

УДК 658.5.012.2, 658.511.2

Разработка методики формирования топливной составляющей себестоимости электроэнергии АЭС

М.М. Осецкая¹, М.А. Алленых²

¹ АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск, Российская Федерация
E-mail: MMOsetskaya@rosatomtech.ru

² ФГБОУВО «Финансовый университет при Правительстве Российской Федерации»,
г. Москва, Российская Федерация
E-mail: marina_allenykh@mail.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Современные подходы и методы формирования топливной составляющей себестоимости электроэнергии АЭС позволяют оценить влияние на ее изменение одного из следующих факторов: технологических потерь; рециклирования; стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами; объема наработки плутония. При этом все факторы целостно не рассматриваются. Таким образом, происходит разрыв между техническими и технологическими аспектами и экономикой производства. В связи с этим возникает необходимость разработки методики оценки топливной составляющей себестоимости, комплексно и системно учитывающей все формирующие ее параметры.

Материалы и методы: Исследование основано на разработках отечественных и зарубежных ученых в области экономики ядерной энергетики и ядерной физики, опубликованных в научных периодических изданиях и в сети Интернет, посвященных вопросам определения массы ежегодных перегрузок топлива, коэффициентов компенсации четных изотопов урана, содержания изотопов урана и плутония в отработавшем ядерном топливе. Используются методы аналитического, технико-экономического и логического анализа, прогнозные качественные и количественные методы и метод группировки данных.

Результаты: Разработана методика формирования топливной составляющей себестоимости электроэнергии АЭС, которая позволяет учитывать в стоимостном выражении ранее не принимаемые во внимание факторы: стратегию обращения с отработавшим ядерным топливом, величину технологических потерь на каждом переделе ядерного топливного цикла, коэффициенты компенсации четных изотопов урана при рециклировании, номер рецикла. Впервые прописан пошаговый алгоритм применения разработанной методики расчета топливной составляющей себестоимости электроэнергии АЭС. Предложена методика оценки стоимости наработанного плутония. Представлены результаты расчета стоимости переделов начальной и заключительной стадии ядерного топливного цикла по российским и мировым ценам.

Выводы: На примере расчета топливной составляющей себестоимости электроэнергии ВВЭР-1000 показано, что наиболее экономически целесообразным является переработка отработавшего ядерного топлива, извлечение и дальнейшее использование плутония обосновано в случае низкой стоимости химической переработки отработавшего ядерного топлива. Доказано, что повышение конкурентных преимуществ российских ядерных энергетических технологий на мировом рынке достигается при условии высоких мировых цен на переделы начальной стадии ядерного топливного цикла, «слабого» рубля, повышения загрузки производственных мощностей российских перерабатывающих заводов, в том числе за счет переработки зарубежного отработавшего ядерного топлива.

Ключевые слова: ядерный топливный цикл, АЭС, радиоактивные отходы, отработавшее ядерное топливо, себестоимость электроэнергии, рецикл.

Development of the technique for fuel component of electricity cost produced by nuclear power plants

M.M.Osetskaya¹, M.A.Allenykh²

¹Rosatom Central Institute for Continuing Education and Training (ROSATOM-CICE&T), Obninsk, Russian Federation
E-mail: MMOsetskaya@rosatom-cipk.ru

²Financial University under the Government of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation
E-mail: marina_allenykh@mail.ru

Abstract

Background: Modern theories and methods of calculating the fuel component of electricity cost produced by nuclear power plants (NPP) can help to assess one of the factors affecting it: technological losses, recycling, particular strategies of treatment of spent nuclear fuel (SNF) and radioactive waste (RW), or the amount of plutonium production, not taking into account all factors holistically. This creates a gap between the technical and technological aspects and economics of production. All this makes it important to develop a technique for electricity cost fuel component estimation that would comprehensively and systematically account for all underlying parameters.

Material and methods: This study is based on Russian and foreign scientists' works in the field of economics of nuclear power engineering and nuclear physics. It also takes into account scientific periodical publications and Internet materials devoted to the problems of determining annual refueling mass, coefficients of the initial presence of even uranium iso-

topes, uranium and plutonium concentration in SNF. The study employs analytical, technical, economic and logical analysis as well as predictive qualitative and quantitative methods and data grouping.

Results: We have developed a technique of electricity cost fuel component calculation for the power produced by NPP. The technique allows us to estimate the earlier neglected factors: strategy for handling RW and SNF, process losses at each of the processing stages, coefficients of the initial presence of even uranium isotopes at the time of recycling, the recycling number. For the first time we described the step-by-step application algorithm for the developed technique of NPP electricity cost fuel component. We have also proposed a technique for plutonium amount assessment. The paper also presents the calculation results of the initial and final stages of nuclear fuel cycle at Russian and world prices.

Conclusions: By calculating the electricity cost fuel component of a boiling water power reactor, we have shown that recycling is the most economically feasible technique, while plutonium extraction and use is only economically viable in case of low-cost chemical processing of SNF. It has been proved that the competitive advantages of Russian nuclear energy technologies on the world market can be improved in case of high world prices of initial stage of the NFC, "weak" rouble, increase in the use of production capacities of the Russian fuel reprocessing plants by recycling SNF from other countries, among other things.

Key words: nuclear fuel cycle, nuclear power plant, uranium, plutonium, spent nuclear fuel, electric energy production cost, recycling.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.6.067-076

Введение. В настоящее время ресурсообеспеченность ядерной энергетики не ставится под сомнение. Развитие ядерных энергетических технологий позволяет говорить о наличии достаточной ресурсной базы, источниками которой являются: 1) залежи урана (по классификации МАГАТЭ), отнесенные к категориям EAR-I, EAR-II [1]; 2) уран, содержащийся в морской воде [2]; 3) наработанный плутоний [3, 4] (в случае перехода на уран-плутониевый топливный цикл); 4) запасы тория [3] (при реализации уран-ториевого топливного цикла).

