

# СИСТЕМНАЯ ТОПЛИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДИМОЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ЯЭС С ЗАМКНУТЫМ УРАН-ПЛУТОНИЕВЫМ ЯТЦ

**А.В. Зродников, В.М. Декусар, О.С. Гурская**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

*249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*

**Р**

Предложен подход к расчетному определению приведенной удельной топливной составляющей стоимости  $TCC$  производимой электроэнергии для быстрого реактора двухкомпонентной ЯЭС с учетом наработки плутония. Подход основан на учете дополнительного экономического эффекта, который может быть получен за счет реализации по рыночной цене природного урана, высвобождаемого при замещении тепловых реакторов быстрыми реакторами с МОКС-топливом на основе расширенно воспроизводимого в быстром реакторе плутония. При этом необходимым условием становится совместное рассмотрение реакторных частей топливного цикла для быстрых и тепловых реакторов. Получены соотношения, связывающие основные нейтронно-физические и топливные характеристики с экономическими показателями АЭС и их топливного цикла. С использованием изложенной методики проведено расчетное исследование  $TCC$  для быстрого натриевого реактора. Расчеты показали, что в рассмотренном случае учет наработки плутония приводит к снижению  $TCC$  почти в два раза и, следовательно, к значительному снижению полной удельной стоимости производства электроэнергии – значения  $LCOE$ .

**Ключевые слова:** замыкание ядерного топливного цикла, технико-экономические показатели, наработка плутония, удельная приведенная топливная составляющая стоимости, дополнительный доход, быстрый и тепловой реакторы.

## ВВЕДЕНИЕ

Замыкание ядерного топливного цикла решает задачу по использованию в ЯЭС второго, помимо энергии, продукта – вторичных ядерных материалов, извлекаемых из ОЯТ. Среди них наибольший интерес представляет плутоний как дополнительный в настоящее время энергетический ресурс АЭ. При исчерпании экономически приемлемых по цене запасов природного урана этот ресурс должен стать основным для дальнейшего развития ЯЭС. В то время как электрическая или тепловая энергии в настоящее время имеют явного потребителя и соответствующим образом оплачиваются, попутное производство плутония пока не имеет денежного эквивалента. При этом затраты на производ-

© *А.В. Зродников, В.М. Декусар, О.С. Гурская, 2021*

ство плутония фактически включаются в топливную составляющую стоимости производства электроэнергии  $TCC$ , что приводит к деформации экономических показателей АЭС. При этом разделить затраты на производство электроэнергии и производство плутония, которое всегда имеет место при облучении ядерного топлива на основе урана, практически невозможно. Вследствие этого традиционный сопоставительный технико-экономический анализ может привести к ошибочному выбору траектории дальнейшего развития АЭ.

Одним из возможных критериев по учету наработки плутония может стать модифицированная  $TCC$  с учетом дополнительной выгоды, получаемой от использования нарабатываемого плутония в качестве товара. Однако отсутствие рынка плутония вследствие его специфических характеристик не позволяет определить указанную выгоду. В этих условиях говорить о цене плутония – денежных средствах, за которые продавец готов передать покупателю свой товар (в данном случае плутоний) не приходится. По-видимому, можно утверждать, что такая ситуация в силу специфики товара сохранится и в обозримом будущем.

Вместе с тем, как всякий произведенный продукт плутоний имеет свою стоимость, которая, с одной стороны, должна покрывать издержки производителя на его производство. С другой стороны, плутоний, являясь эффективным энергоносителем, за счет своих ядерно-физических свойств позволяет осуществить в быстром спектре нейтронов расширенное воспроизводство ядерного топлива. Тем самым технология быстрых реакторов на плутониевом топливе фактически становится возобновляемым источником энергии, что является необходимым условием для развития ЯЭ на любую обозримую перспективу.

Разработанный подход к определению  $TCC$  позволяет фактически свести к единому комплексному критерию, выраженному в денежной форме –  $TCC$ , набор основных параметров, описывающих физические характеристики и экономические показатели реакторов и ЯЭС в целом, которые имеют весьма разнородный характер. Предлагаемый критерий может оказаться полезным при системном многокритериальном анализе ЯЭС [1, 2], сравнении технико-экономических показателей ЯЭС с реакторами различных типов и выборе путей развития АЭ.

Такой подход к определению  $TCC$  сформулирован впервые.

### **ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД К РАСЧЕТУ ТОПЛИВНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ СТОИМОСТИ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА АЭС**

Напомним основные положения традиционного подхода к расчету  $TCC$  [3 – 7].

В традиционном определении  $TCC$  представляет собой среднее за весь срок службы АЭС значение топливных затрат на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии. Так как затраты, связанные с топливом, производятся в течение всего его жизненного цикла, охватывающего период до 100 и более лет, для учета неравноценности денежных затрат используется метод приведенных затрат [3 – 5], т.е. при этом фактически учитывается стоимость денег.

Уравнивание приведенных доходов и расходов топливного цикла позволяет определить постоянную приведенную удельную топливную составляющую стоимости или в терминологии работ [4, 5] величину  $LUFC$  (Levelized Unit Fuel Cost):

$$TCC = \frac{\sum_{\text{этапы}} \sum_{\text{время}} F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}{\sum_{\text{время}} E(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}. \quad (1)$$

Приведенное соотношение для расчета  $TCC$  относится к однопродуктовой модели, в которой учитывается только один источник дохода – продажа электроэнергии.

### ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ НАРАБОТКИ ПЛУТОНИЯ В ЯЭС

Рассмотрим возможность учета наработки плутония при анализе денежных и топливных потоков и стоимостных показателей ЯЭС, как это сделано в работе [8] при рассмотрении цены плутония. При этом предполагается, что ЯЭС включает в себя АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и инфраструктуру замкнутого ЯТЦ. Ввод в эксплуатацию быстрого реактора эквивалентной мощности вместо теплового типа ВВЭР позволяет сэкономить ежегодно порядка 200 т природного урана, чем обеспечивается возможность получения дополнительного дохода.

Дополнительный доход может быть определен через рыночную цену сэкономленного природного урана. Получение этого дохода возможно также при продаже соответствующих количеств обогащенного урана, ТВС для тепловых реакторов и т.п., полученного на основе этого урана.

Поскольку высвобождение урана имеет место в течение всего жизненного цикла АЭС, дополнительный доход должен быть приведен (дисконтирован) к конкретной дате аналогично тому, как это делается при определении топливных затрат [3, 5 – 7].

Соотношение для дисконтированного дохода  $E_{\text{дон}}$ , получаемого за весь проектный ресурс энергоблока длительностью  $L$  для случая природного урана, можно записать как

$$E_{\text{дон}} = \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t_0+L+\Delta t} \frac{C_U(1+es_{\text{дон}})^{(t-t_0)} \Delta G^U(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}, \quad (2)$$

где  $E_{\text{дон}}$  – искомый дополнительный доход, получаемый за счет экономии природного урана;  $t_0$  – базовая дата (обычно это момент пуска реактора в эксплуатацию);  $L$  – длительность жизненного цикла АЭС;  $r$  – норма дисконтирования;  $C_U$  – удельная стоимость продукции, поступающей на рынок (в данном случае это природный уран), за счет которой обеспечивается дополнительный доход, \$/кг;  $es_{\text{дон}}$  – годовая эскалация удельной цены продукции, выставляемой на продажу (может быть как положительной, так и отрицательной или нулевой);  $\Delta G^U$  – масса продукции, которая может ежегодно поставляться на рынок (природный уран) при замене тепловых реакторов на быстрые;  $\Delta t$  – временной лаг (интервал запаздывания или опережения) между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана (или ТВС) и базовой датой.

Для упрощения дальнейшего изложения примем, что  $\Delta G^U(t)$  в формуле (2) является непрерывной функцией, а норма дисконтирования  $r$  – постоянной. Аналогичное допущение примем и для всех остальных суммируемых функций времени, рассматриваемых в работе. Тогда сумму в (2) можно заменить интегралом с одновременной заменой степенных показателей на экспоненты в соответствии с соотношениями вида  $1/(1+r)^t = \exp(-\lambda_d t)$  и выражение для дисконтированного к моменту времени  $t_0$  дохода записать как

$$E_{\text{дон}} = \int_{t_0+\Delta t}^{t_0+L+\Delta t} C_U \Delta G^U(t) \exp(-(\lambda_d - \lambda_{es})(t - t_0)) dt, \quad (3)$$

$$\lambda_d = \ln(1+r), \quad \lambda_{es} = \ln(1+es_{\text{дон}}). \quad (4)$$

Очевидная (гарантированная) возможность экономии урана наступает после загрузки в реактор топлива, изготовленного на основе выделенного плутония, т.е. при этом неявно предполагается замещение «непродаваемого» плутония вполне рыночным ураном. Обычно это происходит спустя несколько лет после выгрузки соответствующей партии ОЯТ из реактора. Следовательно, в этом случае значение  $\Delta t$  положительно и составляет, как правило, не менее пяти – семи лет.

Получение дохода от продажи сэкономленного урана возможно и до получения соответствующего эквивалента в виде выделенного плутония. Более того, в принципе оно возможно и до ввода в эксплуатацию АЭС с быстрым реактором. Для этого просто не-

обходим запас урана на складе. В этих случаях значение  $\Delta t$  отрицательно, а абсолютное его значение может находиться в довольно широких пределах. Величина  $\Delta t$  может принимать и нулевое значение, соответствующее одновременности начала получения дохода от продажи электричества и продажи сэкономленного урана.

### РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ СИСТЕМЫ ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Количество высвобождаемого природного урана и соответствующая экономическая выгода при замещении тепловых реакторов на быстрые могут быть определены в результате математического моделирования конкретной ЯЭС. Получаемый при этом результат носит сугубо частный характер, относящийся только к данной ЯЭС. Вместе с тем наибольший интерес представляют модели, претендующие на некоторую универсальность.

С этой целью рассмотрим простейшую математическую модель ЯЭС с растущей установленной мощностью. Предположим, что в состав энергогенерирующей части такой ЯЭС входят только быстрые реакторы одного типа с постоянными характеристиками, работающие на смешанном уран-плутониевом топливе. Быстрые реакторы характеризуются коэффициентом накопления вторичного плутония  $KH$ , под которым понимается отношение ежегодной выгрузки плутония из быстрого реактора к его ежегодной загрузке. Предполагается, что в системе имеет место равновесный изотопный состав плутония.

