

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЕ ПОДХОДЫ К ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ КАСКАДНЫХ СХЕМ ОБОГАЩЕНИЯ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА

**Е.В. Родионова\*, В.А. Невиница\*, А.Ю. Смирнов\*,\*\***

\* *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»  
123182, Москва, площадь Курчатова, 1*

\*\* *Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
115409, Москва, Каширское шоссе, 31*



Рассмотрена возможность использования многократного использования регенерированного урана. Показано, что проблема очистки регенерированного урана от изотопа  $^{232}\text{U}$  может быть решена при использовании двойных каскадных схем. Поскольку примерно одинаковые размножающие свойства топлива легководного реактора типа ВВЭР-1200 могут быть получены при очень большом сочетании пар обогащений первого и второго каскадов, основная проблема заключается в выборе оптимальных параметров каскадной схемы (величин обогащений первого и второго каскадов). Рассматривается задача выбора оптимальных параметров обогатительного каскада на примере изготовления комплекта ТВС для перегрузки одного реактора типа ВВЭР-1200. Дообогащение регенерата проводится с применением модифицированного двойного каскада. Использован многокритериальный алгоритм выбора набора параметров каскада, который обеспечивает минимизацию расхода природного урана, работы разделения и минимальное количество высокообогащенной по изотопу  $^{235}\text{U}$  фракции, направляемой в отход вместе с выделенным из регенерированного урана изотопом  $^{232}\text{U}$ . Показано, что масса высокообогащенной фракции, загрязненной изотопом  $^{232}\text{U}$  (т.е. фракции, содержащей отходы очистки от изотопа  $^{232}\text{U}$ ), снижается, так же как и потери изотопа  $^{235}\text{U}$  при увеличении обогащения второго каскада с 20-ти до 90%.

**Ключевые слова:** двойной каскад, работа разделения, оптимизация, экономика, натуральные показатели, регенерированный уран, замкнутый топливный цикл, природный уран.

### ВВЕДЕНИЕ

Возможность использования выделенных из ОЯТ реакторов на тепловых нейтронах U и Pu для воспроизводства ядерного топлива становится все более актуальной задачей в контексте постепенного перехода ядерной отрасли в РФ и в мире на замыкание топливного цикла. Одной из причин появления такой тенденции является непрерывное накопление отработавшего топлива легководных реакторов, работающих по всему миру. Для российской ядерной отрасли проблема переработки осложнена тем, что кроме собственных АЭС необходимо обслуживать и утилизировать отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) реакторов, эксплуатирующихся в странах-пользователях. Дополнительным

© *Е.В. Родионова, В.А. Невиница, А.Ю. Смирнов, 2020*

фактором, обуславливающим интерес к вопросу переработки и повторного использования ядерных материалов из ОЯТ, является возможный будущий дефицит природного урана.

Сегодня в мире работают более 300 легководных реакторов (LWR), а в ближайшее десятилетие будут введены в эксплуатацию новые. Большинство LWR используют низкообогащенное урановое топливо, которое может быть получено путем обогащения природного урана в разделительных установках – каскадах [1]. Общее количество урановых ресурсов на Земле оценивается примерно в  $59 \cdot 10^6$  т [2]. Но большую часть этих ресурсов составляет так называемый нетрадиционный уран, для которого выбор технологии добычи и цена являются неопределенными. Только около  $8 \cdot 10^6$  т можно добыть на основе современных технологий по цене не выше 260\$ за 1 кг [2].

Другой проблемой для атомной промышленности является необходимость хранения ОЯТ. Сегодня в разных странах хранится более 400 тыс. т отработанного ядерного топлива, и это количество ежегодно увеличивается примерно на 11 тыс. т [2]. Поэтому разработка технологий переработки отработанного ядерного топлива является одним из возможных способов решения этих проблем, так как позволяет существенно сократить объем складированного топлива и использовать содержащиеся в нем делящиеся материалы. Оценки показывают, что потенциал урана, накопленного в виде ОЯТ, эквивалентен примерно 1 млн. т природного урана [3]. При повторном использовании U и Pu в качестве ядерного топлива количество ОЯТ уменьшится, что обеспечит ресурсы для реакторов на тепловых нейтронах. Но есть проблемы, «отравляющие» такие перспективы.

В отработанном топливе после его выгрузки из реактора содержание  $^{235}\text{U}$  составляет ~ 1,2%. Основной проблемой является появление в выделенном из отработанного топлива уране искусственных изотопов  $^{236}\text{U}$  и  $^{232}\text{U}$ , а также повышение концентрации природного изотопа  $^{234}\text{U}$ . К содержанию этих изотопов в товарном низкообогащенном уране (НОУ) предъявляют жесткие требования, связанные с необходимостью выполнения условий радиационной безопасности при фабрикации ядерного топлива и сохранения его нейтронно-физических характеристик, которые приходится выполнять при обогащении [4]. Для изотопа  $^{232}\text{U}$  вводят ограничение на его абсолютную концентрацию, которая, как правило, не должна превышать  $2 \cdot 10^{-7}\%$ , иногда разрешается  $5 \cdot 10^{-7}\%$  (здесь и далее концентрации изотопов приведены в массовых процентах) [4, 5]. Присутствие же  $^{236}\text{U}$  сказывается на необходимости повышения обогащения по  $^{235}\text{U}$ , конкретная величина которого зависит от концентрации  $^{236}\text{U}$  в продукте. Для  $^{234}\text{U}$  также ограничивают его максимальное содержание в товарном НОУ для ограничения внутреннего поступления при фабрикации топлива [6].

