

ВЛИЯНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ В ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА ПОГРЕШНОСТИ ЯДЕРНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НУКЛИДОВ, ВОЗНИКАЮЩИЕ В ПРОЦЕССЕ РАСЧЕТА ВЫГОРАНИЯ ТОПЛИВА В ЯЧЕЙКАХ С РАЗЛИЧНЫМ СПЕКТРОМ НЕЙТРОНОВ

А.Н. Писарев *, В.В. Колесов*, Д.В. Колесов**

* НИЦ «Курчатовский институт»
123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1
** ФГБНУ «НИИОПП»
125315, Москва, ул. Балтийская, д. 8



Проведены расчетные исследования, показывающие сложную временную зависимость погрешностей ядерных концентраций различных нуклидов, возникающих при переносе погрешности плотности потока нейтронов в процессе расчета выгорания в ячейках с различным спектром нейтронов на указанные погрешности.

Обнаружено, что эти погрешности не только сложным образом зависят от времени выгорания, но и от спектра ячейки. Рассмотрены варианты ячейки с тепловым и быстрым спектрами нейтронов.

Расчеты проводились по программе VisualBurnOut [14], позволяющей оценивать погрешности, возникающие из-за погрешностей во входных параметрах задачи выгорания (скорости реакций, плотность потока нейтронов и т.д.).

Исследовано влияние количества расчетных точек выгорания на результаты расчетов выгорания методом Монте-Карло. В вычислениях учитывались погрешности, возникающие в ядерных концентрациях на промежуточных расчетных шагах за счет погрешностей в ядерных концентрациях, появляющихся на предыдущем шаге.

Ключевые слова: реакторная установка, расчеты выгорания, погрешности в ядерных данных, погрешности в ядерных концентрациях нуклидов, метод Монте-Карло, спектр нейтронов.

ВВЕДЕНИЕ

Оценка погрешностей различных физических величин, получаемых в результате расчетов за счет погрешностей (далее везде под погрешностями будем понимать среднеквадратичные отклонения) в исходных данных, например, ядерно-физических констант, является одной из важнейших задач нейтронно-физического расчета.

В расчетах выгорания методом Монте-Карло период выгорания делится на конечное число непересекающихся временных шагов. В начале каждого временного шага выгорания методом Монте-Карло проводится расчёт микроскопических скоростей реакций. Рассчитанные микроскопические скорости реакций вводятся и используются для решения уравнений изотопной кинетики для определения ядерных концентраций всех нуклидов в конце временного шага выгорания.

Скорости реакций, оцененные методом Монте-Карло в начале каждого временного шага выгорания, должны содержать погрешности, возникающие вследствие погрешностей в микроскопических сечениях и начальных ядерных концентрациях нуклидов, а также статистической погрешности расчетов методом Монте-Карло. Они приводят к погрешностям в ядерных концентрациях, получаемых при решении уравнений выгорания в конце временного шага выгорания. Таким образом, погрешности в ядерных концентрациях нуклидов и оцененных скоростях реакций распространяются на другие шаги по выгоранию. Для оценки распространения погрешностей в течение периода выгорания необходимо использовать много временных шагов и выполнить множество расчетов методом Монте-Карло.

Было проведено большое количество исследований расчетов выгорания с помощью программных кодов, реализующих метод Монте-Карло, таких как MONTEBURNS [1], MVP-BURN [2], MCNPXOCINDER90 [3], McCARD [4] и других. Тем не менее, имеется не так много исследований [5 – 11], посвященных количественной оценке погрешностей в ядерных концентрациях в расчетах изотопной кинетики и их распространения в процессе выгорания топлива.

В [12] показана сложная временная зависимость погрешностей ядерных концентраций различных нуклидов, возникающих при переносе погрешностей одногрупповых констант или плотности потока нейтронов в процессе расчета выгорания в тепловом спектре. Целью данной работы является оценка влияния погрешностей в задании плотности потока нейтронов в тепловом и быстром спектрах нейтронов на погрешности ядерных концентраций в процессе выгорания.

