

УДК 621.039.003

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УДЕЛЬНЫХ ДИСКОНТИРОВАННЫХ ЗАТРАТ НА ПРОИЗВОДСТВО ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА АЭС С РАЗЛИЧНЫМИ ТИПАМИ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

© 2020 г. Д. В. Ковганко<sup>1,\*</sup>, А. А. Андрианов<sup>2,\*\*</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

<sup>2</sup> Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ, Обнинск, 249034, Россия

\*e-mail: d\_kovganko@mail.ru

\*\*e-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Поступила в редакцию 19.05.2020 г.

После доработки 02.07.2020 г.

Принята к публикации 22.09.2020 г.

В статье приводятся результаты прогнозирования удельных дисконтированных затрат на производство электроэнергии на АЭС с различными типами ядерных реакторов с учетом неопределенности в стоимостных данных по сооружению и эксплуатации реакторных установок, а также по товарам и услугам топливного цикла. Рассмотрены три типа тепловых реакторов, работающих в открытом топливном цикле, и четыре варианта быстрых реакторов, функционирующих в замкнутом уран-плутониевом топливном цикле. По результатам оценки удельных дисконтированных затрат с учетом неопределенности в их значениях, обусловленных разбросом в стоимостных данных, сделан вывод, что нельзя сделать однозначное суждение о наибольшей привлекательности той или иной концепции быстрых реакторов, опираясь только на анализ удельных дисконтированных затрат, а также некорректно делать категорические утверждения о более низкой экономической эффективности и конкурентоспособности быстрых реакторов по сравнению с тепловыми реакторами.

*Ключевые слова:* удельные дисконтированные затраты, АЭС, ядерный топливный цикл, тепловые реакторы, быстрые реакторы, неопределенность

DOI: 10.1134/S2304487X20040033

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Оценка экономической эффективности ядерных энерготехнологий, основанная на показателе удельных дисконтированных затрат (LCOE от англ. levelised cost of electricity), получила наибольшее распространение в связи с ее простотой, наименьшим объемом требуемых для ее проведения исходных данных, а также возможностью дать четкую экономическую интерпретацию данному показателю. В частности, на основе данного показателя построена методология экономической оценки для реакторных систем четвертого поколения и методология ИНПРО/МАГАТЭ в области “Экономика”, включая соответствующие аналитические инструменты оценки экономической эффективности G4-ECONS и NEST [1–3]. Также известны многочисленные модификации данного подхода, позволяющие учесть неопределенность параметров модели.

В рамках данного подхода для количественной оценки экономической эффективности и ранжирования проектов используется показатель удельных дисконтированных затрат на производство

электроэнергии (также известны названия – тариф безубыточности, уравновешенная себестоимость производства электроэнергии и ряд других). Данный показатель определяет такой постоянный тариф на продаваемую электроэнергию, при котором суммарная дисконтированная выручка от продажи энергии точно равна сумме дисконтированных общих затрат:

$$LCOE = \sum_{t=T_0}^{T_2} \frac{R_t}{(1+d)^t} / \sum_{t=T_1}^{T_2} \frac{W_t}{(1+d)^t}, \quad (1.1)$$

где  $R_t$  – текущие денежные расходы в моменты времени  $t$ ,  $W_t$  – текущая энерговыработка,  $d$  – норма дисконтирования,  $T_1$  – длительность строительства, лет,  $T_2$  – длительность жизненного цикла проекта, лет.

Экономическая интерпретация показателя LCOE подразумевает, что при тарифе LCOE на жизненном цикле АЭС суммарная выручка от продажи электроэнергии равна суммарным полным затратам, т.е. доход собственника АЭС равен нулю. Очевидно, что при сравнении и ранжиро-

вании проектов АЭС по экономическому показателю предпочтение отдается тому проекту, у которого значение данного показателя окажется минимальным.

В настоящей работе выполняется оценка *LCOE* для АЭС с различными типами ядерных реакторов с учетом неопределенности в стоимостных данных по сооружению и эксплуатации реакторных установок, а также по товарам и услугам ядерного топливного цикла (ЯЭС) [4].

