

- 5 Пат. 99182 РФ, МПК G01P15/09. Устройство дистанционного измерения резонансной частоты пьезоэлектрического акселерометра / Д.А. Плотников, А.К. Малина, В.И. Лачин. – № 2010118405/28; заявлено 6.05.10, опубл. 10.11.10, Бюл. №31.
- 6 Плотников, Д.А. и др. Экспериментальное исследование метода повышения точности интеллектуального датчика вибрации / Д.А. Плотников, В.И. Лачин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2012. – № 3. – С. 72-77.
- 7 Пат. 99158 РФ, МПК G01H17/00. Устройство дистанционного измерения коэффициента преобразования пьезоэлектрического акселерометра / В.И. Лачин, А.К. Малина, Д.А. Плотников. – № 2010125245/28; заявлено 18.06.10, опубл. 10.11.10, Бюл. №31.
- 8 D A Plotnikov, W K M Aljeazna, V I Lachin K Yu Solomentsev Peculiarities of NTP Protocol Realization for Microprocessor Systems with Limited Computing Resources / *J. Phys.: Conf. Ser.* 1661 012009, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012009>.
- 9 Плотников, Д.А. и др. Повышение эффективности межмодульного взаимодействия в системах контроля вибрации путём использования прямого доступа к памяти. Часть 2 / Д.А. Плотников, В.И. Лачин, В.К.М. Алджиязна // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. – 2020. – № 1. – С. 18-24.

## Digital Technologies in Vibration Monitoring Systems of Turbine Units

D.A. Plotnikov, V.I. Lachin, W.K.M. Aljeazna

*Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, Russia  
e-mail: dpl68@mail.ru*

**Abstract** – The paper summarizes the results of the authors' research in the development of turbine units' vibration monitoring systems (VMS). The structure of a modular VMS based on the CANopen protocol is presented, and the means of communication processes modeling are described. Methods of the VMS elements self-diagnostics and mutual diagnostics, as well as a method for reducing the additional temperature error in vibration parameters measuring, based on determining the current value of the piezoaccelerometer conversion coefficient are presented. Methods for increasing the efficiency of using the microprocessor means computing resources in the VMS are described.

*Keywords:* vibration monitoring, modular system, piezoaccelerometer, measurement accuracy improving, intelligent sensor.

УДК 621.039.516.4

## ВОСПРОИЗВОДЯЩИЕ СВОЙСТВА ТОПЛИВА ВВЭР-440 И ВВЭР С СКД ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В ЗАМКНУТОМ ЯДЕРНОМ ТОПЛИВНОМ ЦИКЛЕ

К.С. Аксенова, А.А. Лапкис

*Волгодонский инженерно-технический институт – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Волгодонск, Ростовская обл., Россия*

В работе проведено исследование воспроизводящих свойств активной зоны водоохлаждаемого реактора ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров при использовании в замкнутом ядерном топливном цикле, в сравнении с теми же свойствами прототипа – ВВЭР-440. Актуальность исследования определяется необходимостью повышения КПД, улучшением характеристик воспроизводства топлива в имеющихся проектах легководных реакторов. В работе представлена сравнительная динамика изотопного состава ОЯТ действующих ВВЭР и реакторов, охлаждаемых водой сверхкритического давления. Установлено, что спектральные, размножающие и воспроизводящие свойства топливных загрузок ВВЭР-440 и ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров сближаются по

мере замещения урана плутонием в топливе при многократном рецикле. Ввиду того, что оксиды плутония используются в качестве энергетического источника для космической техники и топлива в ядерных реакторах, был выполнен анализ динамики изотопного состава плутония при многократном рецикле. Показано, что при выгорании топлива в реакторе, охлаждаемого водой сверхкритического давления, нарабатывается плутоний с меньшим содержанием старших изотопов.

*Ключевые слова:* ВВЭР, обогащение, топливная загрузка, ВВЭР-СКД, коэффициент полезного действия, коэффициент воспроизводства, воспроизводство топлива, рецикл топлива, плутоний.

Цель работы: определить воспроизводящие свойства активной зоны (АЗ) ВВЭР с теплоносителем сверхкритического давления (СКД) при использовании в замкнутом ядерном топливном цикле, в сравнении с теми же свойствами прототипа – ВВЭР-440.

Исследование проводилось с помощью программного комплекса Serpent версии 2.1.30, основанного на методе Монте-Карло [1]. В данной работе была использована библиотека JEFF-3.1.1 разработки NEA [2].

