
**ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОБЪЕКТОВ
АТОМНОЙ ОТРАСЛИ**

УДК 621.039.5

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЙТРОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ПРОИЗВОДСТВА WESTINGHOUSE И ТВЭЛ
ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР-1000 ПО КОДУ SERPENT**

© 2019 М.А. Абу Сондос, В.М. Демин, А.Д. Смирнов

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В этой работе проанализировано воздействие на изотопный состав отработавшего ядерного топлива реакторов ВВЭР-1000 различных эксплуатационных условий, таких как концентрация борной кислоты, растворенной в воде, температура топлива и других. Другим фактором влияния являются технические характеристики, реализуемые при производстве топливных сборок, в частности масса топлива, его обогащение и другие массово-габаритные характеристики тепловыделяющих сборок (ТВС). Расчеты проводились на моделях топливных сборок реактора ВВЭР-1000. За основу были взяты типичные топливные сборки российских поставщиков ТВЭЛ и новые топливные сборки американской компании Westinghouse.

Ключевые слова: Serpent, ТВС-А, ТВС-WR, ВВЭР-1000, ОЯТ и эксплуатационные условия.

Поступила в редакцию 25.03.2019

После доработки 26.04.2019

Принята к публикации 17.05.2019

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оператор украинских АЭС компания «Энергоатом» планирует отдать под загрузку американского топлива Westinghouse шесть энергоблоков на Украине – два на Южно-Украинской АЭС и четыре на Запорожской АЭС. В середине июня 2016 г. началась загрузка ядерного топлива ТВС-WR компании Westinghouse в активную зону реактора пятого энергоблока Запорожской АЭС – крупнейшего энергетического объекта на Украине. Первую партию топлива Westinghouse туда доставили в феврале. Ранее топливо Westinghouse было загружено на два блока Южно-Украинской АЭС.

В настоящей работе проведено сравнение российских ТВС компании ТВЭЛ [1-4] и топливных сборок компании Westinghouse [5] с точки зрения контроля и хранения отработавшего топлива. Существенные с точки зрения безопасности характеристики отработавшего топлива определяются главным образом изотопным составом, образующимся при выгорании топлива. Количественное определение изотопного состава отработавшего топлива требуется для решения задач, связанных с:

- 1) учетом и контролем количества опасного ядерного материала;
- 2) определением исходных условий при анализе тепловой и радиационной безопасности;
- 3) использованием выгорания в качестве параметра при обосновании ядерной безопасности систем управления отработавшим топливом.

Изотопный состав отработавшего топлива определяется не только уровнем его выгорания, но и теми условиями или, точнее говоря, спектром нейтронов, при котором происходили процессы выгорания [6, 7]. В зависимости от указанного спектра нейтронов ОЯТ с той же глубиной выгорания может иметь различный изотопный состав. Чем жестче был спектр нейтронов, тем больше U-238 участвует в процессе

выгорания (главным образом в реакциях захвата с образованием Pu-239), и тем больше U-235 остается в отработавшем топливе при одинаковом уровне выгорания [8].

В данной работе были рассчитаны концентрации изотопного состава отработавшего топлива ВВЭР-1000 разного производства при различных условиях эксплуатации: массы топлива и его обогащения, концентрации борной кислоты, растворенной в замедлителе, плотности воды и температуры топлива. Соответствующие операционные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Операционные параметры, которые использовались при выполнении расчета изотопного состава ОЯТ [Operational parameters used in the calculation of the SNF isotopic composition]

Параметр	Среднее	Макс.	Мин.
Обогащение (мас.%)	TBC -A: 306*4,4%+6*3,6% (BA) TBC-WR:240*4,2%+60*3,9%+6*3,6%+6*3,0% _{0(BA)}	+0,5 +0,5	-0,5 -0,5
Вес топливо (кг / TBC)	TBC -A:497,9 / TBC -WR:552,8	+(4,8)/(5,3)	-(4,8)/(5,3)
Концентрация борной кислоты (ppm)	525	1050	0
Плотность воды (г / см ³)	0,72	0,74	0,7
Температура топлива. (Grad K)	1050	1100	900

На рисунках 1 и 2 и в таблице 2 представлены параметры топливных сборок TBC-A и TBC-WR [2-5].

