

Экономика сбалансированного ядерного топливного цикла с инновационным РЕМИКС-топливом

Ульянин Юрий Александрович,

заместитель генерального директора, АО «Техснабэкспорт», Москва, Россия

E-mail: UljaninJ@tenex.ru

Харитонов Владимир Витальевич,

доктор физико-математических наук, профессор, НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

Приведены оценки конкурентоспособности сбалансированного замкнутого ядерного топливного цикла тепловых реакторов типа ВВЭР, PWR и BWR с инновационным уран-плутониевым РЕМИКС-топливом, получаемым путем переработки отработавшего топлива. Рассмотрены три варианта РЕМИКС-топлива – А, Б и С, отличающиеся способом достижения обогащения (концентрации делящихся изотопов ^{235}U и ^{239}Pu), необходимого для реакторов. В качестве критерия конкурентоспособности используется топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС, отражающая все затраты топливного цикла как до реакторной, так и после реакторной стадии. Разработанная экономико-математическая модель топливного цикла позволяет рассчитывать стоимостные показатели компонентов ядерного топлива и топливную составляющую стоимости электроэнергии АЭС в зависимости от стоимостных характеристик ключевых технологических переделов, включая переработку отработавшего топлива, обогащение регенерированного и природного урана, изготовление тепловыделяющих сборок, обращение с радиоактивными отходами, и проводить сравнение с традиционным топливным циклом.

Uliyanin Yu.A.,

Deputy General Director, JSC «Techsnabexport», Moscow, Russia

E-mail: UljaninJ@tenex.ru

Kharitonov V.V.,

Doctor of Sciences (Physical and Mathematical), Professor, NRNU MEPhI, Moscow, Russia

E-mail: vvkharitonov@mephi.ru

ECONOMY OF THE BALANCED NUCLEAR FUEL CYCLE AT INNOVATIVE REMIX-FUEL

The estimates of the competitiveness of the balanced closed nuclear fuel cycle with thermal reactors VVER, PWR and BWR and innovative REMIX-fuel are given. REMIX-fuel obtained by reprocessing spent fuel. Considered three options for REMIX-fuel – A, B and C, differing in the way of achieving enrichment (concentration of fissile isotopes ^{235}U and ^{239}Pu), needed for reactors. The fuel component of the NPP electricity cost is used as competitiveness criterion, which reflects all the costs of the fuel cycle for both before the reactor and after the reactor stages. The developed economic-mathematical model of the fuel cycle makes it possible to calculate a cost indicators of nuclear fuel components and the fuel components of the NPP electricity cost depending on the cost characteristics of key technological conversions, including

reprocessing of spent fuel, enrichment of regenerated and natural uranium, manufacture of fuel assemblies, radioactive waste management and compare with the traditional fuel cycle.

Ключевые слова: стоимость электроэнергии, АЭС, конкурентоспособность, сбалансированный топливный цикл, РЕМИКС-топливо, отработавшее топливо, переработка топлива.

Keywords: cost of electricity, nuclear power plants, competitiveness, balanced fuel cycle, REMIX fuel, spent fuel, fuel recycling.

ОПИСАНИЕ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ СБАЛАНСИРОВАННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА (ЯТЦ)

К началу 2021 г. в 31 стране мира работали 442 энергетических ядерных реакторов, производивших около 11% электроэнергии, причем почти в половине этих стран более 25% производимой электроэнергии приходилось на АЭС, а во Франции более 71%. Наибольшее количество действующих реакторов сосредоточено в США — 94 реактора, производящих почти 20% электроэнергии США. Быстро увеличивает парк ядерных реакторов Китай, где 49 реакторов производят около 5% электроэнергии. Для так называемых легководных корпусных реакторов типа ВВЭР, PWR и BWR, составляющих около 83% мирового парка реакторов, ежегодно требуется около 20 т топлива на ГВт электрической мощности. По экспертным оценкам в 2020 г. мировая потребность ядерной энергетики в топливе составила около 12 кт (12 000 т), из которых до 8 кт пришлось на топливо, требующее обогащения урана единственным делящимся изотопом ^{235}U до $x = 5\%$, и около 4 кт — на топливо для тяжеловодных реакторов типа CANDU, не требующих обогащения природного урана. В добываемом природном уране содержание делящегося изотопа ^{235}U очень мало — концентрация всего $s = 0,711\%$, что почти в 7 раз меньше необходимой для топлива. Остальная часть природного урана состоит из изотопа ^{238}U , который практически не делится, но частично может превращаться в другой делящийся изотоп — плутоний ^{239}Pu , которого в окружающей природе нет. Для производства и утилизации топлива создана сеть предприятий, объединенных в ядерный топливный цикл (ЯТЦ), подробно описанный в [1] и состоящий из предприятий до реакторной (начальной) стадии ЯТЦ (front-end) и после реакторной

(заключительной) стадии (back-end). Итогом до реакторной стадии ЯТЦ являются тепло-выделяющие сборки (ТВС) со свежим топливом массой около 0,5 т и обогащенным до 5% ураном-235. Из 163 таких ТВС состоит активная зона новейшего отечественного реактора ВВЭР-1200. Через 18 месяцев непрерывной работы реактора происходит частичная перегрузка топлива: изымается около четверти ТВС с отработавшим топливом и вместо них загружается свежее топливо. Обращение с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ), отличающимся от свежего топлива высокой радиоактивностью, составляет после-реакторную стадию ЯТЦ.

