов двумерного и трехмерного распределения плотности потока фотонов, плотности потока быстрых нейтронов и плотности потока тепловых нейтронов в активной зоне реактора РБМК-1000 проведена по результатам измерений сканирующим датчиком, выполненных на энергоблоках Курской и Смоленской АЭС при работе реакторов на стационарном номинальном уровне мощности.

Для верификации использованы результаты измерений сканирующим датчиком, выполненных на энергоблоке № 1 Курской АЭС в 2018 г., на энергоблоке № 2 Курской АЭС в 2015 г., на энергоблоке № 4 Курской АЭС в 2009 и 2011 гг., на энергоблоке № 1 Смоленской АЭС в 2013 г. и энергоблоке № 2 Смоленской АЭС в 2009 г.

Верификация расчетов двумерного и трехмерного распределения плотности потока быстрых нейтронов (ППБН) в активной зоне реактора РБМК-1000 проведена по результатам измерений сканирующим датчиком, выполненных на энергоблоке № 1 Курской АЭС в 2018 г. Экспериментальные данные о распределении ППБН с энергией

выше 1 МэВ получены с использованием подвесок ПИК-БН-Т в центральных гильзах ТВС сб.49. Измерения плотности потока быстрых нейтронов проведены совместно с измерениями полной плотности потока тепловых нейтронов с использованием подвесок ПИК-ВЗ. Кроме того, подвеска ПИК-БН-Т имеет в своем составе гамма-камеру и позволяет производить измерения плотности потока фотонов.

В качестве экспериментальных результатов использованы результаты измерений плотности потока фотонов (ППФ), проведенные гамма-нейтронной камерой (Кт.18 или Кт.56) с 2009 по 2015 гг. при работе реакторов РБМК-1000 на энергетических уровнях мощности.

Погрешность расчета определена по результатам сопоставления экспериментальных значений токов сканирующего датчика с результатами расчетов тока датчика по ПК MCU-NR. Погрешность расчета аксиального распределения определяется по отклонениям расчетных и измеренных токов в расчетных нодах.

Характерные высотные распределения плотности потока быстрых нейтронов, плотности потока тепловых нейтронов и плотности потока фотонов в сравнении с экспериментальными данными представлены на рисунках 1–3.