Таблица 2 – Основные различия в геометрических и материальных параметрах TBC-A и TBC-WR [The main differences in the geometric and material parameters FA-A and FA-WR]

Параметр	TBC-A	TBC-WR
Длина топливного элемента, мм	3530	3530
Масса (UO ₂), кг	497,9±4,8	552,8±5,3
Количество тепловыделяющих элементов 312/TBC		
Внутренний / Наружный диаметр топливной таблетки, мм	1,4/7,57	-/7,84
Внутренний / Наружный диаметр оболочки, мм	7,73/9,1	8,0/9,14
Материал оболочки/ плотность (г / см ³)	сплав Э110 / 6,45	сплав ZIRLOTM / 6,55
Центральная трубка		
Внутренний / Наружный диаметр, мм	11,0/13,0	11,0/12,6
Материал / плотность (г / см ³)	сплав Э635 / 6,45	сплав ZIRLOTM / 6,55
Направляющая трубка (18 шт.)		
Внутренний / Наружный диаметр, мм	10,9/12,6	11,0/12,6
Материал / плотность (г / см ³)	сплав Э635	сплав ZIRLOTM

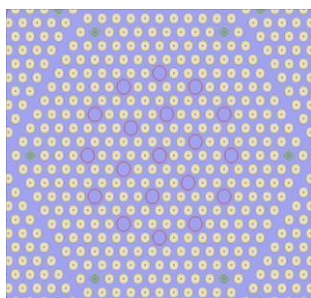


Рисунок 1 – Модель TBC-A [FA-A Model]

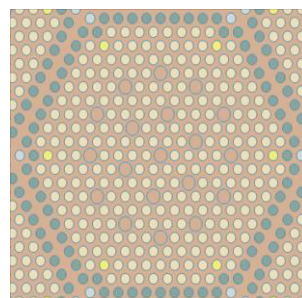


Рисунок 1 – Модель TBC-WR [FA-WR Model]

Расчеты изотопного состава отработанных топливных сборок ВВЭР-1000 проводились с использованием программного комплекса Serpent (Версия 2.1.28) [9] и библиотеки ядерных данных ENDFB7 [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты проводились на моделях топливных сборок ВВЭР-1000 до глубины выгорания 50 МВт.сут/кгU, что соответствует примерно четырехлетнему топливному циклу (1361,84 дня). Средняя мощность ТВС за все время работы и для всех вариантов расчетов составляла 166 Вт/см.

Результаты расчетов коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ в зависимости от глубины выгорания для средних рабочих условных (колонка Ав., табл. 1) показано на рисунке 3.

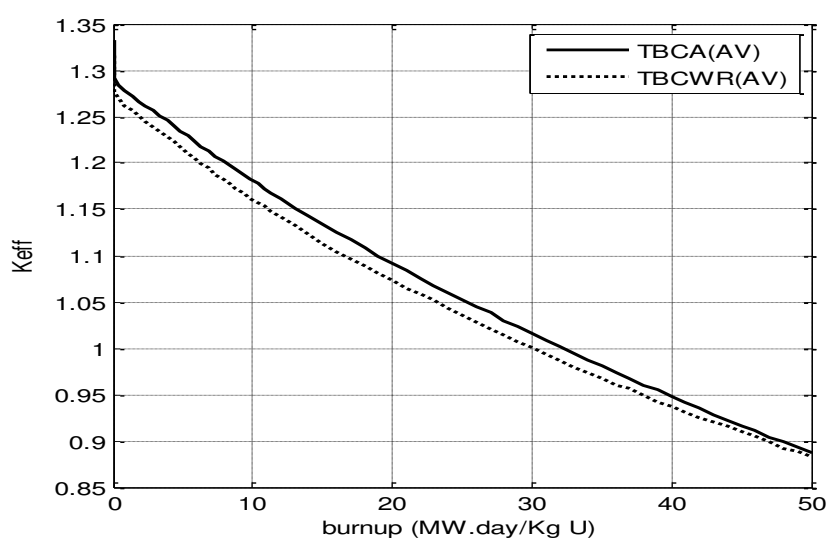


Рисунок 3 – Зависимость $K_{эфф}$ от глубины выгорания [$K_{эфф}$ dependence on burnout depth]

Несмотря на больший объем топлива (552,8 против 497,9 кг), ТВС-WR Westinghouse имеет более низкие значения коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ по сравнению с ТВС-A компании ТВЭЛ. Очевидно, это связано с более низким средним обогащением топлива ТВС-WR (табл. 1). Также заметно, что разница между двумя значениями в течение первых двух с половиной лет (до выгорания 31 МВт.сут/КгU) была постоянной (приблизительно 0,02), на третьем году она стала равной 0,015, а во время четвертого года быстро уменьшилась до 0,005.