В мире накоплено более 300 кт отработавшего ядерного топлива, в котором осталось около 93,5% урана-238, примерно 1,5% не сгоревших изотопов урана-235 и плутония-239 и 5% продуктов деления урана и плутония [1–4]. То есть, в ОЯТ содержится всего около 5% не пригодных для дальнейшего использования продуктов деления. В остальной массе ОЯТ содержание делящихся изотопов ($\approx 1,5\%$) в два раза больше, чем в природном уране. Однако, в настоящий момент отсутствует единая стратегия обращения с ОЯТ, несмотря на ежегодный рост объема его накопления и ужесточение экологических требований. Подавляющая часть ОЯТ хранится в контейнерах на специальных площадках. В некоторых странах строятся подземные хранилища ОЯТ. Такая форма обращения с ОЯТ соответствует так называемому открытому ЯТЦ.

Россия, Франция и некоторые другие страны исходят из целесообразности переработки ОЯТ, существенно сокращающей объем подлежащих захоронению высокоактивных отходов и позволяющей получить регенерированный из ОЯТ уран и плутоний в качестве вторичного источника сырья для ядерной энергетики. В отечественной ядерной отрасли развива-

ется концепция «сбалансированного ядерного топливного цикла», включающего переработку ОЯТ в замкнутом ЯТЦ и направленного на повышение конкурентоспособности ядерной генерации за счет предложения клиентам комплексных решений по поставкам топлива и обращению с ОЯТ (рис. 1).

Настоящая работа посвящена определению конкурентоспособности сбалансированного замкнутого ЯТЦ для наиболее распространенных в мире реакторов типа ВВЭР (PWR, BWR) при использовании регенерированного уран-плутониевого топлива, изготовленного из переработанного отработавшего топлива тепловых реакторов. Различные варианты такого инновационного топлива, разработанного в нашей стране и получившего наименование РЕМИКС (REgenerated MIXture of U—Pu Oxides), отличаются способом достижения необходимого обогащения (концентрации делящихся изотопов ²³⁵U и ²³⁹Pu) [5, 6]. В качестве критерия конкурентоспособности сбалансированного ЯТЦ с РЕМИКС-топливом используется топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС, которая отражает все затраты топливного цикла как до реакторной, так и после реакторной стадии.

СОСТАВ РЕМИКС-ТОПЛИВА

Традиционное урановое топливо содержит только изотопы урана. В состав РЕМИКС-топлива входят, наряду с ураном, изотопы плу-

тония и некоторых актиноидов (нептуния, америция, кюрия) в небольших количествах. Как показано на рис. 1, в замкнутом сбалансированном ЯТЦ в результате переработки отработавшего топлива массой $M_{OЯТ}$ с концентрацией делящихся нуклидов $X_{OЯТ} \approx 1,5\%$ формируются три потока: радиоактивные отходы $M_{рао}$, состоящие из продуктов деления и, возможно, актиноидов, уран-плутониевая смесь $M_{см}$ с концентрацией делящихся нуклидов $X_{см}$ и регенерированный уран $M_{Uост}$, не вошедший в состав уран-плутониевой смеси и имеющий концентрацию урана-235 около $X_{Uрег} \approx 0,8\%$. Концентрация делящихся нуклидов в уран-плутониевой смеси $X_{см}$ зависит от ее массовой доли в топливе $\mu_{см}$. При увеличении массы смеси от 20 до 80% обогащение уран-плутониевой смеси уменьшается от 3–6% до 1,1–2,3%, т.е. чем больше массовая доля уран-плутониевой смеси в топливе, тем меньше в ней концентрация делящихся нуклидов. Поскольку РЕМИКС-топливо, как и традиционное урановое, должно иметь концентрацию делящихся нуклидов около 5%, то обеспечить это можно тремя способами, в соответствии с которыми топливо получило наименования РЕМИКС-А, С или Б (рис. 2).

