

О ЦЕННОСТИ ОЯТ КАК СЫРЬЯ ДЛЯ ТОПЛИВА РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

А.П. Соловьева, Ю.А. Ульянин*, В.В. Харитонов, Д.Ю. Юршина

*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)
115409, Москва, Каширское шоссе, д.31*

**АО «Техснабэкспорт»,
115184, Москва, Озерковская наб., 28, стр. 3*



Представлена аналитическая модель для определения энергетической и экономической ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах и выявления того периода времени, когда появится энергетическая потребность в массовом производстве топлива из ОЯТ. Приведены возможные сценарии использования топливного ресурса из ОЯТ для компенсации прогнозируемого дефицита природного урана, возникающего вследствие исчерпания месторождений с наименьшей себестоимостью добычи и ограниченностью ресурсов по себестоимости до 260 \$/кгU (при имеющихся прогнозах извлекаемых ресурсов). С энергетической (ресурсной) точки зрения нет необходимости в масштабной переработке ОЯТ с целью производства топлива для реакторов на тепловых нейтронах практически до 2040 г. Необходимость переработки ОЯТ в ближайшие десятилетия определяется не ресурсными соображениями, а необходимостью сокращения количества высокорадиоактивных отходов, избавления от накопления плутония, разработки промышленных технологий обращения с ОЯТ для будущего безопасного и экономически приемлемого замкнутого ядерного топливного цикла с реакторами-бридерами, повышения конкурентоспособности топливных компаний на глобальном рынке за счет комплексного предложения услуг ЯТЦ.

Приведены расчеты топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с РЕМИКС-топливом. Рассмотрена разновидность РЕМИКС-топлива, получаемого путем добавления некоторого количества урана с высоким обогащением (до 20%) в неразделенную смесь урана и плутония из переработанного и очищенного от продуктов деления ОЯТ с концентрацией делящихся нуклидов 1 – 2 %. Обогащение добавки (топливной подпитки) слабо влияет на цену РЕМИКС-топлива, поскольку с ростом обогащения добавки растет ее цена, но снижается массовая доля, необходимая для получения заданного обогащения топлива тепловых реакторов.

Введено понятие ценности ОЯТ для производства РЕМИКС-топлива и приведена методика ее расчета путем сравнения с традиционным урановым топливом. Чем больше разница между ценностью ОЯТ и себестоимостью переработки ОЯТ и обращения с РАО, тем выше рентабельность производства РЕМИКС-топлива.

Ключевые слова: облученное ядерное топливо (ОЯТ), переработка ОЯТ, РЕМИКС-топливо, ценность ОЯТ, тепловые реакторы, быстрые реакторы, сценарии развития ядерной энергетики, ресурсы природного урана.

ВВЕДЕНИЕ

Облученное (или отработавшее) ядерное топливо (ОЯТ) в отличие от свежего имеет значительную радиоактивность за счет образования радиоактивных продуктов деления и актиноидов в процессе работы ядерного реактора [1 – 6]. Количество ОЯТ увеличивается ежегодно более чем на 11 кт вследствие перегрузок топлива возрастающего парка действующих реакторов и вывода из эксплуатации старых реакторов. К началу 2018 г. в мире накоплено ОЯТ примерно 400 кт со средним содержанием делящихся нуклидов около 1,5 – 2,0%, т.е. превышающим содержание урана-235 в природном уране (0,711%). Поэтому ОЯТ тепловых реакторов можно рассматривать в качестве сырья для производства нового топлива. Кроме того в ОЯТ остается около 95% урана-238, который служит незаменимым сырьем при производстве искусственного ядерного топлива плутония-239 для давно ожидаемых реакторов-бридеров. Однако мнения научного сообщества разделились – одни специалисты рассматривают ОЯТ как радиоактивные отходы, подлежащие захоронению (или надежной изоляции), другие – считают ОЯТ сырьем, подлежащим переработке, для производства нового ядерного топлива (МОКС или РЕМИКС для тепловых реакторов) или, в перспективе, для реакторов-бридеров на быстрых нейтронах в замкнутом ЯТЦ [1, 6, 7]. Переработка ОЯТ позволяет сократить объем радиоактивных отходов (РАО) для захоронения и накопление плутония, экономить ресурсы природного урана, совершенствовать технологии обращения с ОЯТ для будущего безопасного и экономически приемлемого замкнутого ядерного топливного цикла, без которого невозможно развитие двухкомпонентной ядерной энергетики с реакторами-бридерами, повышать конкурентоспособность топливных компаний на глобальном рынке за счет комплексного предложения услуг ЯТЦ с переработкой ОЯТ. Сегодня в мире перерабатывается менее 20% ОЯТ [2]. В то же время доступные мощности по переработке недостаточны, а возможности глубинного долгосрочного захоронения по-прежнему ограничены [2], что порождает неопределенности и риски принятия решений в области обращения с ОЯТ.

Цель работы – создание аналитической модели для определения энергетической и экономической ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах и выявления того периода времени, когда появится потребность в массовом производстве топлива из ОЯТ.

ВЛИЯНИЕ РЕСУРСОВ ПРИРОДНОГО УРАНА РАЗНОЙ ЦЕНОВОЙ КАТЕГОРИИ НА СЦЕНАРИИ РАЗВИТИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Рассмотрим сценарии развития ядерной энергетики на тепловых нейтронах с учетом исчерпания ресурсов урана разной ценовой категории. В базе данных UDEPO (МАГАТЭ) представлены два типа ресурсов природного урана – традиционные (conventional) и нетрадиционные (unconventional) [8 – 11]. Полные ресурсы урана оценены в 58,16 Мт, из которых 45,48 Мт относятся к нетрадиционным ресурсам (не имеющим надежной экономической оценки с низкой концентрацией урана в руде), а остальные 12,68 Мт – к традиционным, пригодным к извлечению посредством существующей технологии. Из этих 12,68 Мт традиционных ресурсов только около 8 Мт имеют экономическую оценку себестоимости добычи (рис. 1). По классификации ресурсов (resources) урана, используемой в МАГАТЭ, стержневым критерием является вероятная себестоимость добычи урана [9, 10]. С 2009 г. используются четыре ценовые категории себестоимости добычи урана: < 40, < 80, < 130 и < 260 \$/кгU. Как следует из рис. 1, ресурсы урана по себестоимости добычи до 40 \$/кгU в восемь раз меньше суммарных ресурсов (всех четырех ценовых категорий), составляющих приблизительно 8 Мт. В наших прогнозах мы будем ориентироваться на экономически оцененные ресурсы объемом 8 Мт.