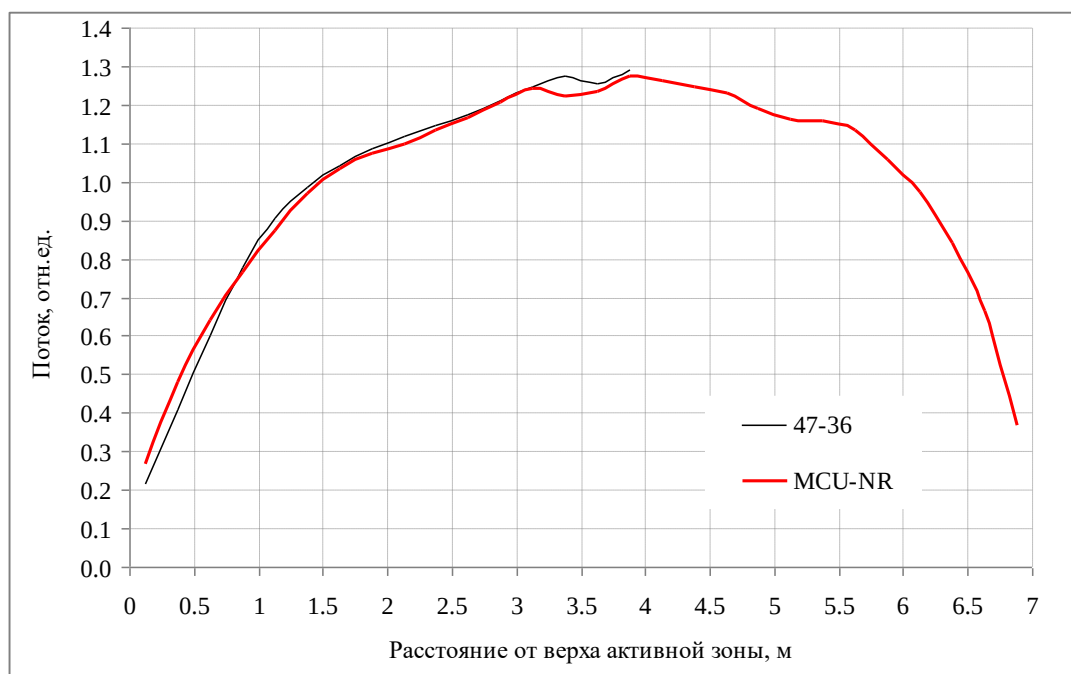


Рис. 1. Высотное распределение плотности потока быстрых нейтронов

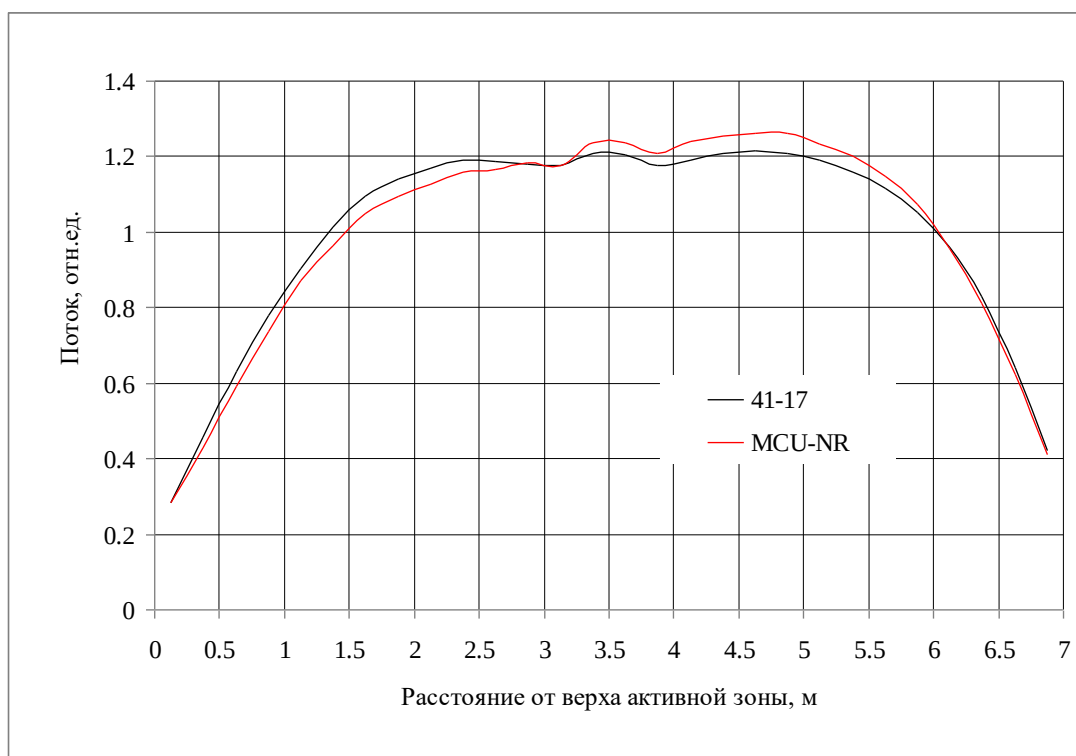


Рис. 2. Высотное распределение плотности потока тепловых нейтронов

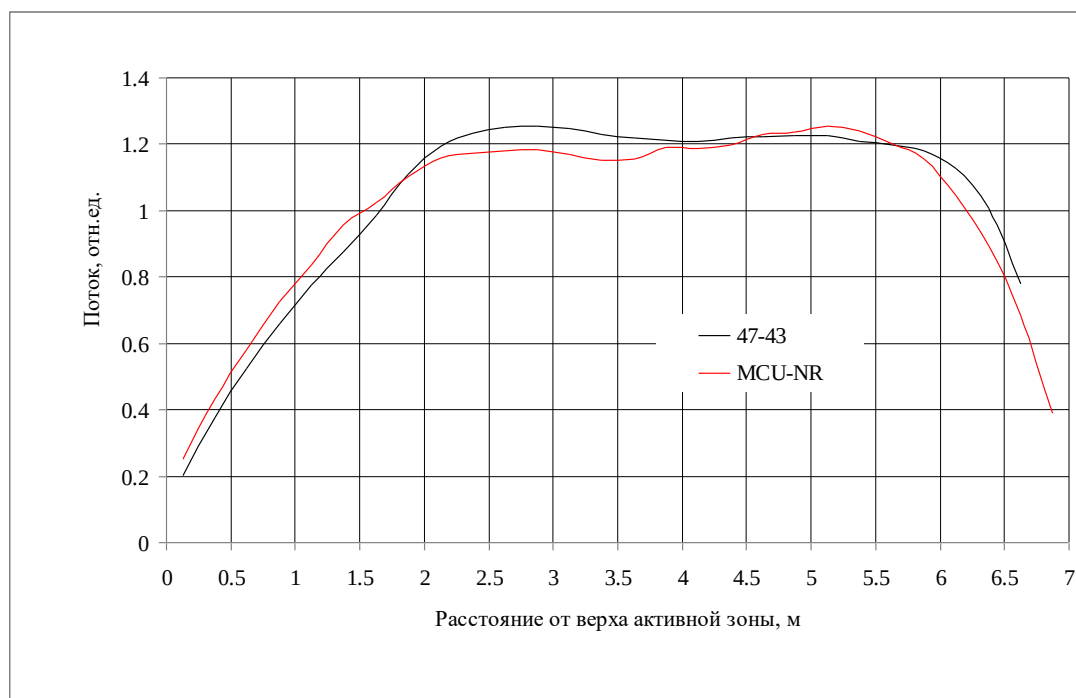


Рис. 3. Высотное распределение плотности потока фотонов

Сравнение измеренных мощностей ТК и рассчитанных с использованием ПК MCU-RBMK и ПК MCU-NR представлено на рисунке 4. Измерения проводились на энергоблоке №1 Курской АЭС в 2016 году.