Для производства топлива РЕМИКС-С требуется обогатить регенерат урана и добавить в топливо компоненту из обогащенного природного урана с обогащением до 20%. То есть такое топливо состоит из трех компонент: ре-

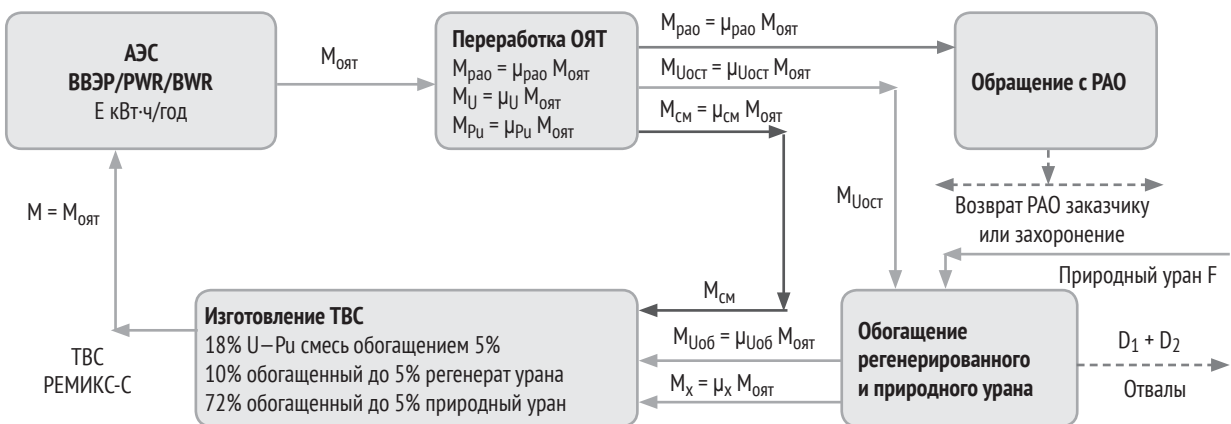


Рисунок 1. Схема материальных потоков в сбалансированном замкнутом ядерном топливном цикле тепловых реакторов с топливом РЕМИКС-С. Состав тепловыделяющих сборок (ТВС) условный.

