

## АНАЛИЗ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА РЕАКТОРА ВВЭР-1000 НА ОСНОВЕ РЕМИКС-ТОПЛИВА ПРОТИВ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕЛЯЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ

**С.В. Соловьев, А.И. Дьяченко, М.И. Федоров, Р.О. Ефремов, В.В. Артисюк**

*Автономная некоммерческая организация дополнительного профессионального образования «Техническая академия Росатома»*

*249031, г. Обнинск Калужской обл., ул. Курчатова, 21*



В настоящее время одной из стратегических целей Госкорпорации «Росатом» является глобальная экспансия технологической платформы ВВЭР, которая направлена на укрепление позиций Российской Федерации на рынке атомных технологий через рост поставок продукции и услуг на всем жизненном цикле АЭС. Госкорпорация «Росатом» помимо реакторных технологий предоставляет услуги, направленные на поставку необлученного ядерного топлива, возврат отработавшего топлива, рециклирование делющихся материалов в форме регенерированных топлив [1, 2].

Отсутствие технологий обогащения и переработки ядерных материалов в странах-новичках приводит к необходимости транспортировки свежего и отработавшего ядерного топлива и обеспечения защитных мер против несанкционированного распространения ядерных делющихся материалов (ЯДМ) [3 – 5].

Проводится оценка защищенности против несанкционированного распространения расщепляющихся материалов ядерного топливного цикла реактора ВВЭР-1000 на основе РЕМИКС-топлива в зависимости от номера последовательного рециклирования такого топлива. Показано, что вовлечение регенерированного урана в форме РЕМИКС-топлива, а следовательно, присутствующего в таком материале изотопа  $^{236}\text{U}$  значительным образом повышает долю изотопа  $^{238}\text{Pu}$  в изотопном векторе плутония, что снижает привлекательность такого плутония с точки зрения его немирного переключения.

С использованием среды энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE проведены оценки экономии ресурсов урана при вовлечении РЕМИКС-топлива в топливный цикл ВВЭР-1000. Оценки показали, что при совместном вовлечении регенерированного урана и плутония формирование такого топливного цикла позволяет сэкономить до 17% от общего требуемого количества уранового сырья.

**Ключевые слова:** регенерированный уран, РЕМИКС-топливо, выгорание, экономия ресурсов, отработавшее ядерное топливо, ВВЭР-1000, несанкционированное распространение.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стандартное интегрированное предложение Госкорпорации «Росатом» включает в себя поставку свежего ядерного топлива для реакторов российского (ВВЭР) и западного дизайнов (PWR, BWR), возврат отработавшего ядерного топлива и фабрикацию свежего ядерного топлива из регенерированных материалов [1, 2 – 7].

Последовательное рециклирование неразделенных фракций регенерированных урана и плутония в форме РЕМИКС-топлива, направленное на замыкание ядерного топливного цикла, способно решить проблему формирования ядерного топливного цикла повышенной защищенности против несанкционированного распространения ЯДМ в странах-реципиентах российских ядерных энерготехнологий. Многократное рециклирование урана и плутония приводит к росту доли четных изотопов урана и плутония в изотопном векторе облученного ядерного топлива. Для регенерированного урана наличие изотопов  $^{232,236}\text{U}$  приводит к усложнению технологии обогащения и повышению радиологической опасности такого материала, снижая его привлекательность с точки зрения немирного переключения [8, 9]. Повышение доли плутония  $^{238}\text{Pu}$  в рециклируемом плутонии, который обладает коротким периодом альфа-распада (87,7 лет), вызывает перегрев элементов взрывного устройства в результате интенсивного излучения альфа-частиц, приводя к невозможности формирования гипотетического взрывного устройства из такого материала [10].

Вовлечение РЕМИКС-топлива в топливный цикл ВВЭР-1000 помимо снижения рисков несанкционированного распространения ЯДМ приводит к формированию синергетического эффекта, выраженного в минимизации объемов отработавшего топлива тепловых реакторов на хранении, существенному улучшению «качества» отходов для окончательного захоронения (кардинальное уменьшение количества актинидов в отходах), экономии ресурсов урана и работы разделения при обогащении урана, а также повышению конкурентоспособности таких установок при организации поставок за рубеж [11].