Несмотря на различные сценарии развития мировой энергетики, доля ядерной энергетики в мировой выработке электроэнергии остается достаточно стабильной и составляет 11% в 2015 г., 11,5% в 2016 г.¹ и 11-12% к 2020 г.² и многие исследователи говорят о «ядерном ренессансе». Снижение топливной составляющей себестоимости (ТСС) электроэнергии как фактора стратегии лидерства в издержках позволит достичь конкурентных преимуществ АЭС, максимально приумножив имеющийся потенциал атомной энергетики России как на отечественном, так и на мировом рынках. На данный момент, несмотря на обилие исследований, посвященных вопросам замыкания топливного цикла [5], точности расчета нейтронно-физических характеристик ядерного реактора [6, 7], эффективности рециклирования урана [8–12], учета стоимости нарабатываемого плутония [4, 13], обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО) [14], отсутствует комплексная методика формирования ТСС электроэнергии АЭС, учитывающая стоимость технологических потерь (ТП), экономическую оценку прямого захоронения и переработки отработавшего то-

плива, в том числе рециклирования, стоимость нарабатываемого плутония и его вклад в энерговыработку. Таким образом, актуальной является разработка методики, учитывающей все вышеперечисленные факторы.

Методы исследования. Данное исследование базируется на классических методах определения топливной загрузки и ее стоимости с учетом технических характеристик реактора, опубликованных в [14]. Следует отметить отсутствие пошагового алгоритма формирования ТСС электроэнергии, что обуславливает необходимость его проработки. Российские и мировые цены на переделы начальной и заключительной стадий ядерного топливного цикла (ЯТЦ) получены эмпирическим путем на базе открытых источников финансовой, бухгалтерской и годовой отчетности АО «Атомредметзолото»³, АО «ТВЭЛ»⁴, АО «Концерн Росэнергоатом»⁵, ФГУП «ПО МАЯК»⁶, ГК Росатом⁷, The UxConsulting Company⁸, AREVA⁹, Cameco¹⁰, URENCO¹¹.

Результаты исследования. Ниже предлагается методика формирования ТСС электроэнергии АЭС, в которой впервые учтены в стоимостном выражении следующие факторы: стратегия обращения с ОЯТ и РАО, ТП на каж-

¹ World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements. URL: <http://www.world-nuclear.org/info/Facts-and-Figures/World-Nuclear-Power-Reactors-and-Uranium-Requirements/>

² OECD/IEA World Energy Outlook 2016. URL: <http://dx.doi.org/10.1787/weo-2016-en>

³ АРМЗ. URL: http://www.armz.ru/shareholders_and_investors/information_disclosure/

⁴ ТВЭЛ. URL: <http://www.tvel.ru/wps/wcm/connect/tvel/tvelsite/finance/>

⁵ Росэнергоатом. URL: http://www.rosenergoatom.ru/shareholders/info_disclosure/god-otchet/

⁶ ПО МАЯК. URL: <http://www.po-mayak.ru/wps/wcm/connect/mayak/site/Production/>

⁷ ГК Росатом. URL: <http://www.rosatom.ru/about/publicnaya-otchetnost/>

⁸ UxC. URL: <https://www.uxc.com/p/prices/UxCPrices.aspx>

⁹ AREVA. URL: <http://www.areva.com/EN/finance-1176/regulated-financial-information-from-the-world-leader-in-the-nuclear-industry.html>

¹⁰ CAMECO. URL: <https://www.cameco.com/invest/financial-information/annual-reports/2016>

¹¹ URENCO. URL: <http://urenc.com/investors/group-reports/annual-report-and-accounts-2016>

дом переделе ЯТЦ, компенсация четных изотопов урана при рециклировании, номер рецикла, уровень российских и мировых цен на переделы ЯТЦ. Пошаговый алгоритм использования методики, частично представленный в [15], имеет следующий вид.

1. Оценка ежегодной потребности в топливе при установленном топливном цикле (тонн тяжелого металла) [14]:

$$G_x = \frac{N_0 \times 365 \times \bar{\varphi}}{\eta \times B} = \frac{N_0 \times 365 \times \bar{\varphi}}{\eta \times \alpha} \times 1,05 \times 10^{-3}, \quad (1)$$

где N_0 – установленная электрическая мощность АЭС; $\bar{\varphi}$ – средний годовой коэффициент использования мощности; η – коэффициент полезного действия АЭС; α – глубина выгорания, кг/т; B – удельная энерговыработка, (МВт×сут)/т.

2. Расчет стоимости ежегодной потребности в природном уране (дол. США, руб.):

$$Ц'_c = G_x \times \frac{x-y}{c-y} \times Ц_c, \quad (2)$$

где x – требуемое обогащение топлива по ^{235}U , %; y – содержание ^{235}U в отвале, %; c – содержание ^{235}U в природном уране, что составляет 0,711 %; $Ц_c$ – цена природного урана, (дол. США или руб.)/кг; $\frac{x-y}{c-y}$ – расходный коэффициент, обо-

значается f [18]; $G_x \times \frac{x-y}{c-y} = G_c$ – потребность в природном уране.

На рынке природного урана и основных переделов начальной стадии ЯТЦ осуществляются продажи в основном закиси-окиси (U_3O_8). Тогда потребность в закиси-окиси урана $G_{\text{U}_3\text{O}_8}$, получаемая делением G_c на отношение атомной массы урана к молекулярной массе соединения и равная 0,842, умножается на стоимость U_3O_8 . Коэффициент ТП на данном переделе составляет примерно 0,1–0,3 % от итоговой себестоимости ТВС.