## 2. РАССМОТРЕННЫЕ ВАРИАНТЫ ТЕПЛОВЫХ И БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ

Рассмотрены три типа тепловых реакторов (LWR, HWR и ALWR), работающих в открытом ЯТЦ (две опции обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ): долговременное хранение ОЯТ в централизованном хранилище и окончательное геологическое захоронение ОЯТ), и четыре варианта быстрых реакторов (FR-1, FR-2, AFR и FR-U), функционирующих в замкнутом уран-плутониевом ЯТЦ. Основные технические характеристики реакторов, включая данные о составе свежего и отработавшего топлива, приведены в [5, 6].

LWR – реактор типа PWR со средним выгоранием 45 ГВт дней/т тм, обогащением топлива 4%, удельной энергонапряженностью активной зоны 38.5 МВт/т и КИУМ 85%.

ALWR – это усовершенствованный LWR с высоким выгоранием топлива. Равновесная загрузка топлива в ALWR на 30% меньше, чем в LWR. Это объясняется более длительным временем пребывания топлива в активной зоне и более высоким средним уровнем выгорания, несмотря на то, что у ALWR полная загрузка активной зоны на 10% больше, чем у LWR вследствие меньшей удельной энергонапряженности активной зоны. Меньшая ежегодная потребность в топливе ALWR делает его более экономически привлекательным, чем LWR. Начальное обогащение топлива составляет 3.4%, равновесное обогащение топлива – 4.95%.

HWR – тяжеловодный водо-водяной ядерный реактор со средним выгоранием 7 ГВт дней/т тм, топливо на основе природного урана, удельная энергонапряженность активной зоны – 24.0 МВт/т, КИУМ – 85%.

FR-1 – реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, имеющий коэффициент воспроизводства близкий к 1 и средним (активная зона и бланкеты) выгоранием топлива ~38 ГВт дней/т тм.

FR-2 – прототип быстрого реактора-размножителя с натриевым теплоносителем со средним коэффициентом воспроизводства 1.16 и средним

(активная зона и бланкеты) выгоранием топлива ~31 ГВт дней/т тм.

AFR – коммерческий реактор на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем со средним коэффициентом воспроизводства 1.2 и средним (активная зона и бланкеты) выгоранием топлива – 54 ГВт дней/т тм. В отличие от FR-1 и FR-2, свежее топливо для AFR содержит около 1% минорных актинидов (МА).

FR-U – концепция быстрого реактора со свинцовым теплоносителем, в котором используется обогащенное урановое топливо (обогащение около 15% по  $^{235}\text{U}$ ) для стартовой загрузки активной зоны и первых перегрузок, предполагается последующая переработка ОЯТ и использование вторичного ядерного топлива (Pu + U + МА). Бланкет не предусмотрен. Коэффициент воспроизводства – 1.05, выгорание ~72.8 ГВт дней/т тм.

Исходные технические данные по реакторным установкам (тепловая мощность, КПД, КИУМ, период строительства, выгорание топлива и т.д.) можно найти в [5, 6]. Для тепловых реакторов были рассмотрены два варианта обращения с ОЯТ: захоронение ОЯТ в глубоких геологических формациях после 5 лет охлаждения и хранение ОЯТ в бассейнах выдержки и централизованном хранилище в течение всего жизненного цикла.

## 3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Оценка показателей экономической эффективности АЭС с различными типами ядерных реакторов требует набора стоимостных исходных данных по добыче, конверсии, обогащению урана, изготовлению топлива, хранению, переработке, окончательному захоронению ОЯТ и РАО, а также по капитальным затратам и затратам на эксплуатацию и техническое обслуживание АЭС. В табл. 1 приведен актуальный разброс в данных о единовременных удельных капитальных затратах, затратах на эксплуатацию и техническое обслуживание тепловых и быстрых реакторов. В табл. 2 показан разброс в стоимостных данных по различным пределам ЯТЦ. При проведении оценки предполагалось, что все затраты распределены равномерно в указанных пределах. Таблицы подготовлены на основе данных, представленных в работе [4]. Ставка дисконтирования была принята равной 5%.

