

ФОРМИРОВАНИЕ ПОСТАВОК ЗАЩИЩЕННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА ДЛЯ СТРАН-РЕЦИПИЕНТОВ РОССИЙСКИХ ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

М.И. Федоров*, **А.И. Дьяченко****, **Н.А. Балагуров****, **В.В. Артисюк****

**Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ
249040, Калужская обл., г. Обнинск, Студгородок, 1*

***Негосударственное образовательное учреждение дополнительного профессионального образования «Центральный институт повышения квалификации Госкорпорации «Росатом»
249031, Калужская обл., г. Обнинск, ул. Курчатова, 21.*



Рассматриваются различные стратегии перевода реакторов ВВЭР-1000 на регенерированное урановое топливо для оценки необходимого времени формирования защищенной топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 на основе урана, выделенного из отработанного топлива реактора того же типа, очищенного от минорных актинидов и продуктов деления. Показано изменение защищенности нарабатываемого плутония в отработавшем ядерном топливе реактора типа ВВЭР-1000, которое достигается посредством денатурирования плутония, через увеличения концентрации ^{238}Pu в облученном топливе. Показано влияние начального присутствия изотопа урана ^{236}U в свежем урановом топливе реактора ВВЭР-1000 на накопление ключевого с точки зрения формирования барьера против несанкционированного распространения изотопа плутония ^{238}Pu . Дополнительно проведен анализ экономии урановых ресурсов для рассматриваемых стратегий перевода реакторов ВВЭР-1000 на топливо из регенерированного урана для расширения ресурсной базы АЭС России и стран-реципиентов.

Ключевые слова: регенерированный уран, выгорание, экономия ресурсов, отработанное ядерное топливо, ВВЭР-1000, денатурирование, рецикл, несанкционированное распространение.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время стратегические цели Госкорпорации «Росатом» направлены на формирование глобального технологического лидерства Корпорации в атомной отрасли. Одной из таких целей является глобальная экспансия технологической платформы ВВЭР. Она направлена на укрепление позиций Корпорации на глобальном рынке атомных технологий за рубежом, сопровождаемое ростом поставок продукции и услуг Корпорации на всем жизненном цикле АЭС [1]. Отсутствие технологий обогащения и пе-

© **М.И. Федоров, А.И. Дьяченко, Н.А. Балагуров, В.В. Артисюк, 2015**

переработки ядерных материалов в странах-новичках приводит к необходимости транспортировки свежего и отработавшего ядерного топлива и, как следствие, значительных усилий по обеспечению защитных мер против несанкционированного распространения ядерных материалов.

Производство регенерированного урана из возвращенного облученного топлива стран-заказчиков либо из собственного отработанного топлива является дополнительной возможностью повышения защищенности от несанкционированного распространения ядерных делящихся материалов. Положительными составляющими использования регенерируемого ядерного топлива (РЯТ) на основе регенерата урана являются экономия урановых ресурсов и снижение сырьевой составляющей стоимости топлива. Для стран-заказчиков использование регенерированного урана может расширить ресурсную базу урана для экономии примерно на 17 – 18 % от полной загрузки активной зоны реактора топливом эквивалентного обогащения [2].

На сегодня в Российской Федерации накоплен более чем 30-летний опыт промышленного использования регенерированного урана для производства ЯТ, основанного на российских спецификациях (отработанное ядерное топливо (ОЯТ) ВВЭР-440 используется для фабрикаци топлива РБМК), и более чем 15-летний опыт производства топлива из регенерированного урана для АЭС с реакторами PWR, BWR Западной Европы (Германия, Швейцария, Швеция, Голландия, Великобритания). В настоящее время произведено более 3000 ТВС, поставляемых в рамках контракта с AREVA NP [3].

С учетом того, что в существующей схеме перегрузки топлива ежегодно перегружается 1/5 активной зоны [4], в работе дается оценка времени формирования топливной загрузки реактора ВВЭР-1000 на основе регенерата. Рассматриваются различные стратегии перевода реакторов ВВЭР-1000 на использование регенерата урана в зависимости от имеющейся ресурсной базы регенерата: от одного реактора (страна-новичок), шести реакторов (страна с достаточно развитой ядерной энергетикой), шести реакторов с регенератом, сформированным из накопленного ОЯТ в пристанционном хранилище (838 ТВС) [5] (страна с развитой ядерной энергетикой и накопленным ОЯТ). Показано изменение защищенности нарабатываемого плутония в ОЯТ реактора типа ВВЭР в зависимости от времени использования регенерата в топливном цикле и сделана оценка экономии урановых ресурсов.

ФОРМИРОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ ЗАГРУЗОК РЕАКТОРА ВВЭР-1000 НА ОСНОВЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА

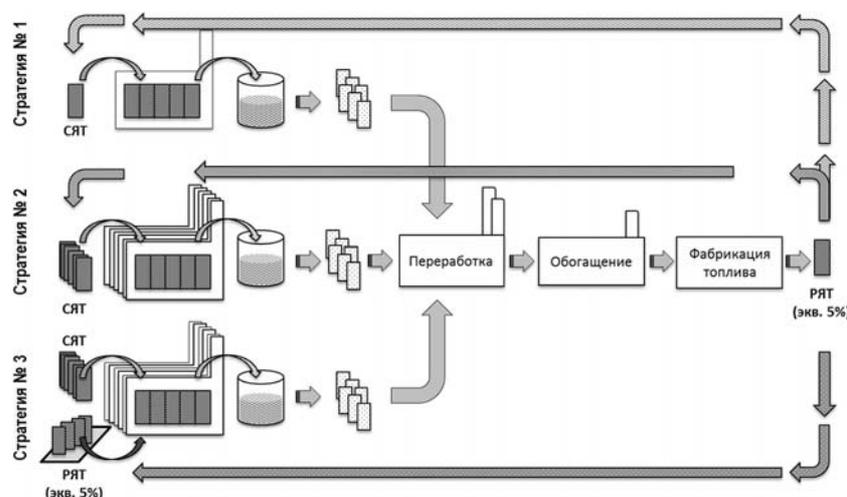


Рис. 1. Схема перевода реакторов ВВЭР-1000 на регенерированный уран для трех стратегий

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Схема формирования топливных загрузок на основе регенерированного урана для трех стратегий представлена на рис. 1.

В первой стратегии перевода реактора ВВЭР-1000 на регенерат урана отработавшее ENU- (Enrichment Natural Uranium) топливо после выдержки в бассейне-охладителе (пять лет) поступает на хранение, где накапливается необходимое количество материала для формирования 1/5 загрузки а.з. реактора, затем направляется на завод по переработке ОЯТ. Выделенный уран RepU (Reprocessed Uranium) дообогащается до требуемого уровня с учетом присутствия ^{236}U и направляется на фабрикуцию ядерного топлива ERU (Enrichment Reprocessed Uranium). Снаряженные таким топливом сборки загружаются в активную зону реактора. Компенсация начального присутствия ^{236}U учитывалась, как описано в работе [4].

Накопление материала для формирования топлива для перегрузки 1/5 а.з. сборки из регенерированного урана занимает шесть лет, для переработки накопленного материала требуется шесть лет; таким образом, первую загрузку топлива из регенерата можно осуществить через 12 лет (рис. 2). В этой стратегии сырьевая составляющая стоимости топлива снижается незначительно из-за небольшого количества вовлеченных регенерированных сборок.

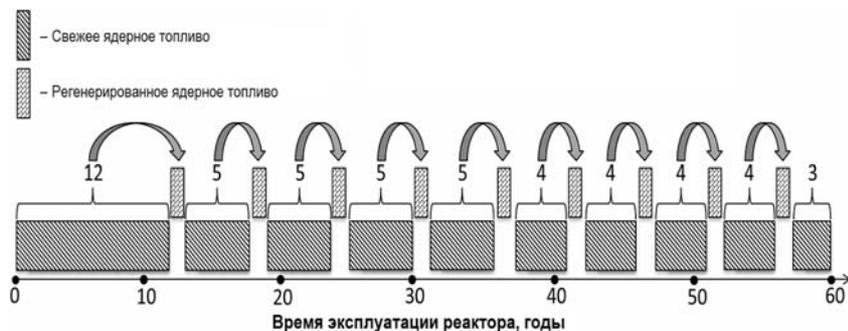


Рис. 2. Схема перегрузки реактора топливом из регенерата урана (стратегия № 1)