Аналогично работе [11] для сравнения двух производителей ТВС выбраны параметры, играющие важную роль в оценке ядерной и радиационной безопасности при эксплуатации свежего и хранении отработавшего топлива, а именно активность, остаточное выделение тепла, а также концентрация ряда изотопов U, Pu, Cs и Eu.

Предварительно сформированы диапазоны исходных данных для каждого выбранного параметра, к которым относятся характеристики топливной сборки и эксплуатационные данные (табл. 1). Диапазоны включают максимальные (колонка Макс. в табл. 1) и минимальные (колонка Мин. в табл. 1) значения рассматриваемого параметра относительно средней величины (колонка Среднее в табл. 1). Соответствующие результаты представлены на рисунках 4-12. В таблице 3 представлены отношения различных результатов с разными исходными данными для разных производителей и отношение между ними при средних показателях.

Таблица 3 – Изменения параметров для ТВС-А и ТВС-ВР [Parameter changes for FA-A and FA-WR]

Набор параметров	ТВС-А		ТВС-ВР		ТВС-ВР/ТВС-А (Среднее)
	Макс./Сред.	Макс./Мин.	Макс./Сред.	Макс./Мин.	
Концентрация U235	1,4	2,0	1,4	2,0	1,0
Концентрация U236	1,1	1,2	1,1	1,3	1,1
Концентрация Pu239	1,1	1,2	1,1	1,2	1,2
Концентрация Pu	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2
Концентрация Eu154	1,0	1,1	1,0	1,1	1,2
Концентрация Cs134	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Концентрация Cs	1,0	1,1	1,0	1,1	1,1
Остаточная теплота	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1
Активность	1,0	1,0	1,0	1,0	1,1

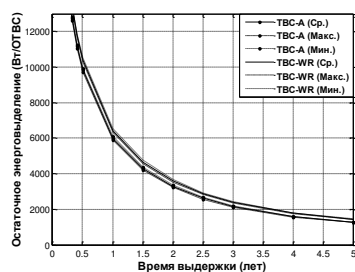


Рисунок 4 – Остаточное энерговыделения в зависимости от времени выдержки [Residual energy release depending on the exposure time]

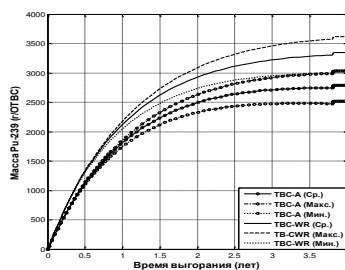
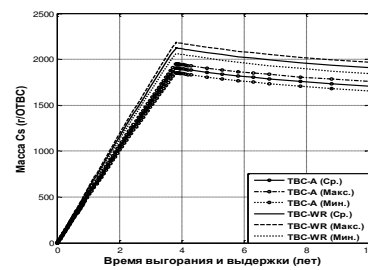
Рисунок 7 – Масса ^{239}Pu при эксплуатации [^{239}Pu weight during operation]

Рисунок 10 – Масса Cs при эксплуатации и хранении [Cs mass during operation and storage]

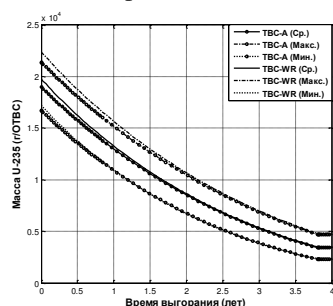
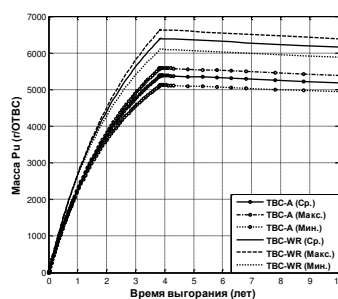
Рисунок 5 – Масса ^{235}U при эксплуатации [^{235}U weight during operation]

Рисунок 8 – Масса Pu при эксплуатации и хранении [Pu mass during operation and storage]

