

В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов

Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев

ОЦЕНКА ОШИБКИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТОВ ФУНКЦИОНАЛОВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКА, ВОЗДЕЙСТВУЮЩЕГО НА КОРПУС ВВЭР-1000

Показано, что систематические ошибки результатов расчетов пакетом программ MСРV функционалов нейтронного потока, действующего на корпус ВВЭР-1000, имеют псевдослучайный характер. С использованием этого факта на основании данных макетного эксперимента и результатов дозиметрических измерений у внешней поверхности корпуса реактора выполнена оценка ошибки, с которой определяются эти функционалы.

Ключевые слова: корпус реактора, расчет функционалов нейтронного потока, ошибки расчетов.

Введение

Обеспечение безопасной работы энергоблока АЭС требует контроля текущего состояния корпуса реактора (КР) – одного из главных элементов реакторной установки. Необходимым условием такого контроля является знание условий его облучения, прежде всего флюенса быстрых нейтронов, действующих на КР.

Конструкционные особенности реакторов корпусного типа, к которым относится и реактор ВВЭР, практически исключают возможность экспериментального определения функционалов нейтронного потока (ФНП), характеризующих условия облучения КР. Для решения этой задачи необходимо применение специальных методик, которые включают численные расчеты переноса нейтронов в околоторпусном пространстве (ОКП) реактора и дозиметрические измерения за внешней поверхностью корпуса [1, 2]. Именно такая методика разработана сотрудниками ИЯИ НАН Украины [3] и успешно применяется на украинских АЭС уже более 10 лет. В рамках этой методики расчеты выполняются пакетом программ собственной разработки MСРV [4].

Современные подходы к оценке реального срока безаварийной работы АЭС с реакторами корпусного типа в связи с необходимостью технического обоснования эксплуатационного ресурса КР требуют знания не только величин ФНП, характеризующих условия облучения корпуса, но и величин ошибок, с которыми они получены [5 - 7].

Как показано в [8], единственным корректным методом получения ошибок расчетных значений ФНП является проведение достаточно большого количества расчетов со случайным розыгрышем всех входных параметров транспортной программы с учетом законов распределения вероятностей их погрешностей. Это обусловлено отсутствием аналитической зависимости представляющих интерес ФНП от входных параметров.

Но на сегодняшний день указанный метод

реализовать по техническим причинам практически невозможно. Для получения ошибок применяется метод, в основе которого лежит использование так называемых матриц чувствительности [9 - 11]. Главным его недостатком является использование для получения матриц чувствительности двух- [9] и даже одномерных [10, 11] транспортных программ, основанных на методе дискретных ординат.

При использовании более качественных программ, прежде всего основанных на методе Монте-Карло, этот метод может хорошо работать для такого входного параметра, который не коррелирует с другими, например почти для любого геометрического параметра расчетной модели реакторной установки [12]. Но для большого количества взаимокоррелирующих параметров, например сечений, представленных в библиотеке микроконстант, его применение ограничено возможностями современной вычислительной техники. Дополнительные сложности в этом случае создаются недостатком информации по корреляциям в файлах оцененных ядерных данных и необходимостью учесть ошибку спектра усреднения, т.е. его отличие от реального. При этом следует иметь в виду, что спектры нейтронов, например у внутренней и внешней поверхностях КР, т.е. там, где используются одни и те же групповые микроконстанты, могут существенно отличаться друг от друга.

Поэтому для доказательства возможности использования метода оценки ошибок расчетов ФНП на основе матриц чувствительности и для определения ошибки этого метода необходимо сравнение расчетных данных с полученными экспериментально на внутренней поверхности корпуса. Но в связи с отсутствием последних такое сравнение, естественно, никогда не проводилось. Поэтому вопрос об ошибке, с которой по данному методу вычисляется ошибка флюенса быстрых нейтронов на внутреннюю поверхность КР, остается открытым.

© В. Л. Демехин, В. В. Илькович, В. Н. Буканов, 2012

Отметим, что практически такая же проблема с корреляционными матрицами библиотеки микроконстант имеется и в разработанной для определения ФНП на КР американской системе LEPRICON [11], использующей обобщенный метод наименьших квадратов. Конечно, использование данных дозиметрических измерений у внешней поверхности КР является ее достоинством по сравнению с методом матриц чувствительности. Но из-за множественных недостатков системы LEPRICON, описанных, например, в [13, 14], она так и не нашла применения на практике. К таким недостаткам относится в том числе и довольно произвольный выбор элементов корреляционной матрицы, и отбрасывание части экспериментальных результатов. Поэтому хотя в системе LEPRICON и декларируется определение ошибок ФНП, но реально вести речь можно только об их приблизительной оценке.