В работе проводится анализ ядерного топливного цикла АЭС с ВВЭР-1000 с использованием методологии оценки перспективных топливных циклов (ATTR) [12] ядерной энергетики с точки зрения защиты против несанкционированного распространения ЯДМ, оценки потребления и экономии урановых ресурсов с применением программных средств МАГАТЭ.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО СОСТАВА

Рассматривается возможность формирования ядерного топливного цикла реактора ВВЭР-1000 повышенной защищенности против несанкционированного распространения ЯДМ на основе РЕМИКС-топлива [13, 14].



Рис. 1. Принципиальная схема рецикла РЕМИКС-топлива

С этой целью проводился анализ размножающих свойств (поведение бесконечного

коэффициента размножения нейтронов в ячеечном приближении) и нуклидного состава урана и плутониевой фракции для последовательного рециклируемого РЕМИКС-топлива с использованием компьютерного кода SCALE 6.2 [15]. На рисунке 1 показана схема топливного цикла ВВЭР-1000 на РЕМИКС-топливе. Отработавшее ядерное топливо реактора после пяти лет выдержки в бассейне-охладителе поступает на завод по переработке ОЯТ. Выделенная уран-плутониевая фракция поступает на завод по обогащению топлива, где производится смешивание с обогащенным природным ураном с содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$ , равным 16%. Затем из полученной смеси урана и плутония фабрикуется РЕМИКС-топливо для загрузок реактора ВВЭР-1000.

Формирование эквивалентных характеристик РЕМИКС-топлива и топлива на основе природного обогащенного урана (Dop) проводилось с использованием уравнения

$$Comp = A \cdot \begin{matrix} ^{234}\text{U}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{235}\text{U}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{236}\text{U}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{238}\text{U}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{238}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{239}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{240}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{241}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} \\ ^{242}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} \end{matrix} + (1 - A) \cdot \begin{matrix} ^{234}\text{U}(\%)_{\text{Dop}} \\ ^{235}\text{U}(\%)_{\text{Dop}} \\ 0 \\ ^{238}\text{U}(\%)_{\text{Dop}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix}. \quad (1)$$

Коэффициент  $A$  определяется по следующей формуле:

$$A = \frac{^{235}\text{U}(\%)_{\text{Dop}} - ^{235}\text{U}(\%)_{\text{REMIX}}}{^{235}\text{U}(\%)_{\text{Dop}} + \frac{2}{3} \cdot ^{236}\text{U}(\%)_{\text{SF}} - (^{235}\text{U}(\%)_{\text{SF}} + ^{239}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}} + ^{241}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}})}, \quad (2)$$

где  $^{235}\text{U}(\%)_{\text{Dop}}$  – концентрация  $^{235}\text{U}$  в материале подпитки (16%);  $^{235}\text{U}(\%)_{\text{REMIX}}$  – концентрация  $^{235}\text{U}$  в топливе эквивалентного обогащения на основе природного урана (5%);  $^{236}\text{U}(\%)_{\text{SF}}$  – концентрация  $^{236}\text{U}$  в отработавшем топливе, рассматриваемом для производства РЕМИКС-топлива;  $^{235}\text{U}(\%)_{\text{SF}}$ ,  $^{239}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}}$ ,  $^{241}\text{Pu}(\%)_{\text{SF}}$  – концентрации делящихся нуклидов в отработавшем топливе, рассматриваемом для производства РЕМИКС-топлива.

Таблица 1

**Изменение изотопного состава РЕМИКС-топлива в зависимости от номера последовательного рецикла (ВОС – начало цикла, ЕОС – конец цикла)**

№ цикла	Изотоп, %									
	$^{234}\text{U}$	$^{235}\text{U}$	$^{236}\text{U}$	$^{238}\text{U}$	$^{238}\text{Pu}$	$^{239}\text{Pu}$	$^{240}\text{Pu}$	$^{241}\text{Pu}$	$^{242}\text{Pu}$	
ВОС	1	0.040	5.000		94.960					
	2	0.002	4.446	0.567	93.641	0.045	0.767	0.284	0.165	0.081
	3	0.006	4.458	0.864	92.844	0.098	0.964	0.382	0.232	0.153
	4	0.005	4.218	0.479	93.469	0.067	0.964	0.396	0.238	0.164
	5	0.005	4.148	0.482	93.526	0.068	0.97	0.398	0.239	0.165
ЕОС	1	0.003	1.095	0.732	96.437	0.058	0.990	0.367	0.213	0.105
	2	0.009	1.311	1.099	95.256	0.124	1.226	0.486	0.295	0.194
	3	0.012	1.436	1.335	93.457	0.168	1.323	0.535	0.327	0.24
	4	0.010	1.322	0.987	95.111	0.133	1.308	0.545	0.329	0.254
	5	0.007	1.049	0.513	95.872	0.099	1.277	0.568	0.335	0.28

В таблице 1 приведены нуклидные составы необлученного и отработавшего РЕМИКС-топлива в зависимости от номера последовательного рециклирования.

