

СРАВНЕНИЕ МЕТОДОВ РАСЧЁТА НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩЕЙ СБОРКИ ВВЭР-1200

А.В. Лавроненко, В.Г. Саванков, Р.А. Внуков, Е.А. Чистозвонова

*Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249039, Калужская обл., г. Обнинск, тер. Студгородок, д. 1*



Представлены результаты нейтронно-физического расчёта тепловыделяющей сборки (ТВС) ВВЭР-1200 с использованием программного комплекса Serpent 2. В исследовании сравниваются нейтронно-физические характеристики при моделировании выдержки топлива между реакторными кампаниями в процессе выгорания и при её отсутствии. В первом варианте моделировалась топливная кампания ТВС с 30-дневными выдержками между реакторными кампаниями. Второй вариант предполагал моделирование топливной кампании ТВС без выдержки. Были определены бесконечные коэффициенты размножения нейтронов, зависимость концентраций нуклидов ксенона, самария и гадолиния от глубины выгорания топлива. Замечено отсутствие различий в изменении концентрации изотопов гадолиния, расхождение значений коэффициента размножения, накопления изотопов самария в процессе кампании.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, нейтронно-физические характеристики, Serpent, выдержка и модельная перегрузка топлива, самарий, ксенон, выгорание топлива, бесконечный коэффициент размножения, отклонение, сечение поглощения.

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос постановки задачи является основополагающим в рамках обоснования эксплуатации той или иной ядерной энергетической установки. Нейтронно-физический расчёт можно осуществлять с различными подходами: некоторые исследователи полагают, что нет необходимости в моделировании выдержки топлива при исследовании выгорания материалов [1], другие, наоборот, что необходимо производить расчёт с выдержкой топлива [2]. В предлагаемой работе произведены вычисления двумя методами: непрерывный расчет выгорания (без моделирования выдержки топлива), расчет выгорания с выдержкой между реакторными кампаниями.

Актуален вопрос эквивалентности предлагаемых методов расчёта. Если результаты отличаются на величины, значительно превышающие статистическую погрешность, то из имеющихся способов вычисления кампании следует выбрать наиболее достоверный, т.е. тот, который соответствует реальным эксплуатационным условиям. В таких условиях выдержка производится для уменьшения концентрации нейтронных поглотителей (^{135}Xe , ^{135}I).

© А.В. Лавроненко, В.Г. Саванков, Р.А. Внуков, Е.А. Чистозвонова, 2022

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Определить бесконечные коэффициенты размножения для ТВС ВВЭР-1200 с моделированием 30-суточной выдержки топлива после каждых 340 эффективных суток работы и непрерывного выгорания топлива. Отследить концентрации наиболее важных нуклидов (с точки зрения поглощения нейтронов) в твэлах и твэгах – ^{135}Xe , ^{149}Sm , ^{155}Gd [3] и получить зависимости от глубины выгорания, а также определить концентрации и время, при которых влияние поглотительных свойств гадолиния окажется незначительным. Сделать вывод о причинах расхождения значений в сравниваемых расчетах.

МОДЕЛЬ

Расчеты проводились с использованием программного комплекса Serpent 2. Также в этом плане интересны статьи [4, 5, 9], где даны результаты расчета выгорания ТВС с гадолинием реакторов ВВЭР-440 и ВВЭР-1000. Расчеты выгорания для шестиугольной ТВС ВВЭР-1200 [6, 7] с кодом Serpent 2 дают достаточно точные результаты по сравнению с результатами, полученными с использованием других проверенных кодов. Показано, что расчёты выгорания с использованием этого комплекса приводят к разумным и достаточно точным характеристикам ТВС, что актуализирует выбор этого программного средства [8].

Программный комплекс Serpent 2 – многоцелевой код, реализующий метод Монте-Карло [10, 12]. В каждом цикле заданы пакет из 10000 нейтронов, 50 неактивных и 750 активных циклов. Задавались следующие шаги по выгоранию в сутках: 1, 5, 10, 15, 40 и далее до 340 эффективных суток с шагом в 30 суток. Частота начальной разбивки обусловлена необходимостью отслеживания изменения концентраций ксенона, плутония и других важных изотопов. В работе также отслеживались концентрации упомянутых элементов для обоснования процессов, происходящих в топливе, и их влияния на коэффициент размножения. В качестве расчётной геометрии была выбрана бесконечная решётка ТВС, являющаяся аналогом реальных решёток БелАЭС [13, 14]. На рисунке 1 представлены горизонтальное (x-y) и вертикальное (x-z) сечения решётки ТВС.