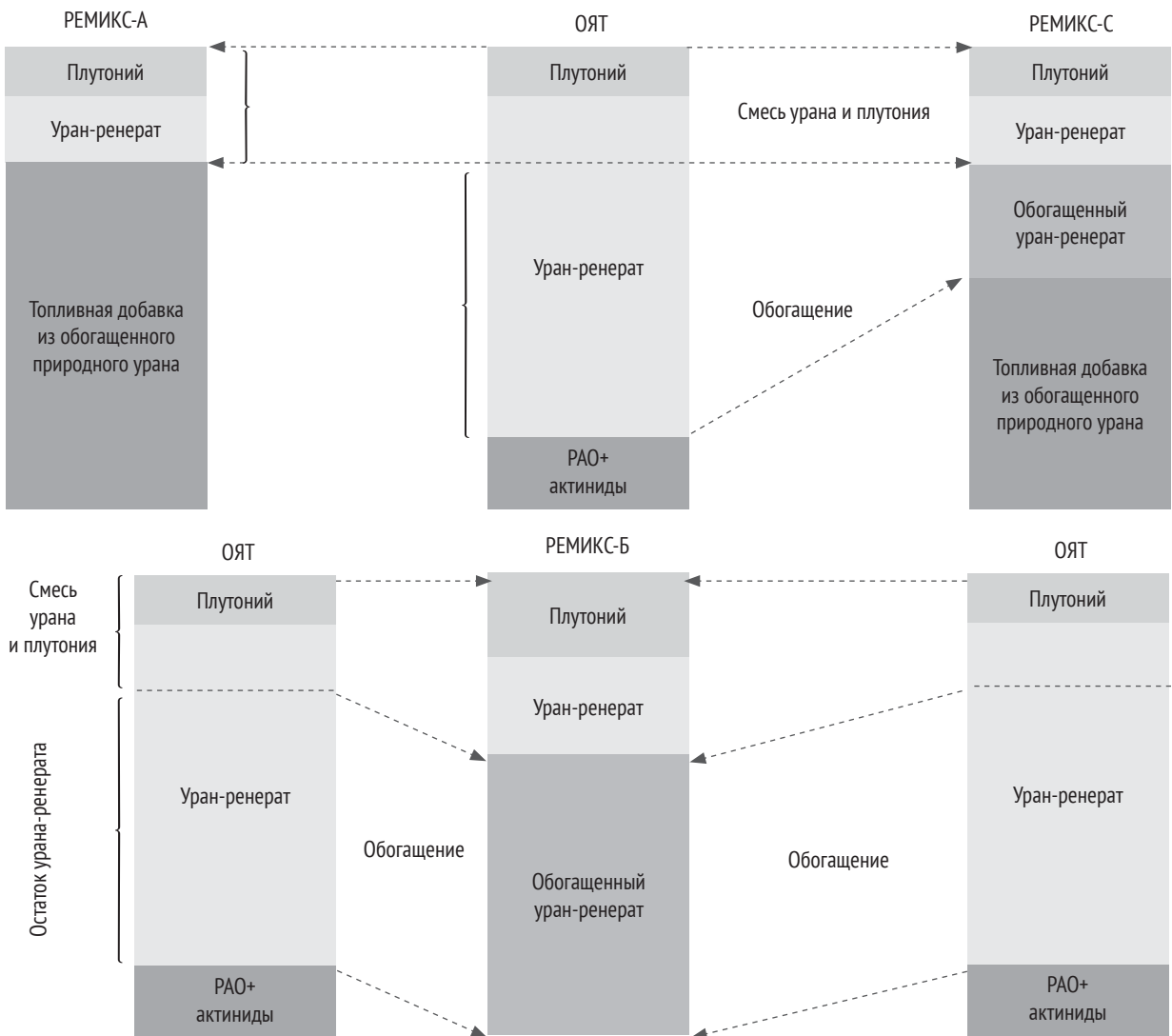


Рисунок 2. Схема формирования состава РЕМИКС-топлива модификаций А, С и Б из переработанного отработавшего топлива (масштаб условный).

генерированной из ОЯТ уран-плутониевой смеси, обогащенного остатка регенерата урана и добавки из обогащенного природного урана (рис. 2). Топливо РЕМИКС-А отличается тем, что регенерированный уран, не вошедший в состав уран-плутониевой смеси, не обогащается и отправляется на склад. Из каждого кг ОЯТ можно получить 1 кг свежего топлива РЕМИКС-А или РЕМИКС-С.

В производстве топлива РЕМИКС-Б исключена добавка из обогащенного природного урана, обогащению подвергается только остаток регенерата урана, не вошедшего в уран-плутониевую смесь. В этом ва-

рианте для получения 1 кг свежего топлива с заданным обогащением $X_M \leq 5\%$ требуется обогащать регенерат урана, полученный из $N > X_M/X_{OЯТ} \approx 3,3$ кг ОЯТ, что увеличивает содержание плутония в топливе в N раз по сравнению с РЕМИКС-А и С. В действительности диапазон изменения N очень мал, практически $N = 3,4-3,8$. В довольно узком диапазоне оказывается и допустимая массовая доля уран-плутониевой смеси, выделяемой из переработанного ОЯТ, ограниченная сверху величиной $\mu_{см} < 0,24-0,27 < 1/N$, что связано с ограничением обогащения регенерата урана величиной 20% и concentra-

цией ^{235}U в отвале разделительного производства $y=0,1-0,3\%$ (рис. 3).

ЗАТРАТЫ АЭС НА РЕМИКС-ТОПЛИВО

При заданной годовой потребности реактора в топливе M и годовом производстве электроэнергии E топливная составляющая стоимости электроэнергии определяется по выражению $LCOE_T = MC/E = C/\eta B$, где C — затраты АЭС на топливо в расчете на 1 кг урана (или тяжелых металлов), η — к.п.д.-брутто АЭС, B — среднее выгорание топлива, определяющее потребность реактора в топливе $M = E/\eta B$ и длительность топливной кампании между перегрузками [1, 7, 8]. Далее будем называть величину $C = C_{бэк} + C_U + C_{твс}$ стоимостью топливного цикла, которая отражает затраты на: 1) переработку отработавшего топлива и обращение с отходами $C_{бэк} = C_{оят} + \mu_{рао}C_{рао}$ при ценах на переработку $C_{оят}$ и на обращение с отходами $C_{рао}$ (затраты на переработку ОЯТ определяют затраты на получение уран-плутониевой смеси и регенерата урана), 2) производство обогащенного природного и регенерированного урана $C_U = \mu_x C_x + \mu_{Uоб} C_{Uоб}$ по цене C_x и $C_{Uоб}$ и 3) изготовление (фабрикацию) ТВС по цене

$C_{твс}$. В топливе РЕМИКС-А $\mu_{Uоб}=0$, в топливе РЕМИКС-Б $\mu_x=0$.

Цены на переработку отработавшего топлива, обращение с отходами и изготовление ТВС рассматриваются как входные варьируемые параметры. В настоящее время существует значительная неопределенность в этих ценах в связи с влиянием на них большого числа факторов и сравнительно не большого производственного опыта. Стоимость обогащения регенерированного и природного урана рассчитываются по стандартным форму-

Таблица 1. Взаимосвязь глубины отвала (концентрации ^{235}U в отвале, y , %) при обогащении регенерата урана и относительной массы переработанного ОЯТ для производства 1 кг топлива РЕМИКС-Б

| № кривой на рис. 3 | Глубина отвала y , % | Относительная масса переработанного ОЯТ, N |
|--------------------|------------------------|--|
| 1 | 0 | 3,30 |
| 2 | 0,1 | 3,45 |
| 3 | 0,2 | 3,63 |
| 4 | 0,3 | 3,83 |
| 5 | 0,377 | 4,00 |