Расчёт исследуемых параметров выполнялся с учетом реальных характеристик АЗ данного вида. Изначально топливная загрузка представляет собой диоксид урана  $UO_2$ . Практическое обогащение топлива реактора ВВЭР-440 – 3,5% по U-235. Длина кампании – 30 месяцев с тремя перегрузками.

По итогу расчёта выгорания было установлено, что коэффициент размножения ( $K_\infty$ ) с исходного значения 1,34 снижается до единицы за 305 суток. Полученное выгорание топлива составило 26,7 МВт·сут/кг, что соответствует реальному эксплуатационному значению (среднее выгорание топлива ВВЭР-440 – 28 МВт·сут/кг [3]).

Длина кампании ВВЭР с СКД теплоносителем также должна быть равна 305 суток. Это значение достигается при обогащении 7,25% по U-235. Глубина выгорания равна 26,7 МВт·сут/кг.

Для расчёта каждой последующей кампании учитывалась загрузка регенерированного плутониевого топлива, разбавленного ураном заданного обогащения. Обогащение разбавляющего урана в новом топливе подбиралась таким образом, чтобы сохранить заданную длину кампании. Доля плутония в регенерированном топливе была зафиксирована.

После каждой кампании в реакторе нарабатываются изотопы плутония, из которых в расчёте рецикла учтены семь: Pu-236, Pu-238, Pu-239, Pu-240, Pu-241, Pu-242, Pu-243. В выходном файле получены их массовые плотности. Ввиду того, что на практике извлечение плутония производится химическим способом, и отсутствует возможность разделения, ищем средневзвешенную атомную массу плутония.

$$M_{Pu} = \frac{\sum A \cdot m_{di}}{\sum m_{di}},$$

где  $A$  – атомная масса изотопа;

$m_{di}$  – массовая плотность изотопа в смеси.

Для загрузки следующей кампании нам необходимо знать массовые доли изотопов в топливе  $UO_2+PuO_2$ . Задаём обогащение плутония ( $x_{Pu}$ ) и разбавляющего урана ( $x_{U235}$  и  $x_{U238}$ ) в смеси.

Теперь необходимо рассчитать средневзвешенную атомную массу уран-плутониевой смеси. Расчёт проводится по формуле:

$$M_{U-Pu} = x_{Pu} \cdot M_{Pu} + x_{U235} \cdot 235 + x_{U238} \cdot 238$$

Массовая доля кислорода находится следующим образом:

$$\omega_o = \frac{32}{M_{U-Pu} + 32}$$

Массовые доли U-235 и U-238 находим по формуле:

$$\omega_{U_i} = y \cdot (1 - \omega_o),$$

где  $y$  – доля каждого изотопа в уран-плутониевой смеси.

Массовые доли каждого изотопа плутония:

$$\omega_{P_{ui}} = \frac{x_{Pu} \cdot (1 - \omega_o) \cdot mdi}{\sum mdi}$$

По итогу моделирования был рассчитан эффективный коэффициент воспроизводства топлива за кампанию. Различия в коэффициенте воспроизводства топлива в данных АЗ незначительны.

В работе был выполнен анализ динамики концентрации актиноидов ОЯТ за шесть кампаний. Из-за того, что практически 90% в топливной загрузке занимает U-238, на графиках он отсутствует. На рисунках 1 и 2 представлены получившиеся распределения для топлива ВВЭР-440 и ВВЭР с СКД теплоносителем, где указанные на графике значения соответствуют концу каждой последующей кампании, а номер кампании указан на оси абсцисс.

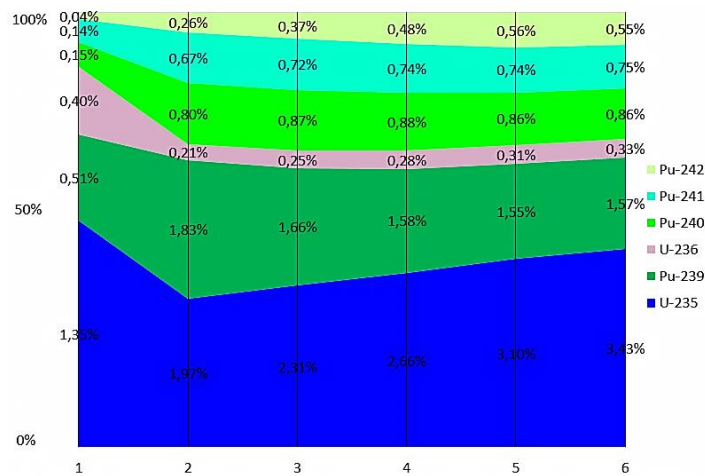


Рисунок 1 – Динамика изотопного состава ОЯТ с массовой долей более 0,1% в АЗ ВВЭР-440