На рисунке 2 показана зависимость бесконечного коэффициента размножения ней-

тронов реактора ВВЭР-1000 для последовательно рециклируемого РЕМИКС-топлива в зависимости от глубины выгорания ЯТ. При последовательном рециклировании РЕМИКС-топлива значение коэффициента размножения нейтронов незначительно снижается в зависимости от номера рецикла, что обусловлено вовлечением в топливный цикл изотопов плутония, имеющих большие значения поглощения нейтронов в сравнении с изотопами урана.

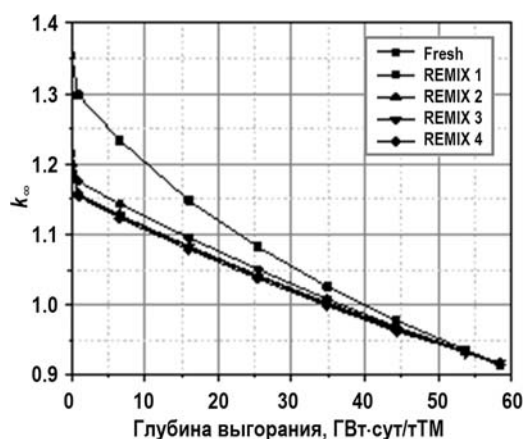


Рис. 2. Поведение  $k_{\infty}$  при рециклировании РЕМИКС-топлива

### ЗАЩИЩЕННОСТЬ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ВВЭР-1000 ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕМИКС-ТОПЛИВА

Одним из ключевых этапов исследований ядерного топливного цикла ВВЭР-1000 является анализ устойчивости к распространению урановой и плутониевой фракций для топлива как на основе обогащенного природного урана, так и для РЕМИКС-топлива. Этот анализ проводился с помощью методологии оценки ядерного топливного цикла АТТР.

Уравнение, описывающее разрабатываемую методологию, с учетом технологических трудностей может быть представлено следующим образом:

$$ATTR = (\alpha_{\max}^2 \cdot \Delta k_{\max}) / (BCM \cdot DH \cdot DR \cdot F) \cdot P_{\text{ing}}, \quad (3)$$

где  $\alpha$  – альфа-Росси;  $BCM$  – критическая масса материала;  $DH$  – тепловыделение материала;  $DR$  – доза ионизирующего излучения;  $F$  – агрегатное состояние материала;  $P_{\text{ing}}$  – вероятность того, что цепная реакция нейтронов не начнется до гарантированного полного выхода.

Вероятность достижения полного выхода и не начала цепной реакции может быть вычислена по формуле [16]

$$1 - P(t < t_i^{\text{crit}}) = \exp\left[-\frac{1}{2} N(t_0 - 90l_{\text{eff}})\right], \quad (4)$$

где  $t_0$  – время сжатия материала ВУ взрывного типа;  $l_{\text{eff}}$  – время жизни мгновенных нейтронов;  $N$  – число нейтронов в секунду. Поэтому уравнение (3) может быть переписано в следующем виде:

$$ATTR = \frac{\alpha_{\max}^2 \cdot \Delta k_{\max}}{BCM \cdot DH \cdot DR \cdot F} \cdot \exp\left[-\frac{N}{2} \cdot (t_0 - 90l_{\text{eff}})\right]. \quad (5)$$

Для урана важным показателем является значение необходимой разделительной работы. Поэтому для урана формула имеет следующий вид:

$$ATTR = \frac{\alpha_{\max}^2 \cdot \Delta k_{\max}}{BCM \cdot DH \cdot DR \cdot F \cdot EPP} \cdot \exp\left[-\frac{N}{2} \cdot (t_0 - 90l_{\text{eff}})\right], \quad (6)$$

## ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

где  $EPP$  – единицы разделительной работы, необходимые для обогащения урана до оружейного уровня. В качестве нормы принимается разделительная работа, необходимая для обогащения природного урана, с содержанием изотопа  $^{235}\text{U}$  до 90%.