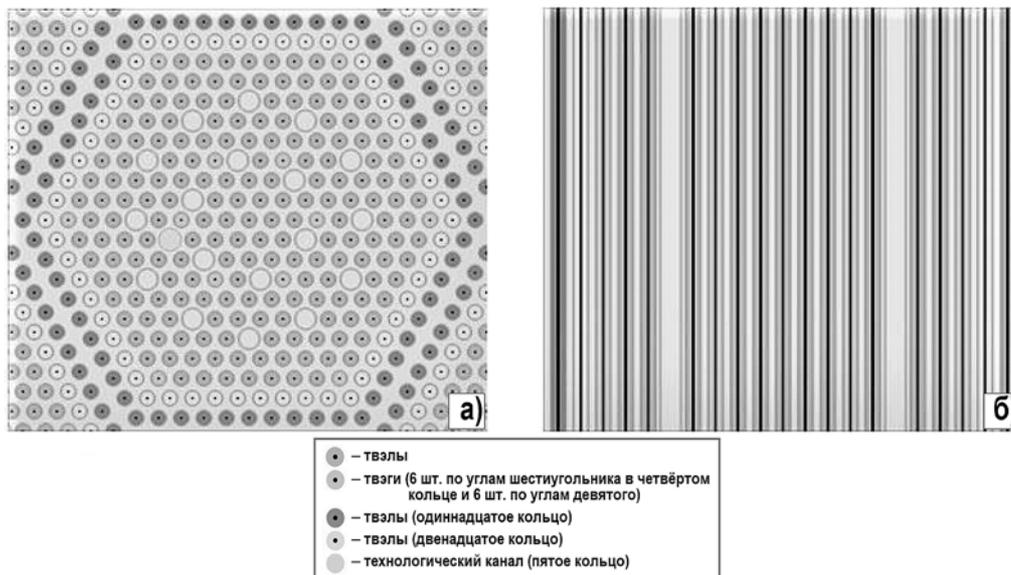


Рис. 1. Сечения решётки ТВС: а) – горизонтальное; б) – вертикальное

Рассматривалась гексагональная ТВС типа Z49A2, содержащая 300 твэлов с обогащением 4,95% по ^{235}U и 12 твэгов с обогащением 3,6% по ^{235}U . В пятом кольце (от цен-

тра) расположен измерительный канал, в четвёртом и шестом кольцах – по шесть и двенадцать направляющих каналов. Для отслеживания неравномерности потока выделены твэлы в десятом и одиннадцатом кольцах. Использовалась бесконечная по высоте и радиусу геометрия (set bc 2) [15 – 17], поэтому в работе оценивались значения K_{inf} . Расчёт производился с 30-ю днями выдержки после каждых 340 эффективных суток (модель 1) и без выдержки непрерывно в рамках четырехгодичной топливной кампании (модель 2). Моделирование процесса выгорания топлива осуществлялось опцией `dep butot`, а моделирование выдержки – опцией `dep decstep`.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 2 представлена зависимость отклонения значений K_{inf} между моделями с выдержкой топлива и без выдержки в процессе выгорания.