Предлагаемая методика оценки влияния погрешностей входных параметров в задаче выгорания на погрешности ядерных концентраций, получаемых в процессе выгорания обоснована результатами, полученными в [15]. В этой работе проводилась оценка влияния погрешностей входных параметров задачи выгорания на получаемые вследствие этого погрешности ядерных концентраций в процессе выгорания с использованием статистического подхода. Для входного параметра, погрешность (среднеквадратичное отклонение) которого предполагалась распределенной по логнормальному закону, много раз разыгрывалось его конкретное значение и решалась задача выгорания. В результате решения задачи выгорания получалось распределение ядерных концентраций нуклидов и определялась соответствующая погрешность (среднеквадратичное отклонение). Результаты проведенных исследований показали, что среднеквадратичные отклонения ядерных концентраций, полученные статистическим методом, совпадают с погрешностями концентрации ядер, полученными в вариационном подходе, при котором достаточно было сделать только два расчета: со входным параметром минус среднеквадратичное отклонение и со входным параметром плюс среднеквадратичное отклонение. Разница между этими двумя значениями ядерных концентраций в значительной степени совпадает со среднеквадратичным отклонением, полученным в статистическом подходе.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Для изучения влияния погрешностей в задании плотности потока нейтронов на ядерные концентрации нуклидов исследовалась модель ячейки реактора PWR, представля-

ющая собой трехзонную квадратную ячейку (шаг решетками 1.3127 см) с МОХ-топливом [13]. Состав свежего топлива, оболочки и замедлителя приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Структура ячейки PWR

| $N \times 10^{24}$ ядер/см ³ | Топливо ($\text{PuO}_2 + \text{UO}_2$), $T = 900\text{K}$ | Оболочка (циркало), $T = 620\text{ K}$, внешний диаметр 0.475 см, толщина 0.065 см | Замедлитель (H_2O), $T = 575\text{ K}$ |
|--|--|--|---|
| ^{234}U | 2.7043E-7 | | |
| ^{235}U | 5.6570E-5 | | |
| ^{238}U | 2.2286E-2 | | |
| ^{238}Pu | 4.5941E-7 | | |
| ^{239}Pu | 8.5640E-4 | | |
| ^{240}Pu | 5.4669E-5 | | |
| ^{241}Pu | 2.7221E-6 | | |
| ^{16}O | 4.5180E-7 | | |
| Zr (natural) | | 3.8657E-2 | |
| Fe (natural) | | 1.3345E-4 | |
| Cr (natural) | | 6.8254E-5 | |
| H | | | 4.8414E-2 |
| O | | | 2.4213E-2 |
| ^{10}B | | | 4.7896E-6 |
| ^{11}B | | | 1.9424E-5 |

Для выполнения расчётов была использована фиксированная погрешность плотности потока в 10%. Все обсуждаемые ниже результаты получены на эту погрешность плотности потока. В реальности эта погрешность существенно ниже и может изменяться от выгорания. Таким образом, эта погрешность может считаться некоторой модельной погрешностью. Реальная (экспериментальная) погрешность может быть определена, например, в результате проведения экспериментов по определению плотности потока нейтронов в реальных бенчмарках.

Расчеты проводились по программе VisualBurnOut [14], где использовались одногрупповые скорости реакций и потоки, вычисленные по программе метода Монте-Карло.

С целью недопущения влияния начального состава топлива для исследования влияния быстрого спектра была выбрана та же ячейка реактора PWR, только уже с жестким спектром. Для ужесточения спектра были изменены геометрия и концентрация водорода в замедлителе.

На рисунке 1 представлено распределение долей спектра нейтронов для исходной тепловой ячейки и для быстрой для трех энергетических интервалов, показывающее, что в первом случае спектр является тепловым, а во втором – быстрым.

Полученные результаты для среднеквадратичных отклонений ядерных концентраций нуклидов для быстрого спектра были сопоставлены с результатами, полученными в работе [12].

