

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ —
ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
имени А. И. Лейпунского

ФЭИ–3293

А. В. Зродников, В. М. Декусар, О. С. Гурская,
В. В. Коробейников, А. Л. Мосеев, А. Ф. Егоров, Л. П. Пупко

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

Обнинск – 2021

Зродников А. В., Декусар В. М., Гурская О. С., Коробейников В. В., Мосеев А. Л., Егоров А. Ф., Пупко Л. П.

Системная топливная составляющая стоимости производимой электроэнергии в двухкомпонентной ЯЭС с замкнутым уран-плутониевым ЯТЦ : Препринт ФЭИ-3293, Обнинск, АО «ГНЦ РФ-ФЭИ», 2021. 40 с.

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

Предложен подход к расчетному определению приведенной удельной топливной составляющей стоимости (ТСС) производимой в двухкомпонентной ЯЭС электроэнергии с учетом наработки в ней плутония. Подход основан на включении в доходы двухкомпонентной ЯЭС 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 системе плутония. При этом необходимым условием становится совместное рассмотрение реакторных частей топливного цикла быстрых и тепловых реакторов. Разработанная методика учитывает наработку плутония в быстрых и тепловых реакторах и соответствующее расширение электрогенерации на быстрых реакторах. Получены соотношения, которые связывают основные нейтронно-физические, топливные характеристики и экономические показатели ядерного энергоблока и топливного цикла ЯЭС. С использованием изложенной методики проведено расчетное исследование ТСС для быстрого натриевого реактора. Результаты показали, что в рассмотренном случае учет наработки плутония приводит к снижению ТСС почти в 2 раза и, следовательно, к значительному снижению полной удельной стоимости производства электроэнергии — значения LCOE.

An approach is proposed to the calculated determination of the levelized unit fuel cost of electricity (LUFC) produced in a two-component nuclear energy system (NES), taking into account the production of plutonium in it. The approach is based on the inclusion of an additional economic effect in the income of a two-component NES, which can be obtained through the sale at a market price of natural uranium released when replacing thermal reactors by fast reactors with MOX fuel based on plutonium produced in the system. In this case, a joint consideration of the reactor parts of the fuel cycle of fast and thermal reactors becomes a necessary condition. The developed methodology takes into account the production of plutonium in fast and thermal reactors and the corresponding expansion of power generation in fast reactors. Relationships are obtained that connect the main neutronic and fuel characteristics and economic indicators of a nuclear power unit and the fuel cycle of a NES. Using the described methodology, a computational study of the LUFC of fast sodium reactor was carried out. The results showed that in the considered case, taking into account the production of plutonium leads to a decrease in TSS by almost 2 times and, consequently, to a significant decrease in the total unit cost of electricity production — the LCOE value.

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ.....	4
ВВЕДЕНИЕ	5
1 Традиционный подход к расчету топливной составляющей стоимости производства электроэнергии на АЭС	7
2 Экономический эффект наработки плутония в ЯЭС	10
3 Расчетные модели для системы тепловых и быстрых реакторов.....	13
4 Расчет потенциального дополнительного дохода от экономии природного урана.....	18
5 Приведенная удельная стоимость плутония.....	19
6 Численный пример расчета стоимости нарабатываемого плутония.....	23
7 Топливная составляющая с учетом наработки плутония в быстрых реакторов	26
8 ТСС коммерческого реактора большой мощности типа БН с учетом наработки плутония.....	30
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	36
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	39

ПЕРЕЧЕНЬ СОКРАЩЕНИЙ И ОБОЗНАЧЕНИЙ

АЭ	– атомная энергетика
АЭС	– атомная электростанция
БН	– реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем
ВВЭР	– водо-водяной энергетический реактор
ЗЯТЦ	– замкнутый ядерный топливный цикл
КВ	– коэффициент воспроизводства
КИУМ	– коэффициент использования установленной мощности
КН	– коэффициент накопления вторичного плутония
МАГАТЭ	– Международное агентство по атомной энергии
МОКС-топливо	– ядерное топливо из оксидов плутония и обедненного урана
ОЯТ	– отработавшее (облученное) ядерное топливо
РАО	– радиоактивные отходы
ТВС	– тепловыделяющая сборка
ТСС	– топливная составляющая стоимости
ЭБ	– энергоблок
ЯТЦ	– ядерный топливный цикл
ЯЭС	– ядерно-энергетическая система
LCOE	– приведенная стоимость производства электроэнергии
LUEC	– Levelized Unit Electricity Cost (приведенная удельная стоимость производства электроэнергии)
LUFC	– Levelized Unit Fuel Cost (приведенная удельная топливная составляющая)

ВВЕДЕНИЕ

Замыкание ядерного топливного цикла решает задачу использования 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 станет основным для дальнейшего развития АЭ. В то время как энергия в форме электрической или тепловой имеет явного потребителя и соответствующим образом оплачивается, производство плутония сейчас не имеет денежного эквивалента. При этом в ЯЭС с открытым ЯТЦ затраты на производство плутония фактически включаются в топливную составляющую стоимости производства электроэнергии (ТСС), что приводит к ее завышению и, соответственно, к деформации экономических показателей АЭС. Разделение затрат на производство электроэнергии и производство плутония, которое всегда имеет место при облучении ядерного топлива на основе урана, при этом практически невозможно.

Вследствие этого традиционный сравнительный технико-экономический анализ АЭ, в котором этот эффект не учитывается, может привести к последующему ошибочному выбору траектории дальнейшего развития АЭ.

Необходимо отметить существенную разницу между АЭС с тепловыми и АЭС с быстрыми реакторами. В то время как выгрузка плутония в современных тепловых реакторах типа ВВЭР обычно составляет порядка 25 % от загрузки реактора ураном-235, то выгрузка плутония в перспективных быстрых реакторах типа БН может достигать 120 % и более от загрузки плутония. В последнем случае достигается не только самообеспечение реактора делящимся материалом, но и закладывается резерв на расширение генерирующих мощностей. Однако это принципиальное отличие перспективных быстрых реакторов от тепловых при ныне действующих подходах к анализу и сравнению технико-экономических показателей АЭС никак не учитывается. Вместе с тем для правильной и полной оценки роли быстрых реакторов в АЭ необходим технико-экономический критерий, учитывающий к тому же уникальное качество быстрого реактора — возможность расширенного воспроизводства ядерного горючего.

Одним из возможных критериев может стать модифицированная ТСС 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, под которой понимаются денежные средства, за которые продавец готов передать покупателю свой товар (в данном случае — это плутоний) не приходится. По-видимому, можно

утверждать, что такая ситуация, в силу специфики такого товара, сохранится и в обозримом будущем.

Вместе с тем, как всякий произведенный продукт, плутоний имеет свою стоимость, которая, с одной стороны, должна покрывать издержки, которые понес производитель на его производство. С другой стороны, плутоний 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.

В препринте представлены результаты разработки расчетной модели ТСС, основанные на учете потенциального вклада плутония в доходы двухкомпонентной ЯЭС. Модель базируется на системном подходе, при котором становится возможным определить доходы ЯЭС за счет продаж природного урана по рыночной цене, обусловленных его экономией при замене в двухкомпонентной ЯЭС тепловых реакторов на природном уране быстрыми реакторами на МОКС-топливе.

В рамках модели сформулированы основные математические соотношения, связывающие технико-экономические показатели ЯЭС и такие нейтронно-физические характеристики реактора, как воспроизводство вторичного ядерного горючего, период удвоения установленной мощности в системе, длительность внешнего топливного цикла и др. Модель позволяет свести указанные показатели и характеристики, которые имеют весьма разнородный характер, к единому комплексному критерию, выраженному в денежной форме —ТСС.

Предлагаемый критерий может оказаться полезным при системном многокритериальном анализе ЯЭС, сравнении технико-экономических показателей ЯЭС с реакторами различных типов и выборе путей развития АЭ.

Насколько известно авторам, такой подход к определению ТСС сформулирован впервые.

1 Традиционный подход к расчету топливной составляющей стоимости производства электроэнергии на АЭС

Напомним основные положения традиционного подхода к расчету ТСС [1], [2].

Топливная составляющая занимает особое место в ряду технико-экономических показателей АЭС. Доля ТСС в полной стоимости производства электроэнергии на АЭС значительно ниже, чем у электростанций, работающих на органическом топливе, и составляет порядка 15–25 % от общих затрат. Тем не менее, выбор ядерного топлива, особенности конструкции твэла и ТВС, технологий изготовления свежего топлива и его переработки после облучения в реакторе и окончательной изоляции РАО в совокупности со стратегическим выбором вида реализуемого ЯТЦ — обуславливают экономическую целесообразность производства электроэнергии на АЭС того или иного типа. Влияние технологии изготовления топлива и особенностей конструкции тепловыделяющей сборки (ТВС) распространяется на экономичность производства электроэнергии в целом.

ТСС напрямую связана с используемыми технологиями ЯТЦ и, соответственно, ценами на его переделы. Особенно это важно для АЭС с реакторами на быстрых нейтронах в замкнутом ЯТЦ.

Под топливной составляющей стоимости производства электроэнергии понимается отношение затрат на ядерное топливо, в общем случае начиная от закупки природного урана и заканчивая обращением с отработанным топливом и РАО, ко всему объему электроэнергии, произведенной за весь срок службы конкретной АЭС. В таком определении ТСС представляет собой среднее за весь срок службы АЭС значение топливных затрат на 1 кВт·ч произведенной электроэнергии. Поскольку затраты, связанные с топливом, производятся в течение всего его жизненного цикла, охватывающего период до 100 и более лет, то для учета неравноценности денежных затрат используется метод приведенных затрат [1], [2], то есть при этом фактически учитывается стоимость денег.

При таком подходе все ежегодные денежные потоки на каждом переделе топливного цикла приводятся (дисконтируются) к одному базовому моменту (t_0) во времени. В качестве базовой даты обычно используется дата ввода реактора рассматриваемой АЭС в коммерческую эксплуатацию. Таким образом, получают чистые текущие издержки за весь жизненный цикл топлива. Учет стоимости денег производится с помощью нормы дисконтирования r , значения которой определяются при экономическом анализе рынка, на котором действует АЭС.

Аналогичным образом получают дисконтированные по отношению к той же базовой дате чистые текущие доходы от произведенной за весь срок службы

АЭС продукции. Отметим, что под произведенной продукцией понимается только электрическая (тепловая) энергия.

Оценка нормы дисконтирования представляет собой отдельную, достаточно сложную задачу, зависящую от состояния рыночных отношений, и в настоящем исследовании не рассматривается. Поэтому в проводимых расчетах ее значение принимается постоянным и равным 0–10 % годовых, что, по-видимому, недалеко от истины.

Концепция приведенных затрат положена также в основу методики расчета полной приведенной удельной стоимости производства электроэнергии на АЭС — показателя LCOE [3], или аналог в терминологии МАГАТЭ — LUEC [1].

Составной частью LCOE, наряду с капитальной и эксплуатационной составляющими, является топливная составляющая, определяемая традиционным методом. LCOE представляет собой стоимость электроэнергии, при которой достигается полное покрытие расходов на производство электроэнергии на полном жизненном цикле ядерного топлива конкретной АЭС. Однако этот показатель не учитывает системных факторов и в единственном числе не может служить корректным показателем для сопоставления эффективности сложных систем с топливными циклами различной структурной организации.

В работе [4] высказано мнение, с которым можно согласиться, что «LCOE является выдернутым из системного анализа критерием, несущим в себе определенные упрощения...». С целью эффективного сравнения энергетических технологий показатель LCOE должен использоваться в составе комплексного технико-экономического анализа энергетической системы с учетом ее места и роли на энергетическом рынке, перспектив ее развития, влияния на экспортный потенциал, нераспространения ядерного оружия и многого другого. Кроме того, для учета двухпродуктового характера производства (электроэнергия и плутоний) на АЭС с быстрыми реакторами методика LCOE, как и методика определения ТСС, нуждается в определенной модификации.

В настоящей работе излагается возможный подход для такого учета через корректировку традиционной методики расчета топливных затрат в замкнутом ЯТЦ, которая базируется на работах [1], [2].