## 4. СРАВНЕНИЕ *LCOE* И ЕГО СОСТАВЛЯЮЩИХ

Удельные дисконтированные затраты *LCOE* (милль<sup>1</sup>/кВт ч) включают в себя три составляю-

<sup>1</sup> Милль – производная денежная единица, равная одной тысячной доле доллара и, соответственно, одной десятой доле цента.

**Таблица 1.** Единовременные удельные капитальные затраты и затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание

Аспект	Единица измерения	Тип реактора	Диапазон
Единовременные удельные капитальные затраты	\$/кВт(е)	LWR	2500–6300
		HWR	2400–6100
		FR	2400–7600
Постоянные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание	\$/кВт/год	LWR	60–87
		HWR	60–87
		FR	65–92
Переменные затраты на эксплуатацию и техническое обслуживание	\$/кВт/ч	LWR	0.8–2.7
		HWR	0.8–2.7
		FR	1.1–2.9

**Таблица 2.** Стоимость товаров и услуг по переделам ЯТЦ

Этап ЯТЦ	Единица измерения	Диапазон
Добыча/переработка урана	\$/кг U	34–296
Конверсия урана	\$/кг U	6.5–19
Обогащение урана	\$/кг EPP	97–154
Изготовление топлива для LWR (UOX)	\$/кг тм	230–575
Изготовление топлива для HWR (UOX)	\$/кг тм	125–327
Изготовление топлива для FR (МОКС, а.з.)	\$/кг тм	2700–7600
Изготовление топлива для FR (бланкет)	\$/кг тм	270–690
Изготовление топлива для FR (урана)	\$/кг тм	500–1240
Изготовление топлива для LWR (UOX)	\$/кг тм	610–1250
Переработка ОЯТ для HWR (UOX)	\$/кг тм	610–1250
Переработка ОЯТ для FR (МОКС, а.з.)	\$/кг тм	900–2500
Переработка ОЯТ для FR (бланкет)	\$/кг тм	900–2500
Хранение ОЯТ LWR	\$/кг тм в год	5–10
Хранение ОЯТ HWR	\$/кг тм в год	5–10
Хранение ОЯТ FR	\$/кг тм в год	7–12
Захоронение ОЯТ LWR	\$/кг тм	289–873
Захоронение ОЯТ HWR	\$/кг тм	289–873
Хранение плутония	\$/кг Pu в год	2280–3762

щих: составляющую, связанную с капитальными затратами ( $LUAC$ ), составляющую, связанную с ежегодными затратами на эксплуатацию и техническое обслуживание ( $LUOM$ ), и составляющую, связанную с расходами на изготовление свежего топлива и обращение с ОЯТ ( $LUFC$ ):

$$LCOE = LUAC + LUOM + LUFC.$$

В настоящей работе  $LCOE$  и его составляющие были рассчитаны с учетом неопределенности в основных стоимостных данных, используемых при оценке удельных дисконтированных затрат согласно табл. 1 и 2.

Одним из популярных в последнее время подходов к анализу неопределенностей является

применение статистических методов, предполагающих задание исходных неопределенностей в виде случайных величин с известным законом распределения (метод Монте-Карло) [7, 8]. Данная методика основана на реализации следующего алгоритма: определение набора входных параметров, влияющих на неопределенность результирующего функционала, формирование наборов исходных входных данных путем случайного выбора значений входных параметров, выполнение расчетов интересующих функционалов, статистическая обработка результатов расчетов и определение оценок статистических характеристик распределений результирующих функционалов.