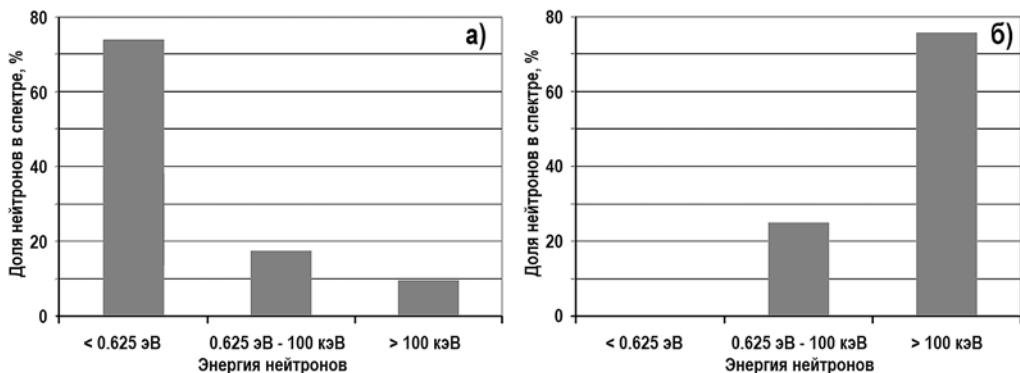


Рис. 1. Тепловой (а) и быстрый (б) спектры нейтронов

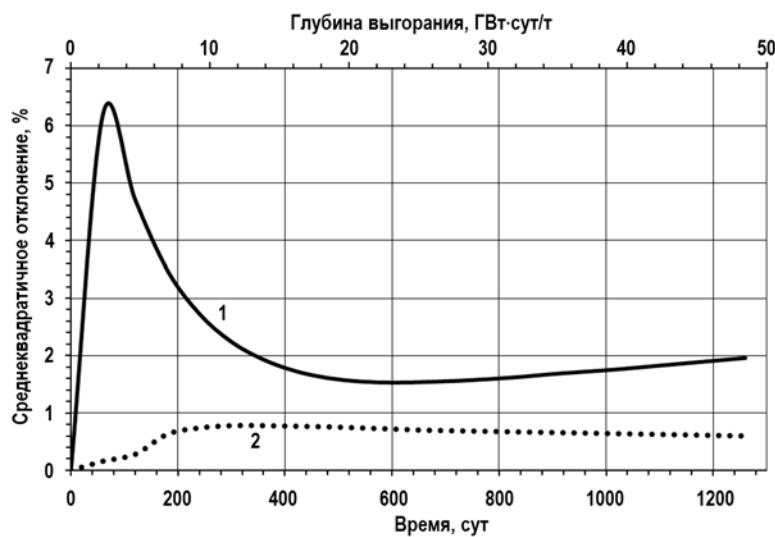


Рис. 2. Среднеквадратичное отклонение (погрешности) в ядерной концентрации ^{241}Am : 1 – тепловой спектр; 2 – быстрый спектр

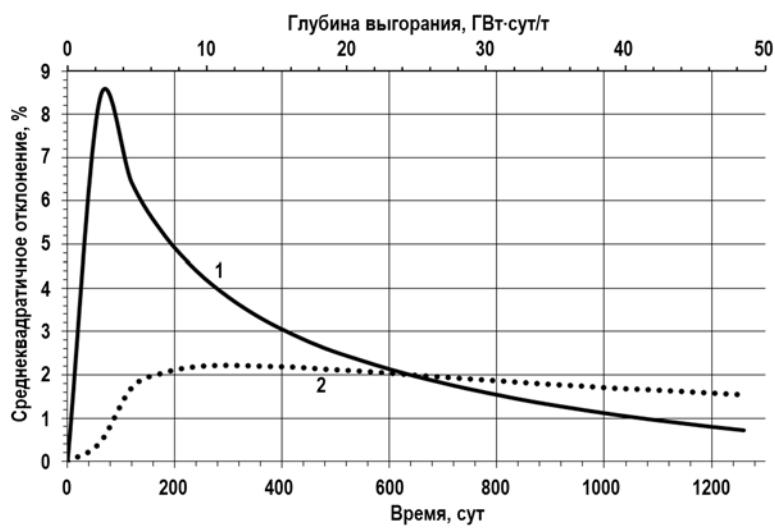


Рис. 3. Среднеквадратичное отклонение (погрешности) в ядерной концентрации ^{241}Pu : 1 – тепловой спектр; 2 – быстрый спектр