Дисконтирование затрат на топливо F_i на переделе i к выбранной базовой дате производят для каждого этапа топливного цикла в соответствии с диапазоном времени, охватывающим данный этап. Результат сложения дисконтированных затрат — общая сумма расходов на топливо — выглядит следующим образом:

$$F = \sum_i^{t_0+L+T_{\text{end}}} \sum_{t=t_0-T_1}^{t_0+L+T_{\text{end}}} F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)}, \quad (1)$$

где t_0 — момент пуска реактора в эксплуатацию,

L — длительность жизненного цикла АЭС,

T_1 — максимальное время опережения по отношению к базовой дате (на начальной стадии топливного цикла),

T_{end} — максимальное значение временного лага (на заключительной стадии топливного цикла).

Коэффициент, учитывающий дисконтирование, $f = (1 + r)^{-(t-t_0)}$, может быть как больше 1, так и меньше 1 в зависимости от того, до или после момента пуска реактора в эксплуатацию t_0 произведена соответствующая затрата.

Аналогичным образом при традиционном подходе получают дисконтированный по отношению к той же базовой дате чистый текущий доход от произведенной за весь срок службы ЯЭС электроэнергии. Суммарный дисконтированный доход I от производства электричества равен

$$I = \sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{TCC \cdot E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}, \quad (2)$$

где ТСС — постоянная приведенная топливная составляющая стоимости единицы выработанной энергоблоком электроэнергии;

$E(t)$ — количество электроэнергии, произведенной за период времени t .

Уравнивание приведенных доходов и расходов топливного цикла позволяет определить постоянную приведенную удельную топливную составляющую стоимости, или в терминологии работ [1], [2] величину LUFC (Levelized Unit Fuel Cost):

$$TCC = \frac{\sum_{\text{этапы время}} \sum F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}{\sum_{\text{время}} E(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}. \quad (3)$$

Приведенные соотношения для расчета ТСС относятся, как указывалось выше, к однопродуктовой модели, в которой учитывается только один источник дохода — продажа электроэнергии, причем обычно понимается, что все величины в предыдущих формулах относятся к одному энергоблоку (реактору). При рассмотрении тепловых реакторов именно так и поступают, то есть наличие второго продукта, производимого в системе, — плутония — никак не учитывается. Плутоний рассматривается в лучшем случае как продукт, не имеющий стоимости, или вообще как отход.

Описанный выше алгоритм расчета топливной составляющей был положен в основу компьютерного кода FCCBNN [5] — расчета ТСС для АЭС с быстрым реактором.

2 Экономический эффект наработки плутония в ЯЭС

Оценка экономического эффекта от наработки плутония в быстрых реакторах при его продаже исключена вследствие, как уже указывалось выше, отсутствия рынка плутония. Традиционный технико-экономический анализ АЭС в этом случае полностью игнорирует способность быстрых реакторов вместе с производством электроэнергии нарабатывать вторичный плутоний, причем в количестве большем, чем требуется для выработки такого количества энергии. Отметим, что также игнорируется и свойство наработки плутония в тепловых реакторах.

Рассмотрим возможность учета этого свойства быстрых реакторов при анализе топливных потоков и стоимостных показателей в ЯЭС. При этом предполагается, что ЯЭС включает АЭС с тепловыми и быстрыми реакторами и инфраструктуру замкнутого ЯТЦ.

Чтобы пояснить суть предлагаемого в настоящей работе подхода, рассмотрим простейший пример.

Допустим, имеется один реактор типа ВВЭР-1200. При ежегодном потреблении им порядка 200 т природного урана его удельное потребление на единицу произведенной электроэнергии составит около 20 г/МВт·ч. Это значение характеризует эффективность использования природного урана в открытом топливном цикле. Если вводится в эксплуатацию еще один такой же реактор, затем следующий и т. д., то это значение останется таким же. Теперь предположим, что вместо второго ВВЭР вводится быстрый реактор типа БН такой же мощности с $K_B > 1$ на плутониевом топливе, например на МОКС-топливе. Поскольку быстрый реактор не потребляет природный уран (вместо него используется регенерат урана или отвальный уран) расход природного урана в системе 1ВВЭР+1БН по сравнению с предыдущим случаем (1ВВЭР+1ВВЭР) не изменится, но количество производимой электроэнергии при этом приблизительно удвоится. Следовательно, удвоится и эффективность топливоиспользования природного урана, то есть потребление природного урана в такой системе составит уже около 10 г/МВт·ч.

Аналогичным образом, при вводе n быстрых реакторов на 1 ВВЭР эффективность использования природного урана в такой системе возрастет в $(n+1)$ раз. При этом количество сэкономленного природного урана прямо пропорционально количеству введенных быстрых реакторов. Сэкономленный уран уже имеет вполне конкретную рыночную цену.

Несмотря на то что источником плутония, наряду с быстрыми реакторами, являются и тепловые, указанный эффект в таких размерах имеет место только при наличии в системе быстрых реакторов с расширенным воспроизводством плутония. При замыкании топливного цикла по плутонию в системе тепловых реакторов, использующих природный уран и МОКС-топливо в виде частичной загрузки, экономия природного урана не превышает 15–20 %.

Потенциальный дополнительный доход ЯЭС, который может служить количественным индикатором экономической эффективности наработки плутония, может быть определен через рыночную цену высвобождаемого в системе природного урана или при продаже соответствующих количеств обогащенного урана. В последнем случае следует ожидать бóльшую выгоду, как от продажи продукции с высокой добавленной стоимостью. В настоящей работе для определенности будем опираться только на цену природного урана.

Предлагаемый подход согласуется с концепцией двухкомпонентной ядерной энергетики [6], на основании которой возможно долгосрочное топливообеспечение ЯЭС с решением остальных современных отложенных ее проблем. При этом открывается возможность расширения зарубежного бизнеса ГК «Росатом» за счет увеличения поставок за рубеж ядерного топлива для тепловых реакторов на основе природного урана.

Отметим, что определяемый таким образом дополнительный доход, обусловленный наличием в ЯЭС быстрых реакторов-бридеров, представляет собой его верхнюю границу. Реально полученный доход будет зависеть от множества рыночных факторов, в том числе и от спроса на электроэнергию и природный уран.

Поскольку высвобождение урана может иметь место в течение всего жизненного цикла АЭС, длительность которого может приближаться к 100 годам, дополнительный доход целесообразно привести (дисконтировать) к конкретной дате, аналогично тому, как это делается при определении топливной составляющей стоимости производства электроэнергии [1], [2].

Оставаясь в парадигме дисконтированных затрат и доходов, принятой при определении величин LCOE и TCC, соотношение для дисконтированного дохода $E_{\text{доп}}$, получаемого за весь проектный ресурс энергоблока длительностью L , можно записать как:

$$E_{\text{доп}} = \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t_0+L+\Delta t} \frac{C_{\text{доп}} (1 + es_{\text{доп}})^{(t-t_0)} G_{\text{доп}}(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}}, \quad (4)$$

где $E_{\text{доп}}$ — искомый дополнительный доход, получаемый за счет экономии природного урана;

t_0 — базовая дата (обычно это момент пуска реактора в эксплуатацию);

L — проектный ресурс энергоблока АЭС;

Δt — временной лаг (интервал запаздывания или опережения) между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана и базовой датой (временем пуска энергоблока в эксплуатацию, моментом начала продажи электричества);

$C_{\text{доп}}$ — удельная стоимость продукции, поступающей на рынок (в данном случае — природный уран), за счет которой обеспечивается дополнительный доход;

$eS_{\text{доп}}$ — годовая эскалация удельной цены продукции, выставяемой на продажу (может быть как положительной, так и отрицательной);

$G_{\text{доп}}$ — масса продукции, которая может ежегодно поставляться на рынок (природный уран) при замене тепловых реакторов на быстрые;

r — норма дисконтирования.

Суммирование по t представляет собой суммирование по времени или, что эквивалентно, по партиям природного урана, сэкономленного (высвобожденного) в результате замены теплового реактора на быстрый при его эксплуатации в течение всего проектного срока службы.

Для упрощения дальнейшего изложения примем, что $G_{\text{доп}}(t)$ в формуле (4) является непрерывной функцией времени. Аналогичное допущение примем и для всех остальных суммируемых функций времени, которые рассматриваются в настоящей работе. Тогда сумму в выражении (4) можно заменить интегралом с заменой степенных показателей на экспоненты в соответствии с соотношениями вида: $1 / (1 + r)^t = \exp(-\lambda_d t)$. В этом случае выражение для дисконтированного к моменту времени t_0 дохода можно записать как:

$$E_{\text{доп}} = \int_{t_0 + \Delta t}^{t_0 + L + \Delta t} C_{\text{доп}} G_{\text{доп}}(t) \exp(-(\lambda_d - \lambda_{es})(t - t_0)) dt, \quad (5)$$

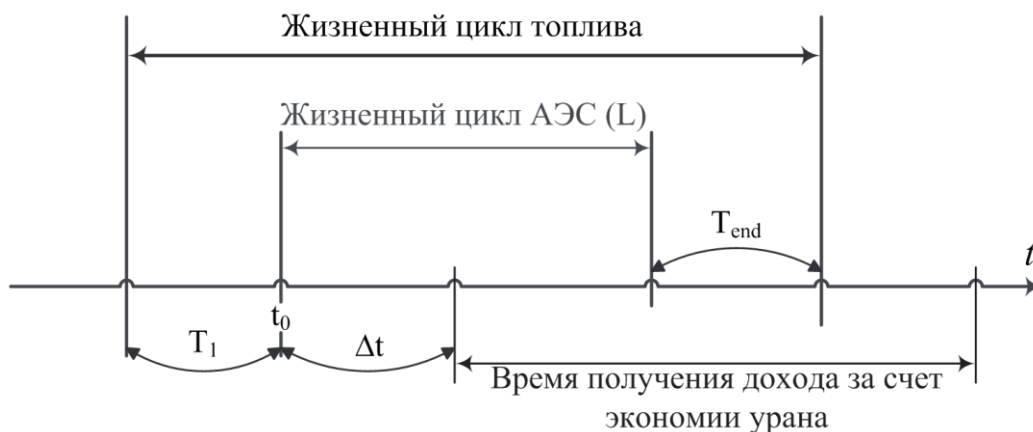
где
$$\lambda_d = \ln(1 + r), \quad \lambda_{es} = \ln(1 + eS_{\text{доп}}). \quad (6)$$

Значение временного лага (величины Δt) в соотношении (4) или (5) может быть положительным, нулевым и отрицательным или даже менять знак в процессе эксплуатации реактора.

Очевидная (гарантированная) возможность экономии урана наступает после загрузки в реактор топлива, изготовленного на основе выделенного плутония. То есть здесь неявно предполагается замещение реального «непродаваемого» плутония вполне рыночным ураном. Обычно это происходит спустя несколько лет после выгрузки соответствующей партии ОЯТ из реактора. Следовательно, в этом случае значение Δt положительно и составляет, как правило, не менее 5–7 лет.

Вместе с тем получение дохода от продажи сэкономленного урана возможно и до получения соответствующего эквивалента в виде выделенного плутония. Более того, оно возможно и до ввода в эксплуатацию АЭС с быстрым реактором. Для этого просто необходим запас урана на складе. В этих случаях значение Δt отрицательно, а абсолютное его значение, учитывая вышесказанное, может находиться в довольно широких пределах; Δt может принимать и нулевое значение, соответствующее одновременности начала получения дохода от продажи электричества и продажи сэкономленного урана.

На рис. 1 на временной шкале графически представлены рассматриваемые в предлагаемом подходе понятия жизненного цикла топлива, времени получения дохода и т. д. Временной лаг Δt на рисунке показан как интервал запаздывания между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана (или ТВС) и базовой датой t_0 (временем пуска энергоблока в эксплуатацию).



