

*И. С. Бибик<sup>1</sup>, А. И. Вальцева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НИ Томский политехнический университет, г. Томск

<sup>2</sup>Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург

isb17@tpu.ru

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКОЛОГИЧНОГО РЕМИКС-ТОПЛИВА ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА ВВЭР

*В работе проанализировано использование РЕМИКС-топлива нового поколения с целью расширения ресурсной базы атомной энергетики. Рассмотрена актуальность сокращения объемов накопленного ОЯТ и экономии ограниченных запасов природного урана, за счет замыкания ядерного топливного цикла на тепловых нейтронах*

*Ключевые слова: РЕМИКС-топливо; ресурсосбережение; экологическая эффективность; легководный реактор ВВЭР; топливный цикл; уран; плутоний; рециклирование урана; рециклирование плутония; ОЯТ.*

*I. S. Bibik<sup>1</sup>, A. I. Valtseva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk

<sup>2</sup>Ural Federal University, Ekaterinburg

## ANALYSIS OF EFFICIENCY OF ENVIRONMENTAL REMIX-FUEL FOR WWER TYPE REACTORS

*In this paper, the use of a new generation REMIX fuel has been analyzed with the aim of expanding the resource base of nuclear energy. The relevance of reducing the amount of accumulated SNF and saving the limited reserves of natural uranium due to the closure of the nuclear fuel cycle on thermal neutrons is considered*

*Key words: REMIX-fuel; resource saving; ecological efficiency; light water reactor VVER; fuel cycle; uranium; plutonium; uranium recycling; plutonium recycling; SNF.*

В настоящее время мировое сообщество запускает ряд проектов, направленных на ресурсосбережение, с целью недопущения истощения топливного потенциала атомной энергетики, и повышения экологической эффективности промышленных процессов.

Ежегодно из реакторов выгружается 650–700 т радиоактивных отходов (далее – РО), при этом перерабатывается лишь незначительная часть от общего объема. На данный момент в России накоплено около 22,5 тыс. т отработанного ядерного топлива (далее – ОЯТ) [1]. Наибольшую опасность представляют долгоживущие актиниды и продукты деления, образующиеся в ТВЭлах по мере выгорания свежего топлива.

Одним из решений проблемы хранения ОЯТ, и повышения ресурсной базы атомной энергетики, является замыкание ядерного топливного цикла (далее – ЗЯТЦ) на тепловых нейтронах.

РЕМИКС (Regenerated MIXture of U-Pu oxides) – это топливо, разработанное в России, получают из неразделенной смеси регенерированного урана и плутония, образующейся в ходе использования технологии пирометаллургической обработки ОЯТ. В данном методе используется электрический ток для выделения совокупности необходимых элементов, а не плутония в отдельности, что снижает риск распространения плутония [2].

В отличие от МОКС-топлива, где плутоний смешивается с природным ураном, РЕМИКС-топливо планируется изготавливать из неразделенной смеси плутония и урана с добавлением природного урана-235 с обогащением около 16–17 % для компенсации присутствия в смеси четных изотопов  $^{236}\text{U}$ ,  $^{232}\text{U}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{242}\text{Pu}$  и обеспечения необходимых размножающих свойств [3].

Другими словами, сокращение объемов ОЯТ и расхода природного урана на подпитку реакторов ВВЭР будет осуществляться за счет ЗЯТЦ по РЕМИКС-технологии при многократном рециклировании.

В таблице представлен расход природного урана и единица работы разделения (далее – ЕРР) при отвале  $y = 0,2\%$ . В скобках указана экономия природного урана и изменение ЕРР по сравнению с

открытым ядерным топливным циклом (далее – ОЯТЦ):  $f = 7,65$ ;  $EPP = 6,79$  отн. ед. Сравнение осуществляется с ОЯТЦ ВВЭР-1000 с 4-х годичной кампанией уранового топлива и годичной кампанией реактора.

Расход природного урана и EPP при отвале  $y = 0,2$  % [4]

№ рецикла	Расход природного урана, $f$ (экономия)	EPP (изменение)
1 рецикл	6,16 (–19,5 %)	7,80 (+14,9 %)
2 рецикл	5,87 (–23,3 %)	7,40 (+9,2 %)
3 рецикл	5,71 (–25,4 %)	7,20 (+6,0 %)
4 рецикл	5,64 (–26,2 %)	7,10 (4,7 %)
5 рецикл	5,63 (–26,3 %)	7,06 (4,6 %)

В ходе эксплуатации, РЕМИКС-топливо, должно обеспечить снижение объема накопления высокоактивных отходов, экономию природного урана на 20–30 % по сравнению с ОЯТЦ, снижение себестоимости эксплуатации АЭС, и, как следствие, снижение стоимости электроэнергии.

Одним из главных достоинств регенерированного топлива является минимизация РО. Остаточные высокоактивные продукты деления планируется направлять для дальнейшей утилизации в систему «сухого хранения» отходов. РО, в данной технологии, заключаются в герметичные пеналы, заполненные азотно-гелиевой смесью, которые помещаются в бетонные модули, и размещаются в зале хранения. Хранить РО «сухим» способом значительно безопаснее и дешевле. В отличие от «мокрого» хранилища, здесь нет расходов на водоснабжение и водоподготовку, не нужно организовывать циркуляцию воды. Объект не пострадает при потере электропитания, а от персонала требуется лишь загрузка свежих модулей [5].

Благодаря вовлечению в топливный цикл ОЯТ данная технология повышает экологическую эффективность путем минимизации техногенного воздействия на окружающую среду.

Разработка и реализация ЗЯТЦ с использованием в ВВЭР регенерированного топлива позволит расширить ресурсную базу будущего атомной энергетики, а также повысить экономическую привлекательность ядерной отрасли и конкурентоспособность России на мировом рынке в условиях исчерпания запасов природного урана и перехода к замкнутому ядерному топливному циклу.

#### Список использованных источников

1. Российские подходы к перспективным ядерным топливным циклам / А. Хаперская // Международный общественный форум-диалог «АтомЭко-2017» [Электронный ресурс]. URL: [http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2017/materials/04\\_Khaperskaya\\_rus\\_zhenskij\\_stol.pdf](http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2017/materials/04_Khaperskaya_rus_zhenskij_stol.pdf) (дата обращения: 29.10.2018).
2. Nuclear Science. Physics of Plutonium Recycling. Vol. VI. Multiple Pu Recycling in Advanced PWRs. NEA OECD, 2002. P. 9.
3. Федоров Ю. С., Бибичев Б. А., Зильберман Б. Я., Кудрявцев Е. Г. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах // Атомная энергия. 2005. Т. 99, вып. 2. С. 136–141.
4. Павловичев А. М., Павлов В. И., Семченков Ю. М. [и др.] Нейтронно–физические характеристики активной зоны ВВЭР-1000 со 100 %-ной загрузкой топливом из регенерированного урана и плутония // Атомная энергия. 2006. Т. 101, вып. 6. С. 407–413.
5. Grouiller J. P., Doriath J. Y., Vasile A., Zaetta A. Different possible scenarios for plutonium recycling in PWRs // Global. 2001. Paris, France. INIS-FR-1314.