Изотопное содержание  $^{235}\text{U}$  в отвале равняется 0.3%. Учет самозащитности материала может быть произведен посредством нормировки мощности дозы ионизирующего излучения от критической массы материала без отражателя на величину мощности дозы, соответствующей значению, определяемому как самозащищенная величина мощности дозы (1 Зв/ч) [17, 18]. Сравнение привлекательности урановой и плутониевой фракций для свежего и отработанного ядерного топлива ВВЭР-1000 показано на рис. 3, 4.

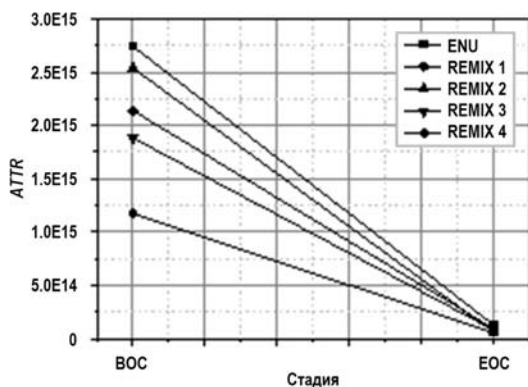


Рис. 3. Привлекательность урановой фракции РЕМИКС-топлива (ВОС – начало цикла, ЕОС – конец цикла)

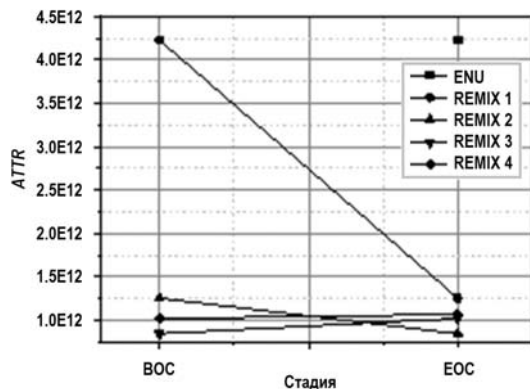


Рис. 4. Привлекательность плутониевой фракции РЕМИКС-топлива (ВОС – начало цикла, ЕОС – конец цикла)

### ЭКОНОМИЯ РЕСУРСОВ УРАНА

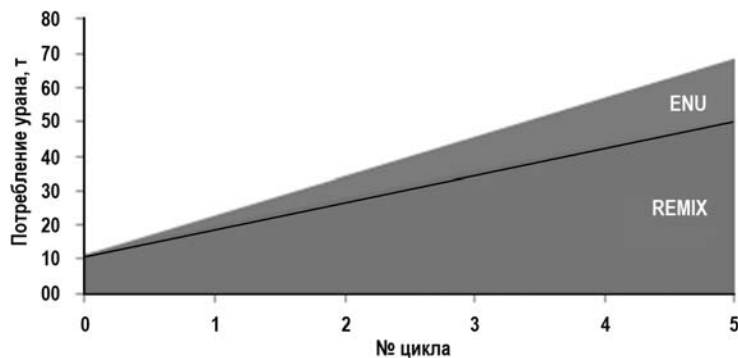


Рис. 5. Сравнение потребления природных ресурсов урана при производстве 1 т топлива на основе природного обогащенного урана (ENU) и РЕМИКС-топлива для ВВЭР-1000

Для моделирования потока материалов использовался инструмент энергетического планирования МАГАТЭ MESSAGE [19, 20]. Результаты анализа показали, что вовлечение в ЯТЦ реактора ВВЭР-1000 РЕМИКС-топлива позволяет сэкономить в среднем до 17% запасов урана за пять последовательных циклов (рис. 5).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Последовательное рециклирование неразделенной смеси регенерированных урана и плутония в форме РЕМИКС-топлива, направленное на частичное замыкание ядерного топливного цикла, способствует разрешению задачи формирования топливного цикла страны-реципиента ядерных энергетических технологий с повышенной устойчивостью к несанкционированному распространению делящихся материалов. Результаты расчетов показали значительное снижение привлекательности урановой фракции свежего топлива ВВЭР-1000 в зависимости от номера последовательного рецикла РЕМИКС-топлива. Вовлечение материала подпитки с обогащением по изотопу  $^{235}\text{U}$  16% для формирования РЕМИКС-топлива эквивалентного обогащения несколько повышает привлекательность урановой фракции, но в то же время показатель защищенности АТТР ниже, чем для свежего топлива на основе обогащенного природного урана.