T_1 — время изготовления топлива; t_0 — дата начала эксплуатации реактора;
 Δt — временной лаг (интервал запаздывания или опережения) между временем получения дохода от продажи высвобождаемого урана (или ТВС) и базовой датой (временем пуска энергоблока в эксплуатацию, моментом начала продажи электричества); L — длительность жизненного цикла АЭС; T_{end} — максимальное значение временного лага, обусловленного необходимостью обращения с ОЯТ и РАО на заключительной стадии топливного цикла после окончания эксплуатации реактора

Рис. 1. Временная шкала рассматриваемых в предлагаемом подходе понятий

3 Расчетные модели для системы тепловых и быстрых реакторов

Экономический эффект, связанный с наработкой плутония, будем оценивать через рыночную цену высвобождаемого природного урана при замещении тепловых реакторов на обогащенном уране на быстрые реакторы на смешанном уран-плутониевом топливе. При этом будем полагать, что установленная мощность быстрых реакторов, замещающих тепловые, определяется только количеством плутония, нарабатываемого в ЯЭС, то есть рассматривается случай полного использования энергетического потенциала плутония.

Экономическая выгода от высвобождаемого природного урана и другие технико-экономические показатели могут быть определены при математическом моделировании ЯЭС, включающей конкретные тепловые и быстрые реакторы. Получаемый при этом результат будет носить сугубо частный характер и не всегда может удовлетворить требованиям рассматриваемых задач, например при сценарных исследованиях развития ЯЭС или при предварительном рассмотрении технико-экономических показателей их объектов. Поэтому было бы удобнее рассмотреть некоторые модельные ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами, обладающие наиболее характерными свойствами. К таким

системам можно отнести, в частности, системы с постоянной суммарной установленной мощностью и системы с растущей мощностью. Причем в обеих системах имеет место рост установленных мощностей на быстрых реакторах. Рассмотрение системы с уменьшающейся установленной мощностью нецелесообразно, поскольку в такой системе трудно ожидать экономический эффект от производства плутония.

Для дальнейшего анализа рассмотрены некоторые аналитические модели. Для простоты изложения все модели включают в себя тепловые и быстрые реакторы только одного типа, характеризующиеся постоянными характеристиками.

Пусть на момент t в ЯЭС имеется $N_{\text{ТР}}(t)$ тепловых реакторов и $N_{\text{БР}}(t)$ быстрых. Предполагается, что тепловые реакторы работают на обогащенном уране, а быстрые — на смешанном уран-плутониевом топливе. Быстрые реакторы характеризуются коэффициентом накопления вторичного плутония ($\text{КН} > 1$), под которым понимается отношение ежегодной выгрузки плутония из быстрого реактора к его ежегодной загрузке. Тепловые реакторы характеризуются ежегодной выгрузкой плутония $G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}}$. Предполагается, что в системе имеет место равновесный изотопный состав плутония, а избыток выгружаемого плутония расходуется на запуск новых быстрых реакторов. Количество высвобождаемого урана в системе тепловых и быстрых реакторов определяется скоростью замены урановых тепловых реакторов на быстрые. При этом предполагается, что количество тепловых и быстрых реакторов определяется в соответствии со следующими моделями ЯЭС.

Модель 1. Данная модель предполагает постоянство на любом интервале времени системной (суммарной) энерговыработки тепловых и быстрых реакторов с учетом их КИУМ. Модель предполагает, что весь нарабатываемый плутоний из ОЯТ тепловых реакторов и избыточный плутоний из быстрых реакторов поступает на начальную загрузку вновь вводимых быстрых реакторов замещения, сэкономленный при этом природный уран засчитывается в доход ЯЭС. Количество быстрых реакторов со временем растет, в то время как количество тепловых уменьшается, однако развития системы по росту энергопроизводства нет. Учитывается возможность различного КИУМ для быстрых и тепловых реакторов. Эта модель может быть названа моделью постоянной энерговыработки.

Модель 2. Модель предполагает постоянное количество тепловых реакторов в системе и рост ее генерирующих мощностей за счет увеличения в ней количества быстрых реакторов. В такой модели под дополнительным доходом понимаются сэкономленные затраты, которые бы понесла ЯЭС при своем развитии (таком же росте установленной мощности) только на тепловых реакторах, без ввода в эксплуатацию быстрых реакторов. Модель 2 описывает

относительно быстро растущую быструю энергетику и постоянную АЭ на тепловых реакторах. Примером системы, имеющей определенное сходство с Моделью 2, может быть гипотетическая быстроразвивающаяся АЭ на быстрых реакторах Российской Федерации и зарубежная АЭ постоянной мощности (или очень медленно меняющейся мощности), которая использует российское топливо и возвращает ОЯТ на переработку. Эта модель может быть названа моделью растущей энерговыработки с использованием плутония из тепловых и быстрых реакторов.

Модель 3. Данная модель фактически является простейшим частным случаем Модели 2, в которой плутоний из ОЯТ тепловых реакторов непосредственно не используется в быстрых реакторах, он может использоваться в тепловых же в виде МОКС-топлива. Модель может быть названа моделью растущих мощностей (энерговыработки) на быстрых реакторах с использованием собственного плутония. Смысл дополнительного дохода в этой модели такой же, как и в Модели 2.

Рассмотрим уравнения, описывающие состояние системы по количеству быстрых и тепловых реакторов во времени. При этом будем исходить из концепции системы реакторов, в которой весь нарабатываемый избыточный плутоний расходуется на ввод новых реакторов. То есть в данном случае под временем удвоения понимается сложное системное время удвоения в терминологии монографии [7]. Кроме того, предполагается, что все уравнения описываются с помощью непрерывных функций.

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

$$G_{\text{Pu}} = G_{\text{Pu}}^0 + T_{\text{вн}} \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T}, \quad (7)$$

где G_{Pu}^0 — начальная загрузка плутонием быстрого реактора, т;

T — длительность кампании ТВС быстрого реактора, годы;

$T_{\text{вн}}$ — длительность внешнего топливного цикла, годы.

Избыток плутония из быстрых реакторов $N_{\text{БР}}(t)$ и тепловых $N_{\text{ТР}}(t)$ составит

$$N_{\text{БР}}(t) \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (KH - 1)(1 - \varepsilon) + N_{\text{ТР}}(t) G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}} (1 - \varepsilon). \quad (8)$$

Здесь предполагается, что потери плутония ε в топливном цикле одинаковы для тепловых и быстрых реакторов.

Тогда скорость изменения количества быстрых реакторов в приближении одинаковых свойств плутония из тепловых и быстрых реакторов описывается дифференциальным уравнением:

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \frac{N_{\text{БР}}(t) \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{KH} - 1)(1 - \varepsilon) + N_{\text{ТР}}(t) G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}} (1 - \varepsilon)}{G_{\text{Pu}}^0 + T_{\text{ВН}} \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T}}, \quad (9)$$

или

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = N_{\text{БР}}(t) \frac{(\text{KH} - 1)(1 - \varepsilon)}{T + T_{\text{ВН}}} + N_{\text{ТР}}(t) \frac{G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}} (1 - \varepsilon) \cdot T}{G_{\text{Pu}}^0 (T + T_{\text{ВН}})}. \quad (10)$$

Уравнение (10) необходимо дополнить начальными условиями $N_{\text{ТР}}(0) = N_{\text{ТР}}^0$ и $N_{\text{БР}}(0) = N_{\text{БР}}^0$.

Уравнение (10) соответствует общему случаю развития ЯЭС, $N_{\text{ТР}}(t) = \text{const}$ соответствует Модели 2, $N_{\text{ТР}}(t) = 0$ — Модели 3.

Обозначим

$$y = \frac{G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}} \cdot T}{G_{\text{Pu}}^0 (\text{KH} - 1)}; \quad \lambda_2 = \frac{(\text{KH} - 1)(1 - \varepsilon)}{T + T_{\text{ВН}}}. \quad (11)$$

λ_2 связана с периодом удвоения мощности T_2 в системе быстрых реакторов соотношением:

$$\lambda_2 = \frac{\ln 2}{T_2}. \quad (12)$$

Тогда уравнение (10) можно переписать в виде:

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \lambda_2 N_{\text{БР}}(t) + y \lambda_2 N_{\text{ТР}}(t). \quad (13)$$

В соответствии с Моделью 1 в системе тепловых и быстрых реакторов на любом интервале времени обеспечивается постоянство общей энерговыработки. Это означает, что выполняется соотношение:

$$\begin{aligned} N_{\text{ТР}}(t) \cdot P_{\text{ТР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{ТР}} + N_{\text{БР}}(t) \cdot P_{\text{БР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{БР}} = \\ = N_{\text{ТР}}^0 \cdot P_{\text{ТР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{ТР}} + N_{\text{БР}}^0 \cdot P_{\text{БР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{БР}}, \end{aligned}$$

где P и КИУМ, соответственно, значения установленной мощности и коэффициента ее использования для теплового (индекс ТР) или быстрого (индекс БР) реактора.

Тогда для $N_{\text{ТР}}(t)$ в Модели 1 можно записать следующее соотношение:

$$N_{\text{ТР}}(t) = N_{\text{ТР}}^0 + N_{\text{БР}}^0 \frac{P_{\text{БР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{БР}}}{P_{\text{ТР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{ТР}}} - N_{\text{БР}}(t) \frac{P_{\text{БР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{БР}}}{P_{\text{ТР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{ТР}}}$$

или

$$N_{\text{ТР}}(t) = N_{\text{ТР}}^0 + xN_{\text{БР}}^0 - xN_{\text{БР}}(t), \quad (14)$$

где

$$x = \frac{P_{\text{БР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{БР}}}{P_{\text{ТР}} \cdot \text{КИУМ}_{\text{ТР}}}.$$

Подставив (14) в (13), получим:

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \lambda_2 N_{\text{БР}}(t) \cdot (1 - xy) + y\lambda_2 (N_{\text{ТР}}^0 + xN_{\text{БР}}^0).$$

Введем обозначения

$$\tilde{\lambda}_2 = \lambda_2 (1 - xy); \quad g = y\lambda_2 (N_{\text{ТР}}^0 + xN_{\text{БР}}^0). \quad (15)$$

Тогда

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \tilde{\lambda}_2 N_{\text{БР}}(t) + g, \quad (16)$$

где $g = \text{const}$. Уравнение (16) вместе с соотношением (14) описывает изменение количества быстрых и тепловых реакторов в ЯЭС в соответствии с Моделью 1.

Дифференциальное уравнение $z' + f(t) \cdot z = g(t)$ с коэффициентами $f(t)$ и g , где $f = -\tilde{\lambda}_2$ имеет следующее решение: $z = \exp(-F) \cdot \left(\int g \cdot \exp(F) dt + C \right)$, где $F = \int f(t) dt$

С начальным условием $N_{\text{БР}}(t_0) = N_{\text{БР}}^0$ это решение будет выглядеть как:

$$N_{\text{БР}}(t) = \left(N_{\text{БР}}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) \cdot \exp(\tilde{\lambda}_2(t - t_0)) - \frac{g}{\tilde{\lambda}_2}. \quad (17)$$

Формула (17) вместе с соотношением (14) описывает количество быстрых и тепловых реакторов в момент времени t в соответствии с Моделью 1.

Рассмотрим теперь Модель 2 — модель ЯЭС с постоянным количеством тепловых реакторов и ростом мощности системы за счет увеличения в ней количества быстрых реакторов. Уравнение, описывающее количество быстрых реакторов в системе, аналогично уравнениям (10) и (13) и имеет вид:

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \lambda_2 N_{\text{БР}}(t) + y\lambda_2 N_{\text{ТР}}, \quad (18)$$

где $N_{\text{ТР}} = N_{\text{ТР}}^0 = \text{const}$.

