

В. С. Красноруцкий, О. С. Кирсанова

Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт», Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл», г. Харьков, Украина

Экономические оценки ядерных топливных циклов с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах для Украины

На основе известных данных представлены оценочные расчеты топливной составляющей стоимости электроэнергии, вырабатываемой АЭС, при реализации различных вариантов ядерного топливного цикла (ЯТЦ) Украины. Показано, что при прогнозируемых затратах на этапы завершающих стадий ЯТЦ экономически выгодны варианты замкнутых ЯТЦ с использованием МОХ-топлива в легководных реакторах, а тариф на электроэнергию, вырабатываемую АЭС, не отражает тех затрат по ЯТЦ, которые могут потребоваться в будущем.

Ключевые слова: экономика, ядерный топливный цикл, топливная составляющая, стоимость электроэнергии, тепловые реакторы, быстрые реакторы.

В. С. Красноруцкий, О. С. Кирсанова

Економічні оцінки ядерного паливного циклу з реакторами на теплових і швидких нейтронах для України

На основі відомих даних наведено оціночні розрахунки паливної складової вартості електроенергії, що виробляється АЕС, під час реалізації різних варіантів ядерного паливного циклу (ЯПЦ) України. Показано, що в разі прогнозованих затрат на етапи завершальних стадій ЯПЦ економічно вигідні варіанти замкнутих ЯПЦ з використанням МОХ-палива в легководних реакторах, а тариф на електроенергію, що виробляється АЕС, не відображає тих витрат по ЯПЦ, які можуть знадобитися в майбутньому.

Ключові слова: економіка, ядерний паливний цикл, паливна складова, вартість електроенергії, теплові реактори, швидкі реактори.

© В. С. Красноруцкий, О. С. Кирсанова, 2014

В настоящее время продолжают интенсивные дискуссии о роли и месте атомной энергетики (АЭ) в мире на ближайшую и отдаленную перспективу. Большинство специалистов сходятся во мнении, что АЭ в будущем должна играть базовую роль в обеспечении человечества энергией; интенсивность ее развития определяется каждым регионом в зависимости от наличия природных ресурсов энергоносителей, в том числе возобновляемых источников энергии.

Украина находится в числе государств, где атомная энергетика уже сейчас имеет преобладающее значение, занимая 10-е место в мире по количеству эксплуатируемых реакторов и 4-е место — по количеству вырабатываемой АЭС электроэнергии [1,2].

В базовом сценарии «Обновленной энергетической стратегии Украины на период до 2030 года» декларируется рост мощностей атомной энергетики на 5 ГВт до 2030 года за счет строительства реакторов на тепловых нейтронах с последующим увеличением показателя на 2 % ежегодно [3].

Стоимость производимой электроэнергии любым источником должна определяться всеми показателями, характеризующими обеспечение безопасности и сохранение окружающей среды. Для каждого источника энергии эти показатели известны (в большинстве случаев — оценочно). Однако затраты, которые необходимо понести, чтобы полностью исключить негативное влияние отрицательных факторов на окружающую среду и человека (например, влияние выбросов от сжигания органических видов топлива в энергетической системе), в стоимости произведенной электроэнергии чаще всего не учитываются. Подобная ситуация характерна и для атомной энергетики. На сегодняшнем этапе развития АЭ практически известны все стадии и этапы, которые должны быть реализованы в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) с реакторами любого типа. Тем не менее, к настоящему времени нет ни одного государства, где был бы реализован полный ЯТЦ, что объясняется поиском технологий, обеспечивающих приемлемые экономические показатели и гарантированную безопасность обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) и радиоактивными отходами (РАО), и прежде всего — на этапах кондиционирования, переработки ОЯТ и удаления ОЯТ и РАО в геологические формации. Для заключительной стадии ЯТЦ разработан ряд технологий, применяющихся в промышленных масштабах, но перспективные разработки продолжают на лабораторном уровне, и на этой основе выполняется оценка их экономических показателей. Пока идет «процесс выжидания», осуществляется отложенное решение: ОЯТ помещается во временные хранилища на срок примерно до 100 лет, чтобы в указанный период можно было бы принять взвешенные решения. В некоторых странах уже сейчас реализуется ЯТЦ с этапами переработки ОЯТ и обращения с полезными продуктами переработки и РАО.