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ И РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

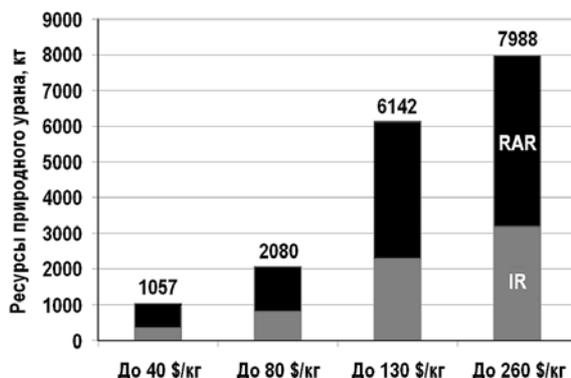


Рис. 1. Мировые ресурсы природного урана в разных ценовых диапазонах (от 40 до 260 \$/кгU): RAR – Reasonably Assured Resources (достоверно установленные, подтвержденные) ресурсы; IR – Inferred Resources (прогнозные, предполагаемые ресурсы) [9]

Потребность мировой ядерной энергетики в природном уране $F(t)$, согласно трем сценариям Всемирной ядерной ассоциации (World Nuclear Association – WNA), с горизонтом прогнозирования 2017 – 2035 гг. аппроксимируется с высокой точностью экспонентами [12, 13] $F(t) = F_0 \exp(kt)$, т.е. при известных начальных условиях F_0 один сценарий от другого отличается лишь величиной темпа роста k . Три сценария WNA потребности в уране соответствуют темпам: $k = 3,4\%/г.$ – высокий сценарий, $k = 2,0\%/г.$ – ожидаемый сценарий, $k = -0,6\%/г.$ – низкий сценарий. Высокий и низкий сценарии МАГАТЭ (2018 г.) до 2050 г. [14] близки к сценариям WNA (до 2035 г.).

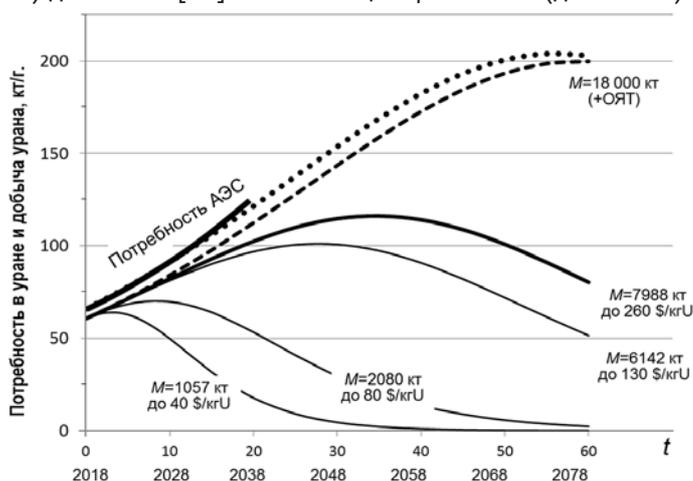


Рис. 2. Прогноз потребности АЭС в природном уране (высокий сценарий WNA-2017, $k = 3,4\%/г.$) и добычи урана с разной себестоимостью при начальном темпе роста добычи 3,4 %/г. с 2018 г. Пунктирная и штриховая линии отражают сценарии максимально возможного влияния переработки ОЯТ на ресурсы топлива

С 1990 г. добыча урана отстает от потребности АЭС в нем [12, 13]. Дефицит урана компенсируется складскими запасами и другими вторичными источниками. Оставшиеся складские запасы (включая военные) оцениваются величиной до $\approx 0,5$ МтU [6, 7, 12, 13]. С 2013-го по 2017-й гг. добыча урана покрывает 85 – 98% потребности АЭС в уране [12]. Ежегодная добыча природного урана непрерывно снижает его ресурсы, что рано или поздно вызовет уменьшение производства электроэнергии на АЭС. Приведенные на рис. 2 результаты расчета динамики истощения ресурсов природного урана $G(t)$ разной ценовой категории для АЭС с тепловыми реакторами получены на основе модели истощения невозобновляемых ресурсов [7, 11]. Прогнозируется нарастающий дефицит добываемого природного урана (разность между потребностью и добычей) вследствие

исчерпания месторождений с наименьшей себестоимостью добычи и ограниченностью ресурсов по наибольшей себестоимости (до 260 \$/кгU). Дефицит урана может достичь 21 – 25 кт/г. к 2035 г. (больше трети годовой потребности) при высоком сценарии развития ядерной энергетики и высоком темпе роста добычи в ближайшие годы (около 3%/г.). Пик добычи урана при ресурсе 8 Мт ожидается около 2050 г. и составит приблизительно 115 ктU/г. При более медленных темпах роста ядерной энергетики дефицит урана будет нарастать медленнее. Независимо от темпов развития ядерной энергетики в начале прогнозного периода следует ожидать в ближайшие годы роста себестоимости добычи природного урана, поскольку ресурсы урана по себестоимости ниже 40 \$/кг близки к исчерпанию.

ДИНАМИКА НАКОПЛЕНИЯ ОЯТ

Для оценки перспектив рынка обращения с ОЯТ необходимо знать объемные (массовые) показатели рынка. Масса ОЯТ $M(t)$, образующегося в году t , включает в себя массу M_i активной зоны всех останавливаемых в году t реакторов и выгружаемое топливо во время перегрузок всех действующих реакторов:

$$M(t) = \sum_i M_i + \sum_j Q_j / B_j, \quad (1)$$

где Q_j – тепловая мощность j -го действующего реактора; B_j – глубина выгорания топлива этого реактора. Зная дату ввода реактора в эксплуатацию, его тепловую мощность и длительность эксплуатации, глубину выгорания топлива, можно рассчитать количество ОЯТ, накопленного к текущему моменту. Полученные с помощью информационной системы по энергетическим реакторам (PRIS) МАГАТЭ результаты представлены на рис. 3.