Будем полагать, что рост установленных мощностей быстрых реакторов в ЯЭС определяется только возможностями системы по наработке плутония. Под дополнительным доходом в этом случае понимаются сэкономленные затраты, которые бы понесла ЯЭС при своем развитии с достижением такого же уровня мощности, но только на тепловых реакторах, без ввода в эксплуатацию быстрых реакторов.

Рассмотрим уравнения, описывающие состояние системы во времени по количеству быстрых реакторов. При этом будем исходить из концепции системы реакторов [9], в которой весь нарабатываемый избыточный плутоний расходуется на ввод новых реакторов.

На запуск одного быстрого реактора с условием заполнения его внешнего топливного цикла требуется плутония

$$G_{Pu} = G_{Pu}^0 + T_{вн} (G_{Pu}^0 / T), \quad (5)$$

где  $G_{Pu}^0$  – начальная загрузка плутонием быстрого реактора, т;  $T$  – длительность кампании ТВС быстрого реактора, годы;  $T_{вн}$  – длительность внешнего топливного цикла, годы.

Ежегодный избыток плутония из  $N_{БР}(t)$  быстрых реакторов составит

$$N_{БР}(t) \frac{G_{Pu}^0}{T} (KH - 1)(1 - \epsilon), \quad (6)$$

где  $\epsilon$  – потери плутония в топливном цикле.

Тогда скорость изменения количества быстрых реакторов описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dN_{БР}(t)}{dt} = N_{БР}(t) \frac{(KH - 1)(1 - \epsilon)}{T + T_{вн}} \quad (7)$$

с начальным условием  $N_{БР}(0) = N_{БР}^0$ .

Обозначим

$$\lambda_2 = (KH - 1)(1 - \epsilon) / (T + T_{вн}); \quad (8)$$

$\lambda_2$  связана с периодом удвоения мощности  $T_2$  в системе быстрых реакторов соотно-

шением

$$\lambda_2 = \ln 2 / T_2. \quad (9)$$

Тогда уравнение (7) можно представить выражением

$$\frac{dN_{БР}(t)}{dt} = \lambda_2 N_{БР}(t), \quad (10)$$

решение которого имеет вид

$$N_{БР}(t) = N_{БР}^0 \exp(\lambda_2(t - t_0)). \quad (11)$$

### РАСЧЕТ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ДОХОДА ОТ ЭКОНОМИИ ПРИРОДНОГО УРАНА

Для определения дополнительного дохода будем использовать формулу (3). В этой формуле количество высвобождаемого природного урана определится из соотношения

$$DG^U(t) = G_{ТР}^U N_{ТР}(t) = G_{ТР}^U x N_{БР}(t) = G_{ТР}^U x N_{БР}^0 \exp(\lambda_2(t - t_0)), \quad (12)$$

в котором число тепловых реакторов определяется из условия равенства энерговыработки на тепловых и вводимых быстрых реакторах на любом интервале времени

$$N_{ТР}(t) P_{ТР} \cdot КИУМ_{ТР} = N_{БР}(t) P_{БР} \cdot КИУМ_{БР}.$$

Количество вводимых быстрых реакторов зависит от количества наработанного плутония и определяется по формуле (11).

В формуле (12)  $x = (P_{БР} \cdot КИУМ_{БР}) / (P_{ТР} \cdot КИУМ_{ТР})$ ;  $P$  и  $КИУМ$  – значения установленной мощности и ее коэффициента использования для теплового (ТР) или быстрого (БР) реактора соответственно;  $N_{БР}^0$  – количество быстрых реакторов в момент времени  $t = t_0$ ;  $G_{ТР}^U$  – годовая потребность ТР в природном уране, кг.

Выполнив в (3) интегрирование, получим следующую формулу для определения дополнительного дохода:

$$E_{доп} = C_U G_{ТР}^U \cdot x N_{БР}^0 F(\lambda). \quad (13)$$

В формуле (13) введена функция  $F(\lambda)$ , в общем виде определяемая соотношением

$$F(\lambda) = \frac{\exp(\lambda \Delta t)}{\lambda} (\exp(\lambda L) - 1),$$

где  $\lambda = \lambda_2 - \lambda_d + \lambda_{es}$ , а  $\lambda_d$  и  $\lambda_{es}$  определены соотношением (4).

### ТОПЛИВНАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ С УЧЕТОМ НАРАБОТКИ ПЛУТОНИЯ В БЫСТРЫХ РЕАКТОРАХ

Топливную составляющую стоимости производства электроэнергии с учетом производства плутония определим так же, как это делается в традиционном подходе при уравнивании приведенных расходов и приведенных доходов. Однако в отличие от обычного подхода в приведенный доход помимо дохода от продажи электроэнергии включим доход от наработки плутония.

Тогда значение  $TCC$  с учетом наработки плутония определится из следующего выражения:

$$\begin{aligned} & \sum_i \sum_{t=t_0-T_i}^{t=t_0+T_{end}} F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)} = \\ & \quad \text{(топливные затраты)} \\ & = \sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{TCC \cdot E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}} + \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+\Delta t+L} \frac{C_U (1+es_{доп})^{(t-t_0)} G_U(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}. \end{aligned} \quad (14)$$

(доход от э/э)                      (доход от плутония)

Обозначения здесь такие же, как и в предыдущих формулах.