Выполнив выкладки, аналогичные предыдущим, получим следующее решение уравнения (18):

$$N_{\text{БР}}(t) = \left(N_{\text{БР}}^0 + yN_{\text{ТР}} \right) \exp(\lambda_2(t - t_0)) - yN_{\text{ТР}}, \quad (19)$$

Модель 3. Для случая системы, состоящей из одних быстрых реакторов ($N_{\text{ТР}}(t) = 0$), уравнение (10) можно записать как:

$$\frac{dN_{\text{БР}}(t)}{dt} = \lambda_2 N_{\text{БР}}(t), \quad (20)$$

решение которого имеет вид:

$$N_{\text{БР}}(t) = N_{\text{БР}}^0 \cdot \exp(\lambda_2(t - t_0)). \quad (21)$$

4 Расчет потенциального дополнительного дохода от экономии природного урана

В Модели 1 годовая экономия природного урана составит:

$$\Delta G^{\text{U}}(t) = G_{\text{ТР}}^{\text{U}} (N_{\text{ТР}}^0 - N_{\text{ТР}}(t)),$$

где $G_{\text{ТР}}^{\text{U}}$ — годовая загрузка природным ураном теплового реактора.

Учитывая соотношения (14) и (17) для $N_{\text{ТР}}(t)$, получим выражение для годовой экономии в виде:

$$\Delta G^{\text{U}}(t) = G_{\text{ТР}}^{\text{U}} x \left(N_{\text{БР}}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) \left[\exp(\tilde{\lambda}_2(t - t_0)) - 1 \right].$$

Тогда в соответствии с (5) дополнительный дисконтированный доход (экономический эффект от наработки плутония в ЯЭС) с учетом возможной эскалации цены на природный уран и в предположении непрерывности всех функций на рассматриваемом интервале времени запишем как:

$$E_{\text{доп}} = C_{\text{U}} \int_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} \Delta G^{\text{U}}(t) \left[\exp(-(\lambda_d - \lambda_{\text{es}})(t - t_0)) \right] dt, \quad (22)$$

где C_{U} — удельная цена продукции, поступающей на рынок, в данном случае природного урана, за счет которой обеспечивается дополнительный доход, US\$/кг.

Выполнив в (22) интегрирование, получим выражение для дисконтированного дохода, обусловленного наработкой плутония. Напомним, что рассматривается Модель 1 энергосистемы тепловых и быстрых реакторов с постоянной мощностью с учетом их КИУМ.

$$E_{\text{доп}} = C_{\text{U}} G_{\text{ТР}}^{\text{U}} x \left(N_{\text{БР}}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) \left[F(\tilde{\lambda}) - F(\lambda_{ds}) \right]. \quad (23)$$

В формуле (23) и далее введена функция $F(\lambda)$, в общем виде определяемая соотношением $F(\lambda) = \frac{\exp(\lambda \Delta t)}{\lambda} \cdot (\exp(\lambda L) - 1)$, где λ соответствует $\tilde{\lambda}$ или λ_{ds} , а $\tilde{\lambda} = \tilde{\lambda}_2 - \lambda_d + \lambda_{es}$; $\lambda_{ds} = \lambda_{es} - \lambda_d$.

В Моделях 2 и 3 количество сэкономленного природного урана определится через число введенных быстрых реакторов эквивалентной мощности за счет нарабатываемого в ЯЭС плутония: в Модели 2 — нарабатываемого в быстрых и тепловых реакторах, в Модели 3 — только в быстрых реакторах. Тогда, проделав аналогичные преобразования, получим следующие формулы для определения дополнительного дохода.

Модель 2:

$$E_{\text{доп}} = C_U G_{\text{ТР}}^U x \left(N_{\text{БР}}^0 F(\lambda) + N_{\text{ТРУ}} (F(\lambda) - F(\lambda_{ds})) \right). \quad (24)$$

Модель 3:

$$E_{\text{доп}} = C_U G_{\text{ТР}}^U x N_{\text{БР}}^0 F(\lambda), \quad (25)$$

где $\lambda = \lambda_2 - \lambda_d + \lambda_{es}$.

5 Приведенная удельная стоимость плутония

Разработанные модели для определения дополнительного дохода от продажи сэкономленного плутония позволяют ввести понятие приведенной стоимости плутония C_{Pu} , обусловленной его свойствами как эффективного энергоносителя. Для этого, аналогично тому, как это делается для приведенной топливной составляющей стоимости производства электроэнергии [1], [2], приравняем дисконтированный доход, определенный одним из вышеприведенных соотношений (23) – (25) в соответствии с выбранной моделью расчета, выражению, определяющему этот же доход через указанную стоимость и количество наработанного избыточного плутония. При этом для определенности установим этот доход на протяжении проектного ресурса энергоблока с быстрым реактором:

$$E_{\text{доп}} = \int_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} \frac{C_{\text{Pu}} \dot{M}_{\text{Pu}}(t)}{\exp(\lambda_d(t-t_0))} dt, \quad (26)$$

где $\dot{M}_{\text{Pu}}(t)$ — скорость поступления избыточного плутония в ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами за весь жизненный цикл быстрого реактора, а C_{Pu} — искомая приведенная стоимость плутония.

Скорость поступления избыточного плутония определяется выражением:

$$\dot{M}_{\text{Pu}}(t) = N_{\text{БР}}(t) \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{КН} - 1)(1 - \varepsilon) + N_{\text{ТР}}(t) G_{\text{Pu}}^{\text{ТР}} (1 - \varepsilon). \quad (27)$$

Подставив в (27) формулы для количества быстрых и тепловых реакторов в рассмотренных выше расчетных моделях и выполнив интегрирование, получим выражения для определения количества избыточного плутония в принятых моделях.

Дальнейшее рассмотрение для простоты проводим для Модели 3.

Здесь уместно заметить, что Модель 3, в отличие от Моделей 1 и 2, не учитывает наработку плутония в тепловых реакторах, т. е. фактически представляет собой однокомпонентную систему. Однако при достаточно хорошем воспроизводстве в быстром реакторе и минимальном времени удвоения относительный вклад тепловых реакторов в наработку плутония в системе быстро падает, в предельном случае до нуля, поэтому Модель 3 является предельным случаем Моделей 1 и 2.

Определяемая в этой модели стоимость плутония является стоимостью плутония, нарабатываемого в быстрых реакторах.

Из выражения (26) получим следующее соотношение для цены плутония:

$$C_{\text{Pu}} = \frac{E_{\text{доп}}}{\int_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} \dot{M}_{\text{Pu}}(t) \exp(-\lambda_d(t-t_0)) dt} = \frac{E_{\text{доп}}}{M_{\text{Pu}}}. \quad (28)$$

Знаменатель формулы (28) по аналогии с приведенной энерговыработкой при определении ТСС может быть назван приведенной массой избыточного плутония, который нарабатывается в рассматриваемой системе.

В Модели 3 при полном использовании плутония на ввод быстрых реакторов количество быстрых реакторов возрастает по закону (21) с ростом массы избыточного плутония в соответствии с соотношением:

$$\dot{M}_{\text{Pu}}(t) = N_{\text{БР}}^0 (1 - \varepsilon) \frac{G_{\text{Pu}}^0 (\text{КН} - 1)}{T} \exp(\lambda_2(t-t_0)). \quad (29)$$

Из условия сохранения суммарной годовой энерговыработки системы тепловых и быстрых реакторов при замене тепловых реакторов быстрыми и соотношения (29) можно определить количество высвобождаемого урана за счет увеличения в системе количества быстрых реакторов:

$$G_{\text{U}}(t) = N_{\text{БР}}^0 x G_{\text{ТР}}^{\text{U}} \exp(\lambda_2(t-t_0)). \quad (30)$$

Выражение для приведенной массы избыточного плутония M_{Pu} в приближении Модели 3 в соответствии с (28) и (29) имеет вид:

$$M_{Pu} = N_{BP}^0 (1 - \varepsilon) \frac{G_{Pu}^0 (KH - 1)}{T} \cdot F(\lambda_{d2}), \quad (31)$$

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

Если считать, что полученный дополнительный доход (25) получен в конечном итоге за счет наработанного в быстрых реакторах избыточного плутония, то, зная его массу M_{Pu} , можно оценить его удельную стоимость:

$$C_{Pu} = C_U G_{TP}^U x \frac{T}{(1 - \varepsilon) G_{Pu}^0 (KH - 1)} \cdot \frac{F(\lambda)}{F(\lambda_{d2})}. \quad (32)$$

Рассмотрим простейший случай, в котором норма дисконтирования равна нулю, отсутствует эскалация цены на природный уран и $\Delta t = 0$. Тогда формулу (32) можно переписать в виде:

$$C_{Pu} = C_U G_{TP}^U x \frac{T}{(1 - \varepsilon) G_{Pu}^0 (KH - 1)} = \frac{C_U G_{TP}^U x}{M_{Pu}}. \quad (33)$$

Формула (33) определяет стоимость плутония как отношение годовой экономии затрат на природном уране за счет замещения теплового реактора быстрым реактором при их одинаковой энерговыработке к количеству избыточного плутония, наработанного за год в быстром реакторе.

Отметим некоторые обстоятельства.

Полученные соотношения (32) и (33) для стоимости плутония базируются на рыночной цене урана. Следовательно, определенную таким образом стоимость плутония можно в каком-то смысле назвать «квазирыночной».

Стоимость плутония, определяемая этими соотношениями, не зависит от стоимости заключительной стадии топливного цикла, на которой происходит выделение плутония. Следовательно, в ее определении не лежит «затратный» механизм, который зачастую предлагается для определения цены плутония.

Отметим, что в соответствии с формулами (32) и (33) при стремлении коэффициента накопления (KH) к 1 стоимость плутония стремится к бесконечности. Однако здесь необходимо иметь в виду, что при $KH = 1$ наработка избыточного плутония равна нулю и, естественно, равен нулю и дополнительный доход.

Разделив дополнительный доход, выраженный формулами (23) или (24) для Моделей 1 и 2, на приведенную массу избыточного плутония в соответствующих моделях, получим значения удельной приведенной стоимости плутония. Отметим, что удельная стоимость плутония или не зависит от структуры

генерирующих мощностей (в Моделях 1 и 3), или зависит только от соотношения быстрых и тепловых реакторов на начальный момент времени (в Модели 2).

Приведем соотношения для приведенной массы плутония и его удельной стоимости в приближении Моделей 1 и 2.

Модель 1:

$$M_{\text{Pu}} = (1 - \varepsilon) \left(\frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{KH} - 1) - G_{\text{Pu}}^{\text{TP}} x \right) \left(N_{\text{БР}}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) F(\tilde{\lambda}_{d2}), \quad (34)$$

$$C_{\text{Pu}} = \frac{C_U G_{\text{TP}}^U x \cdot (F(\tilde{\lambda}) - F(\lambda_{ds}))}{(1 - \varepsilon) \left(\frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{KH} - 1) - G_{\text{Pu}}^{\text{TP}} x \right) F(\tilde{\lambda}_{d2})}.$$

Модель 2

$$M_{\text{Pu}} = (1 - \varepsilon) \left(N_{\text{БР}}^0 \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{KH} - 1) + N_{\text{ТР}} G_{\text{Pu}}^{\text{TP}} \right) F(\lambda_{d2}), \quad (35)$$

$$C_{\text{Pu}} = \frac{C_U G_{\text{ТР}}^U x \left(N_{\text{БР}}^0 F(\lambda) + y N_{\text{ТР}} (F(\lambda) - F(\lambda_{ds})) \right)}{(1 - \varepsilon) \left(N_{\text{БР}}^0 \frac{G_{\text{Pu}}^0}{T} (\text{KH} - 1) + N_{\text{ТР}} G_{\text{Pu}}^{\text{TP}} \right) F(\lambda_{d2})}.$$

Представленные выкладки основаны на системном подходе и базируются на учете дополнительного дохода, потенциально получаемого в двухпродуктовой ЯЭС при учете рыночной цены высвободившегося природного урана в результате замены тепловых реакторов быстрыми реакторами. При этом повышение доходности в системе приводит к снижению ТСС, что позволяет количественно оценить повышение конкурентоспособности ЯЭС с быстрыми реакторами.

Вместо рыночной цены высвобождаемого природного урана может рассматриваться не менее рыночная цена соответствующего количества обогащенного урана или изготовленных на его основе ТВС для тепловых реакторов. При этом за счет продукта с большей добавленной стоимостью возрастает и стоимость плутония.