Особая ситуация сложилась в Украине. Основная часть ОЯТ реакторов ВВЭР отправляется на хранение и переработку в Российскую Федерацию, и только на Запорожской АЭС отработавшее ядерное топливо хранится в сухом хранилище на территории станции; планируется построить централизованное хранилище для ОЯТ со всех станций. При этом нет решений по использованию делящихся изотопов, извлекаемых из ОЯТ при переработке, в ядерном топливном цикле с реакторами на тепловых и быстрых нейтронах (БН), которые могут быть рекомендованы для введения в структуру атомной энергетики Украины; нет решений, что делать с ОЯТ после долговременного хранения. Но в любом случае необходимо знать, какие полные затраты могут иметь место при реализации различных ЯТЦ в Украине.

Чтобы оценить полную себестоимость вырабатываемой АЭС электроэнергии, необходимо учитывать все составляющие: капитальную; эксплуатационную; топливную; продление эксплуатации; снятие с эксплуатации.

В настоящей работе решается часть задачи: выполнение оценочных расчетов топливной составляющей стоимости электроэнергии, производимой АЭС, с учетом всех этапов и стадий ЯТЦ с реакторами ВВЭР и БР применительно к условиям Украины для следующих топливных циклов:

- открытого четырехгодичного цикла реакторов ВВЭР-1000;
- замкнутого четырехгодичного цикла легководных реакторов ВВЭР-1000 с использованием МОХ-топлива (30 % загрузка активной зоны (а.з.));
- замкнутого цикла реакторов на быстрых нейтронах с КВ = 1,2 (КВ — коэффициент воспроизводства);
- комбинированного замкнутого цикла реакторов на быстрых нейтронах с КВ=1,2 и ВВЭР-1000.

Экономические оценки ЯТЦ проводились на основе опубликованных данных по оценке затрат, полученных при отработке технологических процессов в лабораториях и на опытных участках и переносе данных на масштаб массового производства. Рассмотрены стационарные кампании для каждого из вариантов ЯТЦ.

Основные характеристики тепловых реакторов типа ВВЭР-1000 и быстрых реакторов типа БН-1200, используемые для расчетов, представлены в табл. 1, а экономические характеристики этапов ЯТЦ — в табл. 2.

Таблица 1. Характеристики реактора ВВЭР-1000 и БН-1200 на оксидном топливе [4,5]

Характеристики	ВВЭР-1000	БН-1200
Мощность тепловая, МВт	3000	2800
Мощность электрическая, МВт	1000	1220
Срок службы, лет	30	60
Топливный цикл	4×1	6×1
Среднее обогащение топлива подпитки, %	4,26	18
Количество тепловыделяющих сборок (ТВС) подпитки, шт.	42	Нет данных
Глубина выгорания, МВт-сут/кг U	50	137
Масса перегружаемой топливной партии, т В том числе Pu	18,27	8,74 1,39
Избыточная наработка Pu, кг /год	—	190
Коэффициент воспроизводства	—	1,19

Таблица 2. Экономические характеристики этапов ЯТЦ [6—11]

Затраты на этапы ЯТЦ	Тип реактора	Значение, используемое в работе
Стоимость приобретения природного урана, \$/кг т.м.*	LWR	100
Конверсия, \$/кг т.м.	LWR	10
Обогащение**, \$/кг ЕРР	LWR	115
Изготовление топлива, \$/кг т.м.	LWR	275
	LWR(MOX)	1200
	BR	1500
Транспортировка ТВС***, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX), BR	5
Транспортировка ОТВС****, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX), BR	69
Долговременное хранение ОЯТ, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX)	230
	BR	—
Хранение Pu, \$/кг т.м.	—	2000
Переработка ОЯТ, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX)	800
	BR	1700
Кондиционирование ОЯТ, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX)	510
	BR	—
Захоронение ОЯТ, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX)	100
	BR	—
Захоронение ВАО, \$/кг т.м.	LWR, LWR(MOX), BR	90

* т.м. — тяжелый металл.
 ** Содержание ²³⁵U в хвостах принималось равным 0,3%.
 *** ТВС — тепловыделяющие сборки.
 **** ОТВС — отработавшие ТВС.

Открытый четырехгодичный ядерный топливный цикл реакторов типа ВВЭР-1000

Большая часть мирового производства электроэнергии АЭС осуществляется в открытом топливном цикле с использованием обогащенного урана в легководных реакторах типа LWR(ВВЭР). Всего в мире насчитывается 270 легководных реакторов. Из них примерно 240 работают в открытом топливном цикле (рис. 1), что составляет 55 % общемирового парка реакторов.