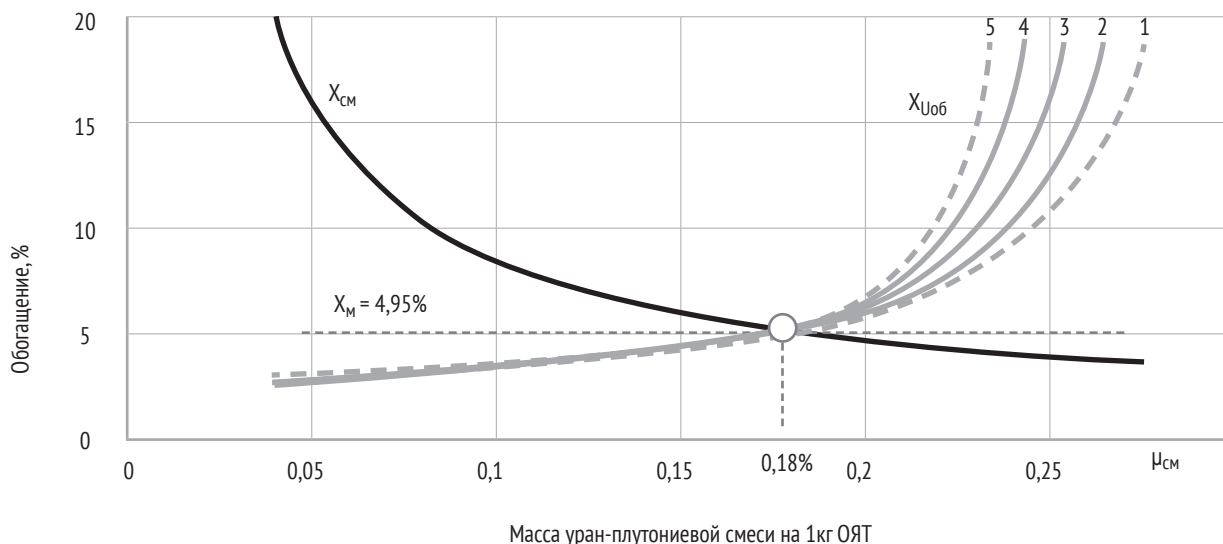


Рисунок 3. Влияние массы уран-плутониевой смеси (в расчете на 1 кг переработанного ОЯТ) на концентрацию в ней делящихся изотопов ^{235}U и ^{239}Pu ($X_{см}$, %, единая зависимость для РЕМИКС-А, Б и С) и на концентрацию ^{235}U в обогащенном регенерате урана топлива РЕМИКС-Б ($X_{Uоб}$, %) для разной глубины отвала разделительного производства ($y = 0-0,377\%$) в соответствии с табл. 1 при обогащении свежего топлива $X_m=4,95\%$.

лам для разделительного производства с учетом рыночных цен (котировок) на природный уран C_F , конверсию окиси-закиси урана в гексафторид урана C_{UF6} , работу разделения C_R и утилизацию отвала C_D [1, 7, 8]:

$$C_{\text{вых}} = \frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{вых}}} (C_{\text{вх}} + C_{UF6}) + \frac{R}{M_{\text{вых}}} C_R + \frac{D}{M_{\text{вых}}} C_D; \quad (1)$$

$$\frac{M_{\text{вх}}}{M_{\text{вых}}} = \frac{X_{\text{вых}} - y}{X_{\text{вх}} - y}; \quad D = M_{\text{вх}} - M_{\text{вых}}; \quad (2)$$

$$\frac{R}{M_{\text{вых}}} = [V(X_{\text{вых}}) + \frac{X_{\text{вых}} - X_{\text{вх}}}{X_{\text{вх}} - y} V(y) - \frac{X_{\text{вых}} - y}{X_{\text{вх}} - y} V(X_{\text{вх}})]. \quad (3)$$

Здесь $C_{\text{вых}}$ и $X_{\text{вых}}$ — стоимость и обогащение продукта на выходе разделительного производства; $C_{\text{вх}}$ и $X_{\text{вх}}$ — цена покупки и обогащение питания на входе разделительного производства; y — глубина отвала (концентрация ^{235}U в отвале); $M_{\text{вх}}$, $M_{\text{вых}}$ и D — массы питания, продукта и отвала; R — работа разделения изотопов урана (имеет размерность массы); $V(z) = (1-2z)\ln[(1-z)/z]$ — разделительный потенциал, $z=X/y$. При обогащении природного урана $M_{\text{вх}} = F$, $C_{\text{вх}} = C_F$ — цена природного урана, $X_{\text{вх}} = c = 0,711\%$ и $X_{\text{вых}} = X < 20\%$. При обогащении регенерата урана $M_{\text{вх}} = M_{\text{Уочт}}$, $C_{\text{вх}} = 0$, $X_{\text{вх}} = X_{\text{Урег}} \approx 0,8\%$ и $X_{\text{вых}} = X_{\text{Уоб}} < 20\%$.