Включение в набор технико-экономических показателей АЭ удельной стоимости плутония и, соответственно, стоимости всего плутония (предмета труда) может рассматриваться как дополнительный фактор капитализации, в результате чего достигается увеличение собственных средств владельца плутония. Однако такая трактовка в настоящее время не является общепризнанной.

6 Пример расчета стоимости нарабатываемого плутония

Численные результаты расчета удельной приведенной стоимости плутония в приближении Модели 3 ЯЭС в соответствии с формулой (32) приведены в таблицах 1 (при временном лаге $\Delta t = 0$) и 2 (при временном лаге $\Delta t = 5$ лет). В таблицах M_{Pu} — избыточная приведенная наработка плутония за весь жизненный цикл, рассчитанная по формуле (31).

В расчетах использовались численные значения, характерные для двухкомпонентной ЯЭС с реакторами ВВЭР+БН:

$$C_{\text{доп}} = 100 \text{ \$/кг}; G_{\text{ТР}} = 200 \text{ т}; P_{\text{БР}} = 1220 \text{ МВт}; \text{КИУМ}_{\text{БР}} = 0,9034; P_{\text{ТР}} = 1250 \text{ МВт}; \\ \text{КИУМ}_{\text{ТР}} = 0,88; \text{КН} = 1,13; G_{\text{Pu}}^0 = 8,4 \text{ т}; T = 4,42 \text{ года}, L = 60 \text{ лет}.$$

На рисунке 2 результаты оценки стоимости плутония показаны графически при значениях эскалации цены природного урана 0 % и 3 % и $\Delta t = 0$. Там же показаны удельные затраты на извлечение плутония из ОЯТ быстрых реакторов при постоянной удельной стоимости его переработки 770 US\$/кг [6], [8]. При этом все затраты на переработку ОЯТ целиком отнесены на плутоний. Учитывая то, что среднее содержание плутония в ОЯТ (из активной зоны и зон воспроизводства) для реакторов БН составляет примерно 11 %, получаем стоимость плутония в этом случае около 7000 US\$/кг. Эта стоимость отражает «затратный» механизм ее оценки.

Таблица 1. Удельная приведенная стоимость плутония ($\Delta t = 0$), К\$/кг

Эскалация цены на природный уран, %	Время удвоения								
	$T_2 = 10$ лет			$T_2 = 25$ лет			$T_2 = 50$ лет		
	Избыточная приведенная наработка P_{Pu} за весь жизненный цикл M_{Pu} , т								
	222,25	28,91	7,43	37,73	8,33	3,56	22,88	6,14	2,98
	Норма дисконтирования r , %								
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
0	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95
3	342,93	265,57	180,44	279,03	188,29	133,08	252,79	167,41	123,85
5	911,88	630,08	346,26	677,39	371,25	202,79	585,79	305,44	176,91
	$T_2 = 75$ лет				$T_2 \rightarrow \infty$				
	Избыточная приведенная наработка P_{Pu} за весь жизненный цикл M_{Pu} , т								
	19,61	5,61	2,82	14,67	4,74	2,56			
	Норма дисконтирования r , %								
	0	5	10	0	5	10			
0	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95			
3	243,84	161,30	121,30	226,03	150,38	116,88			
5	555,11	286,60	169,97	494,91	253,47	158,12			

Таблица 2. Удельная приведенная стоимость плутония ($\Delta t = 5$ лет), К\$/кг

Эскала- ция цены на природ- ный уран, %	Время удвоения								
	$T_2 = 10$ лет			$T_2 = 25$ лет			$T_2 = 50$ лет		
	Избыточная приведенная наработка P_{Pu} за весь жизненный цикл M_{Pu} , т								
	314,31	32,03	6,52	43,34	7,50	2,54	24,53	5,16	1,98
Норма дисконтирования r , %									
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
0	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95
3	397,55	307,87	209,18	323,48	218,28	154,28	293,05	194,08	143,57
5	1163,81	804,16	441,92	864,54	473,82	258,81	747,63	389,82	225,79

	$T_2 = 75$ лет			$T_2 \rightarrow \infty$		
	Избыточная приведенная наработка P_{Pu} за весь жизненный цикл M_{Pu} , т					
	20,54	4,60	1,84	14,67	3,72	1,59
	Норма дисконтирования r , %					
	0	5	10	0	5	10
0	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95	81,95
3	282,68	187,00	140,62	262,03	174,33	135,49
5	708,48	365,78	216,93	631,64	323,50	201,80

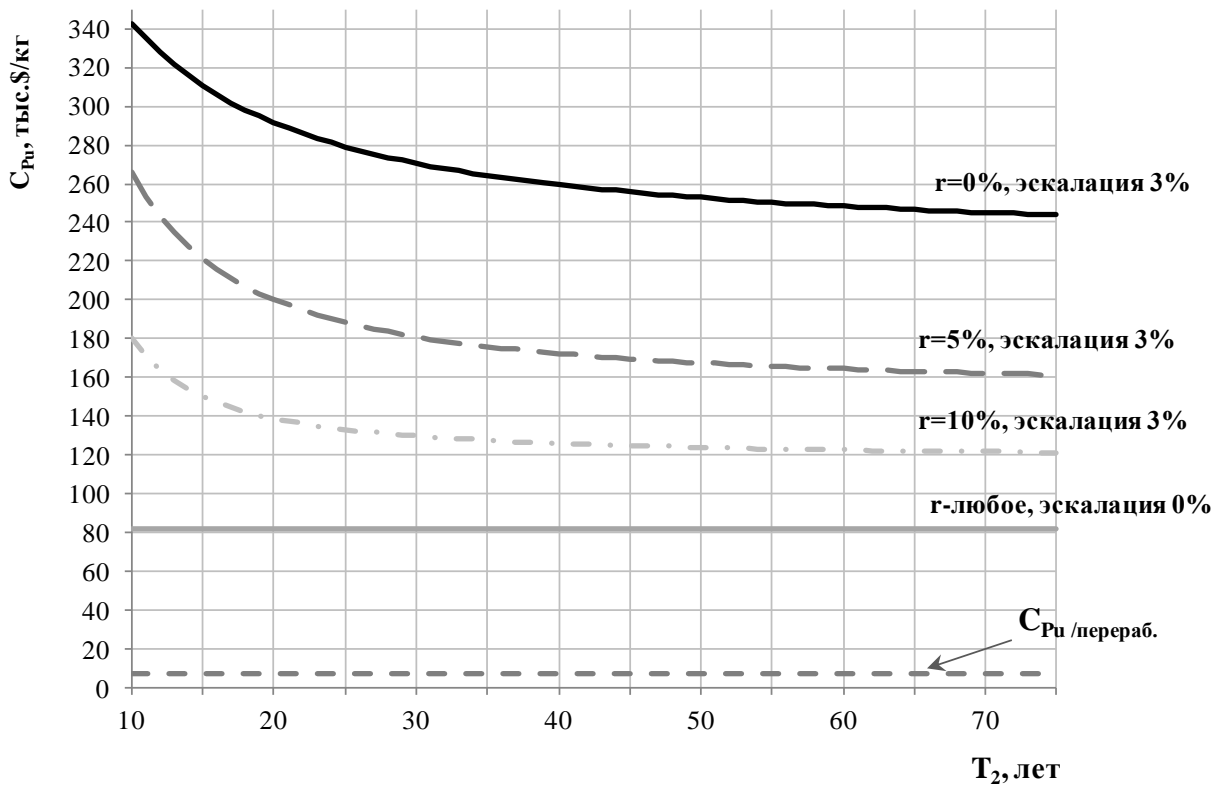


Рис. 2. Удельная стоимость плутония в ЯЭС в зависимости от времени удвоения при $\Delta t = 0$ и эскалации цены на природный уран в 0 и 3 %

Как видно из представленных результатов, «энергетическая» стоимость плутония во всех рассмотренных случаях существенно превышает его «затратную» стоимость, причем это превышение может быть значительным и увеличивается при учете возможной эскалации цены на природный уран. Это демонстрирует энергетическую эффективность использования плутония в двухкомпонентной ЯЭС.

Для случая нулевой эскалации цены на природный уран при любом значении дисконта рассчитанная удельная стоимость плутония не зависит от времени удвоения. При ненулевой эскалации удельная стоимость нарабатываемого плутония падает с увеличением времени удвоения. Причем для малых T_2 (10–25 лет) наблюдается более сильная зависимость C_{Pu} от T_2 . Так, при изменении T_2 с 10 до 25 лет удельная стоимость избыточного нарабатываемого плутония уменьшается на 20 %. Далее при изменении T_2 с 25 до 50 лет удельная стоимость избыточного нарабатываемого плутония уменьшается всего на 10 %.

Полученная зависимость стоимости плутония от времени удвоения показывает, что в «энергетическом» приближении наиболее эффективным является использование плутония в системах с коротким временем удвоения.

Следует отметить, что в данных исследованиях не учитывалась связь времени удвоения и коэффициента накопления, т. е. фактически принималось, что при постоянном коэффициенте накопления время удвоения зависит только от времени внешнего топливного цикла. Кроме того, не учитывалось влияние изотопного вектора нарабатываемого плутония на его стоимость. В этих направлениях требуется дальнейшее уточнение и развитие методики, а также интерпретации полученных результатов по стоимости плутония.

В соответствии с Моделью 3 в настоящих расчетах не учитывался эффект от экономии природного урана за счет ввода быстрых реакторов на плутонии из ОЯТ тепловых реакторов. Этот эффект, учет которого предусмотрен в Моделях 1 и 2, в значительной степени зависит от количества тепловых реакторов на начальный момент времени, то есть от «внешнего» источника плутония. Однако по мере роста мощностей на быстрых реакторах вклад этого эффекта значительно слабее рассмотренного здесь эффекта от быстрых реакторов. Тем не менее данный вопрос следует проработать в дальнейшем.

В настоящее время многие параметры рассматриваемых энергоблоков, а также, и особенно, показатели замкнутого ЯТЦ известны с определенной погрешностью, зачастую значительной. В связи с этим представляемые расчетные результаты носят характер предварительной оценки и в будущем должны уточняться. Однако с учетом относительного характера многих расчетных показателей представляется, что полученные результаты вполне корректно указывают дальнейшие направления исследований по улучшению и оптимизации технико-экономических характеристик быстрых натриевых реакторов и топливного цикла для них.

7 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, аналогично тому, как он определен в разделе 4. Поскольку доход от наработки плутония в общем случае обусловлен как быстрыми, так и тепловыми реакторами, необходимо перейти к понятиям «системный доход» и «системная ТСС». При этом все соотношения разделов 1 и 2 остаются в силе, меняется лишь смысл входящих в них величин.

Чтобы определить значение системной ТСС с учетом наработки плутония, к доходу от продажи электроэнергии, определяемому выражением (2), добавим доход от производства плутония, определяемый формулой (4), и все это приравняем к полным топливным затратам (1) в цикле:

$$\sum_i \sum_{t=t_0-T_1}^{t=t_0+T_{\text{end}}} F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)} = \sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} \frac{\text{ТСС} \cdot E(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}} + \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+\Delta t+L} \frac{C_U (1+es_{\text{доп}})^{(t-t_0)} G_U(t)}{(1+r)^{(t-t_0)}} \quad (36)$$

(топливные затраты) = (доход от э/э) + (доход от плутония)

Обозначения здесь такие же, как в формулах (1) и (2), со следующими отличиями:

$F_i(t)$ — топливные затраты на этапе i в системе тепловых и быстрых реакторов;

ТСС — топливная составляющая стоимости в системе с учетом наработки плутония (системная ТСС);

$G_U(t)$ — экономия природного урана за счет наработки плутония в системе;

$E(t)$ — производство электроэнергии в системе тепловых и быстрых реакторов.