Таким образом, на сегодняшний день методы определения ошибок флюенсов быстрых нейтронов на КР отсутствуют, а существуют лишь способы их приблизительного оценивания. Их главным недостатком является полное или частичное игнорирование данных, полученных в макетных и натуральных экспериментах.

Ориентация именно на эти экспериментальные данные является принципиальным отличием разработанного метода оценки ошибок результатов расчетов ФНП на корпус ВВЭР-1000 пакетом программ MCPV.

1. Общие положения

Прежде всего, представляется необходимым напомнить некоторые известные положения теории ошибок.

1. Результатом серии наблюдений (оценок наблюдаемых величин) является оценка (чаще всего – среднее значение) \bar{x} искомой величины X и ошибка ее определения Δx .

2. Истинное значение величины X не обязательно отличается от \bar{x} меньше, чем на Δx .

3. Основное, что обычно хотят от ошибки: вероятность того, что истинное значение величины X лежит в диапазонах $(\bar{x} - \Delta x, \bar{x} + \Delta x)$ и $(\bar{x} - 2\Delta x, \bar{x} + 2\Delta x)$, должна составлять примерно 65 – 70 и 95 % соответственно.

4. Сама ошибка также определяется с некоторой ошибкой.

5. Ошибка оценки искомой величины включает систематическую и случайную составляющую.

6. Случайная ошибка есть результат различных случайных факторов, действующих при каждом из отдельных наблюдений непредвиден-

ным образом то в сторону уменьшения, то в сторону увеличения результатов.

7. Систематическая ошибка (или смещение) – это та, которая постоянно либо преувеличивает, либо преуменьшает результаты наблюдений из-за воздействия определенных факторов, систематически влияющих на эти измерения и изменяющих их результаты, как правило, в одном направлении.

В отличие от случайной ошибки среднего значения, которая может быть определена и даже теоретически сведена к сколь угодно малой величине, определить величину смещения во многих случаях практически невозможно. Более того, часто невозможно определить ни направление изменения результата, ни полный список неблагоприятных факторов. Однако при наблюдении векторной величины смещения составляющих его скаляров часто связаны некоторыми соотношениями, что позволяет получить о них определенную информацию.

Именно такая ситуация имеет место при расчете ФНП в ОКП реактора методом Монте-Карло в многогрупповом приближении теории переноса нейтронов. Так, из определения одного из ФНП, а именно спектрального индекса $SI_{0,5}$, следует, что величины относительных смещений флюенсов нейтронов с энергиями выше 0,5 МэВ ($\varepsilon(\Phi_{0,5})$) и 3,0 МэВ ($\varepsilon(\Phi_{3,0})$) и спектрального индекса ($\varepsilon(SI_{0,5})$) в одной и той же точке пространства связаны соотношением

$$(1 + \varepsilon(SI_{0,5}))(1 + \varepsilon(\Phi_{3,0})) = 1 + \varepsilon(\Phi_{0,5}).$$

Кроме того, из общих принципов и законов распространения излучения в веществе следует, что смещение любого ФНП должно являться гладкой функцией пространственной координаты во всех точках, кроме точки пересечения границы сред с различными нейтронно-физическими характеристиками.

Однако в нашем случае более важным свойством смещения является то, что при большом количестве неблагоприятных факторов оно ведет себя во многом подобно случайной ошибке. Проще всего данный тезис продемонстрировать на простом примере.

2. Оценка точности расчета переноса нейтронов в сферах из железа и воды

С помощью программ MCPV и MCNP [15] были проведены расчеты переноса нейтронов в железной сфере и определены некоторые ФНП.

Использовался точечный источник нейтронов со спектром деления ^{235}U . Регистрация осуществлялась в объемах, заключенных между поверхностями сфер с радиусами R кратными 5 см вплоть до толщины, которая в два раза больше толщины

корпуса ВВЭР-1000. В таблице представлены выраженные в процентах величины относительных расхождений значений интегральных плотностей потока нейтронов (ППН) с энергией выше E , полученных с помощью программ МСРV и МСNР.