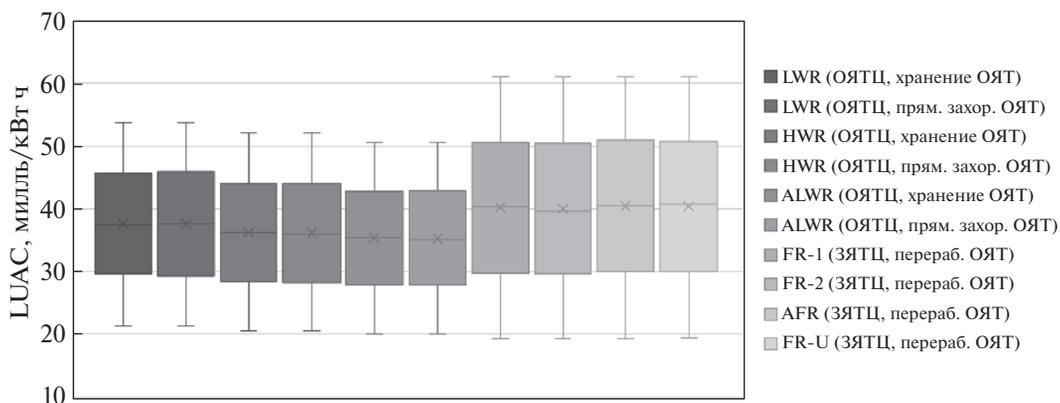


Рис. 1. Разброс в LUAC.

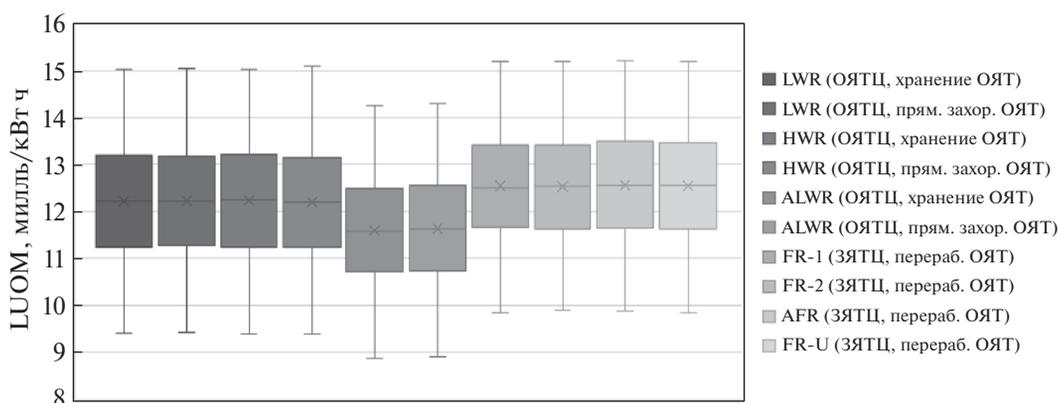


Рис. 2. Разброс в LUOM.

Представляется целесообразным изображать неопределенности в *LCOE* с использованием диаграммы размаха. Диаграммы размаха (“ящик с усами”) – это удобный способ визуального представления групп числовых данных через квартили [9]. Прямые линии, исходящие из ящика, называются “усами” и используются для обозначения максимального наблюдаемого разброса за пределами верхнего и нижнего квартилей. Границами “ящика” служат первый и третий квартили (25-й и 75-й процентили соответственно), линия в середине “ящика” – медиана (50-й процентиль). Концы “усов” – края статистически значимой выборки, и они могут определяться несколькими способами. Наиболее распространённые значения, определяющие длину “усов”: минимальное и максимальное наблюдаемые значения данных по выборке, а также 5-й и 95-й процентили. Данные, выходящие за границы “усов” (выбросы), могут отображаться на графике в виде точек. Иногда на графике отмечают среднее арифметическое и его доверительный интервал.

На основе данных, приведенных в табл. 1 и 2, произведены расчеты *LUAC*, *LUOM*, *LUFC* и *LCOE*. При оценке вероятных значений *LCOE* и ее составляющих методом Монте-Карло для обеспечения статистической значимости результатов было сгенерировано 10 000 вариантов входных стоимостных данных.

Рис. 1–4 демонстрируют диаграммы размаха для *LUAC*, *LUOM*, *LUFC* и *LCOE*, на которых изображены средние значения, 25-й, 50-й и 75-й процентили, минимальные и максимальные значения. В табл. 3 приведены соответствующие данные в виде средних значений, абсолютных и относительных неопределенностей ( $1\sigma$ ) для рассматриваемых вариантов.