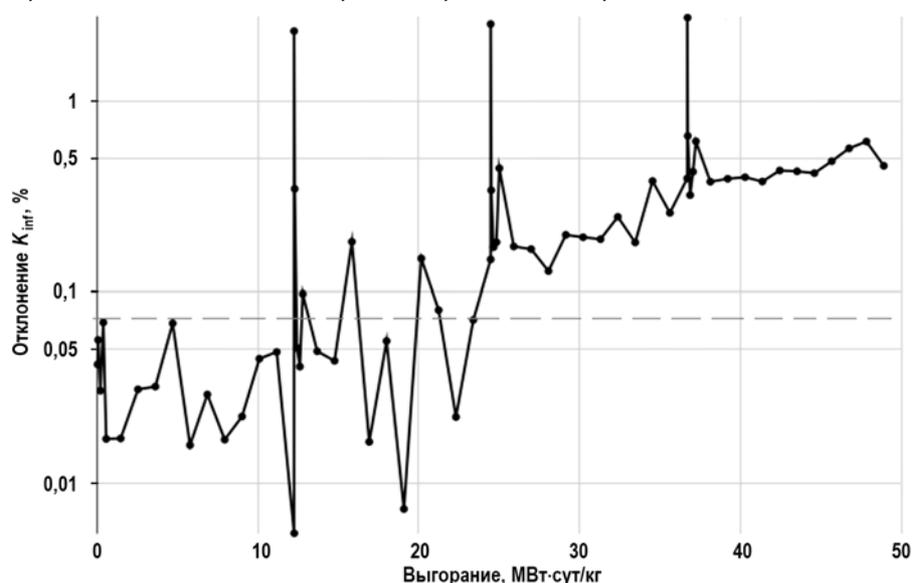


Рис. 2. Изменение отклонения K_{inf} с выгоранием. Горизонтальная штриховая линия – статистическая погрешность

Значительные отклонения в значениях K_{inf} между моделями объясняются переходными процессами: при запуске расчета на начальных шагах выгорания концентрация ксенона нестационарна. Из графика видно, что модель 1 дает результаты ниже, чем модели 2 на 12, 24, 36 МВт-сут/кг.

Отклонения определялись по аналогии с работой [8] по формуле

$$\left[\frac{(K_{inf2} - K_{inf1})}{K_{inf1}} \right] \cdot 100\%,$$

где K_{inf1} – значение, приближённое к реальным эксплуатационным условиям (модель 1); K_{inf2} – значение, сравниваемое с «оптимальной» величиной (модель 2). Наблюдается следующая тенденция: на протяжении всей кампании ТВС (исключая начало второй, третьей и четвёртой реакторных кампаний) отклонение растёт равномерно. Явное отличие в значениях между моделями можно наблюдать на рис. 3.

Разница между значениями накапливается, а на третьем и четвёртом годах превышает статистическую погрешность. Это, предположительно, объясняется тем, что концентрация сильного поглотителя на стационарных участках для модели 1 после года выгорания всё больше и больше отклоняется от соответствующих значений модели 2, и к концу четвёртого года эта разница становится максимальной. Следовательно, величина K_{inf} для модели без выдержки оказывается больше, чем с выдержкой. Для проверки гипотезы сравнивались концентрации значения таких сильных поглотителей, как Xe-135,

Sm-149 и Gd-155. Понятно, что Gd-157 является более сильным поглотителем, чем Gd-155, а поскольку концентрация оксида гадолиния в ТВС мала, он практически полностью выгорает к концу первой микрокампании. Таким образом, гадолиний не может влиять на изменение K_{inf} на заключительных микрокампаниях.

Изменение концентрации Xe-135 с выгоранием представлено на рис. 4.

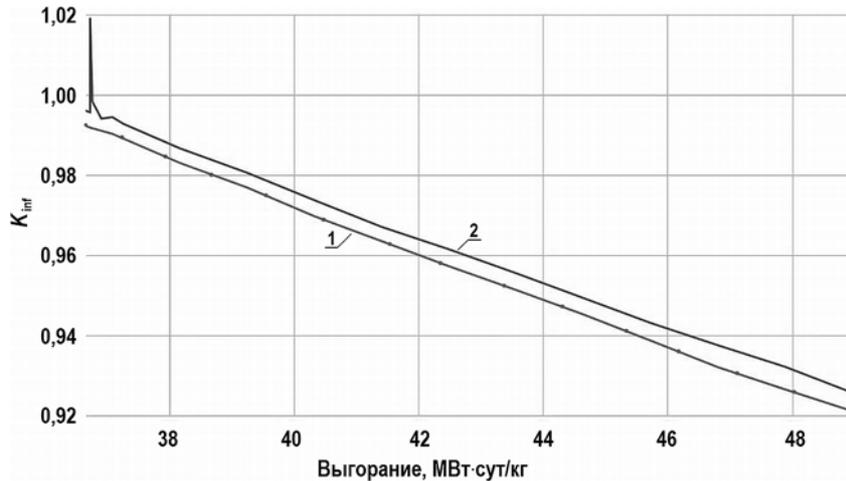


Рис. 3. Зависимость K_{inf} от выгорания: 1 – модель с выдержкой; 2 – модель без выдержки