Относительные расхождения интегральных ППН, %

E , МэВ	R , см							
	5	10	15	20	25	30	35	40
0,4979	3,31	3,34	3,48	2,75	1,11	-1,54	-4,86	-8,74
0,5502	3,22	3,25	3,63	3,25	2,00	-0,34	-3,41	-7,11
0,6081	3,55	4,16	5,20	5,53	4,92	3,20	0,57	-2,94
0,6721	4,41	4,94	5,16	4,30	2,12	-1,48	-6,37	-11,84
0,7427	3,92	2,68	1,42	-0,57	-3,55	-7,63	-12,68	-17,85
0,8209	3,67	2,43	1,58	0,04	-2,40	-5,99	-10,78	-15,76
0,9072	3,47	2,49	2,20	1,34	-0,28	-3,13	-7,11	-11,61
1,0026	2,93	1,95	1,60	0,73	-0,80	-3,38	-7,11	-11,50
1,1080	2,80	2,16	2,05	1,36	0,23	-1,87	-5,44	-9,44
1,2246	3,31	2,77	2,69	2,21	1,40	-0,04	-2,86	-5,52
1,3534	2,63	2,10	2,10	1,88	1,50	0,51	-1,40	-3,67
1,4957	0,50	-0,40	-0,51	-0,78	-1,20	-2,22	-3,93	-6,00
1,6530	0,00	-1,39	-1,96	-2,55	-3,23	-4,16	-5,47	-7,07
1,8268	-0,90	-2,35	-3,22	-4,07	-5,10	-6,47	-8,08	-10,04
2,0190	-1,92	-4,80	-6,67	-8,32	-9,83	-11,35	-13,11	-15,35
2,2313	-1,64	-3,82	-5,19	-6,27	-7,19	-7,90	-9,07	-11,01
2,4660	-1,98	-4,57	-6,15	-7,26	-8,21	-9,02	-9,98	-12,26
2,7253	-1,46	-3,79	-5,53	-6,86	-8,23	-8,87	-10,06	-11,00
3,0119	-1,08	-3,18	-5,00	-6,64	-8,17	-9,07	-10,11	-12,07
3,3287	-0,81	-2,54	-4,13	-5,80	-7,55	-7,76	-8,58	-11,54
3,6788	-0,40	-1,74	-3,35	-5,20	-6,82	-7,43	-8,47	-11,12
4,0657	-0,07	-0,97	-2,66	-4,42	-5,95	-7,42	-8,55	-11,30
4,4933	0,12	-0,60	-2,22	-3,86	-5,29	-7,26	-8,38	-10,57
4,9659	0,01	-1,14	-2,80	-5,07	-7,23	-9,24	-9,94	-12,25
5,4881	-0,21	-1,88	-4,24	-7,04	-9,18	-10,81	-12,05	-15,26
6,0653	-0,48	-2,74	-5,59	-8,60	-11,03	-12,70	-14,71	-18,55
6,7032	-0,81	-3,45	-6,20	-9,24	-12,85	-15,03	-17,05	-19,45
7,4082	-1,02	-3,96	-7,15	-10,29	-13,59	-15,67	-18,32	-19,93
8,1873	-1,18	-4,15	-7,30	-10,90	-14,17	-16,30	-19,41	-20,91
9,0484	-1,22	-4,02	-6,74	-9,59	-12,71	-13,72	-15,15	-17,50

Эти расхождения можно интерпретировать как относительные смещения значений интегральных ППН, полученных программой МСРV, относительно значений, полученных программой МСNР, которые принимаются за истинные.

Среднеквадратичное расхождение $\sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}$ приведенных величин равно 7,6 % и именно его можно и нужно рассматривать как псевдослучайную оценку абсолютного значения относительного смещения. Легко проверить, что почти 70 % истинных значений интегральных ППН отклоняются от значений, рассчитанных по программе МСРV, меньше, чем на величину этой оценки, и чуть больше 94 % – меньше, чем на ее удвоенное значение. Это полностью удовлетворяет основному требованию к ошибкам, указанному в положении 3 раздела 1. Поэтому величина 7,6 %

может быть признана хорошей оценкой относительной ошибки интегральной ППН для рассматриваемой геометрической конфигурации.