3. Расчет стоимости потребности в конверсии:

$$Ц'_{\text{конв}} = G_c \times Ц_{\text{конв}}, \quad (3)$$

где $Ц_{\text{конв}}$ – цена конверсии, (дол. США или руб.)/кг.

При этом цена конверсии складывается из нормы прибыли, амортизационных отчислений, эксплуатационных расходов, включая переделы стадии конверсии. Следует отметить, что коэффициент ТП от обратной конверсии (получение UO_2 или другого соединения из гексафторида UF_6) составляет примерно 0,3–0,5 % от итоговой стоимости ТВС.

4. Оценка потребности в разделительной работе (дол. США, руб.):

$$Ц'_{\text{лЕРР}} = \left(V(x) + \frac{x-c}{c-y} V(y) - \frac{x-y}{c-y} V(c) \right) \times Ц_{\text{лЕРР}} \times G_x, \quad (4)$$

где $V(x)$ – потенциал разделения, зависящий только от концентрации изотопа (в данном случае ^{235}U), рассчитываемый по формуле

$$V(x) = (2x - 1) \ln \left(\frac{x}{1-x} \right); \quad (5)$$

$Ц_{\text{лЕРР}}$ – стоимость обогащения, (дол. США или руб.)/ЕРР.

Следует отметить, что стоимость обогащения существенно отличается в зависимости от используемого метода разделения изотопов. Так, в России используется промышленная технология центрифужного разделения, за рубежом – газодиффузионного, с расходами на электроэнергию 100 кВт×ч/ЕРР, или 3–5 % себестоимости разделительной работы, и 2500 кВт×ч/ЕРР, или 40–45 % себестоимости разделительной работы. Потребность в электроэнергии при обогащении опытными лазерными технологиями составляет примерно 50 кВт×ч/ЕРР. Коэффициент ТП на данном переделе составляет примерно 0,6–1,2 % от итоговой стоимости ТВС.

В случае возврата топлива в цикл возникает экономия на удельной работе разделения, тогда формула (4) преобразуется в выражение

$$Ц''_{\text{лЕРР}} = \left(V(x) + \frac{x-x_k}{x_k-y} V(y) - \frac{x-y}{x_k-y} V(x_k) \right) \times \quad (6)$$

$$\times Ц_{\text{лЕРР}} \times G_x^{\text{рецикл}},$$

где x_k – содержание ^{235}U в ОЯТ; $G_x^{\text{рецикл}}$ – ежегодная потребность в рециклированном уране.

5. Оценка стоимости изготовления топлива:

$$Ц'_{\text{изг.т}} = G_x \times Ц_{\text{изг.т}}, \quad (7)$$

где $Ц_{\text{изг.т}}$ – цена изготовления топлива, (дол. США или руб.)/кг.

Понятие стоимости изготовления топлива в данном случае включает расходы не только непосредственно на топливные таблетки, но и на изготовление оболочек твэл, деталей для ТВС, изготовление и сборку твэлов и ТВС. Цена изготовления топлива колеблется в зависимости от вида изделия, технологии производства, его объема и прочих факторов, в том числе волатильности мировых цен. Отметим, что энергопроизводство в начальной и конечной загрузках и в равновесном состоянии (установление постоянного изотопного состава в активной зоне) при равномерно-частичных перегрузках активной зоны существенно отличается от ядерного топлива, что необходимо учитывать при расчете себестоимости электроэнергии. Итоговый коэффициент ТП (ϵ) на переделах начальной стадии ЯТЦ составляет 1,4–1,8 % от итоговой стоимости ТВС.

6. Выбор варианта заключительной стадии ЯТЦ (прямое захоронение или переработка ОЯТ):

а) в случае прямого захоронения ОЯТ

$$Ц'_{\text{пз}} = G_x \times (Ц_{\text{типрх}} + Ц_{\text{типх}}), \quad (8)$$

где $Ц_{\text{типрх}}$ – стоимость транспортировки и промежуточного хранения, (дол. США или руб.)/кг;

$C_{\text{типрх}}$ – стоимость транспортировки и прямого захоронения, (дол. США или руб.)/кг;

б) в случае переработки ОЯТ

$$C'_{\text{ПОЯТ}} = G_x \times (C_{\text{типрх}} + C_{\text{пер}} + C_{\text{ОиЗ РАО}}), \quad (9)$$

где $C_{\text{типрх}}$ – стоимость транспортировки и промежуточного хранения, (дол. США или руб.)/кг; $C_{\text{пер}}$ – стоимость переработки ОЯТ, (дол. США или руб.)/кг; $C_{\text{ОиЗ РАО}}$ – стоимость остекловывания и захоронения РАО, (дол. США или руб.)/кг.

В данную формулу не входит стоимость выдержки облученного топлива на АЭС, так как она зачастую включается в общестанционные расходы. Стоимость транспортировки определяется транспортным тарифом, который принимается в размере 0,03 дол. США/км×кг. На данном переделе облученное топливо, подлежащее радиохимической переработке в целях извлечения урана и плутония, представляет собой полуфабрикат, находящийся на стадии незавершенного производства.