Открытый топливный цикл состоит из таких основных стадий и этапов:

- *стадия изготовления свежего ядерного топлива (СЯТ):* добыча урановой руды, производство урана; конверсия; обогащение; производство двуоксида урана (реконверсия); производство топливных таблеток; сборка твэлов и тепловыделяющих сборок (ТВС);

- *стадия эксплуатации:* работа ТВС в реакторе; промежуточное хранение (хранение в бассейне выдержки реактора);

- *стадия обращения с ОЯТ (завершающая стадия):* временное хранение отработавшего ядерного топлива (срок временного хранения принимался 50 лет); кондиционирование; удаление в геологические формации.

Основным нерешенным на данный момент вопросом в открытом ядерном топливном цикле с точки зрения технологии являются кондиционирование и захоронение отработавшего ядерного топлива.

В настоящее время по завершающему этапу проводятся исследования в двух направлениях. Первое направление — это окончательное захоронение, при котором предполагается размещение ОЯТ в хранилище без последующего изъятия при условии полной изоляции от биосферы. Концепция захоронения основана на сочетании природных и искусственных защитных барьеров.

Вторым направлением предусматривается долговременное контролируемое удаление в геологические формации с возможностью извлечения ОЯТ для переработки при создании технологий, отвечающих требованиям экологичности и экологической безопасности и приемлемых для страны-владельца ОЯТ.

Топливная составляющая себестоимости электроэнергии, вырабатываемой АЭС, вычисляется по формуле

$$C_{\text{топл}} = \frac{C_{\text{П.П}} + C_{\text{обр}}}{N \cdot T_{\text{к}}}, \quad (1)$$

где $C_{\text{П.П}}$ — стоимость перегрузочной партии, \$; N — электрическая мощность станции, кВт; $T_{\text{к}}$ — кампания топлива, ч; $C_{\text{обр}}$ — общие затраты на стадии обращения с ОЯТ, наработанном в цикле, \$.

Результаты расчетов топливной составляющей стоимости электроэнергии в целом и по основным этапам

открытого ЯТЦ представлены ниже (расчеты приведены к стоимости 1 милл/(кВт·ч), 1 милл = 10^{-3}):

Вклад этапов ЯТЦ в стоимость вырабатываемой электроэнергии в открытом ЯТЦ, милл/(кВт·ч)

Изготовление СЯТ из природного урана	5,46
Транспортировка свежего топлива	0,01
Транспортировка ОТВС	0,18
Хранение, кондиционирование и захоронение ОЯТ	2,19
Итого	7,84

Открытые ЯТЦ характеризуются тем, что в ОЯТ остается много неиспользованных полезных продуктов в виде делящихся изотопов. Кроме того, ОЯТ классифицируется как высокоактивные отходы (ВАО). Чтобы реализовать возможности по использованию полезных продуктов, находящихся в топливе, и уменьшить массу ВАО, требующих захоронения, применяют переработку ОЯТ как этап замкнутых ЯТЦ.

Замкнутые ЯТЦ

Замкнутые ЯТЦ характеризуются такой переработкой ОЯТ, что извлекаемые из него ценные продукты (в основном уран и плутоний) снова используются при изготовлении свежего ядерного топлива для работы в реакторах. В настоящее время наиболее вредные отходы при переработке ОЯТ (радиоактивные изотопы) извлекаются отдельно, кондиционируются и подлежат захоронению. С точки зрения безопасности эти отходы, в основном долгоживущие изотопы, представляют наибольшую потенциальную опасность по влиянию на окружающую среду при длительном хранении (тысячи лет) в случае непредвиденных природных катаклизмов. Поэтому разрабатываются ядерные системы, в которых можно было бы сжигать подобные радиоактивные отходы. Один из вариантов — равновесный цикл, когда долгоживущие изотопы выделяются из ОЯТ и вводятся в свежее топливо для быстрых реакторов. В результате в каждом цикле такого замкнутого ЯТЦ долгоживущие радиоактивные отходы не накапливаются — сколько нарабатывается, столько и выжигается.

В зависимости от вида топлива, используемого в замкнутом ЯТЦ, разрабатываются конкретные технологии переработки ОЯТ, основными из которых являются следующие:

- при переработке ОЯТ отдельно извлекаются уран, плутоний и его изотопы, шлаки;
- уран и плутоний не разделяются, выделяются только шлаки.