Анализ данных, представленных в табл. 3 и на рис. 1–4, позволяет сделать следующие заключения касательно *LUAC*, *LUOM*, *LUFC* и *LCOE* для рассмотренных технологических вариантов. Разница между максимальными и минимальными средними значениями *LUAC*, *LUOM*, *LUFC* и *LCOE* для рассматриваемых вариантов составляет 5.2, 1.0, 10.9 и 13.4 милль/кВт ч соответственно, а

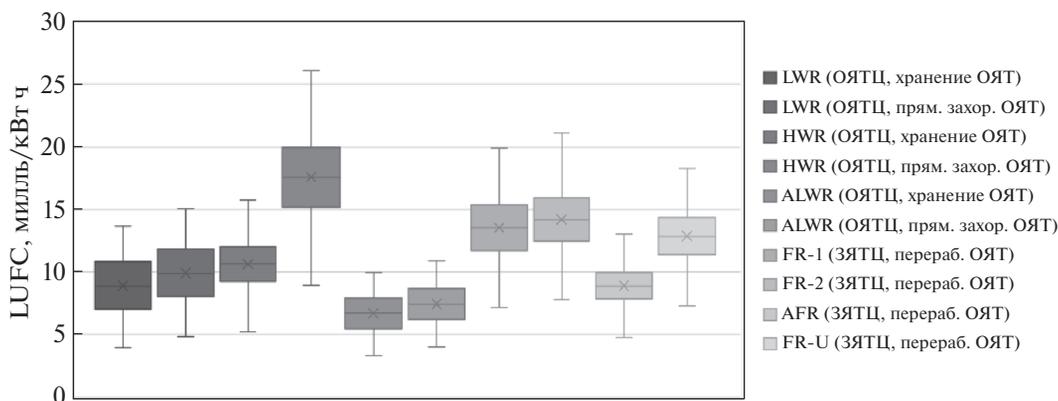


Рис. 3. Разброс в LUFC.

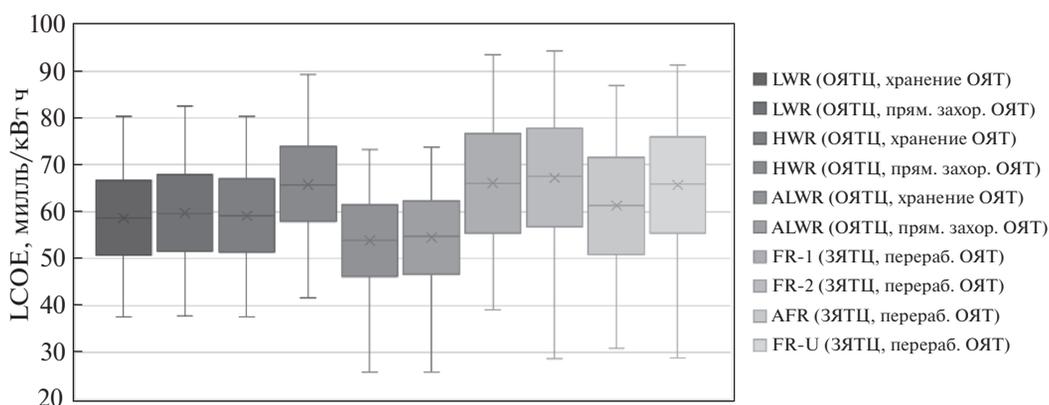


Рис. 4. Разброс в LCOE.

все средние значения  $LCOE$  и его составляющих (исключая  $LUFC$ ) для всех вариантов лежат в соответствующих диапазонах неопределенности. Относительные неопределенности для  $LCOE$  и всех его компонентов (за исключением  $LUFC$ ) сопоставимы друг с другом. Из всех компонентов  $LCOE$  значения  $LUAC$  характеризуются наибольшими относительными неопределенностями (27%), а относительные неопределенности  $LUOM$  – наименьшие (10%). Относительные неопределенности для  $LCOE$  составляют около 17%. Несмотря на то, что относительные неопределенности  $LUFC$  для различных технологических опций не могут рассматриваться как сопоставимые друг с другом (они охватывают диапазон от 16 до 25% для различных вариантов),  $LUFC$  не вносит заметного вклада в неопределенности  $LCOE$ .