Отсюда можно получить соотношение для системной топливной составляющей стоимости производства электроэнергии (ТСС) в виде:

$$\text{ТСС} = \frac{\sum_i \sum_{t=t_0-T_1}^{t=t_0+L+T_{\text{end}}} F_i(t) / (1+r)^{(t-t_0)} + C_U \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} (1+es_{\text{доп}})^{(t-t_0)} G_U(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} E(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}, \quad (37)$$

Первое слагаемое справа в выражении (37) представляет собой системную топливную составляющую в однопродуктовой модели (производство только электроэнергии) — TCC_{0SYS} :

$$TCC_{0SYS} = \frac{\sum_i \sum_{t=t_0-T_1}^{t=t_0+L+T_{end}} F_i(t)/(1+r)^{(t-t_0)}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} E(t)/(1+r)^{(t-t_0)}}. \quad (38)$$

Если известны значения «традиционной» топливной составляющей (без учета наработки плутония) для быстрой и тепловой компонент — $TCC_{БР}$ и $TCC_{ТР}$ [5], то получить значение TCC_{0SYS} можно по соотношению:

$$TCC_{0SYS} = \frac{TCC_{БР} \cdot Q_{БР} + TCC_{ТР} \cdot Q_{ТР}}{Q_{БР} + Q_{ТР}}, \quad (39)$$

где $Q_{БР}$ и $Q_{ТР}$ — соответственно значения приведенной энерговыработки быстрой и тепловой компонент ЯЭС, вычисляемые по соотношению:

$$Q_{БР} = P_{БР} \cdot \text{КИУМ}_{БР} \cdot 8766 \int_{t=t_0}^{t=t_0+L} N_{БР}(t) \exp(-\lambda_d(t-t_0)) dt. \quad (40)$$

Здесь принято, что годовая энерговыработка постоянна на протяжении всего жизненного цикла энергоблока и равна $P_{БР} \cdot \text{КИУМ}_{БР} \cdot 8766$; 8766 — среднее количество часов в году; $Q_{ТР}$ вычисляется по аналогичному соотношению.

Для количества быстрых реакторов $N_{БР}(t)$ и тепловых реакторов $N_{ТР}(t)$ справедливы соотношения:

в Модели 1 — (17) и (14);

в Модели 2 — (19) и $N_{ТР} = N_{ТР}^0 = const$;

в Модели 3 — (21) и $N_{ТР} = 0$.

Выполнив интегрирование в формуле (40), получим следующие соотношения для энерговыработки быстрой и тепловой компонент в рассматриваемых моделях:

Модель 1:

$$Q_{БР} = P_{БР} \cdot \text{КИУМ}_{БР} \cdot 8766 \cdot \left[\left(N_{БР}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) F_1(\tilde{\lambda}_{d2}) - \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} F_1(-\lambda_d) \right];$$

$$Q_{ТР} = P_{ТР} \cdot \text{КИУМ}_{ТР} \cdot 8766 \cdot \left[\left(N_{ТР}^0 + x \left(N_{БР}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) \right) F_1(-\lambda_d) - x \left(N_{БР}^0 + \frac{g}{\tilde{\lambda}_2} \right) F_1(\tilde{\lambda}_{d2}) \right]. \quad (41)$$

Модель 2:

$$Q_{БР} = P_{БР} \cdot \text{КИУМ}_{БР} \cdot 8766 \cdot \left[\left(N_{БР}^0 + yN_{ТР}^0 \right) F_1(\lambda_{d2}) - yN_{ТР}^0 F_1(-\lambda_d) \right];$$

$$Q_{ТР} = P_{ТР} \cdot \text{КИУМ}_{ТР} \cdot 8766 \cdot N_{ТР}^0 F_1(-\lambda_d). \quad (42)$$

Модель 3:

$$Q_{БР} = P_{БР} \cdot \text{КИУМ}_{БР} \cdot 8766 \cdot N_{БР}^0 F_1(\lambda_{d2}). \quad (43)$$

В этих формулах $F_1(\lambda) = \frac{\exp(\lambda L) - 1}{\lambda}$, где λ соответствует λ_d ; $\tilde{\lambda}_{d2}$ или λ_{d2} . Выражение (37) можно переписать в виде:

$$\text{TCC} = \text{TCC}_{\text{OSYS}} - \frac{C_U \sum_{t=t_0+\Delta t}^{t=t_0+L+\Delta t} (1 + eS_{\text{доп}})^{(t-t_0)} G_U(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}{\sum_{t=t_0}^{t=t_0+L} E(t) / (1+r)^{(t-t_0)}}, \quad (44)$$

или

$$\text{TCC} = \text{TCC}_{\text{OSYS}} - \Delta(\text{TCC}),$$

где TCC_{OSYS} — системная топливная составляющая стоимости в однопродуктовой модели, рассчитываемая по соотношению (38).

Значение $\Delta(\text{TCC})$ 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. Это значение может также трактоваться и как компенсация в этих условиях топливных затрат быстрых реакторов. Формулу для расчета значения $\Delta(\text{TCC})$ можно записать как:

$$\Delta(\text{TCC}) = \frac{E_{\text{доп}}}{Q_{БР} + Q_{ТР}}. \quad (45)$$

В формуле (45) величины $E_{\text{доп}}$, $Q_{БР}$ и $Q_{ТР}$ вычисляются по формулам (23) — (25) и (41) — (43) для соответствующих моделей.

Дальнейшее рассмотрение проведем в приближении Модели 3 для ЯЭС. Аргументы в пользу такого рассмотрения приведены в предыдущем разделе. Перейдя, как и в предыдущих разделах, от суммирования к интегрированию по времени и сделав необходимые преобразования, получим в приближении Модели 3 ЯЭС:

$$\Delta(\text{TCC}) = \frac{C_U G_{ТР}^U}{P_{ТР} \cdot \text{КИУМ}_{ТР} \cdot 8766} \cdot f, \quad (46)$$

где f является безразмерной функцией переменных, характеризующих реактор и топливный цикл:

$$f = \frac{\lambda_{d2} \cdot \exp(\lambda \Delta t) \cdot (\exp(\lambda L) - 1)}{\lambda \cdot (\exp(\lambda_{d2} L) - 1)}. \quad (47)$$

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 эффективней используется плутоний в данной ЯЭС и тем больше могут снизиться (компенсироваться) в ЯЭС топливные затраты. Функция f может оказаться полезной при технико-экономическом анализе ЯЭС как двухпродуктовой системы. Формула (47) показывает предельную относительную эффективность, которая может быть достигнута в конкретной ЯЭС в соответствии с Моделью 3.

Тогда для удельной приведенной топливной составляющей стоимости производства электроэнергии с учетом наработки плутония можно записать выражение:

$$TCC = TCC_{OSYS} - \frac{C_U G_{TP}^U}{P_{TP} \cdot \text{КИУМ}_{TP} \cdot 8766} \cdot f. \quad (48)$$

Рассмотрим частный случай, когда на протяжении всего рассматриваемого жизненного цикла энергоблока эскалация удельной цены на поступающий на рынок продукт (природный уран или ТВС) равна нулю, его годовая масса и годовая энерговыработка E постоянны, а значения T_2 стремятся к бесконечности, то есть по существу рассматривается открытый (однопроходный) топливный цикл. Тогда формулы (46) и (47) упрощаются и (46) переходит в:

$$\Delta(TCC) = \frac{C_U G_{TP}^U}{P_{TP} \cdot \text{КИУМ}_{TP} \cdot 8766} \cdot \exp(-\lambda_d \Delta t). \quad (49)$$

В число переменных, от которых зависит ТСС, 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 товар (в нашем случае на природный уран), который может поступать на внешний рынок, и временной лаг между моментом времени выхода с этим товаром на рынок и временем ввода энергоблока в эксплуатацию.

За реактор и топливный цикл отвечает T_2 — время удвоения установленной мощности быстрых реакторов системы. Значение T_2 определяется коэффициентом накопления плутония, длительностью кампании топлива в реакторе и длительностью внешнего топливного цикла. Последняя в основном

зависит от технологических особенностей топливного цикла и радиационных характеристик облученного топлива.

Если реактор работает в переменном режиме, то есть с переменным КИУМ, или эскалация цены на природный уран не постоянна на протяжении срока эксплуатации энергоблока, то для вычисления ТСС необходимо обратиться к формулам (37) и (38). Эти формулы являются наиболее общими для расчета ТСС с учетом наработки плутония в системе быстрых реакторов. Однако в этом случае вычисления сильно усложняются и необходимо использовать специальный компьютерный код.

Отметим, что при некоторых значениях параметров, входящих в формулу (44), значения ТСС могут стать отрицательными. Это будет показано ниже на примере энергоблока с быстрым реактором большой мощности типа БН в ЯЭС.

8 ТСС коммерческого реактора большой мощности типа БН с учетом наработки плутония

Рассмотрим применение изложенной в предыдущем разделе методики расчета ТСС с учетом наработки плутония на примере энергоблока с коммерческим быстрым реактором типа БН.

В соответствии с методикой расчета TSS_0 [1], [2], [5], то есть без учета наработки плутония, все затраты по начальной и заключительной стадиям топливного цикла дисконтируют к выбранной базисной дате и суммируют, чтобы получить общую сумму расходов на топливо.

Расчеты базируются в основном на физико-технических характеристиках энергоблока большой мощности типа БН, принятых в соответствии с [5], [6], [9], [10]. В качестве даты ввода энергоблока в эксплуатацию условно принят 2028 год. Именно к этой дате приводятся все топливные расходы, а также доходы от продажи электроэнергии. Временные лаги на переделах замкнутого топливного цикла в основном взяты из работы [5]. Длительность внешнего топливного цикла принята равной 4 годам (2 года ОЯТ находится во внутриреакторном хранилище, затем 1 год в бассейне выдержки и еще 1 год затрачивается на переработку ОЯТ, изготовление свежего топлива и транспортные операции).

Величины топливных начальных загрузок и регулярных подгрузок топлива приняты по данным монографии [6].

Оценки удельных затрат для переделов ядерного топливного цикла, принятые в данных расчетах, взяты также из монографии [6]. Они были получены в результате экспертного анализа и обобщения данных большого количества

источников, в том числе зарубежных [8], [11], [12] и др. Предполагается наличие централизованных производств 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 TSS_0 , а решающее значение имеют стоимости изготовления МОКС-топлива и переработки ОЯТ. Цена отвального урана в расчетах стоимости изготовления топлива принималась равной нулю.

Результаты расчетов топливной составляющей TSS_0 для быстрого реактора типа БН при норме дисконтирования $r = 0 \%$, 5% и 10% без учета производства плутония приведены в таблице 3 ($1 \text{ mills} = 10^{-3} \text{ US\$}$).

Таблица 3. TSS_0 для реакторов большой мощности типа БН при различной норме дисконтирования, mills/кВт·ч

Стадии топливного цикла	$r = 0 \%$	$r = 5 \%$	$r = 10 \%$
Начальная стадия	6,45	7,45	8,87
Заключительная стадия	3,95	1,60	1,18
Полная TSS_0	10,40	9,05	10,05

Как видно из данных таблицы 3, при изменении нормы дисконтирования от 0% до 10% TSS_0 сначала уменьшается, а затем несколько возрастает. Немонотонная зависимость TSS_0 как функции от нормы дисконтирования r объясняется разнонаправленностью изменения вкладов начальной и заключительной стадий топливного цикла в TSS_0 .

При расчетах технико-экономических показателей с учетом производства плутония прежде всего рассмотрим влияние цены природного урана. При этом будем полагать, что на один быстрый реактор количество ежегодно высвобождаемого урана и его рыночная цена постоянны на протяжении всего жизненного цикла энергоблока, а значение времени удвоения T_2 стремится к бесконечности, т. е. фактически рассматривается открытый топливный цикл. Кроме того, время запаздывания получения дополнительного дохода Δt принимается равным нулю, то есть совпадает со временем получения дохода от продажи электроэнергии. Таким образом, для расчета можно использовать формулу (49). С целью определения влияния цены природного урана на эффективность использования плутония расчеты были проведены при нескольких значениях указанной цены.

Поскольку под дополнительным продуктом понимается высвобожденный природный уран, произведение $C_U G_{TR}^U$ в формуле (49) представляет собой затраты на природный уран массой G_{TR}^U , где G_{TR}^U есть количество природного

урана, ежегодно высвобождаемое при замене одного теплового реактора быстрым реактором с эквивалентной электрической мощностью, т. е. годовая потребность теплового реактора в природном уране.