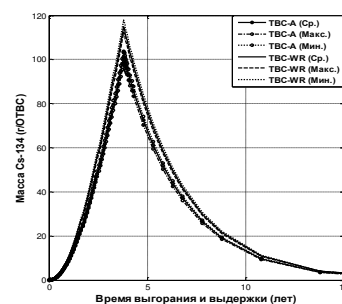
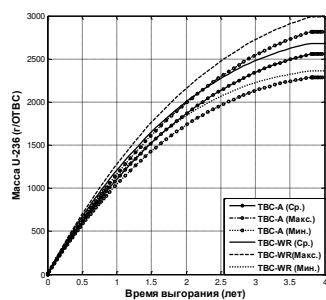
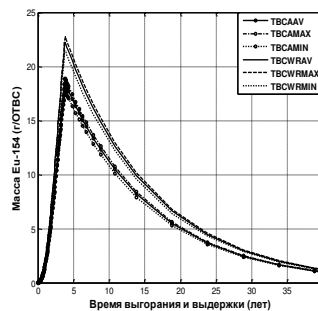
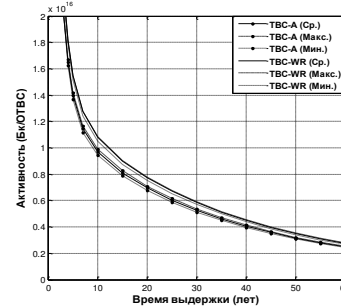
Рисунок 11 – Масса ^{134}Cs при эксплуатации и хранении [^{134}Cs mass during operation and storage]Рисунок 6 – Масса ^{236}U при эксплуатации [^{236}U weight during operation]Рисунок 9 – Масса ^{154}Eu при эксплуатации и хранении [^{154}Eu mass during operation and storage]

Рисунок 12 – Активность ОЯТ в зависимости от времени выдержки [SNF activity depending on the exposure time]

Представленные концентрации изотопов рассчитывались на момент выгрузки топлива из зоны реактора (при выгорании 50 МВт·сут./кгU), а остаточное тепловыделение и активность рассчитывались через 3 года охлаждения в бассейне выдержки.

ОБСУЖДЕНИЕ

Прежде всего следует отметить, что при том же выгорании ТВС-WR (Westinghouse) имеют более низкие значения коэффициента размножения нейтронов $K_{эфф}$ относительно ТВС-А. Это означает, что в нормальных и аварийных условиях эксплуатации имеются дополнительные границы безопасности.

С другой стороны отметим, что значения $K_{эфф}$ для двух моделей приближаются друг к другу на четвертом году эксплуатации (после глубины выгорания почти в 40 МВт·сут./кг U), что обусловлено непрерывностью процесса выгорания в обеих моделях, несмотря на разницу в топливной массе и среднем обогащении разных производителей.

Путем сравнения результатов в таблице 3, можно отметить, что для всех изотопов изменения их концентраций из-за изменения условий эксплуатации в обеих моделях одинаковы. А сравнение концентраций изотопов в ТВС-WR и ТВС-А при одном условии эксплуатации (среднее) показывает, что изменение концентрации U между ними незначительно, а из-за разной топливной массы концентрация продуктов деления и Pu в ТВС-WR больше, чем в ТВС-А.

Из представленных результатов необходимо отметить немного более высокое остаточное тепловыделение и активность в ТВС-WR (Westinghouse) по сравнению с ТВС-А (ТВЭЛ) после 3 лет выдержки, что связано с концентрацией продуктов деления. Это может вызвать необходимость в немного более продолжительном охлаждении топлива после работы в бассейне с отработавшим топливом. Это может потребовать немного более длительного времени для хранения отработавшего топлива ТВС-WR (Westinghouse) в бассейне выдержки.

ВЫВОДЫ

В целом полученные результаты позволяют сделать вывод, что с точки зрения безопасного управления и хранения отработавшего топлива, возможно, использовать альтернативное ядерное топливо компании Westinghouse для реакторов ВВЭР-1000. Дополнительной модификации для него не требуется. Различия характеристик отработавших топливных сборок ТВС-А (ТВЭЛ) и ТВС-WR (Westinghouse) меньше, чем различия некоторых характеристик одного из них в зависимости от изменения условий эксплуатации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лемч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2009) «Предложение эталона для расчетов выгорания активной зоны для активной зоны реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2009.
2. Лемч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2010) «Исправления и дополнения к предложению эталона для расчетов выгорания активной зоны для реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2010. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/41/131/41131407.pdf
3. Лемч Т., Халимончек. В., Кучин А. (2011) «Решения задачи 1 и задачи 2 эталона для расчета выгорания активной зоны реактора ВВЭР-1000». Мюнхен, 2011. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105721.pdf
4. Ковбасенко, Ю.В. Сравнительный анализ возможностей отработавшего топлива ВВЭР-1000 Westinghouse и ТВЭЛ [Текст] / Ю.В. Ковбасенко // Univers J Phys Appl. – № 10 (4). – С. 105-109. DOI: 10.13189/ujpa.2016.100401
5. Мировые ядерные Новости Энергоатом планирует использовать топливо Westinghouse в Запорожье, Лондон (11 ноября 2015 г.) ISSN 2040-5766. URL: <http://www.world-nuclear->