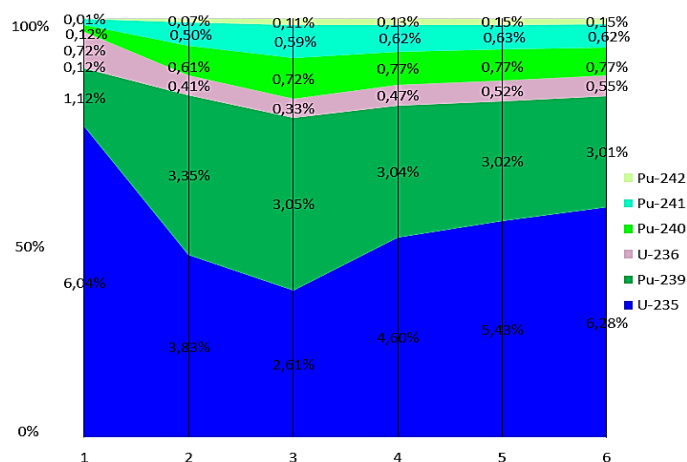


Рисунок 2 – Динамика изотопного состава ОЯТ с массовой долей более 0,1% в АЗ ВВЭР с СКД теплоносителем

Был выполнен анализ динамики изотопного состава плутония при многократном рецикле. В результате полученных распределений можно сделать вывод: в реакторе ВВЭР с теплоносителем сверхкритических параметров нарабатывается более «чистый» состав плутония с меньшим содержанием старших изотопов 240-243.

В ходе данной работы было установлено, что спектральные, размножающие и воспроизводящие свойства топливных загрузок ВВЭР с СКД теплоносителем и ВВЭР-440 сближаются по мере замещения урана плутонием в топливе при многократном рецикле. Различия в коэффициенте воспроизводства топлива в данных АЗ незначительны, при этом при заданных параметрах при выгорании вторичного топлива в реакторе ВВЭР с теплоносителем сверхкритического давления нарабатывается плутоний с более высоким содержанием Pu-239 и меньшим содержанием старших изотопов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. Leppänen, M. Pusa, T. Viitanen, V. Valtavirta, and T. Kaltiaisenaho. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Ann. Nucl. Energy*, 82 (2015) 142-150.
2. The JEFF-3.1.1 Nuclear Data Library, JEFF Report 22, NEA No. 6807, OECD 2009.
3. Денисов, В.П. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций / В.П. Денисов, Ю.Г. Драгунов. – Москва : ИздАТ, 2002. – 480 с.

### **Reproductive Properties of WWER-440 and WWER- SCWR When Used in a Closed Nuclear Fuel Cycle**

**K.S. Aksenova<sup>1</sup>, A.A. Lapkis<sup>2</sup>**

*National Research Nuclear University Moscow Engineering Physics Institute Volgodonsk Engineering Technical Institute (branch), Volgodonsk, Rostov region, Russia*

<sup>1</sup>*e-mail: kseniya.08.26.2014@gmail.com*

<sup>2</sup>*e-mail: aalapkis@mephi.ru*

**Abstract** – This work considers a study of the reproducing properties of the active zone of a water-cooled WWER reactor with a supercritical coolant when used in a closed nuclear fuel cycle, in comparison with the same properties of the prototype – WWER-440. The timeliness of this study is determined by the need to increase NPP thermal efficiency and improve the characteristics reproduce fuel in already known projects of light-water reactors. The paper presents the comparative dynamics of the isotopic composition is obtained for operating VVER and reactors cooled with supercritical water. In the course of this work, it was found that the spectral, multiplying, and reproducing properties of the WWER-440 and WWER reactor with a supercritical coolant converge as uranium is replaced by plutonium in the fuel during repeated recycling. In view of the fact that plutonium oxides are used as an energy source of energy for nuclear technology and fuel in nuclear reactors, therefore an analysis was made of the change of the plutonium isotopic composition during multiple recycling. It is shown that during fuel burnup the plutonium with a lower content of heavier isotopes is produced in supercritical watercooled reactor.

**Keywords:** VVER, enrichment, fuel loading, VVER-SCWR, efficiency, conversion ratio, fuel conversion, nuclear fuel recycling, plutonium.