Привлекательность с точки зрения немирного переключения нарабатываемого и возвращаемого в ЯТЦ ВВЭР-1000 плутония становится ниже в зависимости от номера последовательного рециклирования РЕМИКС-топлива. Такое изменение показателя защищенности АТТР связано с накоплением в плутониевой фракции четных изотопов плутония, что приводит к увеличению тепловыделения от такого материала и образованию нейтронов спонтанного деления.

## Литература

1. Итоги деятельности Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» за 2016 г. Электронный ресурс: <http://www.rosatom.ru> (дата доступа 01.11.2018).
2. Росатом займется переработкой регенерированного урана для АЭС Франции. Электронный ресурс: <https://www.tenex.ru/media/media/d5200d8045a4b4588873bbcd91e6c9bf> (дата доступа 01.11.2018).
3. *International Atomic Energy Agency*. Options for Management of Spent Fuel and Radioactive Waste for Countries Developing New Nuclear Power Programmes. – IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.24, IAEA. – Vienna, 2013.
4. *Williams A.D., Mohagheghi A.H., Cohn B. et al.* System Theoretic Frameworks for Mitigating Risk Complexity in the Nuclear Fuel Cycle. // United States: Nuclear Power. – 2017. – Web. DOI: 10.2172/1395642.
5. *Connolly K. J. and Pope R.B.* A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel // Oak Ridge National Laboratory, ORNL, SR-2016/261, Rev. 1. – 2016.
6. Долгов А.Б. Перспективные направления развития ядерного топлива для российских и зарубежных АЭС. Электронный ресурс: <http://www.atomic-energy.ru/news/2017/05/23/76040> (дата доступа 01.11.2018).
7. *Fedorov Yu., Kryukov O., Khaperskaya A.* Multiple Recycle of Remix Fuel Based on Reprocessed Uranium And Plutonium Mixture in Thermal Reactors. Электронный ресурс: <https://www-pub.iaea.org/iaeaemeetings/cn226p/Session6/ID106Fedorov.pdf> (дата доступа 01.11.2018).
8. *Kang J., Von Hippel F.* U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233. // Spent Fuel Science & Global Security. – 2001. – Vol. 9. – PP. 1-32.
9. *Kryuchkov E.F., Glebov V.B., Kushnarev M.S., Apse V.A., Shmelev A.* Denaturing of Highly Enriched Uranium with  $^{232}\text{U}$ ; Protection Against Uncontrolled Proliferation. // Progress in Nuclear Energy. – 2008. – Vol. 50. – No. 2-6. – PP. 643-646.
10. *Kessler G.* Plutonium Denaturing by  $^{238}\text{Pu}$ . // Nuc. Sci. and Eng. – 2007. – Vol. 155. – PP. 53-72.
11. *U.S. Department of Energy*. Assessment of Disposal Options for DOE-Managed High-Level



Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel. – Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. – October 2014.

12. Разработка методологии оценки перспективных топливных циклов ядерной энергетики с точки зрения защиты против несанкционированного распространения ядерных материалов. – Государственный контракт № Н.46.45.90.10.1098. – 2010.

13. *Alekseev P., Bobrov E., Chibinyaev A., Teplov P., and Dudnikov A.*, Multiple Recycle of REMIX Fuel at VVER-1000 Operation in Closed Fuel Cycle. // *Physics of Atomic Nuclei*. – 2015. – Vol. 78. – No. 11. – PP. 1264-1273.

14. *Teplov P.S., Alekseev P.N., Bobrov E.A. and Chibinyaev A.V.* Physical and economical aspects of Pu multiple recycling on the basis of REMIX reprocessing technology in thermal reactors. // *EPJ Nuclear Sci. Technol.* – 2016. – Vol. 41. – No. 2.

15. SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. ORNL/TM-2005/39, Version 6.1. – Oak Ridge National Laboratory. Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785. – 2011.

16. *Devolpi A.* Proliferation, Plutonium and Policy. – New York: Pergamon Press, 1979.

17. *International Atomic Energy Agency.* Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5). – IAEA Nuclear Security Series No. 27-G, IAEA. – Vienna, 2018.