При анализе второй стратегии отработанное топливо шести реакторов ВВЭР-1000 перерабатывалось по схеме, аналогичной первой. Снаряженные таким топливом сборки загружаются в активную зону одного из шести реакторов. При формировании топлива для загрузки необходимо учитывать, что ОЯТ из шести реакторов не полностью используется для формирования 1/5 загрузки а.з. одного реактора. В течение эксплуатации реактора накапливается достаточно материала чтобы сформировать несколько годовых перегрузок а.з. для второго реактора (рис. 3)

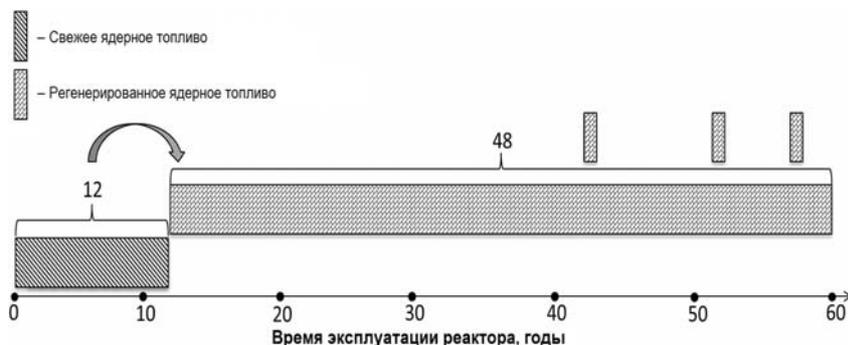


Рис. 3. Схема перегрузки реактора топливом из регенерата урана (стратегия № 2)

В третьей стратегии благодаря вовлечению отработанного топлива пристанционных хранилищ в топливный цикл возможно снижение времени использования ENU-топли-

ва в одном из шести реакторов на четыре года (рис. 4).



Рис. 4. Схема перегрузки реактора топливом из регенерата урана (стратегия № 3)

СНИЖЕНИЕ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНОСТИ НАРАБАТЫВАЕМОГО Р_и В ОЯТ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Регенерированный уран (RepU) содержит несколько изотопов урана, а именно, ^{232}U , ^{233}U , ^{236}U и ^{237}U , которые в природном уране не содержатся. Среди них только ^{236}U играет важную роль в процессе образования ^{238}Pu [6]. Изотопный состав RepU существенно меняется при рециклировании (рис. 5).

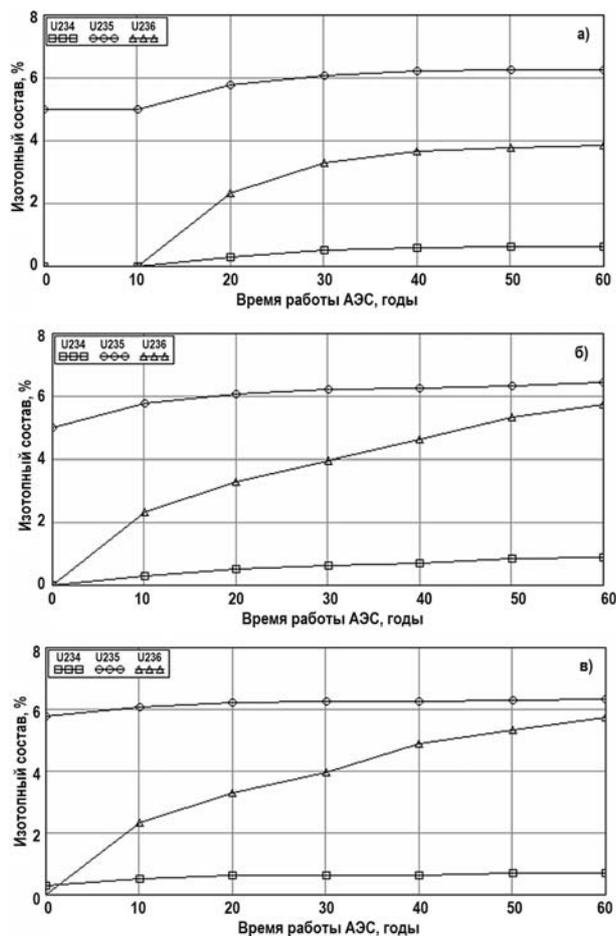


Рис. 5. Изменение изотопного состава RepU: а) – стратегия № 1; б) – стратегия № 2; в) – стратегия № 3

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

Из рисунка видно, что за время использования ERU в реакторе содержание ^{236}U в нем возрастает от 3.84 до 5.75%. Увеличение концентрации ^{236}U приводит к существенному росту ^{238}Pu (рис. 6).