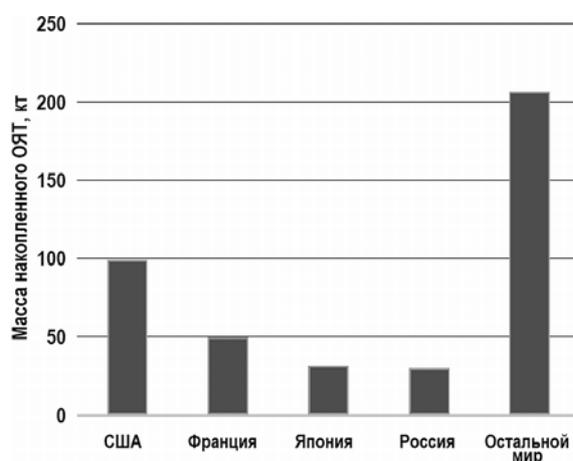


Рис. 3. Количество ОЯТ (кт), накопленного действующими и уже остановленными реакторами к 2018 г. в ряде стран (расчеты авторов по данным PRIS (МАГАТЭ))

Как следует из рисунка, к концу 2017 г. в мире накоплено около 400 кт ОЯТ, при этом большая часть приходится на США, Францию, Японию и Россию. Быстро накапливается ОЯТ в Китае в связи с высокими темпами развития там ядерной энергетики.

ВЛИЯНИЕ ПЕРЕРАБОТКИ ОЯТ НА УВЕЛИЧЕНИЕ ТОПЛИВНЫХ РЕСУРСОВ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

Рассмотрим в какой мере использование топлива из ОЯТ в тепловых реакторах современного поколения может увеличить топливные ресурсы ядерной энергетики в дополнение к природному урану. Как показано на рис. 4, по мере выгорания исходного делящегося нуклида урана-235 в ядерном топливе с обогащением $\approx 4\%$ в реакторах типа

ВВЭР (PWR) накапливается новый делящийся нуклид плутоний-239 (в результате захвата нейтронов ядрами урана-238). Для дальнейших оценок положим суммарную (массовую) концентрацию урана-235 и делящихся нуклидов плутония (239 и 241) в ОЯТ ВВЭР в сумме $X_{\text{ОЯТ}} \approx 1,5 - 1,7\%$. Это соответствует современной тенденции повышения глубины выгорания до 50 МВт-сут/кг и выше (см. рис. 4).

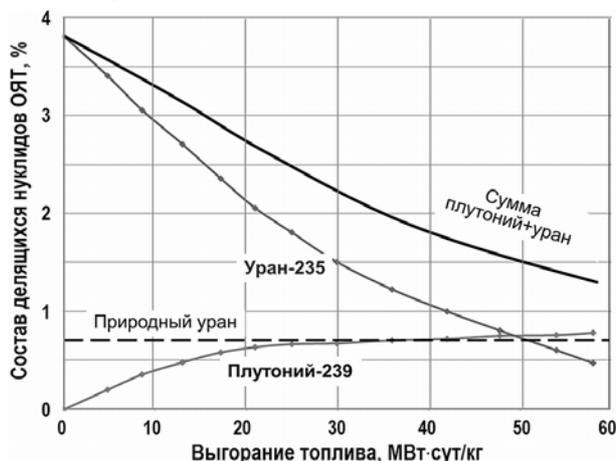


Рис. 4. Зависимость уменьшения концентрации U-235 и накопления Pu-239 от глубины выгорания топлива ВВЭР с обогащения около 4% [15]

В накопленной к началу 2018 г. массе ОЯТ $M_{\text{ОЯТ}} \approx 400$ кт содержится почти $X_{\text{ОЯТ}} M_{\text{ОЯТ}} \approx 6,8$ кт делящихся нуклидов, что эквивалентно по энергетическому потенциалу содержанию урана-235 в примерно 960 кт природного урана ($X_{\text{ОЯТ}} M_{\text{ОЯТ}} / X_{\text{F}} = 6,8 / 0,00711 = 956$ кг, где $X_{\text{F}} = 0,711\%$ – концентрация урана-235 в природном уране). Если бы было возможно переработать все количество накопленного к настоящему времени ОЯТ и произвести из него, например, РЕМИКС-топливо, то это добавило бы к оставшимся на сегодня ресурсам природного урана, оцененным ранее в 8 Мт, еще примерно 1 Мт (по верхней оценке). Итого, при однократной переработке накопленного ОЯТ суммарный топливный ресурс тепловых реакторов составит $M_0 \approx 9$ Мт. Если допустить многократное рециклирование уран-плутониевого топлива (РЕМИКС-топлива), то топливный ресурс возрастает в геометрической прогрессии благодаря накоплению и сгоранию в реакторе делящихся нуклидов плутония [7]. Коэффициент конверсии урана-238 в плутоний в легководных реакторах типа ВВЭР (PWR) составляет приблизительно $K \approx 0,5 - 0,6$. Поэтому при неограниченном числе рециклов (переработки ОЯТ накопленного и будущего) топливный ресурс тепловых реакторов возрастает до $M = M_0 / (1 - K) \approx 18 - 22$ Мт, т.е. примерно в 2,2 – 2,8 раза по сравнению с ресурсами природного урана (8 Мт). Проблемы, возникающие при многократном рециклировании уран-плутониевого топлива, подробно рассмотрены в [1, 3, 5] и здесь не обсуждаются.

Рассмотрим два предельных сценария использования топливного ресурса из ОЯТ:

- заполнение дефицита между потребностью АЭС в природном уране и добычей урана (вместо других вторичных источников и складских запасов) (пунктирная линия на рис. 2);

- вовлечение ресурсов ОЯТ по мере истощения ресурсов природного урана (штриховая линия на рис. 2).

Как следует из рис. 5, масштабы и темпы вовлечения топливных ресурсов из ОЯТ для отмеченных сценариев заметно отличаются. К концу 2035 г. (горизонт прогнозирования WNA-2017) потребность в топливных ресурсах из ОЯТ может возрасти до 20 кт/г. и выше. Потребности могут существенно возрасти, если добыча урана будет стагниро-

вать около современного уровня (около 60 кг/г., пунктирная линия на рис. 5), что маловероятно.