Отсюда можно получить соотношение для  $TCC$  в виде

$$TCC = \frac{\sum_i \sum_{t=t_0-T_1}^{t=t_0+L+T_{\text{end}}} \frac{F_i(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}} - \frac{C_U \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} (1+es_{\text{дон}})^{(t-t_0)} \frac{G_U(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}}, \quad (15)$$

Первое слагаемое справа в выражении (15) представляет собой топливную составляющую в однопродуктовой модели (производство только электроэнергии); обозначим ее как  $TCC_0$ .

Тогда выражение (15) можно переписать в виде

$$TCC = TCC_0 - \frac{C_U \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} (1+es_{\text{дон}})^{(t-t_0)} \frac{G_U(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}} \quad (16)$$

или

$$TCC = TCC_0 - \Delta(TCC).$$

Величина  $\Delta(TCC)$  представляет собой дополнительный доход в расчете на 1 кВт·ч электроэнергии, произведенной в системе вследствие отказа от использования природного урана в тепловых реакторах при их замене на быстрые. Эта же величина может трактоваться и как компенсация в этих условиях топливных затрат быстрых реакторов.

Переходя от суммирования к интегрированию по времени и сделав необходимые преобразования, получим

$$\Delta(TCC) = \frac{C_U G_{\text{ТР}}^U}{P_{\text{ТР}} K_{\text{ИУМ}} M_{\text{ТР}} 8766} f, \quad (17)$$

где 8766 – среднее количество часов в году;  $f$  – безразмерная функция переменных, характеризующих реактор и топливный цикл:

$$f = \frac{\lambda_{d2} \exp(\lambda \Delta t) (\exp(\lambda L) - 1)}{\lambda (\exp(\lambda_{d2} L) - 1)}, \quad (18)$$

где  $\lambda_{d2} = \lambda_2 - \lambda_d$ .

Функция  $f$  может быть названа относительной экономической эффективностью использования плутония в ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом топливном цикле. Чем больше значение этой функции в конкретном случае, тем эффективнее используется плутоний в данной ЯЭС, и тем самым могут снизиться (компенсироваться) в ЯЭС топливные затраты. Формула (18) показывает предельную относительную эффективность, которая может быть достигнута в соответствии с рассматриваемой моделью ЯЭС.

В число переменных, от которых в общем случае зависит  $TCC$ , входят переменные, ответственные как за экономические показатели, так и за нейтронно-физические характеристики реактора и топливного цикла. К экономическим показателям относятся норма дисконтирования, эскалация цены на природный уран и временной лаг между моментом времени выхода с этим товаром на рынок и временем ввода энергоблока в эксплуатацию.

За реактор и топливный цикл отвечает величина  $T_2$  – время удвоения установленной мощности системы быстрых реакторов. Значение  $T_2$  определяется коэффициентом накопления плутония, длительностью кампании топлива в реакторе и длительностью внешнего топливного цикла. Последняя, в основном, зависит от технологических осо-

бенностей топливного цикла и радиационных характеристик облученного топлива.

**ТСС быстрого натриевого реактора большой мощности с учетом наработки плутония**

Рассмотрим применение изложенной методики расчета ТСС на примере энергоблока с быстрым натриевым реактором большой мощности.

Расчеты базируются, в основном, на физико-технических характеристиках энергоблока большой мощности, принятых в соответствии с [3, 10 – 12].

Приняты следующие временные интервалы: после выгрузки из реактора ОЯТ находится в течение двух лет во внутриреакторном хранилище, затем один год в бассейне выдержки и еще один год затрачивается на переработку ОЯТ, изготовление свежего топлива и транспортные операции. Таким образом, длительность внешнего топливного цикла принята равной четырём годам.

Данные по топливным загрузкам и удельные затраты на переделы ядерного топливного цикла взяты из работ [10, 13 – 15]. Предполагаются централизованные производства МОКС-ТВС и ТВС боковой зоны воспроизводства, а также переработка ОЯТ. Следует отметить, что удельные затраты на переделы топливного цикла в значительной степени определяют значение ТСС, причем стоимости изготовления МОКС-топлива и переработки ОЯТ (принятые в расчетах соответственно \$3500/кг тм и \$770/кг тм) имеют решающее значение. Цена отвалного урана при расчетах принималась равной нулю.

Результаты расчетов топливной составляющей  $TCC_0$  при нормах дисконтирования ( $r$ ) 0, 5 и 10% без учета производства плутония приведены в табл. 1 ( $1 \text{ mills} = 1 \cdot 10^{-3} \$$ ).

Таблица 1

**$TCC_0$  [mills/кВт·ч] для быстрого реактора большой мощности при нормах дисконтирования 0, 5 и 10%**

Стадии (этапы) топливного цикла	$r = 0\%$	$r = 5\%$	$r = 10\%$
Начальная	6,45	7,45	8,87
Заключительная	3,95	1,60	1,18
Полная $TCC_0$	10,40	9,05	10,05

Как видно из данных таблицы, при изменении нормы дисконтирования от 0 до 10%  $TCC_0$  сначала уменьшается, а затем несколько возрастает. Немонотонная зависимость  $TCC_0$  как функции от нормы дисконтирования  $r$  объясняется разнонаправленностью изменения вкладов в  $TCC_0$  начальной и заключительной стадий топливного цикла.