7. Расчет стоимости топлива (начальная и заключительная стадии ЯТЦ):

а) в случае прямого захоронения ОЯТ

$$C_{\text{топл}} = (C'_c + C'_{\text{конв}} + C'_{\text{лЕРР}} + C'_{\text{изг.т}})(1 + \varepsilon) + C'_{\text{пз}}, \quad (10)$$

где $(1 + \varepsilon)$ характеризует величину ТП, составляющую 1–2 %;

б) в случае переработки ОЯТ

$$C_{\text{топл}} = (C'_c + C'_{\text{конв}} + C'_{\text{лЕРР}} + C'_{\text{изг.т}})(1 + \varepsilon) + C'_{\text{ПОЯТ}}. \quad (11)$$

В случае возврата топлива в цикл стоимость рециклированного топлива (начальная и заключительная стадии ЯТЦ) без учета стоимости «подпитки» свежим топливом рассчитывается по формуле

$$C_{\text{топл}}^{\text{рецикл}_1} = (C'_{\text{лЕРР}} + C'_{\text{изг.т}} + C'_{\text{ПОЯТ}})(1 + \varepsilon^{\text{рецикл}}), \quad (12)$$

где $C'_{\text{изг.т}}$ – стоимость изготовления ТВС из рециклированного топлива, которая возрастает в виду роста сложности технологии изготовления, так как имеет место его радиотоксичность; $\varepsilon^{\text{рецикл}}$ – доля безвозвратных потерь регенерированного урана в ЯТЦ, составляющая примерно 0,02–0,05 [14].

При рециклировании возникает потребность компенсации «вредного» воздействия изотопа ^{236}U на нейтроно-физические свойства топлива, для чего в топливную смесь добавляется природный уран. В данном случае будем опираться на результаты, полученные в [9, 10]. При расчете стоимости топлива в случае цикла необходимо рассчитывать составляющие C'_c , $C'_{\text{конв}}$, $C'_{\text{лЕРР}}$, но уже для меньшего количества G_x . То есть G_x можно условно разделить на $G_x^{\text{компл}}$ и $G_x^{\text{рецикл}}$, тогда стоимость рециклированного топлива с учетом «подпитки» (начальная и заключительная стадии ЯТЦ) рассчитывается по формуле

$$C_{\text{топл}}^{\text{рецикл}} = (C_c \times f + C_{\text{конв}}) \times G_x^{\text{компл}} + C'_{\text{лЕРР}} + C'_{\text{изг.т}} + C'_{\text{ПОЯТ}}. \quad (13)$$

При этом $G_x^{\text{компл}}$ рассчитывается по формуле (тонн)

$$G_x^{\text{компл}} = G_x \times \frac{c - y}{x_n - y}, \quad (14)$$

где x_n – концентрация ^{235}U , получаемая с учетом компенсации «вредного» воздействия ^{236}U , рассчитываемая по формуле

$$x_n = x - K_1 \times K_2 \times x^{236}, \quad (15)$$

где $K_1 = 0,3$ – компенсация наличия ^{236}U в регенерированном уране; $K_2 = 0,8$ – множитель, учитывающий частичный сброс ^{236}U в поток отвала; x^{236} – концентрация ^{236}U в регенерированном уране [9].

В [10] показано, что коэффициент K_1 изменяется в зависимости от номера цикла. Так, в первом и втором рециклах K_1 составляет 0,33, в третьем рецикле – 0,25, в четвертом – 0,2. Допущением [10], заключающимся в определении в качестве критерия подбора коэффициентов компенсации одинаковой глубины выгорания регенерированного и обогащенного природного урана при фиксированном значении эффективного коэффициента реактивности на уровне 0,9, является величина коэффициента компенсации: для реактора РБМК – на уровне 0,2; реактора ВВЭР – 0,3; PWR – 0,33.

Тогда потребность в регенерированном уране составляет $G_x^{\text{рецикл}} = G_x - G_x^{\text{компл}}$.

8. Оценка ТСС электроэнергетики, дол. США/кВт×ч:

$$C_{\text{топл}}^{\varepsilon} = \frac{N_9 \times 10^3 \times 365 \times 24 \times \bar{\varphi} \times (1 - k_{c.n.})}{C_{\text{топл}}}, \quad (16)$$

где 24 – количество часов в сутках; $k_{c.n.}$ – коэффициент расхода электроэнергии на собственные нужды, который составляет около 5–7 %.

В случае рецикла ТСС 1 кВт×ч электроэнергии рассчитывается следующим образом:

$$C_{\text{топл}}^{\varepsilon} = \frac{N_9 \times 10^3 \times 365 \times 24 \times \bar{\varphi}}{C_{\text{топл}}^{\text{рецикл}}}. \quad (17)$$

Следует отметить, что данные по концентрации ^{236}U зависят от типа реактора, а следовательно, от обогащения и глубины выгорания. Так, для реактора РБМК-1000 [9] – $x^{236} = 0,29$ %, для реактора ВВЭР-1000 [16] данная величина составляет 0,73 %.

Стоимость плутония как вида топлива, получаемого искусственно, определяется по фактической стоимости (фактически понесенным затратам на его производство) или по потребительской стоимости, которые могут существенно различаться. Изначально в обоих случаях определяется стоимость плутония методом эквивалентирования, т.е. плутоний рассматривается как вид топлива, эквивалентный урану, с обогащением 93 % в виду близости

потребительских свойств. Таким образом, цена

$$C_{Pu} = \frac{C_{235U}}{0,93 \times k},$$

где C_{235U} – цена урана по изотопу 235, принимаемая за базисную; k – коэффициент взаимозаменяемости, который можно рассматривать по соизмерению разных признаков: коэффициента реактивности или глубины выгорания. Так, например, при моделировании рециклов в [10] в качестве коэффициента эквивалентирования принимался эффективный коэффициент реактивности на уровне 0,9. Ниже рассматривается вариант использования в качестве коэффициента взаимозаменяемости глубины выгорания топлива, которая должна быть обеспечена на определенном уровне. При загрузке активной зоны происходит смешивание плутония и природного урана, вкладом которого в выгорание пренебрегается. При этом необходимо учитывать изотопный состав плутония, который учитывается корректирующим коэффициентом k_k , представляющим собой отношение изотопов ^{241}Pu к ^{239}Pu . Таким образом, коэффициент взаимозаменяемости по глубине выгорания рассчитывается как

$$k = \frac{k_k \times z_{Pu}}{x_H - c},$$

где z_{Pu} – масса накопленного плутония в отработанном топливе. Последнее справедливо только при расчете стоимости плутония, наработанного в тепловых реакторах, так как в быстром реакторе наработка плутония является одной из целей функционирования АЭС наряду с выработкой электроэнергии.