18. *Lyman E., Kuperman A.* A reevaluation of physical protection standards for irradiated fuel. Proc. of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. – Bariloche, Argentina, November 3-8, 2002. – PP. 2-10.

19. *International Atomic Energy Agency.* Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide. – IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, IAEA. – Vienna, 2016.

20. *International Atomic Energy Agency.* Experience in Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: Country Case Studies. – IAEA-TECDOC-1837, IAEA. – Vienna, 2018.

Поступила в редакцию 05.11.2018 г.

#### **Авторы**

Соловьев Сергей Валерьевич, специалист 1 категории по международной деятельности в профессиональном обучении  
E-mail: sv\_solovyev@mail.ru

Дьяченко Антон Игоревич, специалист 1 категории по международной деятельности в профессиональном обучении  
E-mail: dyachenkoai@mail.ru

Федоров Михаил Игоревич, специалист 1 категории по международной деятельности в профессиональном обучении  
E-mail: fedorovmikhail@bk.ru

Ефремов Руслан Олегович, специалист по международной деятельности в профессиональном обучении  
E-mail: rusefremov@gmail.com

Артисюк Владимир Васильевич, проректор по международной деятельности, доктор техн. наук  
E-mail: VArtisyuk@rosatomtech.ru

UDC 621.039.516.4

## **ANALYSIS OF VVER-1000 NUCLEAR FUEL CYCLE BASED ON REMIX FUEL AGAINST PROLIFERATION OF FISSILE MATERIALS**

Solovyev S.V., Dyachenko A.I., Fedorov M.I., Efremov R.O., Artisyuk V.V.

Rosatom Technical Academy

21 Kurchatov str., Obninsk, Kaluga reg., 249031, Russia

### ABSTRACT

At the present time, one of the strategic objectives of ROSATOM is the global expansion of the VVER technological platform, which is focused on strengthening the position of the Russian Federation in the global market of nuclear technologies, through the growth in the supply of products and services throughout the life cycle of NPP. As a responsible vendor, ROSATOM, in addition to the reactor technologies themselves, provides services focused on the delivery of unirradiated nuclear fuel, return of the spent fuel, and the possibility of recycling fissile materials in the form of recycled fuels [1, 2].

The lack of nuclear materials enrichment and reprocessing technologies in the newcomer countries results in the need for fresh and spent nuclear fuel transportation. Therefore considerable efforts are required to ensure non-proliferation of nuclear fissile materials [3 – 5].

The present paper assesses the security of fissile materials in the VVER-1000 nuclear fuel cycle (NFC) based on REMIX fuel against unauthorized proliferation depending on recycling number. It is shown that the involvement of regenerated uranium in the form of the REMIX fuel, and therefore the  $^{236}\text{U}$  isotope, significantly increases the proportion of the  $^{238}\text{Pu}$  isotope in the plutonium isotopic vector, which prevents its diversion for non-peaceful purposes.

Additionally, uranium resource savings were estimated taking into account the involvement of REMIX-fuel in the VVER-1000 nuclear fuel cycle (NFC) by means of the IAEA MESSAGE energy planning software. Estimates have shown that the joint involvement of regenerated uranium and plutonium can save up to 17% of the total required amount of uranium ore.

**Key words:** reprocessed uranium, REMIX fuel, burnup, resources saving, spent nuclear fuel, VVER-1000, non-proliferation resistant.

### REFERENCES

1. Public annual report «The results of the activities of the State Atomic Energy Corporation Rosatom for 2016.» Available at: <http://www.rosatom.ru> (accessed Nov. 1, 2018) (in Russian).
2. Rosatom will process recycled uranium for France nuclear power plants/ Available at: <https://www.tenex.ru/media/media/d5200d8045a4b4588873bbcd91e6c9bf> (accessed Nov. 1, 2018) (in Russian).
3. International Atomic Energy Agency, Options for Management of Spent Fuel and Radioactive Waste for Countries Developing New Nuclear Power Programmes, IAEA Nuclear Energy Series No. NW-T-1.24, IAEA, Vienna (2013).
4. Williams A.D., Mohagheghi A.H., Cohn B., Osborn D.M., Jones K.A., DeMenno M., Kalinina E., Thomas M.A., Parks E.R., Parks M. and Jeantete B.A. System Theoretic Frameworks for Mitigating Risk Complexity in the Nuclear Fuel Cycle. *United States: N. P.*, 2017. Web. doi:10.2172/1395642.
5. Connolly K.J., and Pope R.B. *A Historical Review of the Safe Transport of Spent Nuclear Fuel*. Oak Ridge National Laboratory, ORNL, SR-2016/261, Rev. 1, 2016.
6. Dolgov A.B. Prospective directions for the development of nuclear fuel for Russian and



foreign NPPs. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/news/2017/05/23/76040> (accessed Nov. 1, 2018) (in Russian).