Таблица 2

**Технико-экономические показатели быстрого реактора большой мощности с учетом рыночной стоимости высвобождаемого природного урана при  $T_2 \rightarrow \infty$**

Цена урана, \$/кг	$\Delta(TCC)$ , mills/кВт·ч	$TCC$ , mills/кВт·ч			Дополнительный доход, \$		
		$r = 0\%$	$r = 5\%$	$r = 10\%$	$r = 0\%$	$r = 5\%$	$r = 10\%$
50	1,04	9,36	8,01	9,01	0,60	0,20	0,11
100	2,07	8,33	6,98	7,98	1,20	0,39	0,21
150	3,10	7,30	5,95	6,95	1,80	0,58	0,31
200	4,14	6,26	4,91	5,91	2,40	0,78	0,42
250	5,18	5,22	3,87	4,87	3,00	0,97	0,52
300	6,21	4,19	2,84	3,84	3,60	1,16	0,63

Рассмотрим эффект экономии природного урана при замене теплового реактора ВВЭР-ТОИ быстрым реактором такой же мощности. Значение величины  $G_{\text{ТР}}^U$  можно принять равным 200 т, что соответствует приблизительно 22,5 т обогащенного (4,3% по  $^{235}\text{U}$ )

урана в год. Результаты расчетов  $TCC$ , а также дополнительного дохода за весь жизненный цикл АЭС с быстрым реактором, учитывающих производство в нем плутония, представлены в табл. 2. При расчетах использовалась программа FCCBNN [3]. Учитывалось влияние нормы дисконтирования в пределах 0 – 10%/г. Потери плутония принимались равными нулю.

Как видно из представленных результатов, наработка плутония дает возможность получить серьезный дополнительный доход (от 0,11 до 3,6 \$ в зависимости от цены на природный уран и нормы дисконта) за счет продажи на рынке сэкономленного природного урана. Учет этого дохода эквивалентным образом приводит к заметному уменьшению топливной составляющей. Сравнение данных табл. 1 (строка «полная  $TCC_0$ ») и 2 показывает, что при цене на природный уран, равной \$50/кг, учет наработки плутония снижает  $TCC$  примерно на 10%. При росте стоимости природного урана до \$300/кг, что вполне возможно на горизонте текущего столетия при интенсивном развитии АЭ с тепловыми реакторами,  $TCC$  снижается уже в два – три раза.

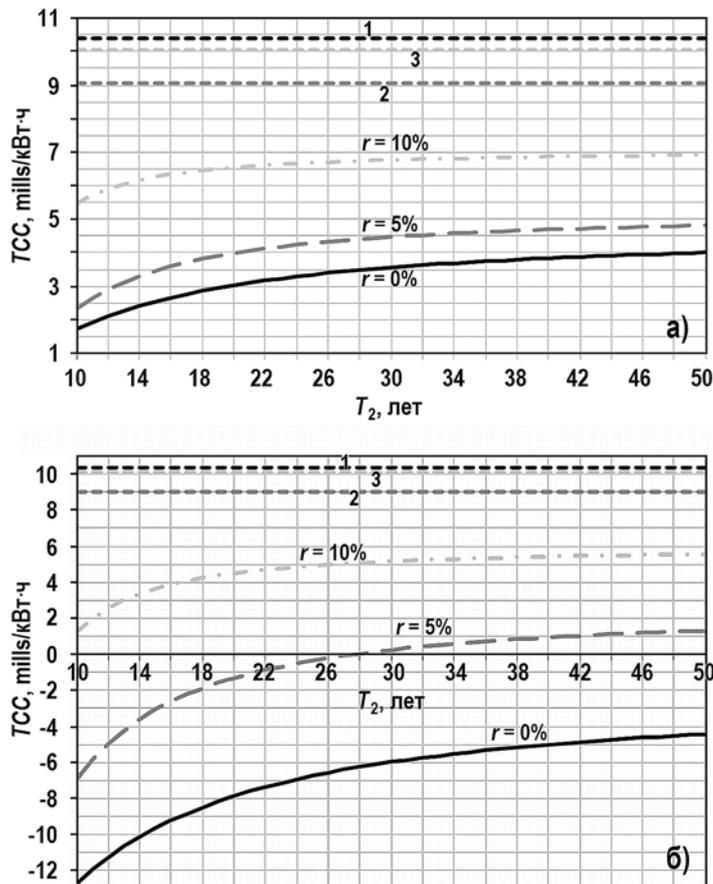


Рис. 1.  $TCC$  быстрого реактора большой мощности при различных величинах дисконта в зависимости от времени удвоения при эскалации цены природного урана: а) – 3%; б) – 5%. 1 –  $TCC_0(r = 0\%)$ ; 2 –  $TCC_0(r = 5\%)$ ; 3 –  $TCC_0(r = 10\%)$

На рисунке 1 представлены результаты расчета  $TCC$  быстрого реактора при совместном учете замыкания топливного цикла и эскалации цены на природный уран. Расчеты проведены для случая начальной цены высвобождаемого природного урана в 100 \$/кг с возможной ее эскалацией в 3 – 5% годовых. При этом варьировались время удвоения в топливном цикле от 10 до 50-ти лет. Значение  $\Delta t$  принималось равным нулю. На рисунке кроме того показаны значения  $TCC_0$ .