Ниже рассмотрим изменение ТСС электроэнергии реактора ВВЭР-1000 со следующими начальными условиями: начальное обогащение для ежегодных перегрузок – 4,85 % по урану; содержание ^{235}U в отвале – 0,3 % (принятое нами допущение); удельная энерговыработка – 50 000 МВт×сут/т; КИУМ – 0,85; x^{236} – 0,73 %; коэффициент накопления плутония – 0,2; коэффициент воспроизводства – 0,6. Последние две характеристики приняты для расчета концентраций ^{235}U и $^{239,241}Pu$ в ОЯТ, которые составили 10,32 и 7,39 кг/т соответственно.

В соответствии с предложенной методикой расчета, ежегодная загрузка реактора (G_x) в равновесном топливном цикле составляет 18,8 тонн обогащенного урана, масса рециклированного урана ($G_x^{рецикл}$) составляет 17,03 тонн, масса компенсационного урана ($G_x^{компл}$) – 1,77 тонн, удельная работа разделения – 8,501 ЕРР/кг, удельная работа разделения с учетом рецикла – 6,105 ЕРР/кг, концентрация делящихся изотопов урана в ОЯТ – 1,03205 %. Сравнительный анализ ТСС электроэнергии с учетом стратегии обращения ОЯТ по российским и мировым ценам на передель ЯТЦ с учетом ТП представлен в табл. 1.

Курс доллара США для расчета российских цен принимался по данным годовых отчетов предприятий на 31.12.2016 г. (1 дол. США): АО «Атомредметзолото» – 60,6569 руб.; АО «ТВЭЛ» – 56,2584 руб.; АО «Концерн Росэнергоатом» – 60,6569 руб.; ФГУП «ПО МАЯК» – 60,6569 руб.

Таблица 1. Сравнительный анализ ТСС электроэнергии с учетом стратегии обращения ОЯТ по российским и мировым ценам на передель ЯТЦ с учетом ТП, дол. США/ кг т.м. (тяжелого металла) и дол. США / кг ЕРР

Наименование	Цена в России	Цена мирового рынка	Стоимость топлива (российские цены)	Стоимость топлива (мировые цены)
Уран	40	44	8 326 402,71	9 159 042,98
Конверсия	17	5	3 538 721,15	1 040 800,34
Обогащение	24	43	3 836 269,45	6 873 316,11
Изготовление топлива	168	90	3 158 909,09	1 692 272,73
ТП, %	1,5		28 290,45	28 148,15
Итого (по начальной стадии ЯТЦ):			18 860 302,41	18 765 432,16
Прямое захоронение				
Транспортировка и промежуточное хранение	100	230	1 880 303,03	4 324 696,97
Инкапсулирование и прямое захоронение	400	610	7 521 212,12	11 469 848,48
Итого (по заключительной стадии ЯТЦ):			9 401 515,15	15 794 545,45
Стоимость топлива всего:			28 290 108,02	34 588 125,76
Переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ)				
Транспортировка и промежуточное хранение	40	60	752 121,21	1 128 181,82
Переработка ОЯТ	500	820	9 401 515,15	15 418 484,85
Остекловывание и захоронение РАО	60	100	1 128 181,82	1 880 303,03
ТП, %	2		225 636,36	368 539,39
Итого (с переработкой ОЯТ):			11 281 818,18	18 426 969,70
Стоимость топлива всего:			30 367 756,96	37 560 941,25
Стоимость топлива без переработки, дол. США/кг			1 504,55	1 839,50
Стоимость переработанного топлива, дол. США/кг			1 615,05	1 997,60
ТСС (прямое захоронение), цент/кВтч			0,37994	0,46452
ТСС (переработка ОЯТ), цент/кВтч			0,40784	0,50444

Данные табл. 1 свидетельствуют, что ТСС электроэнергии по российским ценам ниже, чем по мировым: в случае прямого захоронения – на 18,21 %, с переработкой ОЯТ – на 19,15 %. При этом очевиден факт, что ТСС электроэнергии и по российским, и по мировым ценам выше в случае переработки, чем в случае прямого захоронения. Также рост стоимости на конверсию, обогащение и изготовление топлива из рециклированного урана, обусловленный усложнением технологии из-за остаточного тепловыделения, повышенной радиотоксичности, не учитывался. Выбор стратегии обращения с ОЯТ является сложным решением, требующим учета многих факторов, включая политические и экономические аспекты, проблемы нераспространения ядерных материалов и защиты окружающей среды. В табл. 2, 3 представлены расчеты ТСС электроэнергии с учетом рецикла и ТП.

Анализ результатов расчета (табл. 2, 3) позволяет сделать вывод, что ТСС электроэнергии снижается с каждым последующим

рециклом, что, по нашему мнению, связано со снижением объемов «подпитки» свежим топливом в части расходов на обогащение. Влияние ТП незначительно. Следует отметить, что по российским ценам, за счет большего экономического эффекта в виде снижения ТСС электроэнергии, более выгодно осуществлять рециклирование. Так, ТСС с переработкой ОЯТ по российским ценам, но без рециклирования выше: для рециклов 1 и 2 – на 62,89 %, для рецикла 3 – на 63,01 %, для рецикла 4 – на 63,08 %, по мировым – на 41,37, 41,44, 41,48% соответственно. Происходит замедление темпов снижения ТСС в зависимости от рецикла, что, по нашему мнению, связано с изменением изотопного состава ОЯТ.