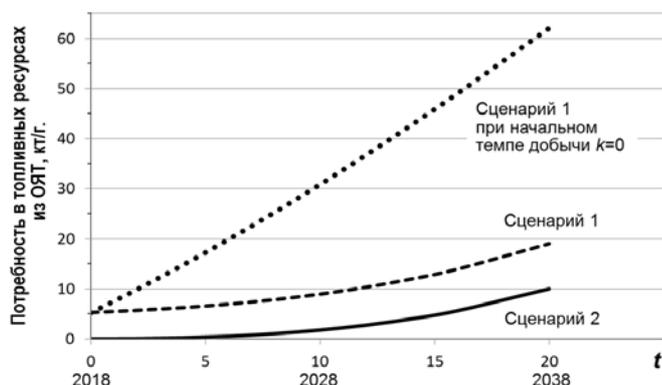


Рис. 5. Динамика потребности мировой ядерной энергетики в топливных ресурсах из ОЯТ при высоком сценарии развития ядерной энергетики (3,4 %/г., WNA-2017) и разных сценариях вовлечения ОЯТ (сценарии 1 и 2). Пунктирная линия – при нулевом темпе роста добычи

Таким образом, с энергетической (ресурсной) точки зрения нет необходимости в существенном увеличении масштабов переработки ОЯТ с целью производства топлива для реакторов на тепловых нейтронах практически до 2040 г. До этого времени достаточно более дешевых ресурсов природного урана для развития ядерной энергетики с начальными темпами 2 – 5 %/г. В 40-х годах текущего века необходимо масштабно развивать ядерную энергетику на быстрых нейтронах, чтобы сохранить природное сырье для топлива строящихся реакторов-бридеров до тех пор, пока они не выйдут на самообеспечение по топливу.

Для «сухого хранения» в течение нескольких десятков лет всего накопленного в мире ОЯТ АЭС (около 400 кт) в современных транспортно-упаковочных контейнерах (ТУК) по 20 отработанных тепловыделяющих сборок в каждом ТУК потребуется поле с размерами всего один квадратный километр. Следовательно, не видно такой катастрофичности в хранении ОЯТ («ядерной помойки»), как в накоплении бытовых отходов в городах. Существующие во Франции переработка ОЯТ и производство МОКС-топлива обусловлены не столько потребностями тепловых реакторов, сколько «обрушением» французской программы развития натриевых реакторов на быстрых нейтронах, для которых и создавались предприятия по переработке ОЯТ [16].

Актуальность переработки ОЯТ в настоящее время обусловлена, в основном, другими причинами (см. введение и работы [1, 3 – 6, 13, 17, 18, 20, 21]).

ОЦЕНКА СТОИМОСТИ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА ИЗ ОЯТ ДЛЯ РЕАКТОРОВ ТИПА PWR

Методика оценки стоимости ядерного топлива из обогащенного природного урана подробно изложена в [7, 19]. Отметим лишь, что цена обогащенного урана зависит, в основном, от стоимости единицы работы разделения и от стоимости природного урана, которых требуется соответственно 6 – 8 ЕРР и 7 – 10 кг на 1 кг топлива. Причем стоимость продукта имеет пологий минимум при некоторой глубине отвала (концентрации урана-235 в отвале) X_D , зависящей только от отношения цен природного урана и работы разделения C_F/C_R . При $C_F/C_R = 1$ оптимальная глубина отвала $X_D \approx 0,23\%$. Чем выше цена природного урана по сравнению с ценой работы разделения, тем меньше оптимальная концентрация отвала ($X_D = 0,16\%$ при $C_F/C_R = 2$) и тем выше стоимость обогащенного урана (рис.6а).

Для производства одного из вариантов РЕМИКС-топлива в неразделенную смесь урана и плутония массой $M_{\text{ОЯТ}}$, имеющего концентрацию делящихся нуклидов $X_{\text{ОЯТ}}$ и очи-

ценного от продуктов деления, добавляют некоторое количество M_X урана с высоким обогащением $X \leq 20\%$ [3 – 5, 20, 21].

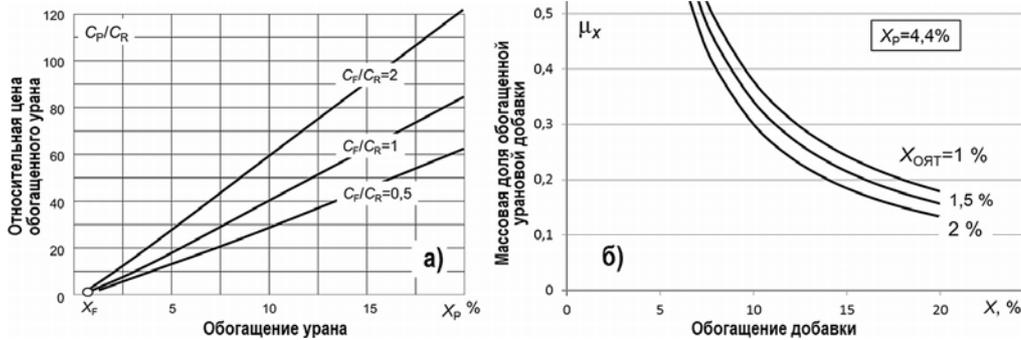


Рис. 6. Влияние обогащения природного урана X_p (а) и урановой добавки в РЕМИКС-топливе X (б) на минимальную относительную цену обогащенного урана C_p/C_R (а) и массовую долю высокообогащенной добавки μ_X (б). Расчет C_p/C_R при относительной цене природного урана $C_F/C_R = 0,5 - 2,0$ и при оптимальной концентрации отвала по формулам из [7]; расчет μ_X при $X_p = 4,4\%$ и концентрации делящихся нуклидов (U-235 и Pu-239) в ОЯТ $X_{OЯТ} = 1 - 2\%$ по формуле (5)

В итоге получается топливо массой $P = M_{OЯТ} + M_X$ с заданным обогащением (например, 4,4 %) $X_p = \mu_{OЯТ} X_{OЯТ} + \mu_X X$, где

$$\mu_{OЯТ} = M_{OЯТ}/P, \quad \mu_X = M_X/P \quad (2)$$

– относительные массы уран-плутониевой смеси (регенерата) из ОЯТ и высокообогащенной урановой добавки в топливе, причем $\mu_{OЯТ} = 1 - \mu_X$. При заданном обогащении топлива X_p и концентрации делящихся нуклидов в ОЯТ $X_{OЯТ}$ массовая доля высокообогащенной добавки связана с ними соотношением

$$\mu_X = (X_p - X_{OЯТ}) / (X - X_{OЯТ}). \quad (3)$$

Как видно, чем выше обогащение добавки X , тем меньше ее требуется (см. рис. 6б).