Рассмотрим замену теплового реактора ВВЭР быстрым реактором типа БН такой же установленной мощности. Значение G_{TR}^U можно принять равным 200 т, что соответствует приблизительно 22,5 т обогащенного (4,3 % по ^{235}U) урана в год. Результаты расчетов дополнительного дохода за весь жизненный цикл АЭС и ТСС быстрого реактора типа БН в приближении Модели 3, учитывающих производство в нем плутония, представлены в таблице 4. В расчетах использовалась программа FCCBNN [5]. Учитывалось влияние нормы дисконтирования в пределах 0–10 %/год. Потери плутония принимались равными нулю.

Таблица 4. Техничко-экономические показатели реактора типа БН с учетом рыночной стоимости высвобождаемого природного урана, $T_2 \rightarrow \infty$

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

Как видно из представленных в таблице 4 результатов, учет производства плутония дает возможность получить серьезный дополнительный доход за счет продажи на рынке освободившегося природного урана. Значения полного за 60 лет дисконтированного дохода значительны и лежат в пределах от 0,11 до 3,6 USB\$ в зависимости от рыночной цены на природный уран и нормы дисконтирования.

Учет этого дохода эквивалентным образом приводит к заметному уменьшению топливной составляющей. Сравнение данных таблиц 3 и 4 свидетельствует о том, что при принятой минимальной цене на природный уран, равной US\$50/кг, учет наработки плутония снижает ТСС примерно на 10 %. При росте стоимости природного урана до US\$300/кг, что вполне возможно на горизонте текущего столетия при интенсивном развитии АЭ с тепловыми реакторами, ТСС снижается уже в 2–3 раза. Отметим, что средняя цена в US\$200/кг соответствует ежегодной ее эскалации в 3 % на протяжении жизненного цикла АЭС в 60 лет при начальной цене в US\$100/кг.

В таблице 5 и на рисунках 3 и 4 показаны результаты расчета ТСС реактора типа БН в приближении Модели 3 при совместном учете замыкания топливного цикла и эскалации цены на природный уран. Расчеты проведены для случая начальной цены высвобождаемого природного урана в 100 US\$/кг с возможной ее эскалацией в пределах 3–5 % годовых. При этом варьировалось время удвоения в топливном цикле от 10 до 50 лет. Значение Δt принималось равным нулю. На рисунках, кроме того, показаны значения TCC_0 , то есть значения топливной составляющей без учета наработки плутония.

Таблица 5. ТСС для реактора большой мощности типа БН при учете стоимости высвобождаемого природного урана, mills/кВт·ч

Эскалация цены на природный уран, %	Время удвоения								
	$T_2=10$ лет			$T_2=25$ лет			$T_2=50$ лет		
	Норма дисконтирования r , %								
	0	5	10	0	5	10	0	5	10
TCC_0	10,4	9,05	10,05	10,4	9,05	10,05	10,4	9,05	10,05
0	8,33	6,98	7,98	8,33	6,98	7,98	8,33	6,98	7,98
3	1,72	2,33	5,48	3,34	4,28	6,68	4,00	4,81	6,92
5	-12,68	-6,90	1,29	-6,74	-0,35	4,92	-4,43	1,32	5,57

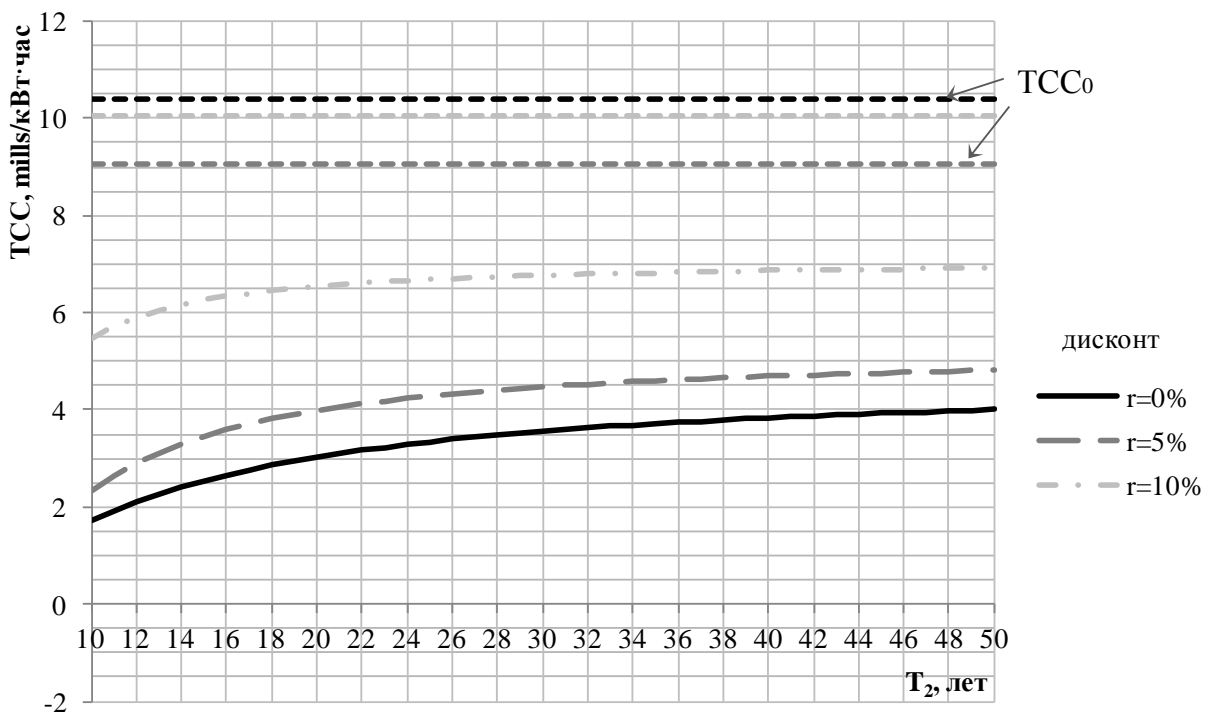


Рис. 3. ТСС для реактора большой мощности типа БН в зависимости от времени удвоения при 3%-й эскалации стоимости природного урана

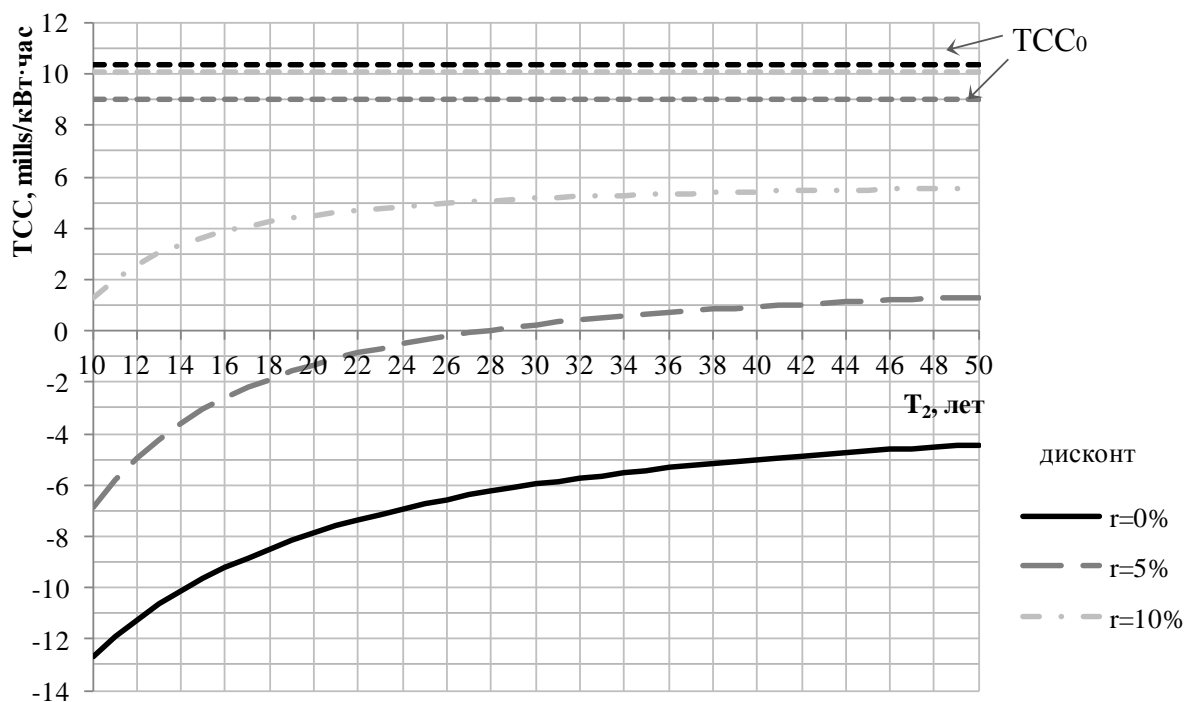


Рис. 4. ТСС для реактора большой мощности типа БН в зависимости от времени удвоения при 5%-й эскалации стоимости природного урана

В настоящее время не представляется возможным определиться с точным значением указанных параметров, можно лишь приблизительно сказать, что вероятными значениями для разрабатываемой в настоящее время двухкомпонентной ЯЭС на начальном этапе перехода к ней будут: время удвоения для быстрого реактора около 50 лет, эскалация цены на природный уран не более 3 % годовых и норма дисконтирования r около 5 %.

При отсутствии эскалации, вне зависимости от времени удвоения, значения ТСС постоянны для любой ставки дисконтирования.

При ненулевых значениях эскалации наблюдается достаточно сильная зависимость ТСС от времени удвоения (как видно из рис. 3, 4, и данных таблицы 5, особенно при малых значениях T_2).

При малых временах удвоения и большом значении эскалации (5 %) значения ТСС для ставки дисконтирования 0–5 % отрицательны. При больших значениях времени удвоения (в нашем случае это более 20–30 лет) зависимость ТСС от эскалации цены урана ослабевает даже при малых значениях нормы дисконтирования, поэтому изменение ТСС при увеличении эскалации цены существенно меньше. Например, при $r = 0$ % и при росте годовой эскалации от 0 до 5 % значение ТСС меняется в пределах от 8 до -6,7 mills/кВт·ч при $T_2 = 25$ лет и от 8 до -4 mills/кВт·ч при $T_2 = 50$ лет. При большем значении нормы дисконтирования зависимость еще более ослабевает. Так, при $r = 10$ % в тех же пределах изменения годовой эскалации значение ТСС меняется в пределах 8—4,9 mills/кВт·ч при $T_2 = 25$ лет и 8—5,6 mills/кВт·ч при $T_2 = 50$ лет.

Отметим, что период удвоения для быстрого реактора определяется характеристиками воспроизводства плутония в реакторе и характеристиками внешнего топливного цикла.

Оценки показывают, что для энергоблока с реактором БН-типа большой мощности и топливного цикла для него со временем удвоения порядка 50 лет, нормой дисконтирования 5 %, при начальной цене природного урана 100 US\$/кг и его ежегодной эскалации в 3 % с нулевым значением Δt (без учета запаздывания) потенциальный максимальный дополнительный доход в ЯЭС за весь проектный ресурс энергоблока составит около 1,1 US\$, что эквивалентно снижению ТСС для реактора большой мощности типа БН до 4,8 mills/кВт·ч. Отметим, что значение ТСС, рассчитанное без учета дополнительного дохода от продажи урана, составляет около 9,0 mills/кВт·ч (как показано на рис. 3, 4), т. е. имеет место снижение ТСС почти в 2 раза.

С учетом того, что вклад ТСС в полную удельную стоимость производства электроэнергии (значение LCOE) составляет около 15 %, учет производства плутония на ЭБ с быстрым реактором большой мощности типа БН приводит к значительному уменьшению LCOE — до 15 % и более — при высоких ценах на природный уран. Этот эффект в конечном итоге обусловлен учетом рыночной стоимости высвобождаемого урана при его потенциальном экспорте. Приведенные оценки эффекта являются минимально возможными, больший эффект может быть достигнут при учете экспорта изготовленных на его основе ТВС для тепловых реакторов, как высокотехнологичного продукта с максимальной добавочной стоимостью.