Стоимость 1 кг урана (исходные данные примера) также изменяется в зависимости от стратегии обращения с ОЯТ, номера рецикла и учета ТП. Полученные результаты изменения стоимости 1 кг урана демонстрируют аналогичную динамику, как и изменение величины ТСС.

Таблица 2. Сравнительный анализ ТСС электроэнергии по российским ценам на пределы ЯТЦ с учетом и без учета ТП, номера рецикла, дол. США

Наименование	Рецикл 1, 2	Рецикл 3	Рецикл 4
Начальная стадия ЯТЦ			
Уран	785 387,10	777 055,29	771 937,09
Конверсия	333 789,52	330 248,50	328 073,26
Обогащение	2 857 008,75	2 855 926,80	2 855 262,16
Изготовление топлива	3 158 909,09	3 158 909,09	3 158 909,09
ТП	10 702,64	10 683,21	10 671,27
Итого (по начальной стадии ЯТЦ):	7 135 094,46	7 122 139,68	7 114 181,60
Заключительная стадия ЯТЦ: переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ)			
Транспортировка и промежуточное хранение	752 121,21	752 121,21	752 121,21
Переработка ОЯТ	9 401 515,15	9 401 515,15	9 401 515,15
Остекловывание и захоронение РАО	1 128 181,82	1 128 181,82	1 128 181,82
ТП	225 636,36	225 636,36	225 636,36
Итого (по заключительной стадии ЯТЦ):	11 281 818,18	11 281 818,18	11 281 818,18
Стоимость топлива всего:	18 416 912,64	18 403 957,86	18 395 999,78
ТСС (с учетом ТП), цент/кВтч	0,25037	0,250196	0,2500891
ТСС (без учета ТП), цент/кВтч	0,2473397	0,2471657	0,2470588

Таблица 3. Сравнительный анализ ТСС электроэнергии по мировым ценам на пределы ЯТЦ с учетом и без учета ТП, номера рецикла, дол. США

Наименование	Рецикл 1, 2	Рецикл 3	Рецикл 4
Начальная стадия ЯТЦ			
Уран	863 925,81	854 760,82	849 130,80
Конверсия	98 173,39	97 131,91	96 492,14
Обогащение	5 118 807,34	5 116 868,84	5 115 678,03
Изготовление топлива	1 692 272,73	1 692 272,73	1 692 272,73
ТП	11 659,77	11 641,55	11 630,36
Итого (по начальной стадии ЯТЦ):	7 773 179,27	7 761 034,30	7 753 573,69
Заключительная стадия ЯТЦ: переработка отработавшего ядерного топлива (ОЯТ)			
Транспортировка и промежуточное хранение	1 128 181,82	1 128 181,82	1 128 181,82
Переработка ОЯТ	15 418 484,85	15 418 484,85	15 418 484,85
Остекловывание и захоронение РАО	1 880 303,03	1 880 303,03	1 880 303,03
ТП	368 539,39	368 539,39	368 539,39
Итого (по заключительной стадии ЯТЦ):	18 426 969,70	18 426 969,70	18 426 969,70
Стоимость топлива всего:	26 200 148,96	26 188 004,00	26 180 543,39
ТСС (с учетом ТП), цент/кВтч	0,3568183	0,3566552	0,356555
ТСС (без учета ТП), цент/кВтч	0,3518688	0,3517057	0,3516055

Получена стоимость плутония по российским ценам, которая составляет в случае переработки без дальнейшего рецикла 36 107,76 дол. США/кг, в случае рецикла 1 и 2 (приблизительно) – 13 046,63 дол. США/кг, рецикла 3 – 13 037,56 дол. США/кг, рецикла 4 – 13 031,99 дол. США/кг. Результаты соответствуют аналогичной стоимости урана, обогащенного до 93%, которая составляет 13 840,23 дол. США/кг. В реакторах на тепловых нейтронах планируется использование РЕМИКС-топлива, получаемого из неразделенной смеси регенерированного урана и плутония с добавлением небольшого количества обогащенного урана, в отличие от МОКС-топлива для реакторов на быстрых нейтронах, где происходит сначала выделение отдельно урана и плутония из ОЯТ. Последнее существенно повышает стоимость его изготовления. В целом, рассуждая логически, с точки зрения формирования ТСС электроэнергии реактора ВВЭР-1000 целесообразным является рециклирование топлива, что обеспечивает своего рода утилизацию плутония, снижение объемов ОЯТ и РАО, а следовательно, и стоимости захоронения. При переработке ОЯТ необходимо учитывать, что стоимость хранения выделенного плутония составляет 1–2 дол. США/г [13], что в случае возложения обязательств по оплате хранения на эксплуатирующие организации повлечет за собой рост тарифов на электроэнергию. Показано, что стоимость переработки ОЯТ на зарубежных заводах в 1,63 раза выше, чем на российских. Следовательно, для иностранных участников рынка ядерных технологий было бы целесообразно перерабатывать топливо в РФ, что, в свою очередь, становится более выгодным для отечественных предприятий в случае «слабого» рубля. Контракты на переработку ОЯТ с зарубежными заказчиками заключаются в валюте, а более низкий курс рубля обеспечивает большую цену контракта в рублях (влияние курсовых разниц).