Выясним влияние обогащения и массовой доли урановой добавки на цену получающегося топлива C (\$/кг). Стоимость рассматриваемого варианта ТВС-РЕМИКС выразим (укрупненно) в виде суммы трех составляющих:

- 1) стоимости «back-end» $C_{back} = C_{OЯТ} + b \cdot C_{РАО}$, состоящей из двух компонентов:
 - стоимость переработки ОЯТ ($C_{OЯТ}$) с получением разделенных компонент РАО и регенератов урана и плутония,
 - стоимость обращения с РАО ($b \cdot C_{РАО}$), где b – массовая доля РАО в ОЯТ;
- 2) стоимости топливной добавки из обогащенного природного урана массой $M_X = \mu_X P$ и обогащением X по цене C_X (включая затраты на покупку природного урана, конверсию и работу разделения);
- 3) стоимости фабрикации ТВС с РЕМИКС-топливом по цене C_ϕ (включая формирование регенерированной уран-плутониевой смеси и урановой добавки в виде двуокисей).

Следовательно,

$$PC = M_{OЯТ} \cdot C_{back} + M_X \cdot C_X + PC_\phi. \quad (4)$$

Отсюда цена (себестоимость) ТВС-РЕМИКС определяется выражением

$$C = (C_{OЯТ} + b \cdot C_{РАО})(1 - \mu_X) + C_X \cdot \mu_X + C_\phi, \quad (5)$$

где первое слагаемое отражает вклад переработки ОЯТ и обращения с РАО в цену топлива, второе слагаемое – вклад высокообогащенной добавки, третье – вклад фабрикации (изготовления) ТВС-РЕМИКС.

Составляющие стоимости 1 кг окисного топлива из обогащенного природного урана

C_0 с тем же обогащением X_p , что и РЕМИКС-топливо, обозначим индексом 0:

$$C_0 = C_{p0} + C_{ф0} + C_{отвс} \quad (6)$$

Здесь C_{p0} – стоимость обогащенного уранового продукта, определяемая как и стоимость урановой добавки C_x ; $C_{ф0}$ – стоимость фабрикации уранового топлива; $C_{отвс}$ – стоимость обращения с отработанными урановыми ТВС (ОТВС) в открытом цикле (транспортировка ОЯТ, включая затраты на ТУК, хранение в подземных или иных депозитариях и пр.).

Например, стоимость обогащенного до 4,95% и до 18% природного урана составляет соответственно 1236 и 4963 \$/кг при ценах (рыночных котировках) на природный уран $C_f = 90$ \$/кгU (включая конверсию) и работу разделения $C_R = 45$ \$/ЕРР. Поскольку массовая доля добавки мала ($\mu_x = 21\%$ при обогащении 18%), то вклад ее в стоимость РЕМИКС-топлива 1038 \$/кг, что несколько меньше стоимости обогащенного урана в урановой ТВС (1236 \$/кг).

Если под величиной P в формуле (4) понимать массу всех ТВС-РЕМИКС, используемых при перегрузке реакторов (в расчете на год, второе слагаемое в формуле (1)), то отношение $PC/E = C_E$ дает топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС (\$/кВт·ч, без учета маржи). Здесь E – годовое производство электроэнергии, кВт·ч/г. По данным [19] затраты конечного этапа ЯТЦ в случае прямого захоронения ОТВС из природного урана составляют 16 – 63% от затрат начального этапа ЯТЦ в зависимости от условий финансирования и ставки дисконтирования до 8%/г., что дает $C_{отвс} \approx 250 - 960$ \$/кг т.м. в формуле (6). Если воспользоваться исходными данными, приведенными в табл. 1, то топливная составляющая электроэнергии АЭС с ТВС-РЕМИКС составит (без маржи) 5,5 – 6,3 \$/МВт·ч (рис. 7). Штриховыми линиями на рис. 7 выделен диапазон топливной составляющей уранового топлива в открытом цикле при затратах на обращение с ОЯТ 450 – 650 \$/кг т.м. Как видно, при концентрации делящихся нуклидов в ОЯТ более 1,5% (что характерно для выгораний топлива примерно до 50 МВт·сут/кг) топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС с РЕМИКС-топливом попадает в диапазон, соответствующий топливу из обогащенного природного урана, если затраты на обращение с ОЯТ в открытом цикле не превышают 650 \$/кг т.м.

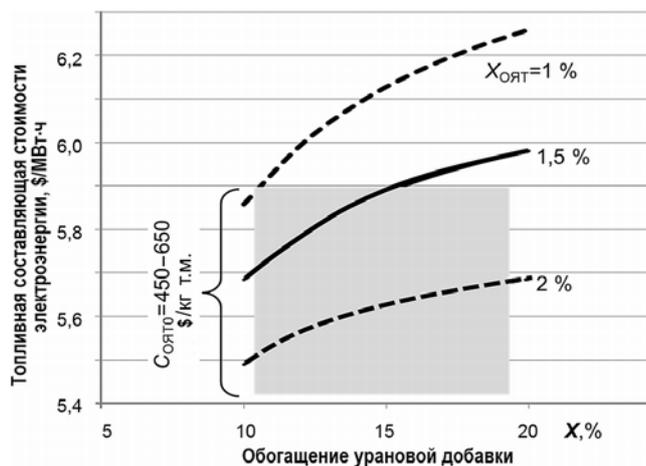


Рис. 7. Зависимость топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с РЕМИКС-топливом от обогащения урановой добавки $X = 10 - 20\%$ и концентрации делящихся нуклидов в ОЯТ $X_{\text{ОЯТ}} = 1 - 2\%$. Исходные данные из табл.1

Обогащение добавки (в диапазоне $x = 10 - 20\%$) слабо влияет на цену РЕМИКС-топлива, но существенно (гиперболически) на массовую долю добавки μ_x в топливе (см. рис. 6б). Иначе говоря, с ростом обогащения добавки растет ее цена, но снижается массовая доля, необходимая для получения заданного обогащения топлива (в данном слу-

чае $X_p = 4,95\%$).