При ненулевых значениях эскалации наблюдается достаточно сильная зависимость  $TCC$  от времени удвоения особенно при малых значениях  $T_2$ .

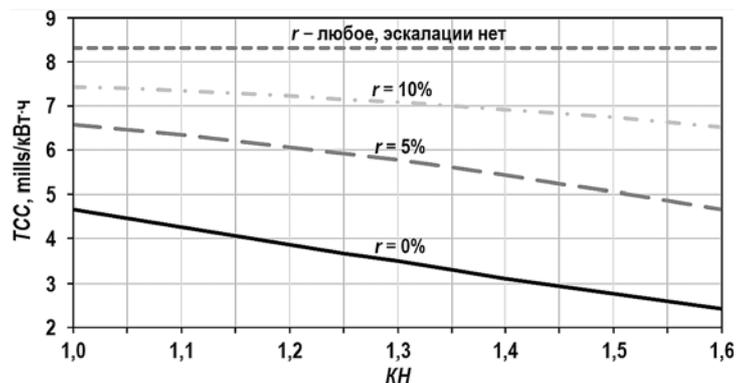


Рис. 2.  $TCC$  для реактора большой мощности типа БН в зависимости от коэффициента накопления при 3%-ой эскалации стоимости природного урана

На рисунке 2 представлены значения  $TCC$  с учетом наработки плутония в зависимости от коэффициента его накопления при значении эскалации цены природного урана 3%, там же для наглядности приведены данные  $TCC$  при нулевой эскалации (значение одинаково при любой ставке дисконтирования и равно 8,3 mills/кВт·ч). При коэффициенте накопления  $КН = 1,17$ , что имеет место для стандартной конфигурации быстрого натриевого реактора большой мощности, значение  $TCC$  составит 4 – 7 mills/кВт·ч в зависимости от нормы дисконтирования. При повышении  $КН$  до значений порядка 1,4 значения  $TCC$  уменьшатся до 3 – 7 mills/кВт·ч.

При эскалации цены природного урана в 5% расчеты показывают, что качественно картина не меняется, но значения  $TCC$  становятся отрицательными: при  $r = 0\%$  для любого  $КН$ ; при  $r = 5\%$  для  $КН > 1,43$ .

Выполненные расчетные исследования показывают, что для энергоблока с быстрым натриевым реактором и топливным циклом со временем удвоения порядка 50-ти лет, нормой дисконтирования 5% и при начальной цене природного урана 100 \$/кг и его ежегодной эскалацией в 3% с нулевым значением  $\Delta t$  (без запаздывания или опережения) учет наработки плутония приводит к снижению  $TCC$  почти в два раза – с 9,0 до 4,8 mills/кВт·ч.

С учетом того, что вклад  $TCC$  в полную удельную стоимость производства электроэнергии (величину  $LCOE$  [16]) составляет около 15%, учет производства плутония на АЭС с быстрым реактором приводит к значительному уменьшению  $LCOE$  – до 10% и более при более высоких ценах на природный уран. Этот эффект в конечном итоге обусловлен учетом рыночной стоимости высвобождаемого урана при его потенциальном экспорте. Этот эффект оказывается минимально возможным, больший эффект может быть достигнут при учете экспорта ТВС тепловых реакторов, изготовленных на его основе, как высокотехнологичного продукта с максимальной добавочной стоимостью.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложен подход к определению топливной составляющей стоимости  $TCC$  электроэнергии, производимой в ЯЭС быстрыми и тепловыми реакторами. В отличие от большинства применяемых при этом подходов в работе предпринята попытка разработать расчетную методiku, учитывающую двухпродуктовый характер технологии – производство электричества и плутония. Необходимым условием становится совместное рассмотрение реакторных частей топливных циклов для быстрых и тепловых реакторов.

При этом дополнительный доход от производства плутония в быстрых реакторах

оценивается по стоимости сэкономленного природного урана при сокращении парка тепловых реакторов, использующих этот уран, с замещением их на быстрые реакторы на плутониевом топливе. Сэкономленный уран имеет вполне реальную рыночную цену и может быть реализован на рынке. Предлагаемый подход базируется на энергетической ценности нарабатываемого плутония и тем самым исключается затратный механизм оценки его стоимости. На основе этих допущений построена математическая модель и получены соотношения для расчета  $TCC$ , связывающие основные топливные характеристики рассматриваемых ядерных реакторов и технико-экономические показатели топливного цикла ЯЭС.

Анализ полученных соотношений показал, что уточненная таким образом  $TCC$  зависит от многих характеристик ЯЭС. В частности, она в значительной степени определяется текущей ценой на природный уран и его эскалацией, коэффициентом накопления плутония в быстром реакторе, длительностью внешнего топливного цикла, периодом удвоения плутония в системе и т.д.

В качестве примера проведено расчетное исследование  $TCC$  в двухпродуктовой модели ЯЭС с быстрыми натриевыми реакторами большой мощности и тепловыми реакторами типа ВВЭР. Результаты показывают, что для энергоблока с быстрым реактором и его топливного цикла с реально достижимыми параметрами (временем удвоения порядка 50-ти лет, нормой дисконтирования 5%, начальной ценой природного урана 100 \$/кг и его ежегодной эскалацией в 3%) учет наработки плутония приводит к снижению  $TCC$  с 9,0 до 4,8 mills/кВт-ч. С учетом того, что вклад  $TCC$  в полную удельную стоимость производства электроэнергии (величину  $LCOE$ ) составляет около 15%, получим, что производство плутония приводит к значительному уменьшению  $LCOE$  – до 10% и более.