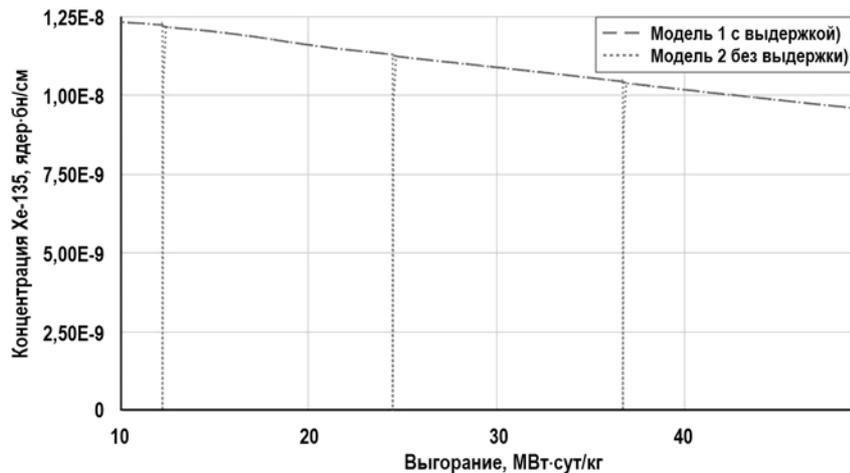


Рис. 4. Изменение концентрации Xe-135 с выгоранием: 1 – модель с выдержкой, 2 – модель без выдержки

Разница в значениях концентрации Xe-135 между моделями наблюдается только в периоды выдержки топлива. Это обусловлено его распадом. В процессе стационарного выгорания концентрации идентичны. Это означает, что вклад в отличие в значениях K_{inf} между моделями данный нуклид не вносит.

Изменение концентрации Sm-149 в моделях с выгоранием показано на рис. 5.

До моделирования первой выдержки топлива расчеты идентичны, поэтому на графике зависимости отражают процесс после 10 МВт-сут/кг. Значительные отклонения (до 17% на 12, 24, 36 МВт-сут/кг) объясняются накоплением самария в модели с выдержкой топлива: при отсутствии мощности поток нейтронов значительно снижается, концентрация Sm-149 растёт. При моделировании следующей реакторной кампании сначала концентрация Sm-149 резко падает, затем растёт, пока не устанавливается равновесная. Такое поведение влияет на значения K_{inf} . Поскольку процесс установления равновесной концентрации занимает значительное время, процесс выгорания

топлива происходит различным образом для двух рассматриваемых моделей ввиду особенности метода расчета ПК Serpent [11]: первоначально в определенный момент времени вычисляется плотность потока нейтронов, затем с данной величиной пересчитываются концентрации к следующей временной точке. Далее плотность потока нейтронов уточняется, после чего концентрации пересчитываются. Таким образом, получаем итерационный процесс с остальными временными точками. Из-за временного отличия между моделями концентрации Sm-149 плотность потока нейтронов искажается, что вызывает различия при пересчете концентраций выгорающих материалов. В связи с этим актуальным является проверка вклада Gd-155 в характеристики кампании в моделях с выдержкой и без. Изменение концентрации Gd-155 с выгоранием для моделей демонстрируется на рис. 6.

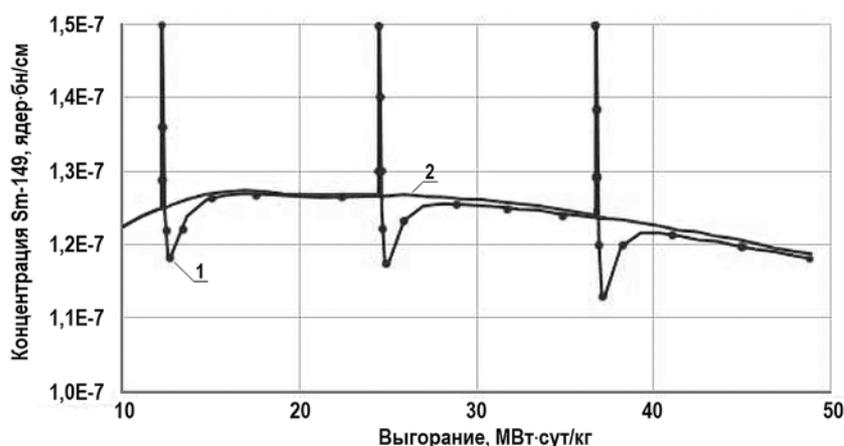


Рис. 5. Изменение концентрации Sm-149 с выгоранием: 1 – модель с выдержкой топлива; 2 – модель без выдержки