Таблица 1

Исходные данные для расчетов топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС (с реактором типа PWR мощностью 1000 МВт) в открытом ЯТЦ и РЕМИКС-ЯТЦ [3, 6, 7, 12, 19]

Годовое производство электроэнергии E , ТВт·ч/г	7,4	
Годовая потребность реактора в топливе P , тU/г	20	
Обогащение топлива X_p , %	4,95	
Цена переработки ОЯТ $C_{OЯТ}$, \$/кг т.м.	700	
Цена фабрикации ТВС-РЕМИКС $C_{Ф}$, \$/кг т.м.	600	
Цена фабрикации урановой ТВС $C_{Ф0}$, \$/кгU	300	
Цена обращения с РАО (в РЕМИКС-цикле) $C_{РАО}$, \$/кг РАО	300	
Цена обращения с ОТВС в открытом цикле, $C_{ОТВС}$, \$/кг т.м.	300 – 700	
Цена на природный уран (включая конверсию) $C_{У}$, \$/кгU	90	130
Цена за единицу работы разделения C_{R} , \$/ЕРР	45	65

Определим ценность ОЯТ как такую стоимость переработки ОЯТ и изоляции РАО, при которых топливная составляющая электроэнергии АЭС одинакова как в случае использования ТВС-РЕМИКС, так и ТВС из обогащенного природного урана (с учетом затрат на обращение с урановыми ОТВС в открытом ЯТЦ). Согласно выражениям (5), (6), ценность ОЯТ для производства ТВС-РЕМИКС определяется формулой

$$C_{OЯТ} = C_{OЯТ} + bC_{РАО} = [(C_{P0} - C_{X} \mu_X) + (C_{Ф0} - C_{Ф}) + C_{ОТВС}]/(1 - \mu_X). \quad (7)$$

Чем больше разница между ценностью ОЯТ и себестоимостью переработки ОЯТ и обращения с РАО, тем выше рентабельность производства РЕМИКС-топлива. Ценность ОЯТ линейно возрастает с ростом затрат на обращение с урановыми ОТВС в открытом цикле и с ростом рыночных цен (котировок) на природный уран и работу разделения (рис. 8).

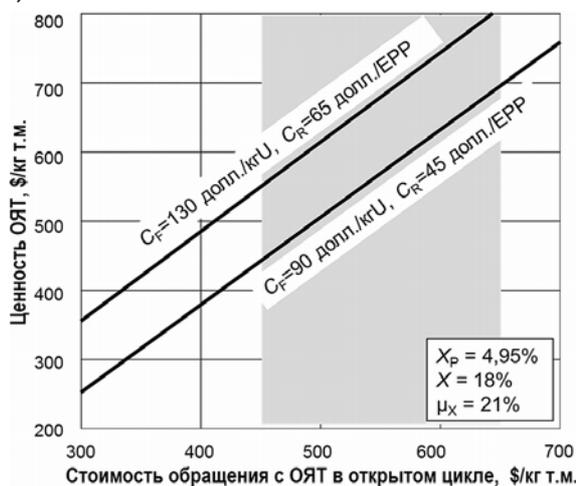


Рис. 8. Зависимость ценности ОЯТ для производства ТВС-РЕМИКС $C_{OЯТ}$ от стоимости обращения с урановыми ОТВС тепловых реакторов в открытом цикле $C_{ОТВС}$ и рыночных котировок на природный уран и работу разделения. Расчет по формуле (7) с исходными данными из табл. 1. Закрашена область вероятных значений стоимости обращения с урановыми ОТВС $C_{ОТВС} = 450 - 650$ \$/кг т.м.

При существующих котировках на природный уран и работу разделения и вероятных ценах на обращение с урановыми ОТВС 450 – 650 \$/кг т.м. ценность ОЯТ для про-

изводства ТВС-РЕМИКС находится в пределах 450 – 700 \$/кг т.м. Если переработка обходится дороже, то использование ТВС-РЕМИКС будет увеличивать топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС. К сожалению, имеющийся в литературе большой разброс данных о ценах на переработку ОЯТ и обращение с ОТВС не позволяет сделать более точных прогнозов о ценности ОЯТ для производства ТВС-РЕМИКС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлена аналитическая модель для определения энергетической и экономической ценности ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах и выявления периода времени, когда появится энергетическая потребность в массовом производстве топлива из ОЯТ. Топливный ресурс ядерной энергетики на тепловых нейтронах может возрасти за счет многократного рециклирования уран-плутониевого топлива (и полной переработки накопленного и будущего ОЯТ) до 25 Мт, т.е. почти в три раза по сравнению с ресурсами природного урана (8 Мт) по известной себестоимости добычи (до 260 \$/кгU). Приведены оценки накопления ОЯТ и возможные сценарии использования топливного ресурса из ОЯТ для компенсации прогнозируемого дефицита природного урана вследствие исчерпания месторождений с наименьшей себестоимостью добычи и ограниченностью ресурсов по себестоимости до 260 \$/кгU (при имеющихся прогнозах извлекаемых ресурсов).

С энергетической (ресурсной) точки зрения нет необходимости в масштабной переработке ОЯТ с целью производства топлива для реакторов на тепловых нейтронах практически до 2040 г. До этого времени достаточно более дешевых ресурсов природного урана для развития ядерной энергетики с начальными темпами 2 – 5 %/г. В 40-х годах текущего века необходимо масштабно развивать ядерную энергетику на быстрых нейтронах, чтобы сохранить природное сырье для топлива строящихся реакторов-бридеров до тех пор, пока они не выйдут на самообеспечение по топливу.

Приведены расчеты топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с РЕМИКС-топливом, получаемым путем добавления некоторого количества урана с высоким обогащением (до 20%) в неразделенную смесь урана и плутония в переработанном ОЯТ, очищенном от продуктов деления и имеющем концентрацию делящихся нуклидов 1 – 2 %. Обогащение добавки слабо влияет на цену РЕМИКС-топлива, поскольку с ростом обогащения добавки растет ее цена, но снижается массовая доля, необходимая для получения заданного обогащения топлива тепловых реакторов.