Методика может оказаться полезной для сравнительно-аналитических исследований в обоснование выбора стратегии развития двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами в едином замкнутом ЯТЦ.

Характерной особенностью предлагаемой методики является то, что получателями дохода от сэкономленного урана являются достаточно отстраненные от АЭС структуры, вплоть до государства в целом. Однако в роли АЭС с быстрым реактором в создании этой возможности не приходится сомневаться. Именно на АЭС в результате ядерно-физических процессов происходит конвертация слабоделящегося  $^{238}\text{U}$  в дополнительный сырьевой энергетический ресурс – плутоний. Разработанная методика позволяет увидеть и учесть этот доход в технико-экономических показателях АЭС.

### **Литература**

1. Алексеев П.Н., Бландинский В.Ю., Декусар В.М. и др. Оценка эффективности сценариев развития ядерной энергетики России с использованием многокритериального анализа. // Атомная энергия. – 2020. – № 1 – С. 3-6.
2. Егоров А.Ф., Клинов Д.А., Коробейников В.В., Мосеев А.Л., Марова Е.В., Шепелев С.Ф. Результаты многокритериального анализа сценариев развития ядерной энергетики с учётом структуры энергетики России. // ВАИТ. Серия: Ядерно-реакторные константы – 2017. – Вып. 4. – С. 64-78.
3. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA. Paris – 1994. Электронный ресурс: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/efc/EFC-complete.pdf> (дата доступа 13.06.2021).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics, INPRO Manual, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, IAEA, Vienna, 2014.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual Economics, Volume 2 of the Final Report of Phase 1 of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), IAEA-TECDOC-1575/Rev. 1, IAEA,

Vienna, 2008.

6. *Декусар В.М., Колесникова М.С., Чижикова З.Н.* Методика и программа расчета топливной составляющей стоимости производства электроэнергии на АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами. Препринт ФЭИ-3243. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2014. – 22 с.
7. *Черняховская Ю.В.* Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта. // Вестник ИГЭУ. – 2016. – Вып. 4. – С. 56-68.
8. *Декусар В.М., Гурская О.С.* К вопросу о цене плутония в двухкомпонентной ЯЭС. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2021. – Вып. 2. – С. 25-33.
9. *Уолтер А., Рейнольдс А.* Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 623 с.
10. *Алексеев П.Н. и др.* Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле / Под ред. академика РАН Пономарева-Степного Н.Н. – М.: Техносфера, 2016. – 160 с.
11. *Матвеев В.И., Хомяков Ю.С.* Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. – М.: МЭИ, 2012. – 355 с.
12. *Поплавский В.М., Цибуля А.М., Хомяков Ю.С. и др.* Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 206-211.
13. *Shropshire D.E. et al.* Advanced Fuel Cycle Cost Basis, INL/EXT-07-12107 Rev.1 2008. Электронный ресурс: <https://core.ac.uk/download/pdf/71325086.pdf> (дата доступа 13.06.2021).
14. *Bunn M. et al.* The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel. DE-FG26-99FT4028. Cambridge, Mass.: Project on Managing the Atom, Harvard University, 2003. Электронный ресурс: <https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/repro-report.pdf> (дата доступа 13.06.2021).
15. *Deutch J. et al.* The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study, Massachusetts Institute of Technology, 2003, Belfer Center for Science and International Affairs Science, Technology, and Public Policy Program. Электронный ресурс: <http://www.web.mit.edu/nuclearpower> (дата доступа 13.06.2021).
16. The Full Costs of Electricity Provision. OECD 2018 NEA No. 7928.

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

#### Авторы

Зродников Анатолий Васильевич, научный консультант генерального директора, профессор, д-р. физ.-мат. наук,  
E-mail: [azrodnikov@ipre.ru](mailto:azrodnikov@ipre.ru)

Декусар Виктор Михайлович, ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук,  
E-mail: [decouss@ipre.ru](mailto:decouss@ipre.ru)

Гурская Ольга Станиславовна, научный сотрудник,  
E-mail: [gurskaya@ipre.ru](mailto:gurskaya@ipre.ru)

**SYSTEM LEVELIZED FUEL COST OF ELECTRICITY GENERATION IN A TWO-COMPONENT NES WITH A CLOSED URANIUM-PLUTONIUM NFC**

Zrodnikov A.V., Dekusar V.M., Gurskaya O.S.

SSC RF-FEI n.a. A.I. Leipunsky JSC

1 Bondarenko Sq., 249033 Obninsk, Kaluga Reg., Russia

## ABSTRACT

An approach has been proposed to determine computationally the levelized unit fuel cost (*LUFC*) of electricity generation for a fast reactor of a two-component nuclear energy system (NES) with regard for plutonium production. The approach is based on taking into account the additional economic effect, which can be achieved through the sale at the market price of the natural uranium from the substitution of thermal reactors by fast reactors with MOX fuel based on the plutonium bred in a fast reactor. This requires considering simultaneously the reactor parts of the fuel cycle for fast and thermal reactors. Relationships have been obtained which connect the key neutronic and fuel characteristics with the NPP economic performance and fuel cycle. The described methodology was used for the computational study of the *LUFC* for a fast sodium-cooled reactor. Calculations have shown that, in the considered case, taking into account the plutonium production leads to the *LUFC* reduction by nearly half and, therefore, to a major decrease in the total unit cost of electricity generation (levelized cost of electricity or *LCOE*).