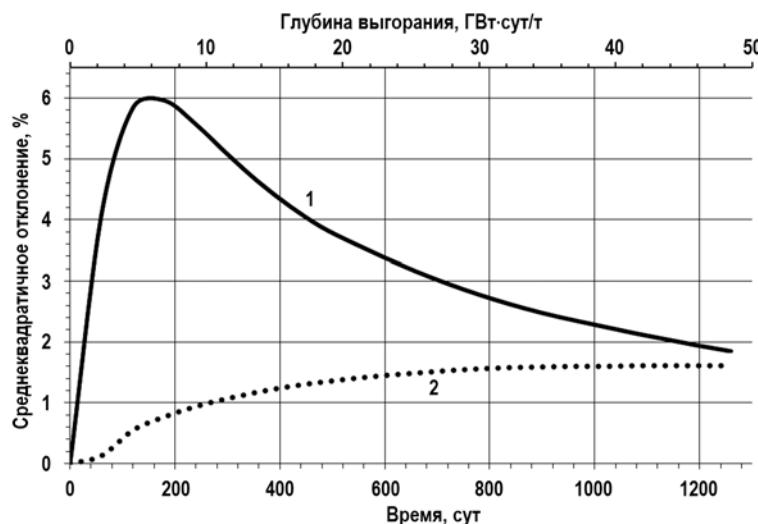


Рис. 4. Среднеквадратичное отклонение (погрешности) в ядерной концентрации ^{242}Pu : 1 – тепловой спектр; 2 – быстрый спектр

Таблица 2

Ядерные концентрации нуклидов и их погрешности на конец кампании реактора при 10%-ой погрешности плотности потока

| Нуклид | Тепловой спектр | | Быстрый спектр | |
|--------------------|-----------------|---|----------------|---|
| | Погрешность, % | $N \times 10^{24}$ ядер/см ³ | Погрешность, % | $N \times 10^{24}$ ядер/см ³ |
| ^{137}Cs | 0.51 | $6.5526\text{E}-5$ | 0.51 | $6.7441\text{E}-5$ |
| ^{155}Eu | 0.74 | $6.2419\text{E}-7$ | 0.68 | $1.6952\text{E}-6$ |
| ^{155}Gd | 5.71 | $1.2394\text{E}-8$ | 0.18 | $3.4383\text{E}-7$ |
| ^{157}Gd | 1.92 | $2.3097\text{E}-8$ | 0.51 | $7.0382\text{E}-7$ |
| ^{158}Gd | 0.85 | $2.0824\text{E}-6$ | 0.58 | $4.5752\text{E}-7$ |
| ^{234}U | 1.36 | $1.7528\text{E}-7$ | 0.38 | $2.4967\text{E}-7$ |
| ^{235}U | 2.18 | $2.0311\text{E}-5$ | 1.71 | $2.6407\text{E}-5$ |
| ^{236}U | 1.76 | $6.6135\text{E}-6$ | 2.11 | $6.0805\text{E}-6$ |
| ^{238}U | 0.05 | $2.1544\text{E}-2$ | 0.20 | $2.0185\text{E}-2$ |
| ^{237}Np | 1.05 | $3.1880\text{E}-6$ | 1.59 | $7.0853\text{E}-6$ |
| ^{238}Pu | 0.93 | $3.8438\text{E}-6$ | 1.48 | $1.9074\text{E}-6$ |
| ^{239}Pu | 0.94 | $2.7440\text{E}-4$ | 0.68 | $1.7051\text{E}-3$ |
| ^{240}Pu | 0.43 | $1.8115\text{E}-4$ | 1.49 | $2.0610\text{E}-4$ |
| ^{241}Pu | 0.72 | $1.0621\text{E}-4$ | 1.54 | $1.5168\text{E}-5$ |
| ^{242}Pu | 1.85 | $3.6946\text{E}-5$ | 1.61 | $1.4526\text{E}-6$ |
| ^{241}Am | 1.96 | $5.3795\text{E}-6$ | 0.60 | $1.1407\text{E}-6$ |
| ^{242m}Am | 0.97 | $1.1430\text{E}-7$ | 2.06 | $1.5666\text{E}-8$ |
| ^{243}Am | 2.12 | $8.7295\text{E}-6$ | 1.95 | $9.6828\text{E}-8$ |
| ^{242}Cm | 3.80 | $1.5823\text{E}-6$ | 3.90 | $4.9779\text{E}-8$ |
| ^{243}Cm | 2.77 | $1.4596\text{E}-8$ | 2.88 | $1.9457\text{E}-9$ |
| ^{244}Cm | 3.03 | $3.7437\text{E}-6$ | 2.48 | $1.6731\text{E}-8$ |
| ^{245}Cm | 3.18 | $3.5184\text{E}-7$ | 2.65 | $8.7577\text{E}-10$ |