Введено понятие ценности ОЯТ для производства РЕМИКС-топлива и приведена методика ее расчета. Чем больше разница между ценностью ОЯТ и себестоимостью переработки ОЯТ и обращения с РАО, тем выше рентабельность производства РЕМИКС-топлива. При существующих котировках на природный уран и работу разделения и вероятных ценах на обращение с урановыми ОТВС 450 – 650 \$/кг т.м. ценность ОЯТ для производства ТВС-РЕМИКС находится в пределах 450 – 700 \$/кг т.м.

Литература

1. *Адамов Е.О., Ганев И.Х.* Экологически безупречная ядерная энергетика. – М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, 2007. – 145 с.
2. *Девос Людовик.* Устойчивые решения AREVA в области конечной стадии топливного цикла для стабильного и эффективного развития ядерной отрасли. 3 июня 2015, Атомэкспо-2015. – 14 с. Электронный ресурс: <http://2019.atomexpo.ru/2015/mediafiles/u/files/materials/6/Devos.pdf> (дата доступа 10.10.2018).
3. *Бобров Е.А.* Исследование характеристик замыкания топливного цикла реакторов ВВЭР на основе РЕМИКС-технологии. / Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2016. – 129 с.
4. *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.

5. Декусар В.М., Каграманян В.С., Калашников А.Г., Капранова Э.Н., Коробицын В.Е., Пузаков А.Ю. Анализ характеристик ремикс-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 4. – С. 109-117.
6. Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES. IAEA Nuclear Energy Series, No. NF-T-4.9. – IAEA, Vienna, 2018. – 360 p.
7. Харитонов В.В. Динамика развития ядерной энергетики. Экономико-аналитические модели. – М.: НИЯУ МИФИ, 2014. – 328 с.
8. Живов В.Л., Бойцов А.В., Шумилин М.В. Уран: геология, добыча, экономика. – М.: РИС «ВИМС», 2012. – 304 с.
9. Uranium 2018: Resources, Production and Demand. OECD 2018, NEA No. 7413. – Nuclear Energy Agency, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2018. – 462 p.
10. World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) 2016 Edition. IAEA-TECDOC-1843. – IAEA, Vienna, 2018. – 262 p.
11. Ульянин Ю.А., Харитонов В.В., Юршина Д.Ю. Перспективы ядерной энергетики в условиях исчерпания традиционных энергетических ресурсов. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 5-16.
12. World Nuclear Association. Information Library. Электронный ресурс: <http://www.world-nuclear.org/information-library.aspx/> (дата доступа 10.10.2018).
13. The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2017-2035. – World Nuclear Association, 2017. – 185 p.
14. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Reference Data Series No. 1, 2017 Edition. – IAEA, Vienna, 2017. – 156 p.
15. Горохов А.К., Драгунов Ю.Г., Лукин Г.Л. и др. Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 496 с.
16. Янберг Клаус, Хиппель Фрэнк фон. «Сухое» промежуточное контейнерное хранение ОЯТ как альтернатива его переработке. Электронный ресурс: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7476> (дата доступа 10.10.2018).
17. Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.4. – IAEA, Vienna, 2009. – 79 p.
18. Клинов Д.А., Гулевич А.В., Баканов М.В., Троянов В.М. Двухкомпонентная ядерная энергетика с замкнутым топливным циклом и роль реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. МНТК-2018. 23 мая 2018 г. – М.: ВНИИАЭС, 2018. – 21 с.
19. Экономика ядерного топливного цикла. / Пер. с англ. – М.: Информ-Атом, 1999. – 164 с.
20. Васильченко И.Н., Куракин К.Ю., Кушманов С.А., Джаландинов А.Д., Чернышев В.Н., Калиниченко П.Ф. Анализ возможности обращения со свежим ремикс-топливом на действующих АЭС с ВВЭР-1000. Электронный ресурс: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/go-2013/documents/55.pdf/> (дата доступа 10.10.2018).
21. Масленников И.А., Федоров Ю.С., Шадрин А.Ю., Зильберман Б.Я., Бабаин В.А., Бибичев Б.А. Переработка облученного топлива: новые требования и инновационные подходы. НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», 26 апреля 2012. Электронный ресурс: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/04/26/33029/> (дата доступа 10.10.2018).

Поступила в редакцию 19.10.2018 г.

Авторы

Соловьева Алена Петровна, магистрант

E-mail: alena--sol@mail.ru

Ульянин Юрий Александрович, первый зам. генерального директора АО «Техснабэкспорт»

E-mail: UljaninJ@tenex.ru

Харитонов Владимир Витальевич, профессор, д-р физ.-мат. наук

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

Юршина Дарья Юрьевна, магистрант

E-mail: yurshinadaria@gmail.com

UDC 621.039, 553.495 (063, 470)

THE VALUE OF SPENT NUCLEAR FUEL AS A RAW MATERIAL FOR FUELING REACTORS ON THERMAL NEUTRONS

Soloveva A.P., Uliyanin Yu.A.* , Kharitonov V.V., Yurshina D.Yu.

National Research Nuclear University «MEPhI»

31 Kashirskoe shosse, Moscow, 115409 Russia

* Joint Stock Company TENEX

28, bld. 3 Ozerkovskaya naberezhnaya, Moscow, 115184 Russia

ABSTRACT

An analytical model is presented to determine the energy and economic value of SNF as a raw material for thermal reactors' fuel and to identify the period of time when the energy demand for mass production of fuel from SNF appears. Possible scenarios for using of fuel resources from SNF for compensation of the predicted shortage of natural uranium which occurs from the exhaustion of deposits with the lowest cost of production and limited resources with a cost price of up to \$ 260/kgU (with available forecasts of recoverable resources) are given. From the energy (resource) point of view, there is no need in large-scale SNF reprocessing for thermal reactors fuel production almost until 2040. The need to reprocess SNF in the coming decades is determined not by resource considerations, but by the necessity to reduce the amount of highly radioactive waste, develop industrial technologies of SNF treatment for the future safe and economically acceptable closed nuclear fuel cycle (NFC), increase the competitiveness of fuel companies on a global market due to the integrated offer of NFC services, etc.