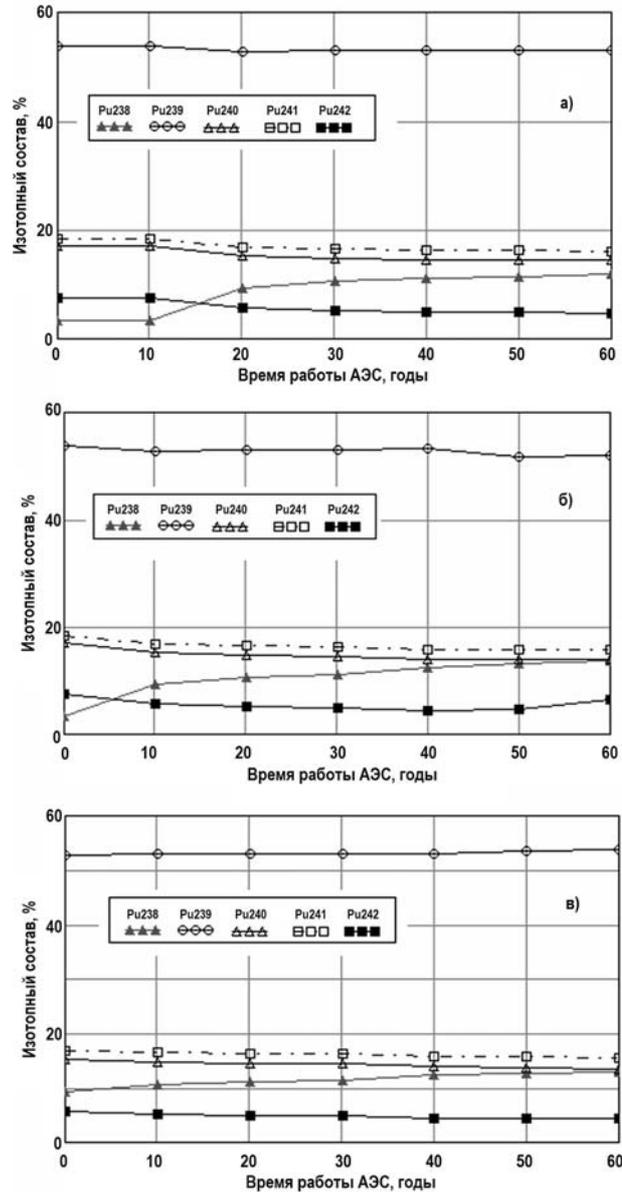


Рис. 6. Изменение изотопного состава Pu ОЯТ RepU: а) – стратегия № 1; б) – стратегия № 2; в) – стратегия № 3

Это означает, что свойства защищенности от нераспространения нарабатываемого плутония в отработанном ERU-топливе хоть и зависят от начальной концентрации ^{236}U в необлученном топливе, но с точки зрения повышенного образования ^{238}Pu лучше, чем у топлива на основе ENU. Так в конце облучения ENU-топлива содержание ^{238}Pu составило 3.39% от общего количества плутония, а ^{236}U – 0.73% от общего количества урана. В результате 20-ти лет работы АЭС на ERU из собственного отработанного топлива содержание ^{238}Pu составляет 9.38% от общего количества Pu за счет возросшего содержания ^{236}U в ERU. Таким образом, в результате переработки ОЯТ (стратегии 2 и 3)

уже через 40 лет использования ERU-топлива один из шести реакторов будет полностью загружен топливом, после сжигания которого содержание ^{238}Pu в конце кампании будет более 12%, что соответствует критерию защищенности Кеслера [7].