Расчеты по формулам (1) — (3) показывают, что стоимость урановой компоненты в топливе РЕМИКС-А и С почти постоянна 902—930 долл. США/кг независимо от массовой доли уран-плутониевой смеси в топливе 0,15—0,85 и обогащения регенерата урана 3—7%. Это обусловлено, в основном, неизменностью массы делящихся изотопов в свежем топливе при изменении массовой доли уран-плутониевой смеси и обогащенных регенерированного и природного урана. В то же время стоимость компоненты из обогащенного до 20% природного урана достигает 5000 долл. США/кг, стоимость обогащенного до 7 или 20% регенерата урана — 1730 или 2700 долл. США/кг. Если принять одинаковыми цены переработки отработавшего топлива, обращения с отходами и изготовления ТВС с топливом РЕМИКС-С на уровне 700 долл. США/кг, то при типичном выгорании топлива до 5% суммарная стоимость после-реакторных технологических переделов и изго-

товления ТВС составляет 1435 долл. США/кг. Вклад обращения с отходами в этой сумме не превышает 2,5% вследствие малой массовой доли продуктов деления в отработавшем топливе (около 5%). В итоге цена топлива РЕМИКС-С обогащением 4,95% составит 2350 долл. США/кг для широкого диапазона изменения массовой доли уран-плутониевой смеси 0,15—0,85 и обогащения регенерата урана 3—7% при глубине отвала разделительного завода $y=0,16\%$ и рыночных котировках на природный уран 78 долл. США/кг, работу разделения 40 долл. США/ЕРР и утилизацию обедненного (отвального) гексафторида урана 7 долл. США/кг. Таким образом, влияние состава топлива РЕМИКС-С (т.е. массовых долей уран-плутониевой смеси, обогащенного регенерированного и природного урана) на его стоимость пренебрежимо мало по сравнению с неопределенностями цен на переработку отработавшего топлива и изготовление ТВС с таким топливом.

При тех же исходных ценах на переработку ОЯТ, обращение с РАО и фабрикации ТВС для производства 1 кг топлива РЕМИКС-Б требуется переработать $N=3,55$ кг ОЯТ и потратить на «back-end» $C_{\text{бэж}}=2610$ долл. США, т.е. в 3,55 раза больше по сравнению с производством 1 кг РЕМИКС-А или С. Масса уран-плутониевой смеси в топливе РЕМИКС-Б жестко привязана к N и составляет 64%, а ее обогащение равно обогащению готового топлива (рис. 3). Обогащение регенерата урана до 4,95% обходится в 550 долл. США/кг, а его доля в топливе составляет 36%. В итоге стоимость замкнутого ЯТЦ с топливом РЕМИКС-Б составляет $C \approx 3512$ долл. США/кг, что в 1,5 раза дороже по сравнению с топливом РЕМИКС-С или А вследствие больших затрат на переработку ОЯТ (74%).

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ЗАМКНУТОГО СБАЛАНСИРОВАННОГО ЯТЦ С РЕМИКС-ТОПЛИВОМ

О конкурентоспособности сбалансированного ЯТЦ с РЕМИКС-топливом свидетельствует сравнение топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС с таким топливом и с традиционным урановым топливом.

Или, что то же, отношение стоимости замкнутого топливного цикла C с РЕМИКС-топливом и стоимости открытого уранового цикла C_0 . Отношение C/C_0 , характеризующее отношение топливных составляющих стоимости электроэнергии АЭС при замкнутом и открытом топливном цикле, назовем критерием конкурентоспособности топлива РЕМИКС. При $C/C_0 < 1$ сбалансированный ЯТЦ с РЕМИКС-топливом выгоднее традиционного открытого ЯТЦ с урановым топливом. При $C/C_0 > 1$ наоборот, выгоднее урановый ЯТЦ.

При одинаковом обогащении 4,95% и выгорании 55 МВт·сут/кг обоих видов топлива расчет топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС (при к.п.д. 34%) с открытым урановым циклом дает 4,9 долл. США/МВт·ч, что ниже по сравнению с замкнутым ЯТЦ на 6% для топлива РЕМИКС-А или С (5,2 долл. США/МВт·ч) и в 1,6 раза для РЕМИКС-Б (7,8 долл. США/МВт·ч, если допустимо загружать реактор на 100% топливом РЕМИКС-Б, содержащим до 4% плутония). Здесь предполагалось, что стоимость изготовления (фабрикации) уранового топлива 350 долл. США/кг в 2 раза дешевле изготовления РЕМИКС-топлива, стоимость обращения с отработавшими урановыми ТВС 700 долл. США/кг, а стоимость обогащенного природного урана рассчитана и составила 1120 долл. США/кг, что позволило оценить стоимость открытого уранового цикла $C_0=2170$ долл. США/кг.