Calculations of the fuel component in the cost of electricity produced by nuclear power plants with REMIX-fuel are made. REMIX-fuel is obtained by adding a certain amount of highly enriched uranium (up to 20%) to an unseparated mixture of uranium and plutonium in the reprocessed SNF which is purified from fission products and has a fissionable nuclide concentration of 1 – 2%. The enrichment of this additive has little effect on the REMIX-fuel price, since its price increases with an increase in the additive enrichment, but the mass fraction necessary for obtaining a given enrichment of fuel from thermal reactors decreases.

A concept of SNF reprocessing value for the production of REMIX-fuel is presented with the method of its calculation. The higher the value of SNF reprocessing, the more profitable the production of REMIX-fuel for thermal reactors.

Key words: spent nuclear fuel (SNF), SNF reprocessing, REMIX-fuel, SNF reprocessing value, thermal reactors, fast reactors, nuclear energy development scenarios, natural uranium resources.

REFERENCES

1. Adamov E.O., Ganev I.Kh. *Ecologically Impeccable Nuclear Power*. Moscow. NIIKIET n.a. N.A. Dollezhal Publ., 2007, 145 p. (in Russian).
2. Devos L. *AREVA sustainable back-end solutions for smooth and optimized nuclear development*. June 3, 2015. Atomexpo 2015, 14 p. Available at: <http://2019.atomexpo.ru/2015/mediafiles/u/files/materials/6/Devos.pdf> (accessed Oct 10, 2019) (in Russian).
3. Bobrov E.A. Research of fuel cycle closure characteristics for VVER reactors based on REMIX-technology. Dr. techn. sci. diss. Moscow, 2016. 129 p. (in Russian).
4. Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zilberman B.Ya., Kudryavsev E.G. Use of regenerated uranium and plutonium in thermal reactors. *Atomic Energy*. 2005, v. 99, no. 2, pp. 136-141 (in Russian).
5. Dekusar V.M., Kagramanyan V.S., Kalashnikov A.G., Kapranova E.N., Korobitsyn V.E., Puzakov A.Yu. The comparison analyses of VVER REMIX fuel characteristics when multiple

recycling were made. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika*. 2013, no. 4, pp. 109-117 (in Russian).

6. Enhancing Benefits of Nuclear Energy Technology Innovation through Cooperation among Countries: Final Report of the INPRO Collaborative Project SYNERGIES. IAEA Nuclear Energy Series, No. NF-T-4.9. IAEA, Vienna, 2018, 360 p.

7. Kharitonov V.V. *Dynamics of nuclear power development. Economic and analytical models*. Moscow. MEFHI Publ., 2014, 328 p. (in Russian).

8. Zhivov V.L., Boytsov A.V., Shumilin M.V. *Uranium: Geology, Extraction, Economics*. Moscow. RIS «VIMS» Publ., 2012, 304 p. (in Russian).

9. Uranium 2018: Resources, Production and Demand. OECD 2018, NEA No. 7413. Nuclear energy agency, Organisation for economic co-operation and development, 2018, 462 p.

10. World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO) 2016 Edition. IAEA-TECDOC-1843. IAEA. Vienna, 2018, 262 p.

11. Uliyanin Yu.A., Kharitonov V.V., Yurshina D.Yu. Prospects for nuclear power in the context of the exhaustion of traditional energy resources. *Izvestia vuzov. Yadernaya Energetika*. 2017, no.4, pp. 5-16 (in Russian).

12. World Nuclear Association. Information Library. Available at: <http://www.world-nuclear.org/information-library.aspx> (accessed Oct 10, 2019).

13. The Nuclear Fuel Report. Global Scenarios for Demand and Supply Availability 2017-2035. World Nuclear Association, 2017, 185 p.

14. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Reference Data Series No. 1, 2017 Edition. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2017, 156 p.

15. Gorokhov A.K., Dragunov Yu.G., Lunin G.L., Novikov A.N., Tsofin V.I., Anan'ev Yu.A. *Justification of the Neutron-Physical and Radiation Parts of vver projects*. Moscow. Akademkniga Publ., 2004, 496 p. (in Russian).

16. Janberg Klaus, Hippel Frank von. «Dry» Intermediate Container Storage of SNF as an Alternative to its Processing. Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=7476> (accessed Oct 10, 2019).

17. Use of Reprocessed Uranium: Challenges and Options. IAEA Nuclear Energy Series No. NF-T-4.4. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2009, 79 p.

18. Klinov D.A., Gulevich A.V., Bakanov M.V., Troyanov V.M. Two-Component Nuclear Power with Closed Fuel Cycle and the Role of Thermal and Fast Neutron Reactors. *Proc. of the VIth Int. Symp. MNTK-2018*. Moscow. VNIIAES Publ., 2018, 21 p. (in Russian).

19. *The Economy of the Nuclear Fuel Cycle*. Translation from English. Moscow. Inform-Atom Publ., 1999, 164 p. (in Russian).

20. Vasilchenko I.N., Kurakin K.Yu., Kushmanov S.A., Dzhalandinov A.D., Chernyshev V.N., Kalinichenko P.F. Analysis of the Possibility of Handling Fresh REMIX-Fuel at Operating NPPs with VVER-1000. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/publication/go-2013/documents/55.pdf> (accessed Oct 10, 2019) (in Russian).

21. Maslennikov I.A., Fedorov Yu.S., Shadrin A.Yu., Zilberman B.Ya., Babain V.A., Bibichev B.A. *Recycling of Irradiated Fuel: New Requirements and Innovative Approaches*. V.G. Khlopin Radium Institute, April 26, 2012. Available at: <http://www.atomic-energy.ru/articles/2012/04/26/33029> (accessed Oct 10, 2019) (in Russian).

Authors

Soloveva Alena Petrovna, Master Student

E-mail: alena—sol@mail.ru

Uliyanin Yury Aleksandrovich, First Deputy Director General

E-mail: UljaninJ@tenex.ru

Kharitonov Vladimir Vitalievich, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vkharitonov@mephi.ru

Yurshina Dariya Yurievna, Master Student

E-mail: yurshinadaria@gmail.com