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Оценка вероятных значений  $LCOE$  для различных тепловых и быстрых реакторов показывает, что разброс возможных значений  $LCOE$  для различных типов быстрых реакторов оказывается

сравнимым и в значительной степени перекрывается с разбросом значений  $LCOE$  для тепловых реакторов (главным образом для  $HWR$  и  $LWR$ , и в меньшей степени для  $ALWR$ ). Это говорит о том, что, основываясь на оценках  $LCOE$ , учитывая неопределенность их значений, вызванную разбросами в стоимостных данных по переделам ЯТЦ, затратах на строительство, эксплуатацию и техническое обслуживание АЭС, невозможно сделать однозначный вывод о наибольшей привлекательности какой-либо концепции реактора на быстрых нейтронах, опираясь только на показатель  $LCOE$ , а также некорректно делать однозначные утверждения о худших экономических показателях реакторов на быстрых нейтронах по сравнению с тепловыми реакторами. Это, в частности, обусловлено также хорошо известными ограничениями  $LCOE$  как показателя, характеризующего экономическую эффективность и конкурентоспособность энерготехнологий [10].

Во-первых,  $LCOE$  предназначен для оценки экономической эффективности и конкурентоспособности энерготехнологий на уровне проек-

Таблица 3. LCOE и его компоненты

	LUAC			LUOM			LUFC			LCOE		
	Среднее значение, милль/кВт ч	$\Delta$ , милль/кВт ч	$\delta$ , %	Среднее значение, милль/кВт ч	$\Delta$ , милль/кВт ч	$\delta$ , %	Среднее значение, милль/кВт ч	$\Delta$ , милль/кВт ч	$\delta$ , %	Среднее значение, милль/кВт ч	$\Delta$ , милль/кВт ч	$\delta$ , %
LWR*	37.6	9.3	24.7	12.2	1.2	10.2	8.9	2.3	25.2	58.7	9.6	16.3
LWR**	37.6	9.5	25.2	12.2	1.2	10.0	9.9	2.3	23.0	59.8	9.8	16.3
HWR*	36.2	9.1	25.1	12.2	1.3	10.4	10.6	2.0	18.6	59.2	9.3	15.7
HWR**	36.2	9.1	25.3	12.2	1.2	10.2	17.6	3.2	18.1	65.8	9.8	14.8
ALWR*	35.4	8.8	24.8	11.6	1.2	10.1	6.7	1.5	22.2	53.8	9.0	16.6
ALWR**	35.3	8.7	24.7	11.6	1.2	10.1	7.5	1.5	19.9	54.5	9.1	16.6
FR-1	40.2	12.0	29.9	12.5	1.2	9.3	13.5	2.4	17.9	66.2	12.4	18.8
FR-2	40.0	12.1	30.2	12.5	1.2	9.3	14.2	2.4	16.8	67.3	12.4	18.4
AFR	40.4	12.1	29.9	12.6	1.2	9.4	8.9	1.5	16.7	61.4	12.1	19.8
FR-U	40.4	12.0	29.8	12.6	1.2	9.3	12.9	2.0	15.8	65.7	12.2	18.5

\* – хранение ОЯТ в централизованном хранилище за пределами реакторного здания в течение всего жизненного цикла

\*\* – окончательное захоронение ОЯТ в глубокие геологические формации после 5 лет охлаждения

та, а не на уровне энергосистемы, предполагающей комбинацию различных энерготехнологий и учет общесистемных связей и ограничений. *LCOE* не отражает каких-либо общесистемных последствий выбора конкретной технологии. *LCOE* имеет смысл использовать для сравнения альтернатив в рамках определенного класса технологий. Однако даже технологии в пределах такого класса могут иметь различные общесистемные последствия (например, вследствие различия установленных мощностей электростанций), с которыми могут быть сопряжены дополнительные затраты. Более общий подход к оценке экономической эффективности и конкурентоспособности энерготехнологий будет заключаться в изучении общесистемных последствий внедрения этой технологии в энергосистему. Такого рода анализ может быть выполнен с использованием программных комплексов энергетического планирования [11].

Второе ограничение, связанное с использованием показателя *LCOE*, состоит в том, что расчет данного показателя предполагает, что все исходные данные для его оценки учитываются корректно: в рассмотрение должны быть включены все прямые и косвенные затраты, которые будут возникать в процессе жизненного цикла энерготехнологии. Как правило, большинство косвенных затрат не могут быть включены в *LCOE*, поскольку их трудно выразить в денежном эквиваленте. В результате простое сравнение *LCOE* для различных технологий не сможет полностью отразить их общественную ценность: технология, которая предлагает большие общественные бла-

га, но является более дорогостоящей, будет менее привлекательной при сравнении с использованием оценки показателя *LCOE*. В этой связи представляется целесообразным привлекать альтернативные подходы к сравнению энерготехнологий и технологий топливного цикла, например, многокритериальный анализ, который позволяет компенсировать отмеченный недостаток подхода к сравнению на основе показателя *LCOE* [12].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка вероятных значений *LCOE* для различных тепловых и быстрых реакторов с учетом неопределенности в стоимостных данных демонстрирует, что разброс возможных значений *LCOE* для различных типов быстрых реакторов оказывается сопоставимым между собой, и он в значительной мере перекрывается с разбросом в *LCOE* для тепловых реакторов (прежде всего для HWR и LWR, в меньшей степени для ALWR). Это говорит о том, что по результатам оценки *LCOE* с учетом неопределенности в их значениях нельзя сделать однозначный вывод о наибольшей привлекательности той или иной концепции быстрых реакторов, опираясь только на анализ *LCOE*, а также некорректно делать утверждения о более низкой экономической эффективности быстрых реакторов по сравнению с тепловыми реакторами. Поскольку все рассмотренные варианты ядерных энерготехнологий, как оказалось, имеют сопоставимую экономическую эффективность по показателю *LCOE*, то для определения их возможно-

го места в системе ядерной энергетики будущего требуется построение модели ядерно-энергетической системы, в которой также бы учитывались множественные ресурсные и инфраструктурные факторы и ограничения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. IAEA. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics / IAEA Nuclear Energy Series // No. NG-T-4.4, Vienna, 2014.
2. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems. Revision 4.2 / September 26, 2007.
3. IAEA. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants. Series. No 396. 224 p. Vienna. 2000.
4. Advanced Fuel Cycle Cost Basis – 2017 Edition, INL/EXT-17-43826. 2017.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Global Architectures of Innovative Nuclear Energy Systems with Thermal and Fast Reactors and a Closed Nuclear Fuel Cycle (GAINS), IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.14. 2013.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear energy development in the 21st century: global scenarios and regional trends, IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.8. 2010.
7. Андрианов А.А., Коровин Ю.А., Купцов И.С., Мурогов В.М., Андрианова О.Н. К вопросу об учете экономических рисков при сравнительном анализе ядерных технологий различной степени зрелости // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 156–168.
8. Андрианов А.А., Андрианова О.Н., Купцов И.С., Осипова Т.А. // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2018. № 4. С. 89–101.
9. [https://datavizcatalogue.com/RU/metody/diagramma\\_razmaha.html](https://datavizcatalogue.com/RU/metody/diagramma_razmaha.html) дата доступа: 13.03.20
10. <https://www.sparklibrary.com/9-reasons-why-lcoe-can-mislead/> дата доступа: 10.02.20
11. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook. Technical Reports Series No. 241, Vienna. 1984.
12. Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. Energies. 2015. № 8. С. 3679–3719.