Принимая во внимание взаимосвязи между смещениями различных ФНП, а также относительную случайность выбора ФНП для первоначального анализа, можно предположить, что с такой же относительной ошибкой считаются и все остальные представляющие интерес ФНП. Дальнейший анализ полученных результатов, к которым относятся спектральные и пространственные индексы, показывает отсутствие прямых противоречий данному предположению.

Из общей формулы для определения величины дисперсии произвольной функции

$$D_f = \left\langle \left(f(x) - \langle f(x) \rangle \right)^2 \right\rangle$$

можно получить формулу для расчета разброса распределения полученной оценки

$$\Delta|\varepsilon| = \sqrt{\langle (\varepsilon_j - |\varepsilon|)^2 \rangle}.$$

Ее применение к данным, приведенным в таблице, дает абсолютное значение разброса 5,0 %. Такое достаточно большое значение объясняется достаточно большим разбросом исходных данных.

С учетом того, что производится оценка относительной ошибки расчета ФНП, величина разброса может быть принята в качестве оценки ошибки этой оценки (см. положение 4 раздела 1). Поэтому, округляя, можно записать $\sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle} = (8 \pm 5) \%$.

Описанный выше подход был использован и при анализе результатов сравнения ФНП, полученных при расчетах программами MСРV и MСNP переноса нейтронов в водяной сфере. В этом случае для оценки относительной ошибки было получено значение $(5 \pm 4) \%$, которое согласуется с оценкой относительной ошибки, полученной для железной сферы.

Из всего вышесказанного можно сделать два основных вывода:

1. Программа MСРV достаточно достоверно моделирует распространение нейтронов в железной и водной средах, т.е. в тех материалах, которые вместе составляют подавляющую часть реактора.

2. Относительная ошибка расчета таких представляющих интерес ФНП, как интегральные ППН, спектральные и пространственные индексы, в указанных материалах может быть признана одинаковой и равной $(6 \pm 4) \%$.

Следовательно, можно применить разработанный подход к результатам расчета переноса нейтронов в сложной гетерогенной преимущественно железо-водной композиции, какой является реактор.

3. Оценка точности расчетов функционалов нейтронного потока в макетном и натуральных экспериментах

Макетный эксперимент был реализован на исследовательском реакторе нулевой мощности LR-0 Института ядерных исследований (г. Ржеж, Чешская республика). Этот реактор проектировался для исследований нейтронно-физических параметров активной зоны (АКЗ) реакторов типа ВВЭР. Технологическое оборудование реактора LR-0 позволяет создавать макеты АКЗ с различными характеристиками реакторов ВВЭР-1000 и исследовать характеристики поля нейтронов в

АКЗ, а также в пространстве между АКЗ и биологической защитой. Подробное описание макетного эксперимента, включая все конфигурации элементов макета и места проведения измерений, дано в [16].

Основными данными этого макетного эксперимента являются спектры нейтронов, а также пространственные и спектральные индексы, полученные в местах измерений между АКЗ и биологической защитой. Сравнение результатов расчетов переноса нейтронов с этими данными позволяет судить, насколько правильно соответствующая программа осуществляет расчеты в сложной железобетонной среде, имитирующей среду реактора ВВЭР-1000.

Такая проверка пакета программ MСРV была выполнена в процессе его валидации [17]. На основе полученных в расчетах переноса нейтронов групповых потоков определялись пространственные и спектральные индексы и затем сравнивались с экспериментальными значениями. Анализ результатов проведенных сравнений показывает их хорошую согласованность с экспериментальными данными. Среднеквадратичное отклонение рассчитанных пакетом MСРV данных от экспериментальных $\sqrt{\langle \varepsilon^2 \rangle}$, т.е. оценка относительной ошибки определения ФНП, составляет $(7 \pm 5) \%$ и удовлетворяет основному требованию к ошибкам, изложенному в положении 3 раздела 1.

Обязательным элементом работы по определению ФНП на КР является сравнение рассчитанных с помощью пакета MСРV и полученных экспериментально значений удельных активностей продуктов реакций активации нейтронно-активационных детекторов (НАД), облучающихся у внешней поверхности корпуса в течение топливной кампании [3].