ЭКОНОМИЯ УРАНОВЫХ РЕСУРСОВ

Экономия урановых ресурсов при переводе реактора ВВЭР-1000 на регенерат из собственного отработавшего ядерного топлива составляет 10 – 15% в зависимости от времени эксплуатации. При использовании второй стратегии перевода реакторов ВВЭР-1000 на регенерированный уран показатели экономии урана возрастают, что вызвано большим вовлечением в суммарное энерговыделение нарабатываемых изотопов плутония, таким образом, экономия урановых ресурсов достигает 17,5%. Вовлечение отработавшего топлива пристанционных хранилищ в топливный цикл реактора ВВЭР-1000 и последовательное его рециклирование позволяют снизить количество требуемого материала подпитки для формирования топлива эквивалентного обогащения на 18,6% (рис.7)

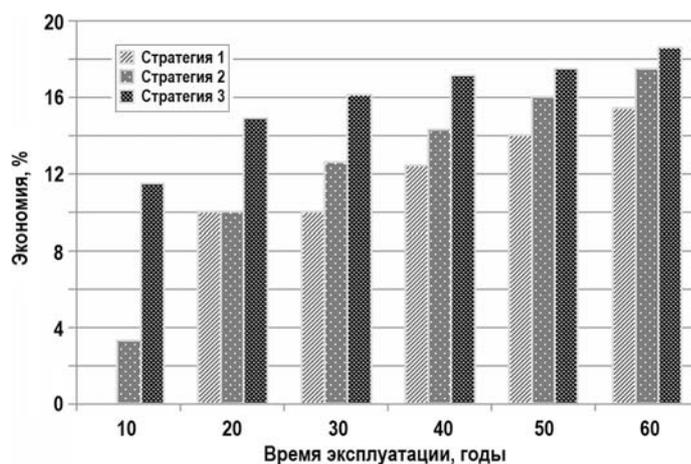


Рис. 7. Экономия урановых ресурсов при последовательном возвращении в топливный цикл урана отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследований трех стратегий перевода реактора ВВЭР-1000 на регенерированный уран. Оценки показывают, что формирование топливных загрузок с повышенной защищенностью от несанкционированного распространения для стратегии рециклирования урана одного реактора ВВЭР-1000 возможно через 20 лет эксплуатации энергоблока. Более масштабное вовлечение регенерированного урана приведет к возможности формирования дополнительных топливных загрузок. Вовлечение отработавшего топлива пристанционных хранилищ в топливный цикл реактора ВВЭР-1000 позволяет сократить время использования «незащищенного» топлива на четыре года.

Анализ экономии ресурсов урана для различных сценариев перевода реактора ВВЭР-1000 на регенерированный уран показал, что экономия природного урана за 60 лет эксплуатации энергоблока варьируется от 15 до 18,6% в зависимости от выбора стратегии перевода реактора на регенерат.

Литература

1. ГК «Росатом» Публичный годовой отчет 2012. Доступен на сайте <http://ar2012.rosatom.ru/#/ru> (07.12. 2014 г.)

2. Дьяченко А.И., Балагуров Н.А., Артисюк В.В. Использование регенерированного урана из топлива с глубоким выгоранием. // Ядерная энергетика. 2012, № 1. С. 135-143.
3. IAEA-TECDOC-CD-1630 «Use of Reprocessed Uranium» Proceedings of a Technical Committee Meeting held in Vienna, August. 2007.
4. Андрюшечко С.А., Афров А.М., Васильев Б.Ю., Генералов В.Н., Косоуров К.Б., Семченков Ю.М., Украинцев В.Ф. АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. От физических основ эксплуатации до эволюции проекта. – М.: Логос, 2010.
5. Калинин В.И., Крицкий В.Г., Токаренко А.И., Тихонов Н.С., Размашкин Н.В., Серова А.Л., Ба-лицкая А.Н. Хранение отработавшего ядерного топлива энергетических реакторов. – С.-Пб.: ОАО «ВНИПИЭТ», 2009.
6. Fukuda K., Sagara H., Saito M., Mitsuhashi T. Feasibility of Reprocessed Uranium in LWR Fuel Cycle for Protected Plutonium Production, Nuclear Science and Technology, 2008. Vol. 45. No 10. PP. 1016-1027.
7. Kessler G. Plutonium denaturing by ^{238}Pu . // Nuclear Science and Engineering. 2007. No.155. PP. 53-73.

Поступила в редакцию 12.02.2015 г.

