

В. Л. Демехин, В. Н. Буканов, В. В. Илькович,  
А. М. Пугач

Институт ядерных исследований Национальной академии  
наук Украины, г. Киев, Украина

## Коэффициенты запаса для флюенсов нейтронов при оценке безопасности АЭС

При расчетах, связанных с оценкой безопасности АЭС, согласно общемировой практике и ряду действующих нормативных документов требуется использование консервативных подходов, что подразумевает необходимость учета ошибки определения, прежде всего, флюенса нейтронов. Предлагается проводить такой учет, умножая значения флюенсов нейтронов, полученные в транспортных расчетах, на коэффициенты запаса. Значения коэффициентов запаса вычисляются по разработанной методике, опирающейся на теорию ошибок, особенности программы расчета переноса нейтронов и полученные с ее помощью результаты. Показано, что для подавляющего большинства мест определения программой MСРV флюенсов нейтронов на корпус, внутрикорпусные устройства и опорные элементы реактора ВВЭР-1000 можно использовать значение коэффициента запаса 1,18 с доверительной вероятностью не ниже 95 %.

Ключевые слова: коэффициент запаса, флюенс нейтронов, ядерный реактор, ВВЭР-1000, расчет переноса нейтронов.

В. Л. Демехин, В. М. Буканов, В. В. Илькович, О. М. Пугач

## Коефіцієнти запасу для флюенсів нейтронів при оцінці безпеки АЕС

У розрахунках, пов'язаних з оцінкою безпеки АЕС, згідно із загальносвітовою практикою та низкою чинних нормативних документів потрібно використовувати консервативні підходи, що передбачає необхідність врахування похибки визначення, перш за все, флюенсу нейтронів. Для врахування цієї похибки пропонується множити значення флюенсу нейтронів, отримані в транспортних розрахунках, на коефіцієнти запасу. Значення коефіцієнтів запасу обчислюються за розробленою методикою, що спирається на теорію похибок, особливості програми розрахунку перенесення нейтронів і отримані за її допомогою результати. Показано, що для переважної більшості місць визначення програмою MСРV флюенсу нейтронів на корпус, внутрішньокорпусні пристрої та опорні елементи реактора ВВЕР-1000 можна брати значення коефіцієнта запасу 1,18 з довірчою ймовірністю не нижче 95 %.

Ключові слова: коефіцієнт запасу, флюенс нейтронів, ядерний реактор, ВВЕР-1000, розрахунок перенесення нейтронів.

© В. Л. Демехин, В. Н. Буканов, В. В. Илькович, А. М. Пугач, 2017

Согласно Энергетической стратегии Украины на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Кабинета Министров Украины от 24.07.2013 № 1071-р, одним из основных заданий перспективного развития атомно-энергетического комплекса является «...продление срока эксплуатации действующих энергоблоков АЭС до 20 лет при условии положительных результатов периодической переоценки безопасности».

Комплексная программа работ по продлению срока эксплуатации действующих энергоблоков АЭС Украины одобрена Кабинетом Министров Украины [1]. Важным и достаточно сложным этапом указанных работ является научно-техническое обоснование возможности продления срока службы энергоблока на сверхпроектный период, которое включает определение и прогнозирование флюенса нейтронов на внутрикорпусные устройства (ВКУ), опорные элементы (ОЭ) и корпус реактора (КР).

Конструкционные особенности реакторов типа ВВЭР практически исключают возможность экспериментального определения функционалов нейтронного потока (ФНП), характеризующих условия облучения КР, ВКУ и ОЭ. Для решения этой задачи необходимы специальные методики, базирующиеся на расчетах переноса нейтронов в среде ядерного реактора. Применяемые с этой целью программы выдают значения ФНП, которые являются хорошей оценкой их истинных значений и могут напрямую использоваться во многих случаях.

В то же время, при расчетах, связанных с оценкой безопасности АЭС, согласно действующим в различных странах нормативным документам (например, НП 306.2.162-2010 «Вимоги до оцінки безпеки атомних станцій», КНД 306.302-96 «Безопасность АС. Требования к содержанию отчета по анализу безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР на стадии выдачи разрешения на ввод в эксплуатацию», федеральный код США 10CFR Part 50 “Domestic Licensing of Production and Utilization Facilities”, гайд NRC DG-1053 “Calculational and Dosimetry Methods for Determining Pressure Vessel Neutron Fluence”, документ Еврокомиссии VERLIFE) требуется использование консервативного подхода, что подразумевает необходимость учета ошибки определения ФНП.