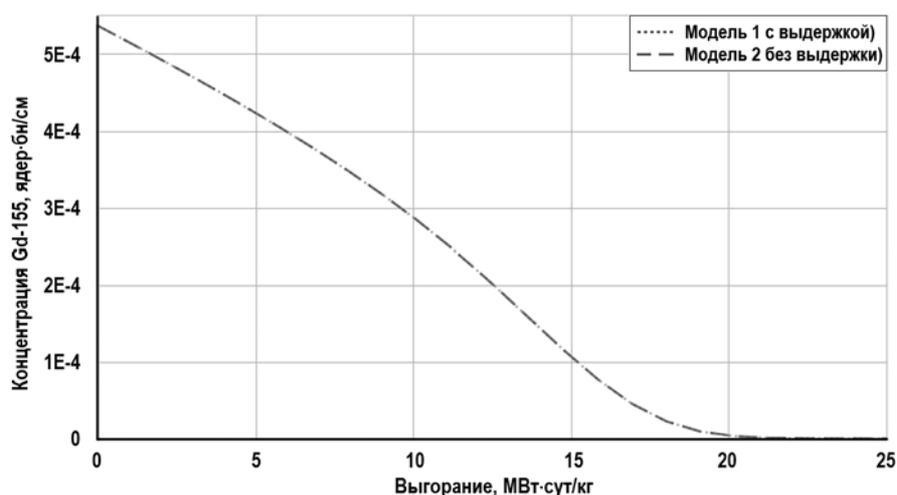


Рис. 6. Изменение концентрации Gd-155 с выгоранием: 1 – модель с выдержкой, 2 – модель без выдержки

На рисунке не отражены шаги выгорания после 25 МВт-сут/кг, поскольку после 16 МВт-сут/кг (после первой микрокампании) поглотитель практически полностью выгорает. При этом он не является накапливаемым изотопом в процессе выгорания топлива, а потому не имеет скачков, подобных скачкам концентрации Sm-149. Поскольку различие значений K_{inf} в моделях происходит после второй выдержки, когда гадолиния не остается в ТВС (рис. 7), можно сделать вывод, что единственным изотопом, влияющим на отклонения K_{inf} между моделями, является Sm-149.

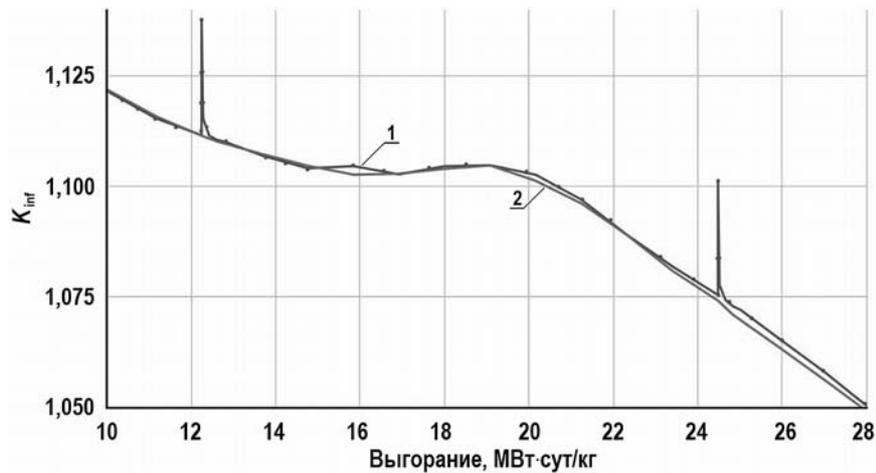


Рис. 7. Изменение K_{inf} с выгоранием (в момент существенного выгорания Gd-155): 1 – с выдержкой; 2 – без выдержки

Отсутствие вклада Sm-149 в изменение концентраций Xe-135 можно объяснить малой равновесной концентрацией изотопа в системе и его незначительным вкладом в кампанию (исключая переходные процессы). В отличие от концентрации Gd-155, неравновесная концентрация Sm-149 также не вносит вклада, поскольку после первой микрокампании выгорающего поглотителя практически не остается, и он на критичность модели практически не оказывает влияния.

ВЫВОДЫ

Выполнен расчет выгорания модели ТВС Z49A2 ВВЭР-1200 с четырехгодичной топливной кампанией. В рамках исследования моделировались варианты: с выдержкой топлива между микрокампаниями длительностью 340 эфф. сут и без выдержки. Оценка K_{inf} показала наличие расхождений между моделями, начиная с 24 МВт-сут/кг. Различия увеличивается с ростом выгорания.