Авторы

Федоров Михаил Игоревич, аспирант

E-mail: fedorovmikhail@bk.ru

Дьяченко Антон Игоревич, ведущий специалист

E-mail: dyachenkoai@mail.ru

Балагуров Николай Андрианович, ведущий специалист, канд. техн. наук

E-mail: nbalagurov@yandex.ru

Артисюк Владимир Васильевич, директор Департамента

международной деятельности, доктор техн. наук

E-mail: artisyuk@scicet.ru

УДК 621.039.543.4

FORMING A SUPPLY OF PROTECTED NUCLEAR FUEL BASED ON RepU FOR COUNTRIES-RECIPIENTS OF RUSSIAN NUCLEAR TECHNOLOGIES

M. Fedorov*, A. Dyachenko**, N.Balagurov**, V.Artisyuk**

*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Nuclear Research University «МЭФТИ». 1, Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

**Rosatom Central Institute for Continuing Education and Training.

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

ABSTRACT

This paper presents the estimation of the time required for the formation of a protected fuel loading of the reactor WWER-1000 based on reprocessed uranium (RepU) recovered from spent fuel of reactors of the same type is estimated. So for this purpose various strategies of conversion of WWER-1000 reactors to the reprocessed uranium fuel were considered depending on the existing resource base of the reprocessed uranium: from one reactor (the case of newcoming countries), six reactors (for countries with well-developed nuclear power industry such as in Bulgaria), and six reactors together with the reprocessed nuclear fuel formed from accumulated spent nuclear fuel in the storage. What is more, the change of protection of the produced plutonium in spent nuclear fuel of WWER-1000 reactor, which is achieved by means of plutonium denaturation by increasing the

concentration of ^{238}Pu in the spent fuel is shown in the paper. Apart from it the work presents the influence of the initial presence of uranium ^{236}U isotope in fresh uranium fuel of WWER-1000 reactor on the core in terms of non-proliferation issues accumulation of plutonium ^{238}Pu isotope. Further on additionally the analysis of uranium resources saving for the considered strategies of conversion of WWER-1000 reactor to the fuel from reprocessed uranium in order to expand the resource base for nuclear power plants in Russia and the recipient countries is performed.

Keywords: reprocessed uranium, burnup, resources saving, spent nuclear fuel, WWER-1000

REFERENCES

1. «ROSATOM» Public Annual Report 2012.
Available at: <http://www.ar2012.rosatom.ru/#/en> (accessed 8 Dec. 2014)
2. Dyachenko A., Balagurov N., Artisyuk V. On the Issues of Uranium Reprocessed from High Burnup Fuels. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2012, no. 1, pp. 135-143 (in Russian).
3. IAEA-TECDOC-CD-1630 «Use of Reprocessed Uranium» Proceedings of a Technical Committee Meeting held in Vienna, August, 2007.
4. Andrushechko S., Afrov A., Vasil'ev B., Generalov V., Kosourov K., Semenchekov Y., Ukrainev V. *AES s reaktorom tipa VVER-1000. Ot fizicheskikh osnov ekspluatatsii do evolyucii proekta* [NPP with VVER-1000. From the physical bases of operation up to the evolution of the project]. Moscow, Logos Publ., 2010 (in Russian).
5. Kalinkin V., Kritskij V., Tokarenko A., Tihonov N., Razmashkin N., Serova A., Balitskaya A. *Hranenie otrabotavshogo yadernogo topliva energeticheskikh reaktorov* [Storage of spent nuclear fuel from power reactors]. Saint-Petersburg, JSC «VNIPIET» Publ., 2009 (in Russian).
6. Fukuda K., Sagara H., Saito M., Mitsuhashi T. Feasibility of Reprocessed Uranium in LWR Fuel Cycle for Protected Plutonium Production, *Nuclear Science and Technology*, 2008, v. 45, no 10, pp. 1016-1027.
7. Kessler G. Plutonium denaturing by ^{238}Pu . *Nuclear Science and Engineering*, 2007, no. 155, pp. 53-73.

Authors

Fedorov Mikhail Igorevich, Postgraduate Student

E-mail: fedorovmikhail@bk.ru

Dyachenko Anton Igorevich, Specialist of International Training Center

E-mail: dyachenkoai@mail.ru

Balagurov Nikolay Andrianovich, Expert, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: nbalagurov@yandex.com

Artisyuk Vladimir Vasil'evich, Vice-Rector CICE&T, Director of International Training Center, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: artisyuk@scicet.ru