Выводы. Разработанная авторская методика формирования ТСС электроэнергии АЭС позволяет учесть при оценке стоимости электроэнергии влияние стратегии обращения с ОЯТ (прямое захоронение или переработка), рециклирование топлива, ТП, стоимостную оценку эффективности использования уран-плутониевого топлива (РЕМИКС-топлива) в тепловых реакторах. Полученные результаты расчета ТСС электроэнергии, произведенного на АЭС с реакторов ВВЭР-1000 по авторской методике, свидетельствуют, что ТСС электроэнергии по российским ценам существенно ниже, чем по мировым, несмотря на более низкую стоимость переделов начальной стадии ЯТЦ. Последнее позволяет заключить, что в случае снижения цен на природный уран, конверсию, обогащение и фабрикацию топлива на мировом рынке преимущества российских

технологий по обращению с ОЯТ будут нивелированы ввиду того, что результаты расчетов говорят о снижении ТСС с каждым последующим рециклом, в отличие от рециклирования. Замедление темпов снижения ТСС происходит в зависимости от рецикла, что, по нашему мнению, связано с изменением изотопного состава ОЯТ. Следует отметить, что влияние ТП оценивается как незначительное (в пределах 0,1–1,41 % роста ТСС). Стоимость плутония, соответствующего по глубине выгорания урану, обогащенному до 93 %, ниже на 6,08 % стоимости урана (93 %), что позволяет говорить в перспективе промышленной технологии изготовления уран-плутониевого (РЕМИКС) топлива об экономической привлекательности.

Авторы выражают глубокую благодарность ведущему научному сотруднику АО «ГЦН РФ – ФЭИ», канд. физ.-мат. наук Г.М. Жердеву за неоценимые советы в области нейтронно-физического расчета и изотопной кинетики ядерных реакторов.

Список литературы

1. **Соколова И.Д.** Обеспеченность мировой ядерной энергетики природным ураном // Атомная техника за рубежом. – 2015. – № 3. – С. 3–13.
2. **Fukaya Y., Goto M.** Sustainable and safe energy supply with seawater uranium fueled HTGR and its economy // Annals of Nuclear Energy. – 2017. – Vol. 99. – P. 19–27.
3. **Михалевич А.А.** Атомная энергетика: перспективы для Беларуси. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 262 с.
4. **Мосеев П.А., Коробейников В.В., Мосеев А.Л.** Оптимизация управления складскими запасами плутония в замкнутом топливном цикле с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2013. – № 2. – С. 123–132.
5. **Разработка** математической модели топливного цикла атомной энергетики, состоящей из тепловых и быстрых реакторов / В.М. Декусар, В.С. Каграманян, А.Г. Калашников и др. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 119–132.
6. **Жердев Г.М., Цибуля А.М.** Аннотация комплекса WIMS-ABBN // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2000. – № 2. – С. 79–84.
7. **Головки Ю.Е., Кощеев В.Н., Жердев Г.М.** Применение метода наименьших квадратов для анализа непротиворечивости интегральных бенчмарк-экспериментов из справочника ICSBER Handbook и оценка константной погрешности расчетов критичности // Научная сессия НИЯУ МИФИ-2015: аннотации докладов. – 2015. – Т. 3. – С. 321.
8. **Эволюция** изотопного состава регенерированного урана при многократном рецикле в легководных реакторах с подпиткой природным ураном / А.Ю. Смирнов, Г.А. Сулаберидзе, П.Н. Алексеев и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. – 2010. – № 4. – С. 70–80.
9. **Волк В., Хаперская А.** Возврат урана из отработавшего топлива РБМК в ядерный топливный

цикл // Атомная энергия. – 2010. – Т. 109, вып. 1. – С. 3–10.

10. Дьяченко А.И., Балагуров Н.А., Артисюк В.В. Использование регенерированного урана из топлива с глубоким выгоранием // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 135–143.

11. Ellis R.J. Prospects of Using Reprocessed Uranium in CANDU Reactors, in the US GNEP Program. Oak Ridge National Laboratory, PO Box, Oak Ridge, TN 37831–6172. 2008.

12. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor / V.P. Alferov, A.I. Radaev, M.V. Shchurovskaya etc. // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – Т. 77. – С. 273–280.

13. Пономарев-Степной Н.Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с замкнутым ядерным топливным циклом на основе БН и ВВЭР // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120, вып. 4. – С. 183–191.

14. Синева М.Н. Экономика ядерной энергетики: Основы технологии и экономики производства ядерного топлива. Экономика АЭС: учеб. пособие для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.

15. Осецкая М.М., Украинцев В.Ф., Галковская В.Е. Управление топливной составляющей (начальной и заключительной стадий ЯТЦ) себестоимости электроэнергии при формировании производственной программы на АЭС России // Экономика и предпринимательство. – 2017. – № 4–2 (81–2). – С. 590–599.

16. 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 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2015. – № 1. – С. 128–135.

References

1. Sokolova, I.D. Obespechennost' mirovoy yadernoy energetiki prirodnyim uranom [Natural uranium security of the world nuclear power industry]. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2015, no. 3, pp. 3–13.

2. Fukaya, Y., Goto, M. Sustainable and safe energy supply with seawater uranium fueled HTGR and its economy. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, vol. 99, pp. 19–27.

3. Mikhalevich, A.A. Atomnaya energetika: perspektivy dlya Belarusi [Nuclear power industry: prospects for Belarus]. Minsk: Belarus. navuka, 2011. 262 p.

4. Moseyev, P.A., Korobeinikov, V.V., Moseyev, A.L. Optimizatsiya upravleniya skladskimi zapasami plutoniya v zamknutom toplivnom tsikle s reaktorami na teplovykh i bystrykh neytronakh [Optimization of plutonium stock resources management in closed fuel cycle with thermal and fast neutron reactors]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2013, no. 2, pp. 123–132.