Приведенные результаты получены для рыночных цен на природный уран, конверсию и работу разделения изотопов урана, характерных для 2018 г., когда эти цены достигли минимальной величины, близкой к себестоимости. Накануне аварии АЭС «Фукусима» в Японии в 2011 г. цены на природный уран и работу разделения были в 2,5–3,5 раза выше цен 2018 г. Начиная с 2019 г. цены на природный уран и работу разделения стали вновь расти. Как следует из рис. 4, с ростом рыночных котировок на природный уран и работу разделения топливо РЕМИКС-С становится более конкурентоспособным и тем значительнее, чем ниже стоимость переработки отработавшего топлива. Однако даже при гипотетически нулевой стоимости переработки выигрывает в топливной составляющей стоимо-

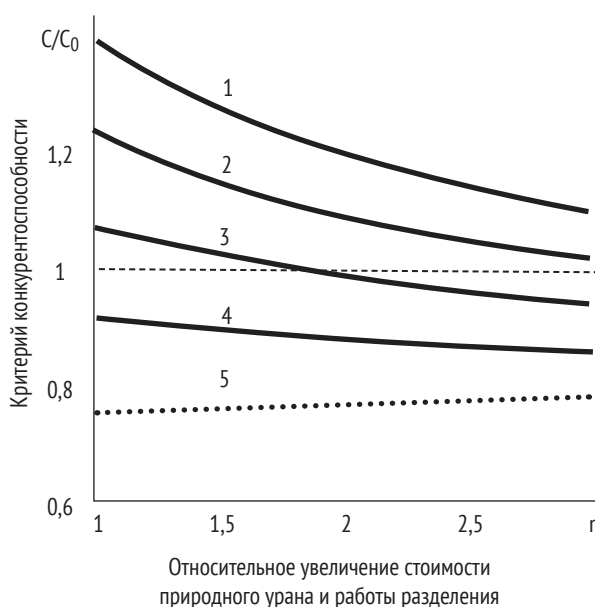


Рисунок 4. Расчетная зависимость критерия конкурентоспособности топлива РЕМИКС-С от относительного увеличения стоимости природного урана и работы разделения от 1 до 3 раз, стоимости переработки отработавшего топлива: 1400 долл. США/кг (1), 1050 (2), 700 (3), 350 (4) и 0 (5) при обогащении топлива 4,95%, добавки из обогащенного природного урана 19%, регенерата урана 5%, ценах $C_{\text{рао}}=C_{\text{твс}}=C_{\text{отр0}}=700$ долл. США/кг, $C_{\text{твс0}}=350$ долл. США/кг, массовых долях уран-плутониевой смеси $\mu_{\text{см}}=80\%$, топливной добавки $\mu_{\text{х}}=18\%$, обогащенного регенерата урана $\mu_{\text{уоб}}=2\%$.

сти электроэнергии при внедрении такого топлива не превышает 25%, как и в случае с топливом РЕМИКС-А.

Если стоимость переработки превышает 1000 долл. США/кг, то цикл с топливом РЕМИКС-С и А проигрывает открытому урановому даже при подорожании природного урана и работы разделения более чем в 2,5 раза по сравнению с принятыми в расчетах котировками на гексафторид природного урана 78 долл. США/кг и работу разделения 40 долл. США/ЕРР (рис. 4). Однако, при высокой стоимости переработки отработавшего топлива 1400 долл. США/кг топливо РЕМИКС-С приводит к росту топливной составляющей цены электроэнергии АЭС не более, чем на 40%.

Отметим, что топливная составляющая стоимости электроэнергии АЭС обычно не превышает 20%, поэтому подорожание то-

плива на 40% приведет к повышению стоимости электроэнергии АЭС на 8%, а удешевление топлива на гипотетически максимальную величину 25% приведет к снижению стоимости электроэнергии АЭС на 5%.

Наряду с экономическими оценками важное значение в сравнении замкнутого и открытого ЯТЦ играет и ряд других параметров. Так, благодаря переработке ОЯТ и использованию регенерированного урана и плутония в новом топливе сокращается в 20 раз масса радиоактивных отходов, подлежащих окончательной изоляции. Благодаря использованию регенерированной уран-плутониевой смеси в РЕМИКС-топливе достигается ежегодная экономия природного урана около 28–36% только при однократном использовании (без рециклирования) топлива РЕМИКС-С и 18–24% при использовании РЕМИКС-А. В производстве топлива РЕМИКС-Б природный уран вообще исключается.