В дальнейших рассмотренных было принято, что при переработке ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 среднее содержание ^{235}U в регенерированных продуктах равно 1 %, содержание плутония — 1 %.

При отдельном выделении урана и плутония конечными продуктами переработки являются: регенерированный уран обогащением 1 %; смесь оксидов плутония массой,



Рис. 1. Схема открытого топливного цикла



Рис. 2. Замкнутый ЯТЦ легководного реактора с МОХ-топливом

эквивалентной 1 % массы регенерированных материалов; РАО. В таком случае возможны следующие варианты использования полезных продуктов переработки:

вариант 1. Оптимальное использование регенерированного урана и плутония. Уран отправляется на обогащение (до 2 % по ^{235}U), после чего смешивается с выделенным плутонием для получения топлива с обогащением, эквивалентным обогащению 4,26 % в загрузке, изготовленной из природного урана;

вариант 2. Использование только регенерированного урана, который отправляется на обогащение и из него изготавливается СЯТ; плутоний остается в запасах;

вариант 3. Изготовление свежего топлива с дообогащением из внешнего источника, например обогащенным ураном, при совместном выделении плутония и урана (технология, наиболее предпочтительная с точки зрения нераспространения).

Стоимость переработки ОЯТ при расчете распределяется между извлеченными полезными продуктами согласно их энергетическому эквиваленту. Таким образом, стоимость полезных продуктов, извлеченных из ОЯТ и не использованных в циклах, а оставленных на хранение, равна затратам на их извлечение.

При этом рассматривалось однократное рециклирование ОЯТ ВВЭР-1000.

Предполагается, что стоимость хранения и захоронения ОЯТ второго цикла в данном случае такая же, как и стоимость этих этапов для ОЯТ ВВЭР-1000 в открытом цикле.

Замкнутый четырехгодичный топливный цикл легководных реакторов ВВЭР-1000 с использованием МОХ-топлива. Общая мощность функционирующих реакторов (примерно 30 реакторов LWR), в которых используется МОХ-топливо (до 30 % загрузки а. з.), составляет около 27 ГВт (эл). Как правило, это реакторы в странах, либо имеющих мощности по переработке ОЯТ, извлечению энергетического плутония и урана и изготовлению смешанного топлива, либо в странах, пользующихся услугами по переработке своего ОЯТ.

При рассмотрении замкнутого ЯТЦ (рис. 2) легководных реакторов возникает вопрос: куда относить затраты по переработке ОЯТ после первого цикла? Кажется логичным отнести все затраты по замкнутому ЯТЦ к общему количеству электроэнергии, вырабатываемой в двух циклах, т. е. на этапе работы реактора на первичном ядерном топливе и на этапе использования МОХ-топлива. В этом случае в расчетах учитываются следующие основные стадии и этапы ЯТЦ:

стадия изготовления свежего ядерного топлива в первом цикле (аналогична открытому ЯТЦ);

стадия изготовления свежего ядерного топлива во втором цикле: переработка ОЯТ; изготовление МОХ-топлива; изготовление СЯТ из природного урана (для цикла с 30 % загрузкой а.з. МОХ-топливом);

завершающая стадия, стадия обращения с ОЯТ во втором цикле: временное хранение ОЯТ второго цикла; кондиционирование ОЯТ второго цикла; захоронение в геологических формациях ОЯТ второго цикла; захоронение высокоактивных отходов (ВАО), образовавшихся при переработке ОЯТ.

Однако определение топливной составляющей стоимости электроэнергии по схеме отнесения всех затрат к двум циклам имеет условный характер, причем возникает много вопросов, как эту схему реализовать на практике.

Существующие в Украине на сегодня схемы отличаются тем, что в одном случае ОЯТ отправляется на хранение и переработку в РФ, а во втором — остается на долговременное хранение в Украине. При этом цена за вырабатываемую электроэнергию та же.

Вариант, когда ОЯТ перерабатывается в РФ и продукты переработки возвращаются в Украину, требует отдельного рассмотрения. Если плутоний и уран при переработке ОЯТ разделяются, то логично при дообогащении МОХ-топлива использовать плутоний, полученный при переработке. Этот вариант в расчетах обозначен как *вариант 4*.

Если плутоний и уран при переработке ОЯТ не разделяются, экономика ЯТЦ с использованием МОХ-топлива в реакторах ВВЭР-1000 относится к варианту 3 с учетом нулевой стоимости ядерного материала. Этот вариант обозначен в расчетах как *вариант 5*.

Для каждого из вариантов замыкания ЯТЦ с легководными реакторами предварительно был рассчитан коэффициент отношения переработанного ОЯТ к полученному МОХ-топливу (ОЯТ/МОХ), который показывает количество ОЯТ, которое необходимо переработать для получения 1 кг МОХ-топлива:

Вариант замыкания ЯТЦ	1	2	3	4	5
Коэффициент	2,52	6,12	1	3,58	1

По физическим характеристикам легководных реакторов, эксплуатирующихся в настоящее время, в них можно использовать МОХ-топливо до 30 % загрузки, не изменяя системы управления. Для загрузки а.з. 100 % МОХ-топливом необходимо разработать специальные реакторы.

Таблица 3. Вклад этапов ЯТЦ в стоимость вырабатываемой электроэнергии в цикле с 30 % загрузкой а.з. ВВЭР-1000 МОХ-топливом при распределении затрат на два цикла (среднее по двум циклам), mill/(кВт·ч)

Стадии, этапы	Вариант ЯТЦ		
	1	2	3
Изготовление СЯТ из природного урана	4,55	4,55	4,55
Переработка ОЯТ*	0,87	1,06	0,89
Изготовление СЯТ из регенерированного урана	0,52	0,52	0,52
Транспортировка свежего топлива	0,01	0,01	0,01
Транспортировка ОТВС	0,18	0,18	0,18
Хранение, кондиционирование и захоронение ОЯТ	0,37	0,37	0,37
Обращение с ВАО (захоронение)	0,10	0,24	0,04
Итого	6,60	6,93	6,56

*Для варианта 3 включено дообогащение ²³⁵U.

Таблица 4. Вклад этапов ЯТЦ в стоимость вырабатываемой электроэнергии в цикле с 30 % загрузкой а.з. МОХ-топливом при отнесении затрат на обращение с ОЯТ ко второму циклу, mill/(кВт·ч)

Стадии, этапы	Вариант ЯТЦ				
	1	2	3	4	5
Изготовление СЯТ из природного урана	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64
Переработка ОЯТ*	1,75	2,12	1,79	0,00	1,09
Изготовление СЯТ из регенерированного урана	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04
Транспортировка свежего топлива	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Транспортировка ОТВС	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
Хранение, кондиционирование и захоронение ОЯТ	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73
Обращение с ВАО (захоронение)	0,20	0,48	0,08	0,28	0,08
Итого	7,55	8,20	7,47	5,88	6,77

*Для вариантов 3 и 5 включено дообогащение ²³⁵U.

В цикле с 30 % загрузкой а.з. МОХ-топливом стоимость перегрузочной партии включает стоимость топлива из природного урана и МОХ-топлива:

стоимость 2/3 СЯТ из природного урана рассчитывается аналогично стоимости СЯТ в открытом ЯТЦ;

стоимость 1/3 МОХ топлива включает в себя стоимость переработки ОЯТ первого цикла и изготовление МОХ-топлива.

Затраты на обращение с ОЯТ в стоимости вырабатываемой электроэнергии вычисляются аналогично стоимости в открытом ЯТЦ, общие затраты на стадии обращения с ОЯТ аналогичны затратам в открытом ЯТЦ с учетом дополнительных затрат на захоронение ВАО, полученных в результате переработки такого количества ОЯТ, которое необходимо для создания загрузки из МОХ-топлива.

Результаты расчетов цикла с 30 % загрузкой а.з. МОХ-топливом, в зависимости от используемой технологии переработки и способа распределения затрат, представлены в табл. 3 и 4.

Представленные в табл. 3 результаты расчетов средней стоимости топливной составляющей электроэнергии,

вырабатываемой в двухэтапном замкнутом ЯТЦ, показывают, что по экономическим показателям наиболее предпочтителен вариант, когда в реакторе одновременно используются и уран, и плутоний, выделенные при переработке. Это обусловлено тем, что при использовании исходных данных (ценовых параметров) стоимость обогащения рециклированного урана оказывается выше, чем стоимость выделения плутония при переработке. То же самое относится и к табл. 4, когда мы рассматриваем замкнутый ЯТЦ с отнесением затрат на переработку к этапу изготовления СЯТ (варианты 1 и 3).

Если затраты на переработку отнесены к первому этапу (условия Украины), нулевая стоимость плутония обуславливает минимальную величину топливной составляющей электроэнергии. Введение операций по дообогащению переработанного, не разделенного, топлива за счет внешнего источника обогащенного урана повышает топливную составляющую электроэнергии.

Замкнутый топливный цикл с реакторами на быстрых нейтронах (КВ = 1,2). В замкнутом топливном цикле с реакторами на быстрых нейтронах (КВ=1,2) происходит

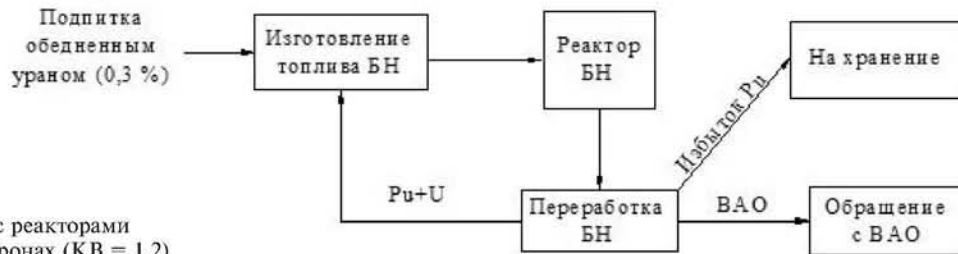


Рис. 3. ЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах (КВ = 1,2)

наработка избыточного плутония, который отправляется на хранение и может быть использован для запуска новых реакторов типа БН или для поддержания работы реакторов типа ВВЭР-1000 с МОХ-топливом (рис. 3).

При расчете стоимости замкнутого ЯТЦ с реактором БН-1200 затраты на переработку ОЯТ БН были отнесены к стоимости полезных продуктов переработки. В работе рассматривался стационарный цикл.

Характерной особенностью циклов с реакторами на быстрых нейтронах (КВ = 1,2) является возможность многократного использования ОЯТ в циклах. В результате процесса переработки выделяются ВАО, которые могут быть кондиционированы и захоронены, или долгоживущие изотопы могут быть возвращены в цикл в составе свежего топлива. В работе рассмотрен первый вариант.

Результаты расчетов замкнутого ЯТЦ с реакторами на быстрых нейтронах с КВ = 1,2 представлены в табл. 5.

Комбинированный цикл реакторов на быстрых нейтронах с КВ = 1,2 и ВВЭР-1000. Комбинированный цикл реакторов на быстрых нейтронах с КВ = 1,2 и ВВЭР-1000 (рис. 4) — это замкнутый цикл, в котором исходным материалом для перегрузочных партий является ОЯТ реакторов БН и ВВЭР, при переработке которого удаляются только продукты деления (ПД) и младшие актиниды (МА) с добавлением обедненного урана. Масса добавляемого обедненного урана выбирается из условия, что удельное содержание делящихся нуклидов в регенерированном топливе такое же, как и в исходном штатном U-Pu топливе. Избыточное количество плутония направляется для изготовления перегрузочных партий реактора ВВЭР-1000.

Предварительные расчеты показали, что система будет самодостаточна при работе в цикле двух реакторов БН-1200 и одного реактора ВВЭР-1000 с учетом переработки ОЯТ ВВЭР-1000 и возвращения в цикл полезных продуктов. Предполагалась возможность многократного рециклирования ОЯТ БН и ВВЭР. Минимальное время выдержки до переработки ОЯТ — 5 лет.

Так как в реакторе БН-1200 происходит избыточная наработка плутония, который используется для работы реакторов типа ВВЭР-1000, стоимость переработки ОЯТ БН-1200 распределяется между циклами с реакторами БН и ВВЭР пропорционально использованию в этих циклах ценных продуктов деления, полученных в результате переработки.

К стадии обращения с ОЯТ было отнесено обращение с ВАО, образовавшимися при переработке ОЯТ БН-1200 и ВВЭР-1000. При рассмотрении цикла затраты на обращение с ОЯТ в стоимости вырабатываемой электроэнергии рассчитываются как среднее между реакторами.

Результаты расчетов комбинированного ЯТЦ реакторов на быстрых нейтронах с КВ = 1,2 и ВВЭР-1000 представлены в табл. 5.

Таблица 5. Вклад этапов ЯТЦ в стоимость вырабатываемой электроэнергии в циклах с реакторами на быстрых нейтронах с КВ = 1,2, mill/(кВт·ч)

Стадии, этапы	Циклы	
	ВВЭР-1000 + БН-1200	Замкнутый с реакторами на быстрых нейтронах, КВ = 1,2
Переработка ОЯТ	1,32	1,36
Изготовление СЯТ из регенерированного урана	1,38	1,36
Транспортировка свежего топлива	0,01	0,01
Транспортировка ОТВС	0,09	0,06
Обращение с ВАО (захоронение)	0,16	0,07
Итого	2,96	2,86

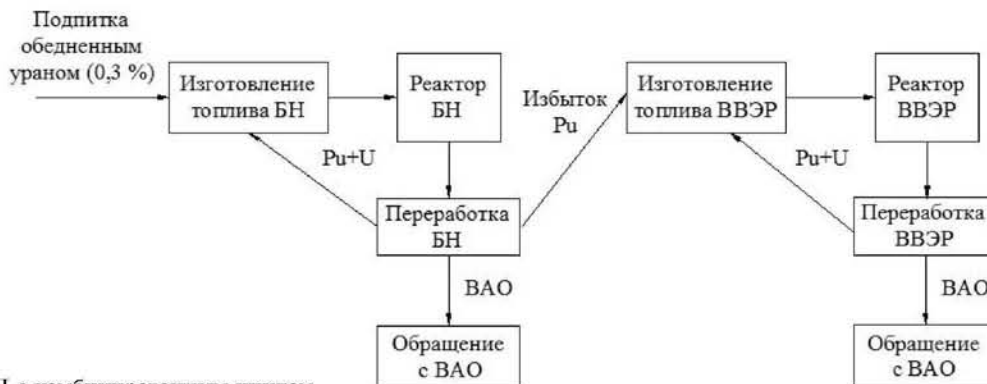


Рис. 4. ЯТЦ с комбинированным циклом

Заключение

Существующее на сегодня в Украине состояние АЭ с отложенным решением по ЯТЦ характеризуется тем, что тариф на электроэнергию, вырабатываемую на АЭС, не отражает тех затрат по ЯТЦ, которые могут быть в конечном итоге реализованы в Украине в будущем.

Отметим, что практически для любых ЯТЦ с реакторами ВВЭР затраты на этапы по обращению с ОЯТ составляют примерно 50 % стоимости топливной составляющей электроэнергии (5,88—8,20 милл/(кВт·ч)). При существующем в Украине тарифе на электроэнергию АЭС (30,23 коп./кВт·ч) доля топливной составляющей равна примерно 4,5 коп./кВт·ч, или 3,85 милл/(кВт·ч), что значительно меньше затрат, которые государство должно понести, чтобы реализовать завершающие стадии ЯТЦ. Таким образом, необходимо вводить затраты на этапы завершающих стадий ЯТЦ в тариф на электроэнергию и создавать фонды для поэтапного развития АЭ и ЯТЦ в Украине.

Как показывают результаты экономических оценок различных возможных вариантов ЯТЦ, при сопоставимых ценовых параметрах различных этапов наиболее предпочтительны варианты замкнутых ЯТЦ с максимальным использованием урана и плутония, выделяемых из ОЯТ при переработке.

Поскольку Украина уже оплачивает переработку части ОЯТ ВВЭР-1000, использование МОХ-топлива в реакторах ВВЭР-1000 существующих конструкций оказывается экономически наиболее выгодным; следовательно, нужно разрабатывать мероприятия по реализации этого варианта.

Введение в структуру АЭ реакторов на быстрых нейтронах приводит к значительному уменьшению стоимости топливной составляющей вырабатываемой электроэнергии как в ЯТЦ с использованием только быстрых реакторов, так и в комбинированных ЯТЦ с реакторами на быстрых и тепловых нейтронах типа ВВЭР-1000. Это объясняется, в первую очередь, реализацией многократных циклов переработки ОЯТ и отправкой на захоронение небольшого количества ВАО.

Полученные результаты расчетов являются оценочными при выбранных экономических показателях этапов ЯТЦ. Существует мнение, что в дальнейшем по мере истощения природных запасов стоимость урана будет возрастать, а по мере развития и массовости применения АЭС стоимость переработки ОЯТ должна уменьшаться, что говорит в пользу замкнутых ЯТЦ.

Экономические и экологические показатели свидетельствуют о том, что открытые ЯТЦ малоперспективны; будущее АЭ невозможно без применения замкнутых ЯТЦ и реакторов на быстрых нейтронах

Список использованной литературы

1. Operational & Long-Term Shutdown Reactors. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
2. Nuclear Share of Electricity Generation in 2013. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>
3. Оновлення Енергетичної стратегії України на період до 2030 р. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=2_22032
4. Концепция перспективного энергоблока с быстрым натриевым реактором БН-1200 / В. И. Рачков, В. М. Поплавский,

А. М. Цибуля, Ю. Е. Багдасаров, Б. А. Васильев, Ю. Л. Каманин, С. Л. Осипов, Н. Г. Кузавков, В. Н. Ершов, М. Р. Аширметов // Атомная энергия. — 2010. — Т. 108, вып. 4. — С. 201—206.

5. Активная зона и топливный цикл для перспективного быстрого натриевого реактора / В. М. Поплавский, А. М. Цибуля, Ю. С. Хомяков, В. И. Матвеев, В. А. Елисеев, А. Г. Цикунов, Б. А. Васильев, С. Б. Белов, М. Р. Фаракшин // Атомная энергия. — 2010. — Т. 108, вып. 4. — С. 206—212.

6. Trends in the nuclear fuel cycle Economic, Environmental and Social Aspects. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/trends-in-the-nuclear-fuel-cycle_9789264196223-en

7. The Economics of the nuclear fuel cycle. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: — <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/efc/EFC-complete.pdf>

8. Accelerator-driven Systems and Fast Reactors in Advanced Nuclear Fuel Cycles. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf>

9. Generation 4 Roadmap : Report of the Fuel Cycle Crosscut Group. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://energy.gov/ne/downloads/generation-iv-roadmap-report-fuel-cycle-crosscut-group>

10. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel : Final Report / M. Bunn, St. Fetter, J. P. Holdren, Bob van der Zwaan. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/repro-report.pdf>

11. Nuclear Fuel Price Indicators. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.uxc.com/review/uxc_Prices.aspx

References

1. Operational & Long-Term Shutdown Reactors [Electron resource]. — Access mode: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>
2. Nuclear Share of Electricity Generation in 2013. [Electron resource]. — Access mode: <http://www.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>
3. Updates of Energy Strategy of Ukraine untill 2030. [Electron resource]. — Access mode: http://mpe.kmu.gov.ua/fuel/doccatalog/document?id=2_22032
4. Concept of Advanced BN-1200 Sodium Fast Reactor Power Unit / V. I. Rachkov, V. M. Poplawski, A. M. Tsubulya, Y. E. Bagdasarov, B. Vasiliev, Y. L. Kamanin, C. L. Osipov, N. G. Kuzavkov, V. N. Ershov, M. R. Ashirmetov // Atomic Energy. — 2010. — Vol. 108, No. 4. — P. 201—206. (Rus)
5. Sodium Fast Reactor Core and Fuel Cycle / V. M. Poplawski, A. M. Tsubulya, S. Hamsters, V. I. Matveev, V. A. Eliseev, A. G. Tsikunov, B. A. Vasiliev, S. B. Belov, M. R. Farakshin // Atomic Energy. — 2010. — Vol. 108, No. 4. — P. 206—212. (Rus)
6. Trends in the nuclear fuel cycle Economic, Environmental and Social Aspects. [Electron resource]. — Access mode: http://www.oecd-ilibrary.org/nuclear-energy/trends-in-the-nuclear-fuel-cycle_9789264196223-en
7. The Economics of the nuclear fuel cycle. [Electron resource]. — Access mode: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/efc/EFC-complete.pdf>
8. Accelerator-driven Systems and Fast Reactors in Advanced Nuclear Fuel Cycles. [Electron resource]. — Access mode: <https://www.oecd-nea.org/ndd/reports/2002/nea3109-ads.pdf>
9. Generation 4 Roadmap : Report of the Fuel Cycle Crosscut Group. [Electron resource]. — Access mode: <http://energy.gov/ne/downloads/generation-iv-roadmap-report-fuel-cycle-crosscut-group>
10. The Economics of Reprocessing vs. Direct Disposal of Spent Nuclear Fuel : Final Report / M. Bunn, St. Fetter, J. P. Holdren, Bob van der Zwaan. [Electron resource]. — Access mode: <http://belfercenter.ksg.harvard.edu/files/repro-report.pdf>
11. Nuclear Fuel Price Indicators. [Electron resource]. — Access mode: http://www.uxc.com/review/uxc_Prices.aspx

Получено 10.06.2014.