На рисунках 2 – 4 показан характер изменения погрешностей в ядерных концентрациях ^{241}Am , ^{241}Pu и ^{242}Pu в течение кампании для теплового и быстрого спектров. Данные нуклиды являются одними из немногих, у которых характер распространения погрешностей зависит от нейтронного спектра. У большинства же нуклидов наблюдается схожее поведение в течение времени. Разница заключается лишь в численном значении погрешности на конец кампании, как представлено в табл. 2.

Для большинства нуклидов наблюдается тенденция к уменьшению погрешностей при переходе от теплового к быстрому нейтронному спектру. Однако имеются нуклиды, для которых наблюдается противоположный эффект ($^{236,238}\text{U}$, ^{237}Np , $^{240,241}\text{Pu}$, ^{242m}Am , $^{242,243}\text{Cm}$). Это является предметом для дальнейшего изучения.

Для изотопов с относительно малыми ядерными концентрациями ($^{242-245}\text{Cm}$, ^{241}Am , ^{243}Am) погрешность становится большей. Погрешность ядерной концентрации для ^{238}U очень мала из-за большой ядерной концентрации этого изотопа. Погрешности для продуктов деления, в основном, ниже 1%. Исключением являются изотопы гадолиния, обладающие большим сечением в тепловом спектре.

ВЛИЯНИЕ КОЛИЧЕСТВА РАСЧЕТНЫХ ТОЧЕК ВЫГОРАНИЯ НА ПОГРЕШНОСТИ ЯДЕРНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ НУКЛИДОВ

В расчетах выгорания методом Монте-Карло погрешности во входных параметрах модели переносятся на ядерные концентрации нуклидов посредством экспоненциальной функции. В этих условиях существует вероятность того, что погрешности в ядерных концентрациях нуклидов зависят от количества расчетных точек выгорания.

Таблица 3

**Погрешности в ядерных концентрациях нуклидов
в зависимости от количества расчетных точек выгорания
при 10%-ой погрешности плотности потока**

| Глубина выгорания, ГВт·сут/т | Количество расчетных точек выгорания | | | | | | | | |
|---------------------------------|---|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | 44 | | | 22 | | | 11 | | |
| | Погрешности в ядерных концентрациях нуклидов, % | | | | | | | | |
| | ^{235}U | ^{239}Pu | ^{241}Am | ^{235}U | ^{239}Pu | ^{241}Am | ^{235}U | ^{239}Pu | ^{241}Am |
| 16 | 0.85 | 0.84 | 0.94 | 1.21 | 1.18 | 1.34 | 1.69 | 1.66 | 1.78 |
| 32 | 1.18 | 0.89 | 1.16 | 1.69 | 1.26 | 1.63 | 2.36 | 1.74 | 2.32 |
| 48 | 1.49 | 0.79 | 1.37 | 2.11 | 1.08 | 1.96 | 2.97 | 1.49 | 2.66 |

Была проведена оценка погрешностей ядерных концентраций в зависимости от числа шагов по выгоранию. Среднеквадратичные отклонения в ядерных концентрациях ^{235}U , ^{239}Pu и ^{241}Am , полученные для различного числа шагов по выгоранию (11, 22 и 44), представлены в табл. 3. Из таблицы видно, что погрешности ядерных концентраций в рассматриваемом диапазоне исследования влияния количества шагов, убывают по закону $2^{1/2}$. Вероятнее всего это справедливо для относительно небольшого количества шагов. Асимптотическая (с ростом числа шагов) зависимость погрешностей не исследовалась. Это будет сделано в дальнейшем.