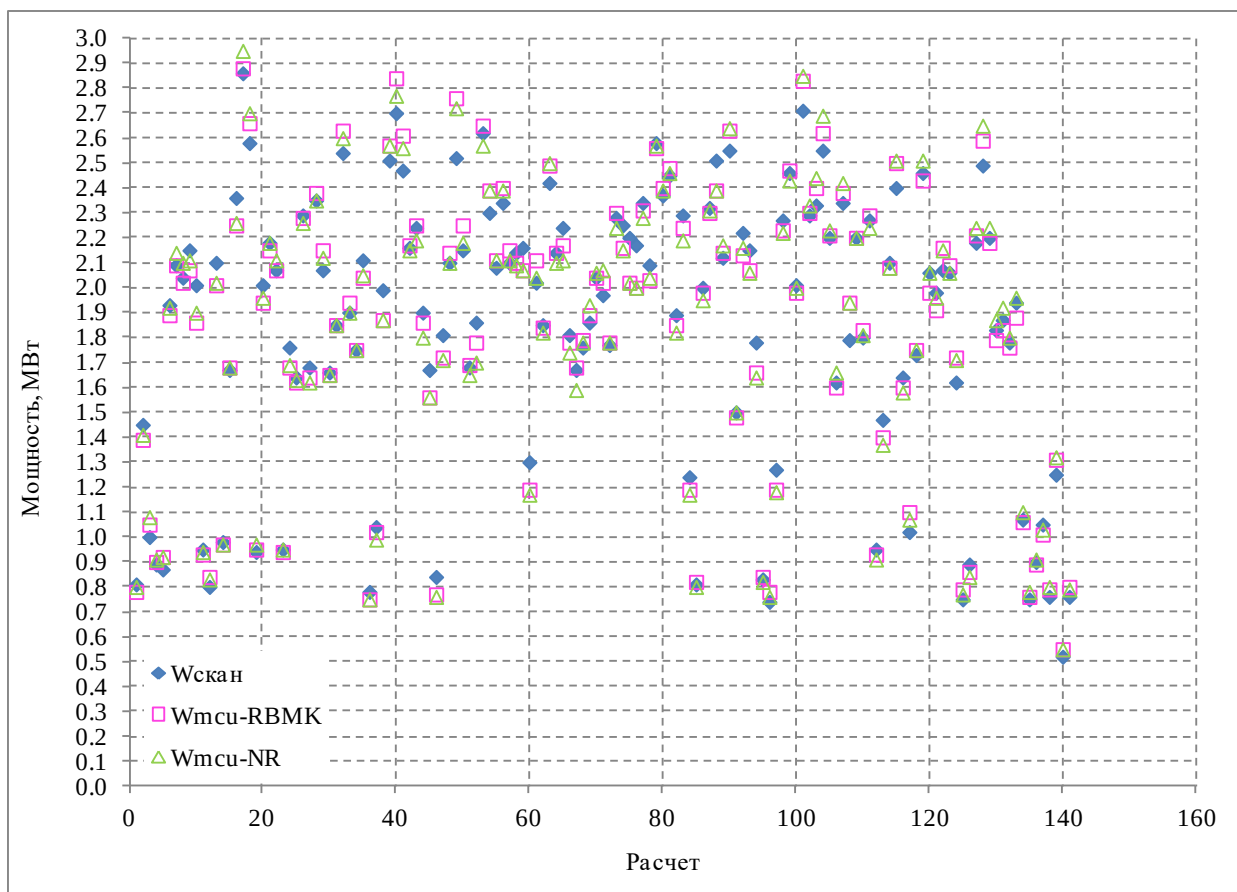


Рис. 4. Измеренные и рассчитанные мощности ТК

Результаты расчетов распределенных характеристик находятся в хорошем согласии с результатами измерений.

2. Верификация расчетов мощности эквивалентной дозы

Верификация расчета радиационных характеристик свежего и отработанного топлива RBMK-1000 основана на расчетном моделировании переноса нейтронов и фотонов следующих измерений радиационной обстановки:

- на производстве ТВС (измерения мощности дозы от свежих ТВС RBMK-1000),
- на площадке АЭС при обращении со свежими ТВС RBMK-1000 на складе свежего топлива (измерения мощности дозы около ТК-С6),
- на площадке АЭС при обращении с отработавшими ТВС (перевозка ОТВС RBMK-1000 в ХОЯТ с использованием ВТУК-8/7 или ВТУК-8/10 в составе ВК-8).

Проведена верификация расчета мощности эквивалентной дозы от одиночной ТВС-ПЧИ RBMK-1000 после изготовления на заводе и определена погрешность расчета с использованием ПК MCU-NR. Все ТВС-ПЧИ изготовлены из сырья с единой датой изготовления гексафторида урана. Верификационная база данных включает 66 измерений ТВС. МЭД от одной из ТВС дополнительно измерена спустя две недели после основных измерений для оценки скорости увеличения МЭД в процессе обращения с ТВС до момента установки этих сборок в активную зону RBMK-1000. Диапазон измеренных значений МЭД варьируется от 1 до 26 мкЗв/ч.

Проведена верификация расчета мощности эквивалентной дозы от контейнеров с 10 свежими ТВС РБМК-1000 на складе свежего топлива и определена погрешность расчета с использованием ПК MCU-NR. Верификационная база данных включает 106 измерений. Диапазон измеренных значений составляет от 10 до 27 мкЗв/ч.

Проведена верификация расчета мощности эквивалентной дозы от вагона-контейнера ВК-8 с ВТУК 8/7, загруженного отработавшими ТВС РБМК-1000 при отправке в ХОЯТ и определена погрешность расчета с использованием ПК MCU-NR.

Верификационная база данных включает семь измерений с 64 ОТВС со средним выгоранием 27 МВт сут/кг и различным временем выдержки после извлечения из активной зоны от 620 до 4000 сут. Диапазон измеренных значений составляет от 25 до 180 мкЗв/ч. Ослабление мощности дозы в контейнере составляет семь порядков.

Верификация расчета радиационных характеристик кобальтовых дополнительных поглотителей основана на расчетном моделировании переноса фотонов от транспортных контейнеров со звеньями кобальтовых дополнительных поглотителей на Ленинградской и Смоленской АЭС.

Верификационная база данных включает 66 измерений мощности эквивалентной дозы при радиационном контроле транспортного комплекта F231 со звеньями кобальтовых ДП. Диапазон измеренных значений составляет от 4,2 до 87 мкЗв/ч.