Проблема, связанная с тем, каким образом производить такой учет, достаточно сложна и не имеет однозначного абстрагированного решения, прежде всего, потому, что заранее невозможно предугадать степень консерватизма используемой методики соответствующих расчетов. Поэтому принять решение о том, какие значения ФНП в них использовать, и обосновать сделанный выбор должна организация, которая эти расчеты выполняет. Тем не менее, можно дать некоторые общие рекомендации, которые опираются на теорию ошибок.

**Доверительная вероятность для коэффициента запаса.** Требование об учете ошибки определения флюенса подразумевает, что вместо полученного в результате расчетов переноса нейтронов значения флюенса нейтронов с  $E_n > 0,5$  МэВ ( $\Phi_{0,5}$ ) необходимо использовать значение

$$\Phi_{0,5}^{[P]} = \Phi_{0,5} + \Delta^{[P]} = K^{[P]} \cdot \Phi_{0,5},$$

где  $\Delta^{[P]}$  — ошибка определения флюенса с доверительной вероятностью  $P$ ;  $K^{[P]} = 1 + \Delta^{[P]} / \Phi_{0,5}$  — коэффициент запаса с доверительной вероятностью  $P$ .

Заметим, что в некоторых специфических случаях (например, при определении флюенса нейтронов

на образцы-свидетели) значение  $K^{[P]}$  может оказаться меньше 1, и тогда следует применить другой подход. Но так как сейчас перед нами не стоит задача разработки обобщенной теории, такие случаи учитываться не будут.

Обратим внимание на одну особенность используемого в рамках данной работы термина «доверительная вероятность». Обычно под термином «доверительная вероятность  $p$ » подразумевается «интервальная» вероятность того, что истинное значение лежит в некотором диапазоне  $(x - \delta^{[p]}, x + \delta^{[p]})$ . Нас же интересует вероятность  $P$  того, что истинное значение не превысит верхнего предела. Эти две разные величины связаны соотношениями

$$P = (1 + p)/2, \text{ или } p = 2P - 1.$$

Выбор значения доверительной вероятности — первый из вопросов, стоящих в рамках поставленной задачи, актуальность которого может быть продемонстрирована следующим примером.

В статье [2] показано, что ошибка определения значений ФНП пакетом программ MСРV [3] составляет 10 %, а распределение ошибок не сильно отличается от нормального. Однако в силу объективных причин точный закон распределения отклонений получаемых ФНП от их реальных значений неизвестен. Фактически это означает, что на данный момент не существует возможности определить доверительную вероятность указанной ошибки 10 %. Ее можно лишь ориентировочно оценить в диапазоне  $p = 0,6...0,75$ . Такой разброс, на наш взгляд, нельзя назвать приемлемым при расчетах, связанных с безопасностью АЭС.

Незнание закона распределения погрешностей в данном случае существенно усложняет выбор значения доверительной вероятности из-за невозможности его однозначного соотнесения со значением соответствующей ошибки.

Однако интегральные кривые для широкого класса симметричных высокоэнтропийных распределений (равномерного, трапецеидального, нормального и многих других) в области 0,05- и 0,95-й квантилей пересекаются между собой в достаточно узком интервале значений около  $x/\sigma = 1,6$  ( $\sigma$  — среднеквадратичное или стандартное отклонение) [4]. Более того, даже ряд несимметричных распределений имеет аналогичные характеристики. Поэтому во многих случаях можно с удовлетворительной степенью точности принять  $\Delta^{[0,95]} = 1,6\sigma$  для любого распределения.

Тем не менее, такое усреднение не совсем соответствует духу консервативного подхода: не зная закона распределения ошибок при использовании коэффициента 1,6, нельзя достаточно уверенно говорить о доверительной вероятности 95 %. Анализ показывает, что значение коэффициента 1,6 для подавляющего большинства законов распределений меньше, чем для нормального, для которого оно равно 1,65. Поэтому следует использовать именно значение 1,65. В таком случае можно достаточно уверенно утверждать, что с вероятностью не менее 95 % истинное значение флюенса не превысит расчетное более, чем на  $1,65\sigma$ .

**Определение коэффициента запаса.** Анализ показывает, что возможная ошибка результатов расчетов переноса нейтронов методом Монте-Карло фактически имеет три основные составляющие: ошибку метода\*, статистическую

\* Под ошибкой метода понимается ошибка метода определения ФНП, включающая методическую ошибку, обусловленную приближениями и допущениями программы, ошибки источников нейтронов, ошибки библиотеки ядерных данных и т. п.

погрешность расчетов и ошибку, связанную с незнанием точной геометрии. Рассмотрим их по отдельности, но не абсолютные значения ошибок  $\Delta^{[P]}$ , а их относительные значения —  $\varepsilon^{[P]} = \Delta^{[P]}/\Phi_{0,5}$ , которыми более удобно оперировать на практике.