Оценка концентраций отравителей Xe-135, Sm-149 и выгорающего поглотителя Gd-155 свидетельствует о наличии вклада Sm-149 в отклонение K_{inf} между моделями.

Значительные скачки отклонения K_{inf} между моделями на 12, 24, 36 МВт-сут/кг объясняются распадом Xe-135 в модели с выдержкой топлива. Равновесная концентрация Xe-135 достигается быстрее в сравнении с Sm-149. Отличие между моделями в концентрации отравителя на протяжении длительного времени вносит существенные изменения в процесс выгорания топлива и расчёт критичности модели. В связи с этим при расчетах выгорания следует использовать ту модель, которая обеспечивает наибольшее приближение к реальным условиям изучаемого явления. В данном случае модель с выдержкой топлива оказалась наиболее корректной. Безусловно, важно принимать во внимание существование отличий при моделировании и при реальных условиях эксплуатации и перегрузки топлива, поскольку в таком сравнении не учитываются особенности нейтронного спектра во время выгорания топлива, особенности процедуры выдержки на той или иной атомной станции, регламентируемой соответствующими актами и нормативными документами. Поэтому дальнейшие исследования следует направить на рассмотрение эффектов при учёте существующих отличий и сравнения показателей при использовании различных характеристик активной зоны.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Программы повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Литература

1. *Korkmaz M. E., Agar O., Buyuker E.* Burnup Analysis of the VVER-1000 Reactor using Thorium-Based Fuel. // *Kerntechnik*. – 2014. – Vol. 79. – No. 6. – PP. 478-483. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110449>.
2. *Giusti V., Ambrosini W., Mercatali L., Venturini A.* Neutronic Investigations of MOX and LEU Fuel Assemblies for VVER Reactors. Электронный ресурс: <https://core.ac.uk/download/pdf/79616503.pdf> (дата доступа 29.09.2021).
3. *Mercatali L., Venturini A., Sanchez V.H.* New Solutions for the OECD VVER-1000 LEU and MOX Burnup Computational Benchmark. Электронный ресурс: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/230098149/3816710> (дата доступа 29.09.2021).
4. *Lotsch T.* Fuel Assembly Burnup Calculations for VVER Fuel Assemblies with the Monte Carlo code Serpent. // *Kerntechnik*. – 2014. – Vol. 79. – No. 4. – PP. 295-302. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110455>.
5. *Vnukov R.A., Zhavoronkova I.A., Kolesov V.V., Karpovich G.V., Teplyakova A.R.* Effect of Gadolinium Absorber Radial Profiling in Fuel Pins on VVER-1000 Assembly Neutron-Physical Characteristics. // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012043>.
6. *Внуков Р.А., Колесов В.В., Жаворонкова И.А., Котов Я.А., Праманик М.Р.* Влияние размещения выгорающего поглотителя на нейтронно-физические характеристики тепловыделяющей сборки ВВЭР-1200. // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. – 2021. – № 2. – С. 27-38. DOI: <https://doi.org/10.26583/пре.2021.2.03>.
7. *Абу Сондос М.А., Демин В.М., Савандер В.И.* Оценка возможности использования Eu_2O_3 в качестве выгорающего поглотителя в реакторе ВВЭР-1200. // *Глобальная ядерная безопасность*. – 2019. – № 1 (30). – С. 39-46. DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-01-04>.
8. *Строганов А.А., Курындин А.В., Киркин А.М., Аникин А.Ю., Синегрибов С.В., Курбатова М.В.* Опыт использования программного средства Serpent для проведения оценок параметров ядерной безопасности систем, содержащих ядерное топливо. // *Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук*. – 2014. – Т. 7. – № 1. – С. 59-65.
9. *Novak O., Chvala O., Nicholas P., Luciano B., Maldonado I.* VVER 1000 Khmel'nitskiy Benchmark Analysis Calculated by Serpent 2. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2017. – Vol. 110. – PP. 948-957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.011>.
10. *Leppaanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T.* The Serpent Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013. // *Ann. Nucl. Energy*. – 2015. – Vol. 82. – PP. 142-150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.
11. *Leppaanen J.* Burnup Calculation Methodology in Serpent. Электронный ресурс: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent2_BU.pdf (дата доступа 29.09.2021).
12. SERPENT – MCRPBCS. Электронный ресурс: <http://montecarlo.vtt.fi> (дата доступа 29.09.2021).
13. VVER-1200 reactor core (V-392M). Электронный ресурс: <https://ppt-online.org/274776> (дата доступа 29.09.2021).
14. *Frybortova L.* Recommended Strategy and Limitations of Burnable Absorbers used in VVER Fuel Assemblies. // *Nuclear Science and Techniques*. – 2019. – Vol. 30. – No. 129. – P. 14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0651-x>.
15. Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs. Report 108, VVER-1200 (V491) (VVER-1200 (V-491)). Электронный ресурс: [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200\(V-491\).pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200(V-491).pdf). (дата доступа 29.09.2021).
16. *Khrais R.A., Tikhomirov G.V., Saldikov I.S., Smirnov A.D.* Neutronic Analysis of VVER-1000 Fuel Assembly with Different Types of Burnable Absorbers using Monte-Carlo Code Serpent. // *J. Phys.: Conf. Series*. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012002>.
17. *Khoshahval F., Foroutan S. S., Zolfaghari A., Minuchehr H.* Evaluation of Burnable Absorber Rods Effect on Neutronic Performance in Fuel Assembly of VVER-1000 Reactor. // *Annals of Nuclear Engineering*. – 2016. – Vol. 87. – PP. 648-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>.
18. *Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I.* The effect of burnable absorbers (Gd and Eu) on the neutronphysical characteristics of fuel assemblies of VVER-1000 reactors. // *Journal of Physics: Conf. Series*. – 2019. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012003>.