**Key words:** nuclear fuel cycle closure, technical and economic performance, plutonium production, levelized unit fuel cost, additional income, fast and thermal reactors.

## REFERENCES

1. Alekseev P.N., Blandinsky V.Yu., Balanin A.L., Grol' A.V., Nevinica V.A., Teplov P.S., Fomichenko P.A., Gulevich A.V., Dekusar V.M., Egorov A.F., Korobejnikov V.V., Moseev A.L., Marova E.V., Maslov A.M., Farakshin M.R., Shepelev S.F., Shirokov A.V. Evaluation of the scenarios effectiveness of Russian nuclear power development using multi-criteria analysis. *Atomnaya Energiya*. 2020, v. 128, iss. 1, pp. 3-6 (in Russian).
2. Egorov A.F., Klinov D.A., Korobejnikov V.V., Moseev A.L., Marova E.V., Shepelev S.F. Results of multi-criteria analysis of nuclear energy development scenarios in Russia including total energy mix in the state. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2017, iss. 4, pp. 64-78 (in Russian).
3. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD/NEA. Paris – 1994. Available at: <https://www.oecd-neo.org/ndd/reports/efc/EFC-complete.pdf> (accessed Jun. 13, 2021).
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics, INPRO Manual, IAEA Nuclear Energy Series No. NG-T-4.4, IAEA, Vienna, 2014.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems, INPRO Manual Economics, Volume 2 of the Final Report of Phase 1 of the International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), IAEA-TECDOC-1575/Rev.1, IAEA, Vienna, 2008.
6. Dekusar V.M., Kolesnikova M.S., Chizhikova Z.N. *Methodology and Software for Calculation of the Fuel Component Cost of Electricity Production at Nuclear Power Plants with Thermal and Fast Reactors*. Preprint FEI-3243. Obninsk. GNTs RE-FEI,

2014, 22 p. (in Russian).

7. Chernyakhovskaya Yu.V. Evolution of Methodological Approaches to the Assessment of the Cost of Electricity. The Analysis of Foreign Experience. *Vestnik IGEU*. 2016, iss. 4, pp. 56-68 (in Russian).

8. Dekusar V.M., Gurskaya O.S. On the issue of plutonium cost in a two-component nuclear power system. *VANT. Ser. Yaderno-Reaktornye Konstanty*. 2021, iss. 2, pp. 25-33 (in Russian).

9. Walter A., Reynolds A. *Fast Neutron Breeder Reactors*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1986, 623 p. (in Russian).

10. Alekseev P.N. et al. *Two-Component Nuclear Power System with Thermal and Fast Reactors in the Closed Nuclear Fuel Cycle*. Moscow. Tekhnosfera Publ., 2016, 160 p. ISBN 978-5-94836-434-6 (in Russian).

11. Matveev V.I., Khomyakov Yu.S. *Technical Physic of Sodium Fast Reactors*. Moscow. MEI Publ., 2012, 355 p. (in Russian).

12. Poplavsky V.M., Tsibulya A.M., Khomyakov Yu.S., Matveev V.I., Eliseev V.A., Tsikunov A.G., Vasil'ev B.A., Belov S.B., Farakshin M.R. Core and Fuel Cycle for an Advanced Sodium-Cooled Fast Reactor. *Atomnaya Energiya*. 2010, v. 108, iss. 4, pp. 206-211 (in Russian).

13. Shropshire D.E., Williams K.A., Boore W.B. Smith J.D., Dixon B.W. Dunzik-Gougar M., Adams R.D., Gombert D., Schneider E. *Advanced Fuel Cycle Cost Basis*, INL/EXT-07-12107 Rev.1 2008. Available at: <https://core.ac.uk/download/pdf/71325086.pdf> (accessed Jun. 13, 2021).

14. Bunn M., Fetter S., Holdren J.P., Zwaan B. *The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel*. DE-FG26-99FT4028. Cambridge, Mass.: Project on Managing the Atom, Harvard University, 2003. Available at:

<https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/repro-report.pdf> (accessed Jun. 13, 2021).

15. Deutch J. et al. *The Future of Nuclear Power: An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, 2003, Belfer Center for Science and International Affairs Science, Technology and Public Policy Program. Available at: <http://www.web.mit.edu/nuclearpower> (accessed Jun. 13, 2021).

16. The Full Costs of Electricity Provision. OECD 2018 NEA No. 7928.

### Authors

Zrodnikov Anatoly Vasilievich, Scientific Advisor of Director General, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: [azrodnikov@ippe.ru](mailto:azrodnikov@ippe.ru)

Dekusar Viktor Mikhaylovich, Leading Scientist, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: [decouss@ippe.ru](mailto:decouss@ippe.ru)

Gurskaya Olga Stanislavovna, Researcher

E-mail: [gurskaya@ippe.ru](mailto:gurskaya@ippe.ru)