Для пакета MСРV псевдослучайная ошибка метода  $\sigma_m$  — это те 10 %, о которых упоминалось ранее. Закон ее распределения точно неизвестен. Очевидно, что для получения  $\varepsilon_m^{[0,95]}$  с учетом всего ранее изложенного эту величину следует умножить на 1,65. Существует еще систематическая ошибка метода интерполяции или экстраполяции результатов расчетов в конкретную пространственную точку  $\varepsilon_g$ . Если для определения условий облучения КР, ВКУ и (или) ОЭ используется другая программа расчета переноса нейтронов, то в процессе ее верификации не только должна быть определена ошибка метода, но и доказан ее псевдослучайный характер. Если же это не сделано, такую ошибку следует считать систематической.

Статистическая погрешность расчетов  $\sigma_{st}$  имеет нормальный закон распределения. Следовательно, ее также следует умножить на 1,65.

Гораздо сложнее определить величину ошибки, связанной с неточным знанием геометрических параметров КР, ВКУ и ОЭ: закон ее распределения неизвестен и, более того, отсутствуют даже значения каких-либо характеристик распределения, например среднее значение. Как правило, единственная информация о любом геометрическом параметре — проектный размер  $D$  и величины допусков в меньшую и большую стороны  $d_-$  и  $d_+$ . При этом анализ информации из паспортов КР об их реальных размерах показывает, что иногда они выходят за пределы допусков. Очевидно, аналогичная ситуация может иметь место и для других геометрических параметров. Но поскольку выход истинных значений за пределы допусков — ситуация достаточно редкая, то при отсутствии реальных замеров значения  $D - d_-$  и  $D + d_+$  можно принять в качестве 0,05- и 0,95-й квантилей. Кроме того, отсутствие достоверной информации о законе распределения отклонений приводит к тому, что в рамках консервативного подхода средним значением геометрического параметра можно считать не то, которое приведено в сдаточной или проектной документации, а среднее в диапазоне возможных отклонений:

$$\bar{D} = D + (d_+ - d_-)/2. \quad (1)$$

Таким образом, опуская простое математическое обоснование приводимых далее формул, схема учета ошибки флюенса, связанная с незнанием того или иного геометрического параметра, в общем случае будет выглядеть следующим образом:

1. На основании сдаточной и проектной документации определяются проектный размер  $x$  и величины допусков в меньшую и большую стороны  $d_-$  и  $d_+$ .

2. Вычисляется значение  $\bar{D}$  по формуле (1).

3. Используя полученный по специальной методике [5] соответствующий элемент матрицы чувствительности  $s$  вычисляется величина сдвига

$$\varepsilon_g = \max \{0, (\bar{D} - D) \cdot s\}.$$

Отметим, что эта величина представляет собой систематическую ошибку.

4. Вычисляется величина

$$d = \begin{cases} \min \{d_+, d_-\}, & \text{если } \varepsilon_g = 0, \\ (d_+ + d_-)/2, & \text{если } \varepsilon_g > 0. \end{cases}$$

5. Определяется величина псевдослучайной ошибки (с уровнем доверительной вероятности 95 %), обусловленной неточным знанием геометрического параметра:

$$\varepsilon_s = \sqrt{s^2 + \sigma_s^2} \cdot d,$$

где  $\sigma_s$  — стандартная ошибка (среднеквадратичное отклонение) для соответствующего элемента матрицы чувствительности.

Объединив все вышеизложенное, приходим к следующей общей формуле для коэффициента запаса (в случае, если все входящие в нее ошибки выражаются в процентах):

$$K^{[0,95]} = 1 + \left( \varepsilon_e + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{gi} + \sqrt{1,65^2 (\sigma_m^2 + \sigma_{st}^2) + \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{si})^2} \right) / 100 \%,$$

где суммы берутся по всем геометрическим параметрам, неопределенности которых могут влиять на величину флюенса, для которого рассчитывается этот коэффициент.

Последняя формула может быть использована для определения коэффициента запаса любой программой расчета переноса нейтронов, но только в том случае, если в процессе ее верификации и валидации доказан псевдослучайный характер декларируемой ошибки метода. В противном случае нужно использовать другую формулу:

$$K^{[0,95]} = 1 + \left( 1,65 \sigma_m + \varepsilon_e + \sum_{i=1}^n \varepsilon_{gi} + \sqrt{1,65^2 \sigma_{st}^2 + \sum_{i=1}^n (\varepsilon_{si})^2} \right) / 100 \%.$$

Анализ двух последних формул показывает, что ключевую роль при определении коэффициента запаса играет ошибка метода: для любой программы расчета переноса нейтронов именно она задает его минимально возможное значение.