Заключение

Погрешности расчетного кода MCU-NR с банком данных MDBNR61 представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1

Погрешности расчета НФХ реакторов РБМК-1000 на энергетических уровнях мощности

№	Характеристика, размерность	Погрешность (СКО)
1	Коэффициент размножения нейтронов критического реактора ($K_{эф}$) ¹⁾ , %	0,15
2	Эффективность стержней АЗ ²⁾ , %	10
3	Эффективность стержней БСМ (СУЗ) ²⁾ , %	11
4	Оперативный запас реактивности ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,05
5	Эффект реактивности при обезвоживании КМПЦ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,05
6	Эффект реактивности при обезвоживании ТК с ТВС ²⁾	0,05
7	Эффект реактивности при заполнении ТК с ТВС ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,08
8	Эффект реактивности при обезвоживании КОСУЗ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,06
9	Паровой коэффициент реактивности ¹⁾ , $\beta_{эф}$	0,1
10	Быстрый мощный коэффициент реактивности ¹⁾ , $\beta_{эф}/\text{МВт}$ Систематическая погрешность расчета, Среднеквадратичное отклонение (σ)	$1,0 \cdot 10^{-4}$ $0,5 \cdot 10^{-4}$
11	Коэффициент реактивности по температуре топлива ²⁾ , $\beta_{эф}/^{\circ}\text{C}$	$1,8 \cdot 10^{-4}$
12	Коэффициент реактивности по температуре графита ²⁾ , %	20
13	Коэффициент радиальной неравномерности энерговыделения ^{1,2)} , %	4
14	Коэффициент высотной неравномерности энерговыделения ^{1,2)} , %	5
15	Двумерное поканальное распределение энерговыделения ^{1,2)} , %	4
16	Высотное распределение энерговыделения в топливных каналах ^{1,3)} , %	6
17	Трехмерное распределение энерговыделения в активной зоне ^{1,3)} , %	7
18	Двумерное поканальное распределение ППН ¹⁾ , %	4
19	Высотное распределение ППН в топливных каналах ¹⁾ , %	6

№	Характеристика, размерность	Погрешность (СКО)
20	Трехмерное распределение ППН в активной зоне ¹⁾ , %	7
21	Двумерное поканальное распределение ППБН ¹⁾ , %	11
22	Высотное распределение ППБН в топливных каналах ¹⁾ , %	4
23	Трехмерное распределение ППБН в активной зоне ¹⁾ , %	12
24	Двумерное поканальное распределение ППФ ¹⁾ , %	10
25	Высотное распределение ППФ в топливных каналах ¹⁾ , %	6
26	Трехмерное распределение ППФ в активной зоне ¹⁾ , %	12
27	Эффективная доля запаздывающих нейтронов ²⁾	3
¹⁾ Величина погрешности получена путем сопоставления с результатами измерений		
²⁾ Величина погрешности получена путем сопоставления с результатами расчетов MCU-RBMK		

Таблица 2

Погрешности расчета НФХ реакторов РБМК-1000 на физических уровнях мощности

Пункт	Характеристика, размерность погрешности	Погрешность (СКО)
1	Коэффициент размножения нейтронов ($K_{эф}$) ¹⁾ , %	0,15
2	Эффективность АЗ ¹⁾ , %	10
3	Эффективность БСМ (СУЗ) ¹⁾ , %	7
4	Эффективность групп стержней СУЗ, ¹⁾ %	10
5	Суммарная эффективность стержней АЗ и БСМ, ¹⁾ %	6
6	Подкритичность ¹⁾ , %	7 (отн.)
7	Оперативный запас реактивности ²⁾ , %	3
8	Эффект реактивности при обезвоживании КМПЦ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,25
9	Эффект реактивности при обезвоживании КОСУЗ ²⁾ , $\beta_{эф}$	0,13
10	Изотермический коэффициент реактивности ²⁾ , %	15
11	Эффективная доля запаздывающих нейтронов ²⁾ %	3
12	Распределение плотности потока нейтронов в подкритическом реакторе ¹⁾ , %	10
¹⁾ Величина погрешности получена путем сопоставления с результатами измерений		
²⁾ Величина погрешности получена путем сопоставления с результатами расчетов MCU-RBMK		

Таблица 3

Погрешности расчета радиационных характеристик ТВС РБМК-1000 и звеньев кобальтовых ДП

№	Характеристика, размерность погрешности	Погрешность (СКО)
1	Мощность эквивалентной дозы от свежей ТВС РБМК-1000	49 %
2	Мощность эквивалентной дозы от контейнера ТК-С6 со свежими ТВС РБМК-1000	23 %
3	Мощность эквивалентной дозы от вагон-контейнера ТК-8 с отработавшими ТВС РБМК-1000	52 %
4	Мощность эквивалентной дозы от контейнера F231 со звеньями облученного кобальтового ДП	61 %