К настоящему времени накоплен значительный массив отношений расчетных и экспериментальных данных. В рамках валидации пакета MСРV по результатам дозиметрических измерений у внешней поверхности КР действующего энергоблока был выполнен анализ этого массива отношений [17]. Практически все (более 98 %) отношения отличаются от единицы менее чем на 20 %, предусмотренных в [3, 6, 7]. Это означает, что пакет программ MСРV достаточно адекватно моделирует реальную ситуацию с полем нейтронов в ОКП действующих реакторов ВВЭР-1000. А ошибка расчетных значений удельных активностей НАД, оцененная по разработанной схеме, составляет $(8 \pm 4) \%$ и удовлетворяет основному требованию к ошибкам, изложенному в положении 3 раздела 1.

4. Оценка ошибки определения функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000

Видно, что все четыре оценки ошибки расчетов ФНП, полученные для существенно различных материально-геометрических композиций, т.е. $(8 \pm 5) \%$, $(5 \pm 4) \%$, $(7 \pm 5) \%$, $(8 \pm 4) \%$, достаточно близки между собой. Поэтому с высокой долей вероятности можно утверждать, что основной вклад в эти величины обусловлен одними и теми же причинами. Элементарный анализ показывает, что главной из них следует считать ошибки в библиотеке микроконстант, обусловленные, прежде всего, приближенностью групповой модели, ошибками ядерных данных и несоответствиями спектров усреднения и реальных спектров.

Средневзвешенное четырех указанных значений дает оценку ошибки определения ФНП, равную 7%. Однако такой подход противоречит логике разработанного метода оценивания, так как вероятность того, что ошибка того или иного ФНП не превысит данное значение составляет всего около 50%.

Опираясь на основные положения теории ошибок можно получить более адекватную оценку. При этом, однако, возникают некоторые сложности, обусловленные тем, что ошибки

четырёх указанных значений очень велики, а значит распределения, по которым они получены, не являются нормальными. Кроме того, очевидна разная ценность полученных значений для решения конкретной задачи оценки ошибки определения ФНП в ОКП реактора ВВЭР-1000. Тем не менее различные реалистичные подходы дают почти одни и те же результаты – оценка ошибки определения ФНП составляет 8 - 10%.

Выводы

Анализ результатов расчетов ФНП в железной и водной сферах пакетом программ MСРV, сравнение расчетных и экспериментальных данных макетного и натурального экспериментов показывают, что разработанный метод дает одинаковые в пределах разброса значения относительных ошибок расчетов.

Это подтверждает правильность сделанных при разработке метода предположений и дает возможность оценить относительную ошибку расчета пакетом MСРV флюенса нейтронов на корпус ВВЭР-1000. Учитывая приближенность разработанного метода оценки и требования к необходимости обеспечения безопасной эксплуатации АЭС, в качестве такой оценки предлагается принять наибольшее из возможных значений, т.е. 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Minutes of WGRD-VVER Workshop on RPV Neutron Dosimetry*. Sandanski, Bulgaria, 29 Sept. - 3 Oct. 1997. - 4 p.
2. *Пояснительная записка к предложению по разработке и внедрению штатных систем мониторинга радиационной нагрузки корпусов и внутрикорпусных устройств реакторов ВВЭР (СМРН ВВЭР)*. Приложение 2 к письму ИАЭ им И. В. Курчатова (Москва, Россия) № 36-04/1 от 21.01.91 к зам. Министра Минатомэнергопрома СССР. - 5 с.
3. *СТП 640.02.340.002-2003*. Система качества. Определение радиационной нагрузки корпуса реактора ВВЭР-1000 / ИЯИ НАН Украины. - К., 2004. - 22 с.
4. *Пакет программ MСРV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000* / В.Н. Буканов, А.В. Гриценко, В.Л. Демехин, С.М. Пугач. - Киев, 2005. - 28 с. - (Препр. / НАН Украины. Ин т ядерных исслед.; КИЯИ-05-6).
5. *Zsolnay É.M.* Reactor Dosimetry Aspects of the RPV Service Life Management at the Paks NPP // Proc. of the 9th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. Prague, Czech Republic, 2 - 6 Sept. 1996. - Singapore: World Scientific, 1998. - P. 50 - 57.
6. *Учет флюенса быстрых нейтронов на корпусах и образцах-свидетелях ВВЭР для последующего прогнозирования радиационного ресурса корпусов РБ-007-99 / Госатомнадзор России, 1999. - 9 с.*
7. *Regulatory Guide 1.190 "Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence"* / US Nuclear Research Commission, 2001. - 53 p.
8. *Демехин В.Л.* Определение радиационной нагрузки корпуса ядерного реактора на основе Байесовского подхода: Дис. ... канд. техн. наук: 01.04.16. - К., 2003. - 147 с.
9. *Boehmer B., Borodkin G.I., Manturov G.N.* Improved Covariance Analysis and Spectrum Adjustment for VVER-1000 Pressure Vessel Fluences // Reactor Dosimetry: Radiation Metrology and Assessment, ASTM STP 1398 (Proc. of the 10th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. Osaka, Japan, 12 - 17 Sept. 1999). - ASTM, West Conshohocken, PA (USA). - 2001. - P. 508 - 515.
10. *Boehmer B., Manturov G.N.* Influence of Input Neutron Spectrum Covariances on Results of Pressure Vessel Neutron Spectrum Adjustments // Proc. of the 9th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. Prague, Czech Republic, 2 - 6 Sept. 1996. - Singapore: World Scientific, 1998. - P. 294 - 301.
11. *Maerker R.E., Broadhead B.L., Wagschal J.J.* Theory of a Few Unfolding Procedure in Pressurized Water Reactor Pressure Vessel Dosimetry and Development