7. Fedorov Yu., Kryukov O., Khaperskaya A. *Multiple Recycle of Remix Fuel Based on Reprocessed Uranium and Plutonium Mixture in Thermal Reactors*. Available at: <https://www-pub.iaea.org/iaeameetings/cn226p/Session6/ID106Fedorov.pdf> (accessed Nov. 1, 2018) (in Russian).

8. Kang J., Von Hippel F., U-232 and the Proliferation-Resistance of U-233. *Spent Fuel Science & Global Security*, 2011, v. 9, pp. 1-32.

9. Kryuchkov E.F., Glebov V.B., Kushnarev M.S., Apse V.A., Shmelev A.N. Denaturing of Highly Enriched Uranium with  $^{232}\text{U}$ ; Protection Against Uncontrolled Proliferation. *Progress in Nuclear Energy*, 2008, v. 50, no. 2-6, pp. 643-646.

10. Kessler G. Plutonium Denaturing by  $^{238}\text{Pu}$ . *Nuc. Sci. and Eng.*, 2007, v. 155, pp. 53-72.

11. US Department of Energy. *Assessment of Disposal Options for DOE-Managed High-Level Radioactive Waste and Spent Nuclear Fuel*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. October. 2014.

12. Development of a Methodology for Assessing Prospective Fuel Cycles of Nuclear Power from the Point of View of Protection Against Unauthorized Distribution of Nuclear Materials, Under the State Contract No. H.4b.45.90.10.10.1098. Mar. 03, 2010 (in Russian).

13. Alekseev P., Bobrov E., Chibinyaev A., Teplov P., and Dudnikov A. Multiple Recycle of REMIX Fuel at VVER1000 Operation in Closed Fuel Cycle. *ISSN 1063-7788, Physics of Atomic Nuclei*, 2015, v. 78, no. 11, pp. 1264-1273.

14. Teplov P.S., Alekseev P.N., Bobrov E.A. and Chibinyaev A.V. Physical and economical aspects of Pu multiple recycling on the basis of REMIX reprocessing technology in thermal reactors. *EPJ Nuclear Sci. Technol.*, 2016, v. 41, no. 2.

15. SCALE: A Comprehensive Modeling and Simulation Suite for Nuclear Safety Analysis and Design. ORNL/TM-2005/39, Ver. 6.1. Oak Ridge National Laboratory. Radiation Safety Information Computational Center at Oak Ridge National Laboratory as CCC-785, 2011.

16. Devolpi A. *Proliferation, Plutonium and Policy*. Pergamon Press, New York, 1979.

17. International Atomic Energy Agency. *Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5)*, IAEA Nuclear Security Series No. 27-G, IAEA, Vienna, 2018.

18. Lyman E., Kuperman A. *A reevaluation of physical protection standards for irradiated fuel*. Proc. of the International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. Bariloche, Argentina, November 3-8, 2002, pp. 2-10.

19. International Atomic Energy Agency. *Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: A User's Guide*, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-5.2, IAEA, Vienna, 2016.

20. International Atomic Energy Agency. *Experience in Modelling Nuclear Energy Systems with MESSAGE: Country Case Studies*. IAEA-TECDOC-1837, IAEA, Vienna, 2018.

#### Authors

Solovyev Sergey Valer'evich, Specialist of International Training Center  
E-mail: sv\_solovyev@mail.ru

Dyachenko Anton Igorevich, Specialist of International Training Center  
E-mail: dyachenkoai@mail.ru

Fedorov Mikhail Igorevich, Specialist of International Training Center  
E-mail: fedorovmikhail@bk.ru

Efremov Ruslan Olegovich, Specialist of International Training Center  
E-mail: rusefremov@gmail.com

Artisyuk Vladimir Vasil'evich, Vice-rector for International Cooperation, Dr. Sci. (Engineering)  
E-mail: VVArtisyuk@rosatomtech.ru