В реальных расчетах выгорания стоимость расчетов в большой степени зависит от затрат, связанных с общим количеством нейтронных историй методом Монте-Карло при подготовке одногрупповых сечений на каждом шаге выгорания. Поэтому нельзя бесконечно увеличивать количество расчетных точек выгорания, а следует разумно ограничить расчетное время. Полученные результаты оценок погрешности от числа шагов позволяют утверждать, что желательно иметь меньшее число расчетных точек выгорания

для случаев, когда не требуется получение высокоточных результатов в оценке погрешностей и большее количество расчетных точек выгорания для случаев, например, PIE (Post-Irradiation Experiments), которые требуют высокоточных результатов в ядерных концентрациях нуклидов. В обоих случаях мы получаем оценку погрешности сверху.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка погрешностей (среднеквадратичных отклонений) в ядерных концентрациях нуклидов, обусловленных погрешностью в задании плотности потока нейтронов для теплового и быстрого спектров нейтронов. Выполнены сравнения погрешностей ядерных концентраций различных нуклидов, полученных на тепловом и быстром спектрах.

Эти сравнения показали, что эффекты распространения погрешностей входных данных (в данном случае плотности потока нейтронов) в расчетах выгорания методом Монте-Карло для топливной ячейки PWR сложным образом зависят от спектра нейтронов. Были выявлены вопросы, требующие дополнительного изучения. В дальнейшем целесообразно провести анализ влияния погрешностей в скоростях реакций для теплового и быстрого спектров и выявить, какие реакции имеют наибольшее влияние на погрешности концентраций тех или иных нуклидов.

Выполнена проверка влияния количества расчетных точек выгорания на погрешности ядерных концентраций нуклидов. Обнаружено, что среднеквадратичное отклонение в ядерных концентрациях нуклидов в рассматриваемом диапазоне исследования влияния количества шагов убывает по закону $2^{1/2}$. Представляется целесообразным провести дополнительные исследования поведения погрешностей для значительно большего числа шагов.

Планируется провести расчеты коэффициентов чувствительности ядерных концентраций к различным ядерным данным. Это позволит исследовать вопрос о поведении погрешностей ядерных концентраций при различных значениях погрешностей входных данных.

Литература

1. *Trellue H.R. Modification of Monteburns to Maintain Criticality Throughout the Burnup Cycle.* // Transactions of American Nuclear Society. – 2006. – Vol. 95. – No. 1. – PP. 315-316.
2. *Okumura K. et al. Validation of a Continuous-Energy Monte Carlo Burnup Code MVP-BURN and its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment.* // Nuclear Science and Technology. – 2000. – Vol. 37. – No. 128. – PP. 128-138. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2000.9714876>.
3. *Fensin M.L., Hendricks J.S., Trellue H.R., Anghie S. Incorporation of a Predictor-Corrector Methodology and 1-Group Reaction Rate Reporting Scheme for the MCNPX Depletion Capability.* // Transactions of American Nuclear Society. – 2006. – Vol. 95. – No. 1. – PP. 317-319.
4. *Shim H.J., Kim C.H. Error Propagation Module Implemented in the MC-CARD Monte Carlo Code.* // Transactions of American Nuclear Society. – 2002. – Vol. 95. – No. 1. – PP. 325-326.
5. *Takeda T., Hirokawa N., Noda T. Estimation of Error Propagation in Monte-Carlo Burnup Calculations.* // Nuclear Science and Technology. – 1999. – Vol. 36. – No. 9. – PP. 738-745. DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1999.9726262>.
6. *Tohjoh M., Endo T., Watanabe M., Yamamoto A. Effect of error propagation of nuclide number densities on Monte Carlo burn-up calculations.* // Annals of Nuclear Energy. – 2006. – Vol. 33. – No. 17-18. – PP. 1424-1436. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.09.010>.
7. *Garcia-Herranz N., Cabellos O., Sanz J., Juan J., Kuijper J.C. Propagation of statistical*