- news.org/UF-Energoatom-plans-use-of-Westinghouse-fuel-at-Zaporozhe-11111501.html (дата обращения: 20.12.2015).
6. Шидранк, П. Влияние эксплуатационных условий на изотопный состав отработавшего топлива реактора ВВЭР-440 [Текст] / П. Шидранк, В. Нашас // Инт. Конф. 7-9 июня 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – Экономический. – 2011. – Высокие Татры, Словацкая Республика. Словацкий Унив. Технология. Bratislava, Fac. Electr. Инженер. Бесконечность. Технология. Отдел. Nucl. Физический. С. 7-10.
 7. Шнайдер, Е.А. Вычислительно простая модель определения зависящего от времени спектрального потока нейтронов в активной зоне ядерного реактора. [Текст] / Е.А. Шнайдер, М.Р. Дейнерт, К.Б. Каду // Журнал ядерных материалов. – 2006. – Т. 357. – Вып. 1-3. – С. 19-30. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.04.012.
 8. Ковбасенко, Ю. Сравнительный анализ изотопного состава отработавшего топлива ВВЭР-1000 в зависимости от условий производства и эксплуатации [Текст] / Ю. Ковбасенко, Ю. Билодид, М. Еременко // 7-й межд. Конф. Nucl. Критический. Безопасность. Токай-Мура. – С. 661-665.
 9. Липаннен, Дж выступление Дельта-отслеживание вальдшнепа в применение физики решетку с помощью змея физики реакторов методом Монте-Карло выгорания код расчета, летописи атомной энергии. – 2010. – Вып. 5. – С. 715-722. DOI: 10.1016/j.anусен.2010.01.011
 10. Чедвик, М.Б. ENDF/B-VII.1 ядерные данные для науки и техники : сечения, ковариации, выходы продуктов деления и данные распада [Текст] / М.Б. Чедвик, М. Herman, П. Облозенску // Ядерные Паспорта. – 2011. – Т. 112. – С. 2887-2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002.
 11. Новак, О. ВВЭР 1000 Хмельницкий бенчмарк-анализ, рассчитанный Serpent2, Annals of Nuclear Energy. [Текст] / О. Новак, О. Чвала, Н.П. Лучано, Г.И. Мальдонадо // Serpent2, Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Т. 110. – С. 948-957. DOI: 10.1016/j.anусен.2017.08.011.

REFERENCES

- [1] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2009). Proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor core. Munich, 2009.
- [2] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2010). Corrections and additions to the proposal of a benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor. Munich, 2010.
- [3] Lötsch T., Khalimonchuk V., Kuchin A. (2011). Solutions for the task 1 and task 2 of the benchmark for core burnup calculations for a VVER-1000 reactor. Munich, 2011.
- [4] Kovbasenko Y. Sravnitel'ny'j analiz vozmozhnostej otrabotavshego topliva VVE'R-1000 Westinghouse i TVE'L [Comparative Analysis of WVER-1000 Westinghouse and TVEL Spent Fuel Capability]. Univers J Phys Appl 10(4), P. 105-109. DOI: 10.13189/ujpa.2016.100401 (in Russian).
- [5] Mirovy'e yaderny'e Novosti E'nergoatom planiruet ispol'zovat' toplivo Westinghouse v Zaporozh'e [World Nuclear News Energoatom Plans Use of Westinghouse Fuel at Zaporozhe] London. 11 November 2015 ISSN 2040-5766. URL: <http://www.world-nuclear-news.org/UF-Energoatom-plans-use-of-Westinghouse-fuel-at-Zaporozhe-11111501.html> (in Russian).
- [6] Čudrnák P., Nečas V. Vliyanie e'kspluatacionny'x uslovij na izotopny'j sostav otrabotavshego topliva reaktora VVE'R-440 [Impact of the Operatinal Conditions on the Isotopic Composition of WVER-440 Reactor Spent Fuel] Int. Konf. 7-9 iyunya 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – E'konomicheskij [International Conference June 7-9, 2011 Tatraské Matliare ENERGY – Ecol. – Economics] 2011 High Tatra, Slovak Republic. Slovak Univ. Technol. Bratislava, Fac. Electr. Eng. Inf. Technol. Dep. Nucl. Phy. P. 7-10 (in Russian).
- [7] Schneider E.A., Deinert M.R., Cady K.B. Vy'chislitel'no prostaya model' opredeleniya zavisnyashhego ot vremeni spektral'nogo potoka nejtronov v aktivnoj zone yadernogo reaktora [Computationally Simple Model for Determining the Time Dependent Spectral Neutron Flux in Nuclear Reactor Core]. Zhurnal yaderny'x materialov [Journal of Nuclear Materials]. 2006. Vol. 357. Issue 1-3. P. 19-30. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2006.04.012 (in Russian).
- [8] Kovbasenko Y., Bilodid Y., Yeremenko M. Sravnitel'ny'j analiz izotopnogo sostava otrabotavshego topliva VVE'R-1000 v zavisimosti ot uslovij proizvodstva i e'kspluatatsii [Comparative Analysis of Isotope Composition of WVER-1000 Spent Fuel Depending on their Manufactory and Operation Conditions]. 7-j mezhd. Konf. Nucl. Kriticheskij. Bezopasnost' [7th International Conference Nucl Crit. Safety]. Tokai-mura. P. 661-665 (in Russian).
- [9] Leppänen J. Vy'stuplenie Del'ta-otslezhivanie val'dshnepa v primenenie fiziki reshetku s pomoshh'yu zmeya fiziki reaktorov metodom Monte-Karlo vy'goraniya kod rascheta, letopisi atomnoj e'nergii [Performance of Woodcock Delta-Tracking in Lattice Physics Application Using