Топливо РЕМИКС-А позволяет экономить ежегодно 8–18% работы разделения и сокращать накопление обедненного гексафторида урана на 16–17%. В замкнутом ЯТЦ с топливом РЕМИКС-С образование отвалного урана на 25–40% меньше, чем в открытом урановом цикле. Годовая потребность в работе разделения для производства топлива РЕМИКС-Б и годовое накопление обедненного гексафторида урана почти в 3 раза меньше по сравнению с традиционным открытым урановым циклом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые разработана экономико-математическая модель для оценки конкурентоспособности сбалансированного ядерного топливного цикла тепловых реакторов с инновационным РЕМИКС-топливом (типа РЕМИКС-А, Б и С) в условиях ожидаемого роста цен на природный уран. Модель позволяет оценить стоимостные показатели различных компонент топлива и топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС, работающей в замкнутом цикле, в зависимости от материального состава топлива, концентрации делящихся нуклидов в отработавшем топливе и стоимости его технологических переделов.

Показано, что конкурентоспособность топлива РЕМИКС по отношению к традицион-

ному урановому топливу повышается с ростом рыночных котировок на природный уран и работу разделения и снижением стоимости переработки отработавшего топлива. Возможное снижение топливной составляющей стоимости электроэнергии АЭС при внедрении такого топлива не превышает 25%, а стоимости электроэнергии АЭС — 5%. В то же время внедрение РЕМИКС-топлива позволяет ежегодно сокращать в 20 раз массу радиоактивных отходов, подлежащих окончательной изоляции, экономить природный уран и работу разделения, снижать накопление обедненного гексафторида урана по сравнению с открытым урановым топливным циклом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Харитонов В.В. Динамика развития ядерной энергетики. Экономико-аналитические модели. М.: НИЯУ МИФИ, 2014. 328 с.
2. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. NEA No. 7061. OECD 2013. 193 p.
3. Адамов Е.О., Ганев И.Х. Экологически безупречная ядерная энергетика. М.: НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, 2007. 145 с.
4. Годовой отчет АО «Атомэнергопром» за 2019. М.: АО «Атомэнергопром», 2020. 109 с.
5. 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.
6. Ковалев Н.В., Зильберман Б.Я., Голецкий Н.Д., Синюхин А.Б. Новый подход к вторичному использованию отработавшего ядерного топлива тепловых реакторов в рамках концепции РЕМИКС //Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2020. №1. С. 67–77.
7. Экономика ядерного топливного цикла./Пер. с англ. Информ-Атом, 1999. 164 с.
8. Гордеев Б.К. Введение в экономику ядерного топливного цикла атомной энергетики. М.: ЦНИИАТОМИНФОРМ, 2001. 128 с.

REFERENCES

1. Kharitonov V.V. Nuclear Power Development Dynamics. Economical-Analytical Models. M., NRNU MEPhI, 2014. 328 p. (in Russian).

2. The Economics of the Back End of the Nuclear Fuel Cycle. NEA No. 7061. OECD. 2013. 193 p.

3. *Adamov E.O., Ganev I.K.* Environmentally friendly nuclear power. M.: NIKIET them. ON. Dollezhal, 2007, 45 p.

4. Annual Report of «Atomenergoprom» for 2019. M., Atomenergoprom, 2020. 109 p.

5. *Fedorov Yu.S., Bibichev B.A., Zilberman B.Y., Kudryavcev E.G.* Use of Regenerated Uranium and Plutonium in Thermal Reactors. Atomic Energy. 2005. V. 99. №2. pp. 136–141 (in Russian).

6. *Kovalev N.V., Zilberman B.Ya., Goletskiy N.D., Sinyukhin A.B.* A New Approach to Spent Nuclear Fuel Recycling for Light Water Reactors in the Frame of REMIX Concept // *Izv. Vuzov. Yadernaya Energetika*. 2020. №1. pp. 67–77 (in Russian).

7. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle. NEA, OECD. 1994. 175 p.

8. *Gordeev B.K.* Introduction to Economics of the Nuclear Fuel Cycle of Nuclear Power. M., CNI-IATOMINFORM, 2001. 128 p.



ГРАФИК ВЫХОДА ЖУРНАЛА «МИКРОЭКОНОМИКА» В 2021 г.

Периодичность издания — 6 номеров в год.

№1 (96) — Февраль:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 февраля;
- Выход номера — 28 февраля.

№2 (97) — Апрель:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 апреля;
- Выход номера — 29 апреля.

№3 (98) — Июнь:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 июня;
- Выход номера — 29 июня

№4 (99) — Август:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 августа;
- Выход номера — 29 августа.

№5 (100) — Октябрь:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 октября;
- Выход номера — 29 октября.

№6 (101) — Декабрь:

- Последний срок сдачи статьи в номер — 10 декабря;
- Выход номера — 29 декабря.