- and nuclear data uncertainties in Monte Carlo burn-up calculations. // Annals of Nuclear Energy. – 2008. – Vol. 35. – No. 4. – PP. 714-730. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.07.022>.
8. Park H.J., Shim H.J., Kim C.H. Uncertainty Propagation in Monte Carlo Depletion Analysis. // Nuclear Science and Engineering. – 2011. – Vol. 167. – No. 3. – PP. 196-208. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE09-106>.
9. Rochman D., Koning A.J., Da Cruz D.F. Propagation of $^{235,236,238}\text{U}$ and ^{239}Pu Nuclear Data Uncertainties for a Typical PWR Fuel Element. // Nuclear Technology. – 2012. – Vol. 179. – No. 3. – PP. 323-338. DOI: <https://doi.org/10.13182/NT11-61>.
10. Newell Quentin, Sanders Charlotta. Stochastic Uncertainty Propagation in Monte Carlo Depletion Calculations. // Nuclear Science and Engineering. – 2015. – Vol. 179. – No. 3. – PP. 253-263. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE13-44>.
11. Minamigawa Yasuhiro, Kitcher Evans D., Chirayath Sunil S. A Method to Estimate Fission Product Concentration Uncertainty in a Multi-Time-Step MCNP6 Code Nuclear Fuel Burnup Calculation. // Nuclear Technology. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1624429>.
12. Писарев А.Н., Колесов В.В. Исследование переноса неопределенностей в ядерных данных на ядерные концентрации нуклидов в расчетах выгорания. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2020. – № 2. – С. 108-121. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.10>.
13. Stepanek P. Vontobel. EIR Results for the HCLWR NEACRP Burn-out Benchmark Obtained Using EIR Version of DANDE System and JEF Library. / Report NEACRP-A-851 (1987).
14. Kolesov V.V., Khitrik D.V., Kamaev D.A. VisualBurnOut Program. Registration No. 2009617021 dated 23.12.2009 in Computer Program Register.
15. Kolesov V.V., Novichkov A.V., Voznyakevich E., and Terekhova A.M. Statistical Approach to Estimated Uncertainty of Nuclear Concentration in Problems of Isotope Kinetics. / Proc. of the XIII International Youth Scientific and Practical Conference «Future of Atomic Energy – AtomFuture 2017». KnE Engineering. – PP. 261-267. DOI: <https://doi.org/10.18502/keg.v3i3.1625>.

Поступила в редакцию 08.06.2021 г.

Авторы

Писарев Александр Николаевич, аспирант

E-mail: a.n.pisarev93@gmail.com

Колесов Валерий Васильевич, зав. лабораторией, доцент, канд. техн. наук

E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Колесов Дмитрий Валерьевич, научный сотрудник

E-mail: dvkolesov@yandex.ru

UDC 621.039.51

THE EFFECT OF ERRORS IN THE NEUTRON FLUX DENSITY ON THE UNCERTAINTIES OF NUCLEAR CONCENTRATIONS OF NUCLIDES ARISING DURING THE CALCULATION OF FUEL BURNUP IN CELLS WITH DIFFERENT NEUTRON SPECTRA

Pisarev A.N.*, Kolesov V.V.*, Kolesov D.V.**

National Research Center «Kurchatov Institute»

1 Academician Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

FSBSI «Research Institute of General Pathology and Pathophysiology»

8 Baltiyskaya Str., 125315 Moscow, Russia

ABSTRACT

Computational studies showing the complex temporal dependence of uncertainties in nuclear concentrations of various nuclides arising from the transfer of the neutron flux density error in the burnup calculation process in cells with different neutron spectra on the above errors are carried out.

It is found that these uncertainties not only depend on the burnup time in a complex way, but also depend on the spectrum of the cell. The variants of the cell with thermal and fast neutron spectra were considered.

The calculations were performed using the VisualBurnOut program [14], which makes it possible to estimate these uncertainties arising due to errors in the input parameters of the burnup problem (reaction rates, neutron flux density, etc.).

The influence of the number of calculated burnup points on the results of burnup calculations by the Monte Carlo method was investigated. Uncertainties arising in nuclear concentrations at intermediate calculation steps due to errors in nuclear concentrations appearing at the previous step were taken into account in the calculations.

Key words: reactor plant, burnup calculations, uncertainties in nuclear data, uncertainties in nuclide nuclear concentrations, Monte Carlo method, neutron spectrum.