---

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta "MIFI", 2020, vol. 9, no. 4, pp. 368–375

---

## Prediction of the Levelized Cost of Electricity for Nuclear Power Plants with Different Nuclear Reactors

D. V. Kovganko<sup>a,#</sup> and A. A. Andrianov<sup>b,##</sup>

<sup>a</sup> National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

<sup>b</sup> Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Obninsk, 249033 Russia

<sup>#</sup>e-mail: d\_kovganko@mail.ru

<sup>##</sup>e-mail: andreyandrianov@yandex.ru

Received May 19, 2020; revised July 2, 2020; accepted September 22, 2020

**Abstract**—The levelized cost of electricity for nuclear power plants with different types of nuclear reactors has been predicted taking into account the uncertainty in the cost data on the construction and operation of reactor facilities, as well as the uncertainty in the cost data on fuel cycle products and services. Three types of thermal reactors operating in the once-through fuel cycle are considered (two options of spent fuel management are analyzed including the long-term storage of spent fuel at the away-from-reactor storage facility and final geological disposal of spent fuel), as well as four types of fast reactors operating in a closed uranium–plutonium fuel cycle. The estimation of probable LCOE values for various thermal and fast reactor technologies shows that the spread in possible LCOE values for different types of fast reactors turns out to be comparable and largely overlaps with the spread in LCOE values for thermal reactors. This suggests that, based on the LCOE estimations, taking into account the uncertainty in their values caused by the spreads in fuel cycle unit service cost and costs for the construction, operation and maintenance of nuclear power plants, it is impossible to make an unequivocal conclusion about the greatest attraction of any fast reactor concept, relying only on the LCOE analysis, and it is also incorrect to make statements about the lower economic performance of fast reactors as compared to thermal reactors: the corresponding statements should be considered solely as probabilistic ones.

*Keywords:* leveled cost of electricity, nuclear power, nuclear fuel cycle, thermal reactors, fast reactors, uncertainty

DOI: 10.1134/S2304487X20040033

## REFERENCES

1. IAEA. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Economics / IAEA Nuclear Energy Series // No. NG-T-4.4, Vienna, 2014.
2. Cost estimating guidelines for GENERATION IV nuclear energy systems. Revision 4.2 / September 26, 2007.
3. IAEA. Technical Reports Economic Evaluation of Bids for Nuclear Power Plants. Series No 396, p. 224, Vienna (2000).
4. Advanced Fuel Cycle Cost Basis – 2017 Edition, INL/EXT-17-43826, 2017.
5. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Framework for Assessing Dynamic Nuclear Energy Systems for Sustainability, Final Report of the INPRO Collaborative Project on Global Architectures of Innovative Nuclear Energy Systems with Thermal and Fast Reactors and a Closed Nuclear Fuel Cycle (GAINS), IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.14 (2013).
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Nuclear energy development in the 21st century: global scenarios and regional trends, IAEA Nuclear Energy Series NP-T-1.8 (2010).
7. Andrianov A.A., Korovin Yu.A., Kuptsov I.S., Murogov V.M., Andrianova O.N. K voprosu ob uchete ekonomicheskikh riskov pri sravnitel'nom analize yadernykh tekhnologiy razlichnoy stepeni zrelosti [Comparative evaluation of nuclear reactor technologies of different maturity levels on economic risk measures]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2017, vol. 1, pp. 156–168 (in Russian).
8. Andrianov A.A., Kuptsov I.S., Osipova T.A., Andrianova O.N. Sravnitel'nyy analiz investitsionnoy privlekatel'nosti energoblokov AES na baze reaktornykh moduley maloy i sredney moshchnosti i reaktora bol'shoy moshchnosti [Comparative analysis of the investment attractiveness of nuclear power plant concepts based on small and medium sized reactor modules and a large nuclear reactor], *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2018, no. 4, pp. 89–101 (in Russian).
9. [https://datavizcatalogue.com/RU/metody/diagramma\\_razmaha.html](https://datavizcatalogue.com/RU/metody/diagramma_razmaha.html) (accessed 13.03.20)
10. <https://www.sparklibrary.com/9-reasons-why-lcoe-can-mislead/> (accessed 10.02.20)
11. Expansion Planning for Electrical Generating Systems: A Guidebook. Technical Reports Series No. 241, Vienna (1984).
12. Kuznetsov V., Fesenko G., Schwenk-Ferrero A., Andrianov A., Kuptsov I. Innovative Nuclear Energy Systems: State-of-the Art Survey on Evaluation and Aggregation Judgment Measures Applied to Performance Comparison. *Energies*, 2015, no. 8, pp. 3679–3719.