Поступила в редакцию 02.10.2021 г.

Авторы

Лавроненко Алексей Владимирович, студент

E-mail: lavronenkoaleksey@gmail.com

Саванков Вячеслав Геннадьевич, студент

E-mail: savankovvg@oiate.ru

Внуков Руслан Адхамович, аспирант

E-mail: vnukovra@oiate.ru

Чистозвонова Елена Александровна, старший преподаватель

E-mail: lena1957@mail.ru

UDC 53.088.3

COMPARISON OF METHODS FOR CALCULATING THE NEUTRONIC CHARACTERISTICS OF A VVER-1200 FUEL ASSEMBLY

Lavronenko A.V., Savankov V.G., Vnukov R.A., Chistozvonova E.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, MPhI

1 Studgorodok, 249040 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

ABSTRACT

This article presents the results obtained by neutron-physical calculation of a VVER-1200 fuel assembly using the multi-purpose three-dimensional continuous-energy Monte Carlo particle transport code Serpent 2. The study compares the neutron-physical characteristics calculated using two methods. The existence of several techniques makes it doubtful that they are all equivalent to each other. If this is not the case, then from the available methods of calculating the reactor campaign, you can choose the most reliable one, that is, the one that corresponds to real operating conditions. Under such conditions, ageing is performed to reduce the concentration of neutron absorbers (^{135}Xe , ^{135}I). The burnout of fuel assemblies with a 30-day exposure and a model refueling procedure and burnup without a refueling procedure (continuous process) were considered, infinite neutron multiplication factors have been determined for the methods, and also the dependence of the concentration of important nuclides from the standpoint of neutron-physical characteristics (strong absorbers) on the depth of fuel burnup. The concentration of ^{155}Gd was also monitored, it turned out that it burns out in the same way in the framework of the two methods. It is concluded that the reasons for the discrepancy between the values when using different methods are the different accumulation of samarium isotopes in the process of simulated burnup.

Key words: fuel assembly, neutron-physical characteristics, Serpent, ageing and model refueling, Samarium, Xenon, fuel burnup, infinite multiplication factor, deflection, absorption cross-section.

REFERENCES

1. Korkmaz M. E., Agar O., Buyuker E. Burnup Analysis of the VVER-1000 Reactor using Thorium-Based Fuel. *Kerntechnik*. 2014, v. 79, no. 6, pp. 478-483. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110449>.
2. Giusti V., Ambrosini W., Mercatali L., Venturini A. Neutronic Investigations of MOX and LEU Fuel Assemblies for VVER Reactors. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/79616503.pdf> (accessed Sep. 29, 2021).
3. Mercatali L., Venturini A., Sanchez V.H. New Solutions for the OECD VVER-1000 LEU and MOX Burnup Computational Benchmark. Available at: <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/230098149/3816710> (accessed Sep. 29, 2021).

4. Lotsch T. Fuel Assembly Burnup Calculations for VVER Fuel Assemblies with the Monte Carlo code Serpent. *Kerntechnik*. 2014, v. 79, no. 4, pp. 295-302. DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110455>.
5. Vnukov R.A., Zhavoronkova I.A., Kolesov V.V., Karpovich G.V., Teplyakova A.R. Effect of Gadolinium Absorber Radial Profiling in Fuel Pins on VVER-1000 Assembly Neutron-Physical Characteristics. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2020; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1689/1/012043>.
6. Vnukov R.A., Kolesov V.V., Zhavoronkova I.A., Kotov Y.A., Pramanik M.R. Effect of the Burnable Absorber Arrangement on the VVER-1200 Fuel Assembly Neutronic Performance. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2021, no. 2, pp. 27-38; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2021.2.03> (in Russian).
7. Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I.. Estimation of the Possibility of Using Eu_2O_3 as a Burnout Absorber in a VVER-1200 Reactor. *Global'naya Yadernaya Bezopasnost'*. 2019, no. 1 (30), pp. 39-46; DOI: <https://doi.org/10.26583/gns-2019-01-04> (in Russian).
8. Stroganov A.A., Kurindyn A.V., Kirkin A.M., Anikin A.U., Sinegribov S.V., Kurbatova M.V. Experience in Using the Serpent Software for Assessing the Nuclear Safety Parameters of Systems Containing Nuclear Fuel. *Aktual'nye Problemy Gumanitarnykh i Estestvennykh Nauk*. 2014, v. 7, no. 1, pp. 59-65 (in Russian).
9. Novak O., Chvala O., Nicholas P., Luciano B., Maldonado I. VVER 1000 Khmel'nitskiy Benchmark Analysis Calculated by Serpent 2. *Annals of Nuclear Energy*. 2017, v. 110, pp. 948-957. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2017.08.011>.
10. Leppaanen J., Pusa M., Viitanen T., Valtavirta V., Kaltiaisenaho T. The Serpent Monte Carlo Code: Status, Development and Applications in 2013. *Ann. Nucl. Energy*. 2015, v. 82, pp. 142-150; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.08.024>.
11. Leppaanen J. Burnup Calculation Methodology in Serpent. Available at: http://montecarlo.vtt.fi/download/Serpent2_BU.pdf (accessed Sep. 29, 2021).
12. SERPENT – MCRPBC. Available at: <http://montecarlo.vtt.fi> (accessed Sep. 29, 2021).
13. VVER-1200 reactor core (V-392M). Available at: <https://ppt-online.org/274776> (accessed Sep. 29, 2021).
14. Frybortova L. Recommended Strategy and Limitations of Burnable Absorbers used in VVER Fuel Assemblies. *Nuclear Science and Techniques*. 2019, v. 30, no. 129, p. 14; DOI: <https://doi.org/10.1007/s41365-019-0651-x>.
15. Status Report for Advanced Nuclear Reactor Designs. Report 108, VVER-1200 (V491) (VVER-1200 (V-491)). Available at: [http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200\(V-491\).pdf](http://www.iaea.org/NuclearPower/Downloadable/aris/2013/36.VVER-1200(V-491).pdf) (accessed Sep. 29, 2021).
16. Khrais R.A., Tikhomirov G.V., Saldikov I.S., Smirnov A.D. Neutronic Analysis of VVER-1000 Fuel Assembly with Different Types of Burnable Absorbers using Monte-Carlo Code Serpent. *J. Phys.: Conf. Series*. 2019; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012002>.
17. Khoshahval F., Foroutan S. S., Zolfaghari A., Minuchehr H. Evaluation of Burnable Absorber Rods Effect on Neutronic Performance in Fuel Assembly of VVER-1000 Reactor. *Annals of Nuclear Engineering*. 2016, v. 87, pp. 648-658. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.012>.
18. Abu Sondos M.A., Demin V.M., Savander V.I. The Effect of Burnable Absorbers (Gd and Eu) on the Neutronphysical Characteristics of Fuel Assemblies of VVER-1000 Reactors. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2019; DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1189/1/012003>.

Authors

Lavronenko Aleksey Vladimirovich, Student

E-mail: lavronenkoaleksey@gmail.com

Savankov Vyacheslav Gennadievich, Student

E-mail: savankovvg@oiate.ru

Vnukov Ruslan Adhamovich, PhD Student

E-mail: vnukovra@oiate.ru

Chistozyonova Elena Aleksandrovna, Senior Lecturer

E-mail: lana1957@mail.ru