- the Serpent Monte Carlo Reactor Physics Burnup Calculation Code, *Annals of Nuclear Energy* 2010. Vol. 37. Issue 5. P. 715-722. DOI: 10.1016/j.anucene.2010.01.011 (in Russian).
- [10] Chadwick MB., Herman M., Obložinský P. ENDF/B-VII.1 yaderny`e dannyye dlya nauki i tekhniki : secheniya, kovariatsii, vy`xody` produktov deleniya i dannyye raspada [ENDF/B-VII.1 Nuclear Data for Science and Technology: Cross Sections, Covariances, Fission Product Yields and Decay Data] Yadernyye Pasporta [Nuclear Data Sheets]. 2011. Vol.112. P. 2887-2996. DOI: 10.1016/j.nds.2011.11.002 (in Russian).
- [11] Novak O., Chvala O., Luciano N. P. Xmel`niczkij benchmark-analiz, rasschitanny`j Serpent2, *Annals of Nuclear Energy* [WVER 1000 Khmelnitskiy Benchmark Analysis Calculated by Serpent2, *Annals of Nuclear Energy*] 2017. Vol. 110. P. 948-957. DOI: 10.1016/j.anucene.2017.08.011 (in Russian).

Comparative Analysis of Neutrons Properties of Nuclear Fuel Produced by Westinghouse and Fuel Element for WVER-1000 Reactors by code SERPENT

M.A. Abu Sondos¹, V.M. Demin², A. D. Smirnov³

*Institute of Nuclear Physics and Technology (INP&T), National Research Nuclear University «MEPhI»,
Kashirskoye shosse, 31, Moscow, Russia 115409*

¹*ORCID ID: 0000-0003-3954-151X*

Wos Researcher ID: E-2735-2019

e-mail: MAbusondos@mephi.ru

²*ORCID ID: 0000-0003-3894-9396*

Wos Researcher ID: E-2750-2019

e-mail: VMDemin@mephi.ru

³*ORCID ID: 0000-0001-6381-8780*

Wos Researcher ID: E-3089-2019

e-mail: ADSmirnov@mephi.ru

Abstract –The paper analyzes the impact of spent nuclear fuel of WVER-1000 reactors of various operating conditions, such as the concentration of boric acid dissolved in water, the temperature of the fuel and others on the isotopic composition. Another factor of influence is the technical characteristics implemented in the production of fuel assemblies, in particular the mass of fuel, its enrichment and other mass-dimensional characteristics of fuel assemblies (FA). Calculations are carried out on models of fuel assemblies of the WVER-1000 reactor. The basis was taken of a typical fuel assembly of the Russian suppliers of fuel elements and fuel assembly of the Westinghouse American company.

Keywords: Serpent, FA-A, FA-WR, VVER-1000, SNF, operational conditions.