- of an Associated Benchmark Data Base // Nucl. Sci. Eng. - 1985. - Vol. 91, No. 4. - P. 369 - 392.
12. Демехин В.Л., Пугач А.М., Буканов В.Н. Влияние геометрических параметров элементов конструкции ВВЭР-1000 на величину флюенса нейтронов на корпус // Ядерная и радиационная безопасность. - 2007. - № 4. - С. 41 - 47.
 13. Perel R., Wagschal J.J., Yeivin Y. LEPRICON, Combination of Correlated Data and Peelle's Puzzle // Reactor Dosimetry, ASTM STP 1228 (Proc. of the 8th ASTM-EURATOM Symp. on Reactor Dosimetry. Vail, CO (USA), 29 Aug. - 3 Sep. 1993). - ASTM, Philadelphia, PA (USA), 1994. - P. 75 - 84.
 14. Lois L., Carew J. Lessons Learned on Reactor Vessel Dosimetry // 10th Int. Symp. on Reactor Dosimetry. Osaka, Japan, 12 - 17 Sept. 1999. - 5 p.
 15. MCNP - A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 4C: Report / Los Alamos National Laboratory. - No. LA-13709-M. - Los Alamos, NM (USA), 2000. - 788 p.
 16. Ošmera B., Zaritsky S. 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, 2002.
 17. Буканов В.Н., Гриценко А.В., Демехин В.Л. и др. Валидация пакета программ MСРV // Ядерна фізика та енергетика. - 2009. - Т. 10, № 2. - С. 165 - 170.

В. Л. Демьохін, В. В. Ількович, В. М. Буканов

ОЦІНКА ПОХИБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ РОЗРАХУНКІВ ФУНКЦІОНАЛІВ НЕЙТРОННОГО ПОТОКУ, ЩО ДІЄ НА КОРПУС ВВЕР-1000

Показано, що систематичні похибки результатів розрахунків пакета програм MСРV функціоналів нейтронного потоку, що діє на корпус ВВЕР-1000, мають псевдовипадковий характер. З використанням цього факту на підставі даних макетного експерименту та результатів дозиметричних вимірювань біля зовнішньої поверхні корпусу реактора виконано оцінку похибки, з якою визначаються ці функціонали.

Ключові слова: корпус реактора, розрахунок функціоналів нейтронного потоку, похибки розрахунків.

V. L. Diemokhin, V. V. Ilkovich, V. M. Bukanov

ESTIMATION OF THE ERROR OF FUNCTIONALS CALCULATION RESULTS OF THE NEUTRON FLUX ONTO THE WWER-1000 REACTOR PRESSURE VESSEL

It is shown that systematic calculation errors of functionals of the neutron flux onto WWER-1000 reactor pressure vessel are pseudorandom. The error of the neutron flux functionals is estimated on the basis of this fact and the data obtained with the reactor LR-0 benchmark and with the results of dosimetry measurements near reactor pressure vessels.

Keywords: reactor pressure vessel, calculation of the neutron flux functionals, calculation errors.

Поступила в редакцію 11.11.2011.