## Выводы

Разработан подход к учету ошибки флюенса нейтронов в работах, связанных с оценкой безопасности АЭС. Предлагается использование коэффициентов запаса, на которые необходимо умножать значения флюенсов нейтронов, полученные в результате транспортных расчетов. Для вычисления значений коэффициентов разработана методика, опирающаяся на теорию ошибок, особенности программы расчета переноса нейтронов и получаемые с ее помощью результаты.

Используя данные, полученные в результате расчетов пакетом программ MCPV ФНП на КР, ВКУ и ОЭ реакторов ВВЭР-1000 различных энергоблоков АЭС Украины, с помощью разработанной методики определены значения

коэффициентов запаса для флюенсов нейтронов: они лежат в диапазоне 1,17...1,25. И хотя их большинство сосредоточено в районе 1,18, существенный разброс полученных значений требует обязательного расчета коэффициента запаса для каждого конкретного реактора и каждого конкретного места, где необходимо знание флюенса с  $E_n > 0,5$  МэВ.

## Список использованной литературы

1. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2004 р. № 263-р «Про схвалення Комплексної програми робіт з продовження строку експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій». *Офіційний вісник України*. 2004. № 17. Ст. 1195.
2. Демехин В. Л., Илькович В. В., Буканов В. Н. Оценка ошибки результатов расчетов функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000. *Ядерная физика та енергетика*. 2012. Т. 13, № 1. С. 56—61.
3. Буканов В. Н., Гриценко А. В., Демехин В. Л., Пугач С. М. Пакет программ MCPV для расчета функционалов нейтронного потока, воздействующего на корпус ВВЭР-1000 / Ин-т ядер. иссл. НАН Украины. К., 2005. 28 с. (Препр. КИЯИ-05-6).
4. Новицкий П. В. Об особых свойствах 95%-ной квантили большого класса распределений и предпочтительных значениях доверительной вероятности при указании погрешностей приборов и измерений. *Метрология*. 1979. № 2. С. 18—24.
5. 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. Т. 10, вып. 4. С. 41—47.

## References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 263-r dated 29 April 2004, (2004), "On Approval of the Comprehensive Program for Lifetime Extension of Operating Nuclear Power Units" [Pro skhvalennia Kompleksnoi prohramy robot z prodovzhennia stroku ekspluatatsii diiuchykh enerhoblokiv atomnykh elektrostantsii], *Official Bulletin of Ukraine*, No. 17, Article 1195. (Ukr)
2. Diemiokhin, V. L., Ilkovich, V. V., Bukanov, V. M. (2012), "Estimation of the Error of Functional Calculation Results of the Neutron Flux onto the VVER-1000 Reactor Pressure Vessel" [Otsenka oshibki rezultatov raschiotov funktsionalov neitronnogo potoka, vozdeistvuiushchego na korpus VVER-1000], *Nuclear Physics & Atomic Energy*, V. 13, No. 1, pp. 56—61. (Rus)
3. Bukanov, V. N., Grytsenko, O. V., Diemiokhin, V. L., Pugach, S. M. (2005), "MCPV Program Package for Calculation of Functionals of Neutron Flux on VVER-1000 Pressure Vessel" [Paket programm MCPV dlia raschiota funktsionalov neitronnogo potoka, vozdeistvuiushchego na korpus VVER-1000], Kyiv, Institute for Nuclear Research, NASU, 28 p. (Preprint KINR-05-6). (Rus)
4. Novitskii, P. V. (1979), "About Special Properties of 95th Quantile of Large Class of Distributions and Preferable Values of Confidential Probability at Pointing of Instrumental and Measuring Errors" [Ob osobykh svoistvakh 95%-noi kvantili bolshogo klassa raspredelenii i predpochtitelnykh znacheniiakh doveritelnoi veroiatnosti pri ukazanii pogreshnostei priborov i izmerenii], *Metrology*, No. 2, pp. 18—24. (Rus)
5. Diemiokhin, V. L., Pugach, A. M., Bukanov, V. N. (2007), "Impact of Geometrical Parameters of VVER-1000 Structural Components on Pressure Vessel Neutron Fluence Value" [Vliianiie geometricheskikh parametrov elementov konstrukticii VVER-1000 na velichinu fliuensa neitronov na korpus], *Nuclear and Radiation Safety*, V. 10, No. 4, pp. 41—47. (Rus)

Получено 19.09.2016.