5. Dekusar, V.M., Kagramanyan, V.S., Kalashnikov, A.G., Korobeinikov, V.V., Korobitsyn, V.E., Klinov, D.A. Razrabotka matematicheskoy modeli toplivnogo tsikla atomnoy energetiki, sostoyashchey iz teplovykh i bystrykh reaktorov [Development of a mathematical model of the nuclear power plant fuel cycle including thermal and fast neutron reactors]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2010, no. 4, pp. 119–132.

6. Zherdev, G.M., Tsubulya, A.M. Annotatsiya kompleksa WIMS-ABBN [A short description of the

WIMS-ABBN complex]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Yaderno-reaktornye konstanty*, 2000, no. 2, pp. 79–84.

7. Golovko, Yu.E., Koshcheyev, V.N., Zherdev, G.M. Primenenie metoda naimen'shikh kvadratov dlya analiza neprotivorechivosti integral'nykh benchmark-eksperimentov iz spravochnika ICSBEP Handbook i otsenka konstantnoy pogreshnosti raschetov kritichnosti [Application of the least squares method to analyzing the consistency of integral benchmark experiments from the ICSBEP Handbook and evaluation of the constant error of criticality calculations]. *Nauchnaya sessiya NIYaU MIFI-2015: annotatsii dokladov* [A scientific session of the National Research Nuclear University MPhL-2015], 2015, vol. 3. 321 p.

8. Smirnov, A.Yu., Sulaberidze, G.A., Alekseyev, P.N., Smirnov, A.Yu., Sulaberidze, G.A., Alekseyev, P.N., Dudnikov, A.A., Nevinitisa, V.A., Proselkov, V.N., Chibinyayev, A.V. Evolyutsiya izotopnogo sostava regenerirovannogo urana pri mnogokratnom retsikle v legkovodnykh reaktorakh s podpitkoy prirodnym uranom [Evolution of isotopic composition of reprocessed uranium under multiple recycling in light-water reactors with a natural uranium make-up]. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika yadernykh reaktorov*, 2010, no. 4, pp. 70–80.

9. Volk, V., Khaperskaya, A. Vozvrat urana iz otrabotavshogo topliva RBMK v yadernyy toplivnyy tsikl [Uranium recovery from high burn-out fuel of the high power reactor to the nuclear fuel cycle]. *Atomnaya energiya*, 2010, vol. 109, issue 1, pp. 3–10.

10. Dyachenko, A.I., Balagurov, N.A., Artisyuk, V.V. Ispol'zovanie regenerirovannogo urana iz topliva s glubokim vygoraniem [Using of uranium recovered from high burn-out fuel]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2012, no. 1, pp. 135–143.

11. Ellis, R.J. Prospects of Using Reprocessed Uranium in CANDU Reactors, in the US GNEP Program. Oak Ridge National Laboratory, PO Box, Oak Ridge, TN 37831–6172. 2008.

12. Alferov, V.P., Radaev, A.I., Shchurovskaya, M.V., Tikhomirov, G.V., Hanan, N.A., Van Heerden, F.A. Comparative validation of Monte Carlo codes for the conversion of a research reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 77, pp. 273–280.

13. Ponomarev-Stepnoi, N.N. Dvukhkomponentnaya yadernaya energeticheskaya sistema s zamknutym yadernym toplivnym tsiklom na osnove BN i VVER [A two-component nuclear power system with a closed nuclear fuel cycle based on fast neutron and boiling water nuclear reactors]. *Atomnaya energiya*, 2016, vol. 120, issue 4, pp. 183–191.

14. Sinev, M.N. *Ekonomika yadernoy energetiki: Osnovy tekhnologii i ekonomiki proizvodstva yadernogo topliva. Ekonomika AES* [Economics of nuclear power industry: Basics of technology and economy of nuclear fuel production]. Moscow, Energoatomizdat, 1987. 480 p.

15. Osetskaya, M.M., Ukraintsev, V.F., Galovskaya, V.E. Upravlenie toplivnoy sostavlyayushchey (nachal'noy i zaklyuchitel'noy stadiy YaTTs) sebestoimosti elektroenergii pri formirovanii proizvodstvennoy programmy na AES Rossii [Management of the fuel component (of the initial and final stages of the nuclear fuel cycles) of the electric power cost in developing a production plan for the Russian nuclear power plants]. *Ekonomika i predprinimatel'stvo*, 2017, no. 4–2(81–2), pp. 590–599.

16. Fedorov, M.I., Dyachenko, A.I., Balagurov, N.A., Artisyuk, V.V. Formirovanie postavok zash-

chishchennogo yadernogo topliva na osnove regenerirovannogo urana dlya stran-retsipientov rossiyskikh yadernykh tekhnologiy [Planning of supply of protected nuclear fuel based on reprocessed uranium to the countries

acting as recipients of Russian nuclear technologies]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2015, no. 1, pp. 128–135.

Осецкая Мария Михайловна,
АНО ДПО «Техническая академия Росатома»,
руководитель проекта, кандидат экономических наук,
e-mail: MMOsetskaya@rosatomtech.ru
Osetskaya Maria Mikhailovna,
Rosatom Technical Academy,
Project leader, Candidate of Economic Sciences (PhD in Economics),
e-mail: MMOsetskaya@rosatomtech.ru

Алленых Марина Анатольевна,
ФГБОУВО «Финансовый университет»,
доцент кафедры экономической теории, кандидат экономических наук,
e-mail: marina_allenykh@mail.ru
Allenykh Marina Anatolyevna,
Financial University under the Government of the Russian Federation,
Associate Professor of the Department of Economics, Candidate of Economic Sciences (PhD in Economics),
e-mail: marina_allenykh@mail.ru