REFERENCES

1. Trellue H.R. Modification of Monteburns to Maintain Criticality Throughout the Burnup Cycle. *Transactions of American Nuclear Society*. 2006, v. 95, no. 1, pp. 315-316.
2. Okumura K. et al. Validation of a Continuous-Energy Monte Carlo Burnup Code MVP-BURN and its Application to Analysis of Post Irradiation Experiment. *Nuclear Science and Technology*. 2000, v. 37, no. 128, pp. 128-138; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.2000.9714876>.
3. Fensin M.L., Hendricks J.S., Trellue H.R., Anghie S. Incorporation of a Predictor-Corrector Methodology and 1-Group Reaction Rate Reporting Scheme for the MCNPX Depletion Capability. *Transactions of American Nuclear Society*. 2006, v. 95, no. 1, pp. 317-319.
4. Shim H.J., Kim C.H. Error Propagation Module Implemented in the MC-CARD Monte Carlo Code. *Transactions of American Nuclear Society*. 2002, v. 95, no. 1, pp. 325-326.
5. Takeda T., Hirokawa N., Noda T. Estimation of Error Propagation in Monte-Carlo Burnup Calculations. *Nuclear Science and Technology*. 1999, v. 36, no. 9, pp. 738-745; DOI: <https://doi.org/10.1080/18811248.1999.9726262>.
6. Tohjoh M., Endo T., Watanabe M., Yamamoto A. Effect of Error Propagation of Nuclide Number Densities on Monte Carlo Burn-Up Calculations. *Annals of Nuclear Energy*. 2006, v. 33, no. 17-18, pp. 1424-1436; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.09.010>.

7. Garcia-Herranz N., Cabellos O., Sanz J., Juan J., Kuijper J.C. Propagation of Statistical and Nuclear Data Uncertainties in Monte Carlo Burn-Up Calculations. *Annals of Nuclear Energy*. 2008, v. 35, no. 4, pp. 714-730; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2007.07.022>.
8. Park H.J., Shim H.J., Kim C.H. Uncertainty Propagation in Monte Carlo Depletion Analysis. *Nuclear Science and Engineering*. 2011, v. 167, no. 3, pp. 196-208; DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE09-106>.
9. Rochman D., Koning A.J., Da Cruz D.F. Propagation of $^{235,236,238}\text{U}$ and ^{239}Pu Nuclear Data Uncertainties for a Typical PWR Fuel Element. *Nuclear Technology*. 2012, v. 179, no. 3, pp. 323-338; DOI: <https://doi.org/10.13182/NT11-61>.
10. Newell Quentin, Sanders Charlotta. Stochastic Uncertainty Propagation in Monte Carlo Depletion Calculations. *Nuclear Science and Engineering*. 2015, v. 179, no. 3, pp. 253-263. DOI: <https://doi.org/10.13182/NSE13-44>.
11. Minamigawa Yasuhiro, Kitcher Evans D., Chirayath Sunil S. A Method to Estimate Fission Product Concentration Uncertainty in a Multi-Time-Step MCNP6 Code Nuclear Fuel Burnup Calculation. *Nuclear Technology*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1080/00295450.2019.1624429>.
12. Pisarev A.N., Kolesov V.V. Investigation of the Transfer of Uncertainties in Nuclear Data to Nuclear Concentrations of Nuclides in Burnup Calculations. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020, no. 2, pp. 108-121; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2020.2.10> (in Russian).
13. Stepanek P. Vontobel. EIR Results for the HCLWR NEACRP Burn-out Benchmark Obtained Using EIR Version of DANDE System and JEF Library. Report NEACRP-A-851 (1987).
14. Kolesov V.V., Khitrik D.V., Kamaev D.A. VisualBurnOut Program. Registration No. 2009617021 dated 23.12.2009 in Computer Program Register.
15. Kolesov V.V., Novichkov A.V., Voznyakevich E., and Terekhova A.M. Statistical Approach to Estimated Uncertainty of Nuclear Concentration in Problems of Isotope Kinetics. *Proc. of the XIII International Youth Scientific and Practical Conference «Future of Atomic Energy – AtomFuture 2017»*. KnE Engineering. 2017, pp. 261-267; DOI: <https://doi.org/10.18502/keg.v3i3.1625>.

Authors

Pisarev Alexandr Nikolaevich, PhD Student
E-mail: a.n.pisarev93@gmail.com

Kolesov Valeriy Vasilievich, Head of Laboratory, Cand. Sci. (Engineering)
E-mail: valeri-kolesov@yandex.ru

Kolesov Dmitry Valerievich, Researcher
E-mail: dvkolesov@yandex.ru