На рис. 5 представлены данные ТСС для реактора типа БН в зависимости от коэффициента накопления при значении эскалации стоимости природного урана 3 %, там же для наглядности приведены данные ТСС при нулевой эскалации (значение одинаково при любой ставке дисконтирования и равно 8,3 mills/кВт·ч). Значения ТСС определены согласно формулам (47) и (48). Зависимость функции f от КН имеет место через λ_2 и время удвоения T_2 , которое можно записать в виде:

$$T_2 = \frac{(T + T_{\text{ВН}}) \cdot (1 + \varepsilon)}{\text{КН} - 1}.$$

Для реактора типа БН с коэффициентом накопления КН равным 1,17, значение ТСС составит 4–7 mills/кВт·ч в зависимости от нормы дисконтирования. При повышении КН до значений порядка 1,4 значения ТСС уменьшатся до 3–7 mills/кВт·ч.

При эскалации стоимости природного урана в 5 % качественно картина не меняется, но значения ТСС становятся отрицательными: при $r = 0$ % для любого КН; при $r = 5$ % для КН > 1,43.

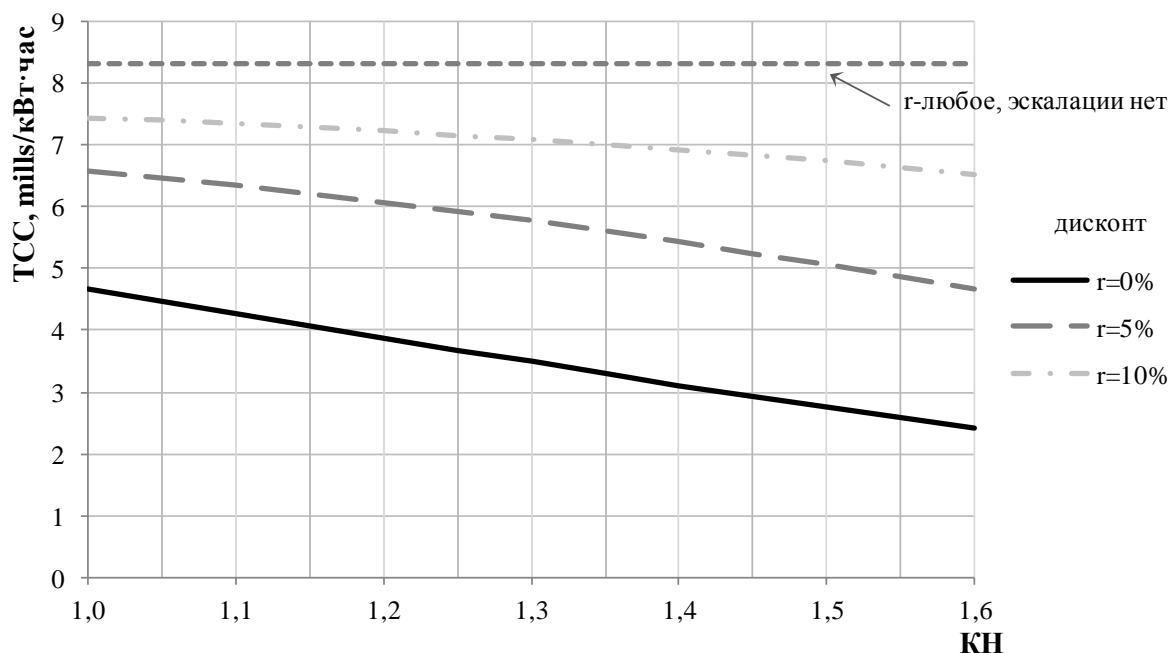


Рис. 5. ТСС для реактора большой мощности типа БН в зависимости от коэффициента накопления при 3%-й эскалации стоимости природного урана

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен новый подход к определению топливной составляющей стоимости (ТСС) электроэнергии, производимой в ЯЭС с быстрыми и тепловыми реакторами. В отличие от большинства применяемых ранее подходов, в настоящей работе предпринята попытка разработать расчетную методику, учитывающую двухпродуктовый характер технологии – производство электричества и плутония. При этом необходимым условием становится совместное рассмотрение реакторных частей топливного цикла быстрых и тепловых реакторов. Это делает возможным оценить компенсацию топливных затрат в ЯЭС за счет производства плутония и, соответственно, снижение ТСС. Дополнительно, в рамках предлагаемой методики открывается возможность введения понятия удельной приведенной стоимости плутония, аналогично тому, как это делается при определении удельной приведенной топливной составляющей стоимости производства электроэнергии.

Методика учитывает наработку плутония в реакторах и соответствующее расширение электрогенерации на быстрых реакторах как источник дохода за счет экономии (высвобождения) природного урана при сокращении парка тепловых реакторов, работающих на природном уране, при неизменной или возрастающей установленной мощности ЯЭС. Сэкономленный уран имеет вполне реальную рыночную цену. Такой подход положен в основу построения

математических моделей и вывода соотношений для расчета системной ТСС, а также для оценки удельной стоимости плутония.

Указанные соотношения связывают следующие основные топливные характеристики рассматриваемых ядерных реакторов и технико-экономические показатели топливного цикла ЯЭС:

- 1) единичные установленные мощности быстрых и тепловых реакторов в системе и их КИУМы;
- 2) годовую потребность теплового реактора в природном уране;
- 3) годовую наработку плутония в тепловом реакторе;
- 4) начальную загрузку плутония в быстром реакторе;
- 5) длительность кампании быстрого реактора;
- 6) коэффициент накопления плутония в быстром реакторе;
- 7) период удвоения плутония для быстрого реактора;
- 8) норму дисконтирования, принятую для ЯЭС;
- 9) цену природного урана на рынке в данный момент;
- 10) прогнозируемую (или устанавливаемую экспертно) эскалацию цены на природный уран.

Поскольку предлагаемый подход базируется на энергетической ценности нарабатываемого плутония, он позволяет исключить затратный механизм оценки его стоимости.

Анализ полученных соотношений показал, что уточненная ТСС, а также расчетная стоимость плутония, зависят от многих характеристик ЯЭС. В частности, они в значительной степени определяются 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 ТСС и удельной приведенной стоимости плутония в двухпродуктовой модели ЯЭС с реакторами большой мощности типа БН и ВВЭР. Результаты показали, что для энергоблока с реактором большой мощности типа БН и топливного цикла с реально достижимыми параметрами (временем удвоения порядка 50 лет, нормой дисконтирования 5 %, начальной ценой природного урана 100 US\$/кг и его ежегодной эскалацией в 3 %) учет наработки плутония приводит к снижению ТСС с 9,0 до 4,8 mills/кВт·ч, то есть имеет место снижение ТСС почти в 2 раза. С учетом того, что вклад ТСС в полную удельную стоимость производства электроэнергии (LCOE) по оценкам составляет около 15 %, получим, что производство плутония приводит к значительному уменьшению LCOE — до 10 % и более.

Результаты расчетов во всех рассмотренных случаях показывают весьма значительную удельную приведенную стоимость плутония. При этом минимальная приведенная удельная стоимость плутония, полученная для такой системы, при постоянной текущей цене на природный уран (порядка \$100/кг),

нулевой ставке дисконтирования и нулевом временном лаге по отношению к базовой дате составляет около К\$80/кг.

Сравнение полученной удельной стоимости плутония, базирующейся в конечном итоге на энергетическом эквиваленте плутония и урана, и стоимости плутония, оцененной на основании затрат на заключительную стадию топливного цикла (извлечение плутония из ОЯТ) — порядка \$7000/кг, указывает на экономическую эффективность замыкания топливного цикла даже при существующих ценах на уран.

Разработанный подход к оценке влияния производства плутония в реакторной части топливного цикла для энергоблока с быстрым реактором на его топливные затраты и в конечном итоге на ТСС производимой на нем электроэнергии в совокупности с разработанной в рамках традиционного подхода и реализованной в компьютерном коде методикой расчета ТСС быстрого реактора являются основой для интегральной методики и компьютерного кода расчета ТСС, учитывающих специфику реакторной части топливного цикла для быстрого реактора. Такая методика является полезной для сопоставительных аналитических исследований в обоснование выбора путей развития двухкомпонентной ЯЭС с тепловыми и быстрыми реакторами в едином замкнутом ЯТЦ.

Характерной особенностью предлагаемой методики является то, что, в отличие от традиционного метода учета дохода от продажи только электроэнергии, получателями дохода от сэкономленного урана являются очень отстраненные от АЭС структуры, вплоть до государства в целом. Однако в роли АЭС с быстрым реактором в создании этой возможности не приходится сомневаться. Именно в реакторе АЭС в результате ядерно-физических процессов происходит конвертация слабо делящегося ^{238}U в дополнительный сырьевой энергетический ресурс — плутоний. Разработанная методика позволяет увидеть и учесть этот доход в технико-экономических показателях АЭС.

В развитие предлагаемого подхода целесообразно более детально рассмотреть влияние нейтронно-физических характеристик быстрого реактора, в частности изотопного состава нарабатываемого плутония, на ТСС производимой электроэнергии. Необходимо также учесть использования и наработки плутония в тепловых реакторах с загрузкой МОКС-топлива. Кроме того, необходима также оценка вклада дополнительных, по сравнению с урановым топливом, затрат на переделы смешанного уран-плутониевого топлива. Эти вопросы в настоящей работе не рассматривались, их следует проработать в дальнейшем.

В заключение подчеркнем, что ни значение ТСС, определяемое в соответствии с международной признанной методикой расчета LUFС, ни значение ТСС, учитывающее наработку плутония и определяемое в соответствии с предлагаемым подходом, нельзя рассматривать в качестве истинной стоимости

производства 1 кВт·ч электроэнергии для АЭС. Эти значения следует рассматривать только в качестве системных индикаторов, учитывающих достигнутую эффективность технологий использования топливных ресурсов атомной энергетики. Истинная себестоимость электроэнергии для каждого момента (или интервала) времени зависит от множества переменных экономических, технологических и социополитических факторов, значения которых невозможно предсказать заранее для всего, весьма длительного, срока эксплуатации ядерного энергоблока. Вместе с тем необходимость и полезность таких индикаторов представляется несомненной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Экономика ядерного топливного цикла, ОЭСР/АЯЭ. / Пер. с англ. Информ-Атом. — Москва: ЦНИИАтоминформ. — 1999. — 141 с.
3. Единые отраслевые методические рекомендации по определению показателя LCOE и предельной стоимости сооружения АЭС в России, обеспечивающей конкурентоспособный уровень показателя LCOE. МУ_УПС.93.01.01. Утверждены приказом Госкорпорации «Росатом» от 10.05.2017 №9/599-П.
4. Черняховская Ю.В. Эволюция методологических подходов к оценке стоимости электроэнергии. Анализ зарубежного опыта // Вестник ИГЭУ. Вып. 4, 2016.
5. 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, 2014.
6. 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.
7. Уолтер А., Рейнольдс А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. — М., Энергоатомиздат, 1986.
8. Shropshire D.E. et al. Advanced Fuel Cycle Cost Basis, INL/EXT-07-1207 Rev.1 2008. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/71325086.pdf> (дата доступа 03.03.2021).
9. 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.

10. *Матвеев В.И., Хомяков Ю.С.* Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. — Москва: Издательский дом МЭИ. — 2012.

11. *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. URL: <https://www.belfercenter.org/sites/default/files/legacy/files/repro-report.pdf>.

12. *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. Полный текст доступен на сайте <http://www.web.mit.edu/nuclearpower/>.

Подписано к печати 19.07.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆. Усл. п. л. 1,5. Уч.-изд. л. 2,1.
Тираж 55 экз. Заказ № 106.

Отпечатано в ОПиНТИ методом прямого репродуцирования с оригинала авторов.
249033, Обнинск Калужской обл., пл. Бондаренко, 1.
АО «ГНИЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского»