

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ЗАМЫКАНИЯ ТОПЛИВНЫХ ЦИКЛОВ ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРОВ

Н.И. Гераскин, Н.А. Пискунова

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва



Предложена методика, позволяющая оценить экономическую целесообразность замыкания топливного цикла легководных реакторов с минимальной зависимостью полученных результатов от неопределенности значений цены на природный уран, стоимости работы разделения и химической переработки топлива. В качестве основного критерия рассматривается сравнение топливных составляющих себестоимости электроэнергии в открытом и замкнутом топливном циклах. Представлены результаты применения данной методики для исследования экономической целесообразности замыкания топливного цикла реакторов типа ВВЭР-1000 по урану и плутонию.

Ключевые слова: замкнутый топливный цикл, топливная составляющая, химическая переработка, диапазон цен, система реакторов, MOX-топливо.

Key words: closed fuel cycle, fuel factor, spent fuel reprocessing, cost range, system of reactors, MOX-fuel.

Проблема повышения эффективности использования топливных ресурсов ядерной энергетики с каждым годом приобретает все большую актуальность. В связи с этим возможность повторного использования делящихся материалов, выделенных из облученного топлива, т. е. замыкание топливного цикла, вызывает заслуженный интерес. В первую очередь это относится к быстрым реакторам, однако поскольку их число в настоящее время невелико, имеет смысл рассмотреть и проанализировать возможность замыкания топливного цикла легководных реакторов, получивших наибольшую распространенность. Будем считать, что имеющийся опыт переработки ОЯТ реакторов ВВЭР-440 и начавшееся строительство завода РТ-2 позволяют судить о том, что технологических трудностей, связанных с переработкой облученного топлива реакторов типа ВВЭР-1000 и проектируемого реактора ВВЭР-1200, практически нет. В этой связи главными факторами, определяющими возможность замыкания топливного цикла, будут экономическая целесообразность и соответствующая политическая воля.

Переход на замкнутый топливный цикл отразится на себестоимости электроэнергии, производимой АЭС, и в первую очередь на ее топливной составляющей.

Поэтому критерием для принятия решения об экономической целесообразности замыкания в данной работе выбрано сравнение топливных составляющих себестоимости электроэнергии в замкнутом и разомкнутом циклах. В общем случае результат будет зависеть как от концентрации делящегося материала в свежем и облученном топливе и глубины его выгорания, так и от сочетания цен на услуги различных предприятий ядерного топливного цикла (ЯТЦ), включая цены на природный уран, обогащение, изготовление топлива, химическую переработку ОЯТ и т.д. Определенная трудность связана с тем, что данные о стоимости того или иного производства имеют большую неопределенность [1]. Для решения этой проблемы в существующих исследованиях экономического потенциала замыкания топливного цикла используется следующий подход [1]. Составляется прогноз на 10–20 лет по ценам на услуги предприятий ЯТЦ, с учетом сделанных предположений определяется стоимость топливной составляющей себестоимости электроэнергии в открытом и замкнутом циклах и проводится их сравнение. Учет неопределенности исходных данных заключается в вычислении чувствительности полученного результата к возможным изменениям стоимости каждого из производств. Таким образом, в распоряжении исследователя оказывается многовариантный сценарий развития событий с множеством параметров, на основании которого представляется затруднительным принятие конкретных решений в данный момент времени.

Предлагаемый нами подход основан на предположении, что для получения простых и быстрых оценок достаточно учитывать неопределенность только тех параметров, значения которых вносят существенный вклад в величину топливной составляющей и которые в наибольшей степени подвержены колебаниям в зависимости от рыночной конъюнктуры. В первую очередь речь идет о стоимости урана, операции с которым на рынке приводят к существенному разбросу цен (рис. 1). Конкуренция и развитие технологий обогащения также изменяют стоимость работы разделения [2]. Другие параметры, такие как стоимость транспортиров-

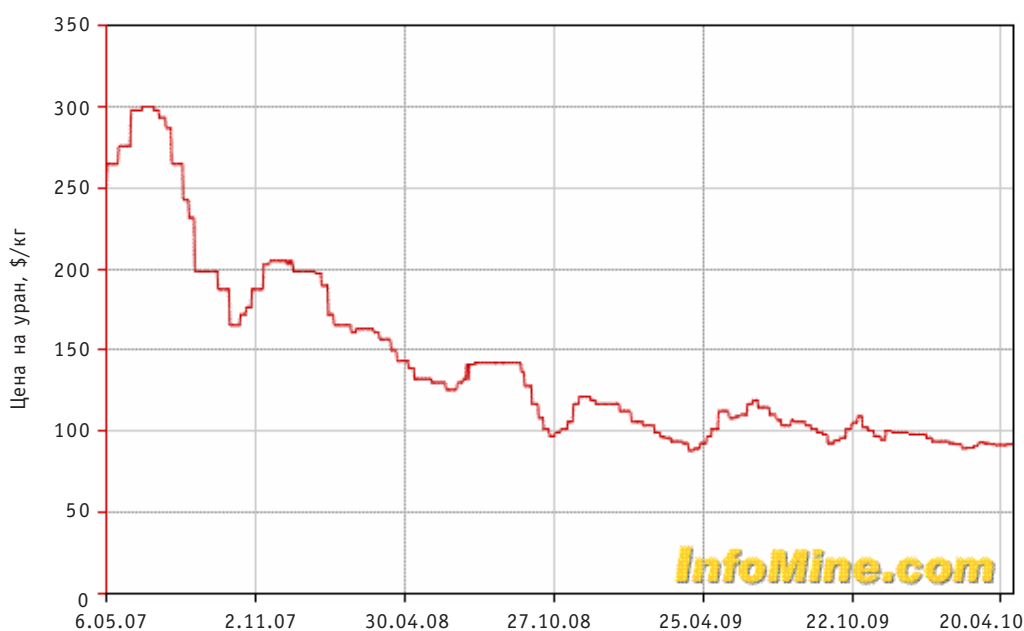


Рис. 1. Динамика цен на уран на мировом рынке за последние три года (по данным источника <http://www.infomine.com>)

ки, долговременного хранения ОЯТ, хранения плутония не имеют предпосылок для больших колебаний. Это не означает, что их значения не могут резко измениться в будущем в связи с появлением новых технологий или влиянием других факторов (имеется в виду, что в настоящий момент времени пока нет смысла делать подобные предположения). Затраты на конверсию урана составляют очень небольшую величину по сравнению со стоимостью других переделов, еще меньшее влияние они оказывают на целесообразность замыкания топливного цикла, так что их изменением можно с уверенностью пренебречь. При анализе эффективности замыкания топливного цикла по урану стоимость изготовления топлива можно исключить из рассмотрения.

Стоимость химической переработки ОЯТ является ключевым параметром в определении экономической целесообразности замыкания топливного цикла. Его значение обуславливается применяемой технологией переработки, масштабом производства, величиной инвестиций в строительство завода, условиями привлечения и сроками выплаты заемных финансовых средств и другими факторами. В настоящее время коммерческая переработка ОЯТ легководных реакторов осуществляется во Франции, Великобритании и России, в ближайшее время планируется запуск завода в Японии. В зависимости от конкретных условий в той или иной стране стоимость химической переработки может отличаться почти на порядок – от 400 до 3500 \$/кг [1]. В этой связи возникает вопрос о том, на какую стоимость химической переработки следует ориентироваться при проектировании и строительстве завода по переработке или при выборе поставщика таких услуг, чтобы в изменяющихся рыночных условиях замыкание топливного цикла легководных реакторов приносило прибыль.

Таким образом, проблему неопределенности исходных данных предлагается решить путем выделения из общей группы параметров тех, которые схожи между собой по характеру неопределенности и динамике изменения значений. К первой категории относятся параметры, для которых характерно интенсивное изменение значений во времени – это стоимость урана и работы разделения. Для таких параметров представляется целесообразным задать диапазон значений, покрывающий их возможное изменение. Вторая категория параметров обладает неопределенностью, связанной, в основном, с коммерческой тайной. Применяемые по отношению к этим параметрам средние оценки, получаемые из открытых источников, при необходимости могут быть уточнены заинтересованной стороной в процессе переговоров с непосредственными поставщиками услуг. Следовательно, на стадии практического применения методики влияние неопределенности значений этих параметров может быть сведено до минимума. Третью категорию составляют стоимости захоронения облученного топлива и высокоактивных отходов, для которых характерна принципиальная неопределенность значений на сегодняшний момент времени в связи с отсутствием опыта коммерческого применения технологий. Исходя из стоимости проекта «Юкка-Маунтин» дисконтированная стоимость захоронения ОЯТ составляет не менее 520 \$/кг [1]. С учетом технологических трудностей реализации этого и других проектов можно принять оценку дисконтированной стоимости захоронения ОЯТ 610 \$/кг [3]. В любом случае отдаленность перспективы окончательного захоронения ОЯТ и высокоактивных отходов снижает влияние неопределенности этих факторов на результат сравнения топливных циклов.

Отдельное место занимают такие параметры, как стоимость химической переработки ОЯТ и производства MOX-топлива, поскольку именно они играют важнейшую роль при принятии решения о целесообразности замыкания топливного цик-

ла по урану и плутонию. Предлагается исследовать взаимосвязь этих параметров с другими с точки зрения их влияния на стоимость топливного цикла, определить диапазон допустимых значений, в котором замыкание топливного цикла выгодно, и сравнить найденные варианты с реальными технологическими и экономическими условиями в отрасли. В более конкретном выражении, требуется определить верхнюю границу стоимости химической переработки, ниже которой замыкание топливного цикла по урану будет выгодно во всем принятом в качестве наиболее вероятного диапазоне цен на уран и работу разделения. Если она окажется выше предполагаемой стоимости химической переработки на заводе РТ-2, то можно сделать вывод о целесообразности использования подобного производства. В случае замыкания топливного цикла и по плутонию дополнительно необходимо исследовать и учесть влияние на результат стоимости изготовления МОХ-топлива и сравнить диапазон допустимых значений этого параметра с оценками ожидаемой стоимости производства. Используемые в статье значения по стоимости производств ЯТЦ взяты из оценок, приведенных в различных открытых источниках.

Физические предпосылки замыкания топливного цикла легководных реакторов связаны со следующими факторами. В процессе работы реактора типа ВВЭР происходит «сжигание» делящегося изотопа U^{235} и накопление плутония. При этом величина обогащения урана в облученном топливе $x_k = 1,4\%$ превышает обогащение природного урана $c = 0,714\%$, а изотопный состав плутония таков, что большую часть в нем составляют делящиеся изотопы Pu^{239} и Pu^{241} [4]. Таким образом, с точки зрения физического баланса делящихся материалов в свежем и облученном топливе легководных реакторов целесообразно замыкание их топливного цикла как по урану, так и по плутонию в виде МОХ-топлива.

Определим условия экономической целесообразности замыкания топливного цикла реактора типа ВВЭР по урану. При этом будем рассматривать цикл с однократным использованием регенерированного урана. Это ограничение связано с тем, что в процессе облучения топлива в реакторе в нем накапливается изотоп U^{236} , влияющий на нейтронный баланс неблагоприятным образом [4].

Топливную составляющую себестоимости электроэнергии для открытого цикла можно выразить следующим образом:

$$C_{\text{топ}}^{\text{отк}} \cdot W_t = C_U \cdot f(x_n, y, c) \cdot (1+\varepsilon)^3 \cdot G_x + C_k \cdot f(x_n, y, c) \cdot (1+\varepsilon)^2 \cdot G_x + \\ + C_{pp} \cdot n(x_n, y, c) \cdot (1+\varepsilon) \cdot G_x + C_{изг} \cdot G_x + C_{тр_хр} \cdot G_x + C_{зах} \cdot G_x \dots, \quad (1)$$

где G_x – ежегодная потребность в топливе, кг/год; W_t – производство энергии на АЭС за год, МВт·сут/год; $C_U, C_k, C_{pp}, C_{изг}, C_{тр_хр}, C_{зах}$ – соответственно стоимость природного урана, конверсии, работы разделения, изготовления топлива, транспортировки и хранения ОЯТ и захоронения ОЯТ; ε – доля потерь на предприятии ЯТЦ ($\varepsilon = 1\%$); x_n – обогащение по U^{235} в свежем топливе ($x_n = 4,4\%$); y – обогащение в отвале ($y = 0,2\%$); c – обогащение природного урана ($c = 0,714\%$); $f(x_n, y, c)$ – коэффициент расхода природного урана; $n(x_n, y, c)$ – удельная работа разделения.

Предполагается, что в случае замкнутого топливного цикла облученное топливо после выдержки отправляется на завод по переработке. В результате будет выделен уран с обогащением x_k в количестве $G_x \cdot (1-\alpha) \cdot (1-\varepsilon)$, где $\alpha = k \cdot B$ – средняя глубина выгорания топлива [4]. Затраты на переработку при этом составят $G_x \cdot C_{хим}$. В данном случае не учитывается влияние временного фактора на стоимость работ, т.е. не производится дисконтирование, поскольку, как можно показать, его влияние на итоговый результат при сроке оборачиваемости ядерных материалов в топливном цикле менее 10 лет незначительно. Выделенный уран необходимо дообогащать от x_k до x_n , предварительно подвергнув конверсии. В результате про-

изойдет замена части топлива на регенерированное в количестве

$$G_p = G_x \cdot \frac{1}{f(x_n, y, x_k)} \cdot (1 - z - \alpha) \cdot (1 - \varepsilon)^3.$$

Затраты на обогащение при этом составят

$$C_k \cdot G_x \cdot (1 - z - \alpha) \cdot (1 - \varepsilon) + C_{pp} \cdot n(x_n, y, x_k) \cdot G_x \cdot \frac{1}{f(x_n, y, x_k)} \cdot (1 - z - \alpha) \cdot (1 - \varepsilon)^3.$$

Кроме того, в результате переработки ОЯТ будет выделен плутоний в количестве $z \cdot G_x \cdot (1 - \varepsilon)$, который необходимо отправить на хранение, и продукты деления в количестве $\alpha \cdot G_x \cdot (1 - \varepsilon)$, которые следует подвергнуть захоронению. Эти затраты также нужно учесть:

$$C_{Pu}^{xp} \cdot T_{xp} \cdot z \cdot G_x \cdot (1 - \varepsilon) + C_{зах}^{PAO} \cdot \alpha \cdot G_x \cdot (1 - \varepsilon),$$

где C_{Pu}^{xp} – стоимость хранения плутония (по оценкам составляет около 2000 \$/кг-год); T_{xp} – время хранения плутония (примем 10 лет); $C_{зах}^{PAO}$ – стоимость захоронения радиоактивных отходов (90 \$/кг).

Замыкание топливного цикла будет выгодно, если затраты на транспортировку и переработку ОЯТ, хранение плутония, захоронение PAO и дообогащение урана от x_k до x_n для замены части топлива G_p на регенерированное окажутся меньше затрат на транспортировку, долгосрочное хранение и захоронение всего ОЯТ и обогащение природного урана до x_n для получения той же части топлива G_p (рис. 2).

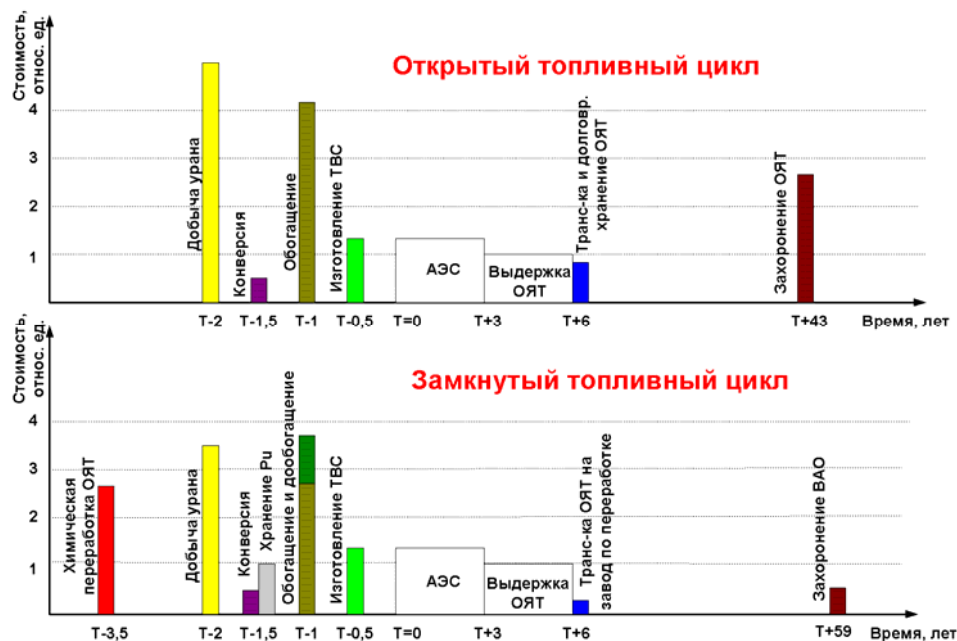


Рис. 2. Относительная стоимость стадий открытого и замкнутого топливных циклов легководных реакторов

В аналитическом виде, пропуская ряд несложных преобразований, **условие экономической целесообразности замыкания топливного цикла по урану** можно представить следующим образом (пренебрегая величинами порядка ε^2):

$$A \cdot C_U + B \cdot C_{pp} + D - C_{хим} > 0, \quad (2)$$

где $A = \frac{f(x_n, y, c)}{f(x_n, y, x_k)} \cdot (1 - z - \alpha) \cdot (1 - \varepsilon)$; $B = \frac{(1 - z - \alpha) \cdot (1 - 3 \cdot \varepsilon)}{f(x_n, y, x_k)} \cdot [n(x_n, y, c) - n(x_n, y, x_k)]$;

$$D = C_k \cdot (1 - z - \alpha) \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \left[\frac{f(x_n, y, c)}{f(x_n, y, x_k)} - 1 \right] - C_{\text{тр}} - C_{\text{пу}}^{\text{xp}} \cdot T_{\text{xp}} \cdot z \cdot (1 - \varepsilon) - C_{\text{зах}}^{\text{пао}} \cdot \alpha \cdot (1 - \varepsilon) + C_{\text{тр_xp}} + C_{\text{зах}};$$

$C_{\text{тр}}$ – стоимость транспортировки ОЯТ на завод по химической переработке.

Для расчетных исследований был выбран достаточно широкий диапазон изменения цен на уран и работу разделения: $60 \leq C_U \leq 200$ \$/кг, $60 \leq C_{\text{pp}} \leq 120$ \$/кг. Стоимость химической переработки, включающая в себя стоимость промежуточного хранения и кондиционирования отходов, принята в качестве основного варьируемого параметра. В результате было получено, что замыкание топливного цикла реактора типа ВВЭР-1000 по урану экономически целесообразно во всем выбранном диапазоне цен при стоимости химической переработки $C_{\text{хим}}$ менее 780 \$/кг. При $C_{\text{хим}} > 1140$ \$/кг использование регенерированного урана представляется уже нецелесообразным при любом сочетании цен на уран и работу разделения. Что касается промежуточных значений $C_{\text{хим}}$ (от 780 до 1140 \$/кг), то в этих случаях все будет определяться конкретным сочетанием цен на уран и работу разделения внутри рассматриваемого диапазона. Например, при цене на природный уран 140 \$/кг и стоимости работы разделения 110 \$/кг, характерных для настоящего временного периода, замыкание топливного цикла по урану выгодно при стоимости химической переработки менее 1020 \$/кг (рис. 3).

Отметим, что в настоящий момент по оценкам стоимость химической переработки ОЯТ составляет 300–400 \$/кг ОЯТ. В зарубежных аналитических исследованиях используется значение стоимости химической переработки в среднем порядка 720 \$/кг. В случае широкомасштабного перехода в России на замкнутый топливный цикл с переработкой ОЯТ и строительством завода РТ-2 использова-

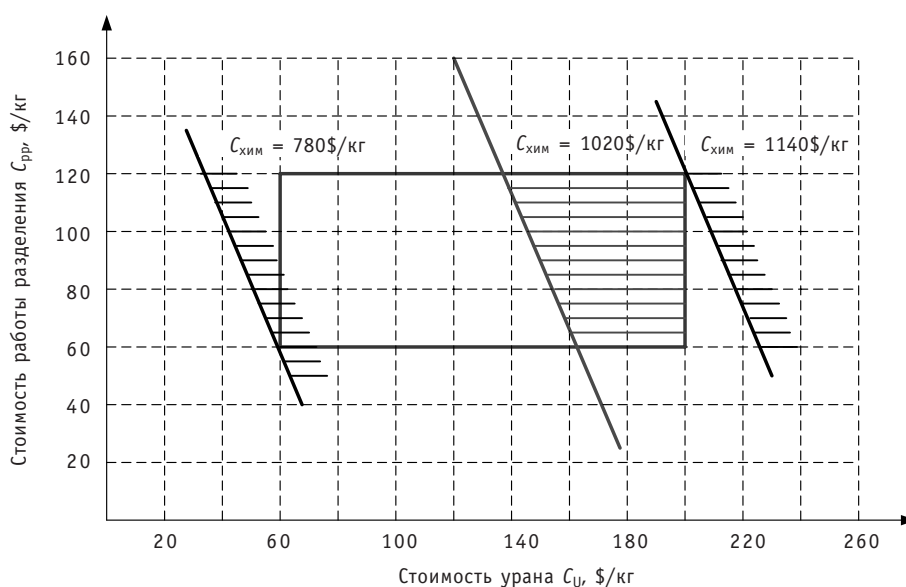


Рис. 3. Графическое представление результатов исследования с помощью предлагаемой методики (области экономической целесообразности замыкания топливного цикла образуются пересечением площади прямоугольника, обозначающего выбранный диапазон цен, и штрихованной области вправо от соответствующей данному значению параметра $C_{\text{хим}}$ наклонной кривой)

ние новой технологии переработки может привести к повышению цены, однако в таком случае следует учесть компенсирующее действие фактора «востребованности» продукции завода на рынке. Таким образом, складывающаяся ситуация на рынке услуг ядерного топливного цикла и проведенное исследование позволяют судить о том, что использование регенерированного урана имеет высокий экономический потенциал.

При исследовании экономической целесообразности замыкания топливного цикла по урану предполагалось, что выделенный в результате химической переработки ОЯТ плутоний отправляется на долгосрочное хранение. С точки зрения обеспечения нераспространения ядерных материалов более безопасной формой «существования» плутония является его нахождение в составе облученного топлива. Кроме того, плутоний изотопного состава ОЯТ ВВЭР-1000 является ценным делящимся материалом, который может быть повторно использован, в частности, в виде MOX-топлива.

В результате нейтронно-физических исследований, проведенных с помощью программы GETERA [5], было показано, что если выделенный при химической переработке уран обогащения $x_k = 1,4\%$ дополнить выделенным плутонием в количестве $z = 5,1\%$, то получившееся MOX-топливо при облучении в реакторе за три года может достигнуть глубины выгорания 45000 МВт-сут/т. При расчетах рассматривалась поличейка, состоящая из одной сборки с MOX-топливом и двух сборок с UO_2 -топливом (таким образом учитывалось, что по условиям ядерной безопасности загрузка MOX-топлива в реактор не должна превышать 1/3 активной зоны).

Важным условием замкнутого топливного цикла является максимально полное замыкание материальных потоков. Поэтому была поставлена задача нахождения системы реакторов типа ВВЭР-1000, работающих на UO_2 -топливе и на MOX-топливе, которая смогла бы обеспечивать сама себя плутонием с минимально возможным избытком или недостатком с учетом целого числа реакторов.

Пусть есть n реакторов на MOX-топливе и m реакторов на UO_2 -топливе. Тогда раз в три года для формирования MOX-загрузки потребуется $n \cdot z \cdot G_x^{MOX} = 1,067n$ т плутония. Этот плутоний может быть получен из переработки ОЯТ UO_2 -реакторов, накопившегося за три года $3 \cdot m \cdot z \cdot k_m \cdot G_x^{UO_2} (1-\epsilon)^2 = 3 \cdot m \cdot 0,263$ тPu, и из UO_2 -сборок MOX-реакторов $2 \cdot n \cdot z \cdot k_n \cdot G_x^{UO_2(n)} (1-\epsilon)^2 = 2 \cdot n \cdot 0,297$ тPu.

Из полученного баланса следует соотношение $m/n = 3/5$, означающее, что система из трех реакторов на UO_2 -топливе и пяти реакторов на MOX-топливе сможет обеспечить сама себя плутонием. При этом недостаток плутония составит всего ~2 кгPu/год, что в принципе укладывается в погрешность вычислений. Для оцен-

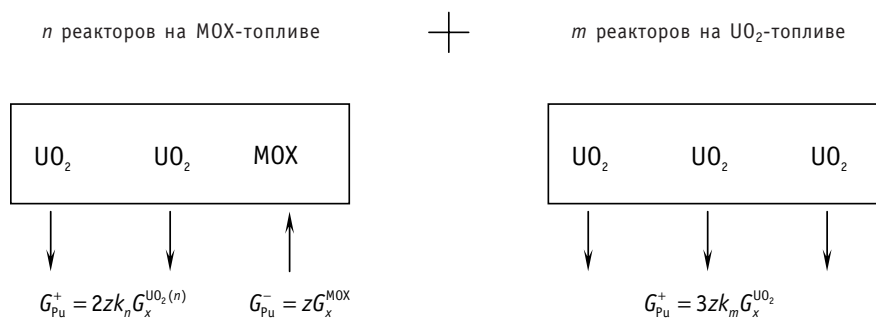


Рис. 4. Соотношение потребности в плутонии и его выработки в системе легководных реакторов на UO_2 - и MOX-топливе

ки экономической целесообразности использования МОХ-топлива в рамках найденной системы сравним топливные составляющие в случае, когда все восемь реакторов работают на UO_2 -топливе и пять из них имеют МОХ-топливо в одной трети активной зоны.

Условие экономической целесообразности замыкания топливного цикла по плутонию может быть выражено следующим образом:

$$8 \cdot 3 \cdot C_{\text{топ}}^{\text{отк}} > 5 \cdot 1 \cdot C_{\text{топ}}^{\text{МОХ}} + 5 \cdot 2 \cdot C_{\text{топ}}^{\text{пер}} + 3 \cdot 3 \cdot C_{\text{топ}}^{\text{пер}(UO_2)}, \quad (3)$$

где $C_{\text{топ}}^{\text{отк}}$ – топливная составляющая для реакторов на UO_2 -топливе, работающих в открытом топливном цикле; $C_{\text{топ}}^{\text{МОХ}}$ – топливная составляющая для МОХ-сборок, включающая в себя стоимость их изготовления, а также стоимость транспортировки, хранения и захоронения облученных сборок; $C_{\text{топ}}^{\text{пер}}$ – топливная составляющая для UO_2 -сборок реакторов, работающих на МОХ-топливе, включающая в себя стоимость добычи соответствующего количества природного урана, его конверсии, обогащения, изготовления ТВС, а также стоимость последующей транспортировки облученного топлива, его химической переработки и захоронения выделенных радиоактивных отходов; $C_{\text{топ}}^{\text{пер}(UO_2)}$ – топливная составляющая для реакторов на UO_2 -топливе, работающих в замкнутом топливном цикле; отличие от $C_{\text{топ}}^{\text{пер}}$ вызвано другим значением годового расхода топлива и количества накопленных радиоактивных продуктов деления (изменение нейтронно-физических свойств активной зоны при добавлении МОХ-топлива приводит к изменению достигаемой глубины выгорания).

Преобразуем выражение (3), раскрыв каждую его составляющую и сгруппировав члены возле коэффициентов, представляющих основные параметры – стоимость урана, работы разделения, химической переработки ОЯТ и изготовления МОХ-топлива. Введем следующие обозначения:

$$E = 5f(x_n, y, c)(1 + \epsilon)^3 (3G_x^{UO_2} - 2G_x^{UO_2(M)});$$

$$F = 5n(x_n, y, c)(1 + \epsilon)(3G_x^{UO_2} - 2G_x^{UO_2(M)});$$

$$G = -10G_x^{UO_2(M)} - 9G_x^{UO_2}; H = -5G_x^{\text{МОХ}};$$

$$I = 5C_k f(x_n, y, c)(1 + \epsilon)^2 (3G_x^{UO_2} - 2G_x^{UO_2(M)}) + 5C_{\text{изг}} (3G_x^{UO_2} - 2G_x^{UO_2(M)}) - \\ - C_{\text{тр}} (10G_x^{UO_2(M)} + 9G_x^{UO_2}) + C_{\text{тр-хр}} (24G_x^{UO_2} - 5G_x^{\text{МОХ}}) + C_{\text{зах}} (24G_x^{UO_2} - 5G_x^{\text{МОХ}}) + \\ + C_{\text{зах}}^{\text{РАО}} (1 - \epsilon) (10\alpha_1 G_x^{UO_2(M)} + 9\alpha_2 G_x^{UO_2}),$$

где $G_x^{UO_2}$, $G_x^{UO_2(M)}$, $G_x^{\text{МОХ}}$ – годовой расход топлива соответственно для реакторов на UO_2 -топливе, для урановых и МОХ-сборок реакторов на МОХ-топливе; $C_{\text{изг}} = 275$ \$/кг – стоимость изготовления UO_2 -топлива; $C_{\text{изг}}^{\text{МОХ}}$ – стоимость изготовления МОХ-топлива; α_1 и α_2 – средняя глубина выгорания UO_2 -сборок в реакторах на UO_2 - и МОХ-топливе.

Тогда условие экономической целесообразности использования МОХ-топлива в предложенной системе реакторов может быть записано следующим образом:

$$E \cdot C_U + F \cdot C_{\text{пп}} + G \cdot C_{\text{хим}} + H \cdot C_{\text{изг}}^{\text{МОХ}} + I > 0. \quad (4)$$

Проведем аналогичное расчетное исследование в диапазоне цен на уран и работу разделения, принимая стоимость химической переработки облученного топлива неизвестным варьируемым параметром. Однако теперь дополнительным параметром будет стоимость изготовления МОХ-топлива. Результаты исследования представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты исследования экономической целесообразности использования МОХ-топлива в системе легководных реакторов

$C_{\text{изг}}^{\text{МОХ}}$, \$/кг	1000	1250	1500
$C_{\text{хим}}^{\text{мин}}$, \$/кг	853	800	740
$C_{\text{хим}}^{\text{макс}}$, \$/кг	1254	1200	1140

В таблице 1 $C_{\text{хим}}^{\text{мин}}$ характеризует значение стоимости химической переработки, ниже которого использование МОХ-топлива в рассматриваемой системе реакторов типа ВВЭР-1000 представляется экономически целесообразным при данной стоимости изготовления МОХ-топлива во всем диапазоне цен на уран и работу разделения. При $C_{\text{хим}} > C_{\text{хим}}^{\text{макс}}$ использование МОХ-топлива невыгодно, а в промежутке ($C_{\text{хим}}^{\text{мин}} < C_{\text{хим}} < C_{\text{хим}}^{\text{макс}}$) все будет зависеть от конкретного сочетания цен. Из анализа данных, приведенных в табл. 1, видно, что чувствительность предельных значений стоимости химической переработки по отношению к стоимости изготовления МОХ-топлива невелика (изменение $C_{\text{изг}}^{\text{МОХ}}$ на ~25% приводит к изменению $C_{\text{хим}}^{\text{мин}}$ на ~7% и $C_{\text{хим}}^{\text{макс}}$ на ~5%). Таким образом, сильная неопределенность в данных о стоимости изготовления МОХ-топлива для легководных реакторов не окажет большого влияния на результаты исследования. В рамках найденной системы реакторов экономический потенциал использования МОХ-топлива сохраняется даже при стоимости изготовления МОХ-топлива 1500 \$/кг.

В заключение отметим, что разработанная методика, реализованная в соответствующем компьютерном коде, позволяет получить быстрые оценки экономической целесообразности замыкания топливного цикла легководных реакторов. Полученные результаты при этом практически не зависят от возможных флуктуаций цен на рынке товаров и услуг ЯТЦ. Результаты исследований, проведенных с использованием данной методики, при условии справедливости принятых допущений свидетельствуют о наличии высокого экономического потенциала для замыкания топливного цикла легководных реакторов.

Литература

1. Bunn M., Fetter S. et al. The economics of reprocessing vs. direct disposal of spent nuclear fuel. BCSIA, Final Report 8/12/1999-7/30/2003.
2. Market Competition in the Nuclear Industry, OECD, 2008.
3. The Economics of the Nuclear Fuel Cycle, OECD, 1994.
4. Синев Н.М. Экономика ядерной энергетики: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 480 с.
5. Гераскин Н.И., Пискунова Н.А., Голосная А.А. Обоснование экономической целесообразности замыкания топливного цикла реакторов типа ВВЭР с использованием МОХ-топлива/Научная сессия МИФИ-2006. Т. 8. – М.: МИФИ, 2006.

Поступила в редакцию 31.03.2010

problems solution. Authors describe the results of parametric uncertainty analysis for concerned process calculation on KORSAR/GP program code.

УДК 504.064: 631.438

Monitoring Network Optimization on Radioactively Contaminated Territory with the use of Multiobjective Genetic Algorithms and Neural Nets \S.V. Gritsyuk, B.I. Yatsalo, G.I. Afanasev, I.A. Pichugina; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 12 pages, 4 tables, 4 illustrations. – References, 29 titles.

Optimization of monitoring network structure for radioactively contaminated territory is considered based on multiobjective optimization with implementation of modified genetic algorithms integrated with neural network. Geographic information system (GIS) of contaminated territory is used within the case study on monitoring network optimization. This work demonstrates effectiveness of integration of multiobjective genetic algorithms with neural networks and GIS within the problems on environmental protection and remediation of contaminated sites.

УДК 502.52:631.4

Patterns of Spatial and Temporal Changes in Soil Biological Activity in the Location of Nuclear Power Plants (on Example of Obninsk-city Soils) \N.N. Pavlova, Yu.V. Kulish; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 7 pages, 2 tables, 1 illustration. – References, 20 titles.

Comprehensive analysis of the spatial and temporal changes in soil biological activity at the location of nuclear power plants was carried out. Found the variation of the enzymatic activity of microbial content in the soil of some heavy metals, radionuclides and organic substances, indicators of acidity and texture of the soil. The contribution of these factors in the spatial variability of biological indicators identified long-term trend direction, giving an idea about the dynamics of the functioning of soil biota.

УДК 621.039.54

Methods Development for Economical Advantages Investigation of VVER-Type Reactors Closed Fuel Cycle \N.I. Geraskin, N.A. Piskunova; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 9 pages, 1 table. – References, 5 titles.

The method offered in the article enables to evaluate the economical expediency of enclosing light water reactors fuel cycle in such a way that the obtained results have minimal dependence on three main parameters with most uncertain values – the costs of natural uranium, enrichment and spent fuel reprocessing. Economic expediency criterion for fuel cycle enclosing has been derived from comparison of the electric energy cost fuel factor in the closed and the open fuel cycle. There are also presented the results of this method application for investigation of economical advantages of VVER-1000 reactor closed fuel cycles with uranium and plutonium fuel.

УДК 621.039.543.6

Developing Mathematical Model for Nuclear Energy Fuel Cycle Based on Thermal and Fast Reactors \V.M. Dekusar, V.S. Kagramanyan, A.G. Kalashnikov, V.V. Korobeynikov, V.E. Korobitsyn, D.A. Klinov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2010. – 14 pages, 3 tables, 13 illustrations. – References, 14 titles.

The paper describes a nuclear energy (NE) model and computer code CYCLE modules developed for this particular NE pattern. The modules developed enable to model the NE system operating in both open and closed cycles. The current research considers partially closed fuel cycle in terms of Pu and regenerated Uranium. Here it has been assumed that Pu produced by Uranium fueled thermal reactors (VVER in particular) after being cooled down due to keeping irradiated fuel in spent fuel pool and regenerating fuel is 100% used to start and maintain operation of the same reactor types fueled with MOX.

The paper discusses comparable results obtained for VVER-1000 reactor based open fuel cycle and those obtained for partially closed in terms of Pu and regenerated U fuel cycle based on U reactors and VVER-1000 reactor types fueled with MOX of the same installed power.

U-fueled and MOX-fueled reactors ratio has been determined by Pu balance. Mass and ecological fuel cycle parameters as well as the amounts accumulated in spent fuel storages and final repositories have been analyzed and compared.