Предложен ряд способов дообогащения регенерата, позволяющих решить проблемы превышения допустимых содержаний изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$  и компенсации  $^{236}\text{U}$  [7 – 12]. Но для обеспечения условия максимального вовлечения продуктов переработки ОЯТ в цикл важно выполнение требования полного использования выделенных из ОЯТ регенерированных ядерных материалов для изготовления свежего топлива. Применительно к регенерированному урану оно заключается в том, чтобы израсходовать выделенный из 1 кг ОЯТ уран для производства 1 кг товарного НОУ. При однократно облученном регенерате большинство схем обогащения легко удовлетворяют этому требованию. В условиях многократного рецикла большинство каскадных схем не позволяют решить эту проблему. Основная причина состоит в том, что при превышении концентрации  $^{232}\text{U}$  в исходной смеси предельных значений становится невозможным выполнение ограничения по этому изотопу в продукте без его дополнительного разбавления [12]. В итоге для выполнения ограничений на концентрации  $^{232}\text{U}$  в продукте приходится снижать расход регенерата на единицу

получаемого продукта [12]. Это означает, что, начиная с определенного рецикла, использовать весь регенерат, выделенный из топлива конкретной загрузки реактора, для производства топлива последующих загрузок этого же реактора не удастся.

Для решения задачи остаются три наиболее очевидных подхода. Первый заключается в увеличении объема производимого из регенерата топлива. Этот путь фактически приводит к увеличению количества реакторов, загружаемых топливом из регенерата урана, выделенного из одного конкретного реактора. Такой подход допустим, когда перерабатывают топливо российских реакторов для изготовления топлива также для отечественных реакторов. Второй путь заключается в отправке неиспользованной части регенерата для складирования на неопределенный срок.

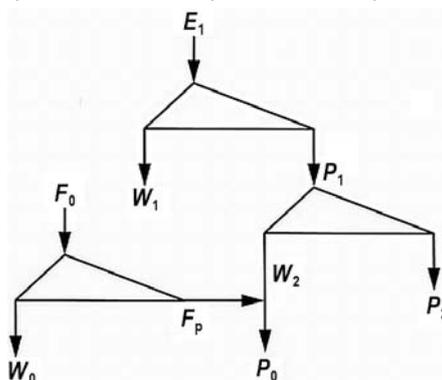


Рис. 1. Схема двойного каскада для рецикла регенерированного урана:  $E_1$  – поток регенерированного урана;  $P_1$  – поток отбора первого каскада, являющийся питанием второго каскада;  $P_2$  – поток отбора второго каскада;  $W_1$  – поток отвала первого каскада;  $W_2$  – поток тяжелой фракции второго каскада;  $F_0$  – поток природного урана для наработки НОУ-разбавителя;  $F_p$  – поток НОУ-разбавителя;  $P_0$  – финальный продукт (товарный НОУ);  $W_0$  – поток отвала вспомогательного каскада для наработки НОУ-разбавителя

Третий вариант решения проблемы может быть основан на использовании модифицированных двойных каскадов, которые позволяют отделить друг от друга изотопы  $^{232}\text{U}$  и  $^{235}\text{U}$  и понизить их относительную концентрацию без разбавления сырьем, не содержащим  $^{232}\text{U}$  [12]. На рисунке 1 показана двойная каскадная схема такого типа.

В первом каскаде исходный материал обогащается, в первую очередь, по изотопам  $^{232-235}\text{U}$ , а во втором каскаде смесь делится на две фракции так, чтобы на «тяжелом» конце оказался продукт с пониженным по отношению к питающей второй каскад смеси содержанием компонентов  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ . Так в первом каскаде на одном из концов обогащают легкие изотопы ( $^{232-235}\text{U}$ ) в потоке  $P_1$ , при этом концентрация  $^{235}\text{U}$  может варьироваться, но ее целесообразно выбирать в диапазоне 5 – 20%, поскольку ее величина должна быть больше требуемой из-за того, что во втором каскаде получаемый продукт будет обеднен по  $^{235}\text{U}$ . Полученный обогащенный уран направляется на вход второго каскада, где он разделяется на две группы – в первой концентрируются легкие изотопы и  $^{235}\text{U}$ , во второй легкие изотопы обедняются параллельно со снижением концентрации  $^{235}\text{U}$ . А концентрация  $^{235}\text{U}$  может доходить до значений, близких к 20%.

Важной особенностью каскада (см. рис. 1) является то, что поток  $W_2$  не является конечным продуктом. Финальным шагом получения товарного продукта является разбавление потока  $W_2$  сырьем, не содержащим искусственных изотопов урана для выполнения ограничений по  $^{236}\text{U}$  и  $^{232}\text{U}$ . Для выполнения условия полного возврата регенерата в цикл пропорция смешивания фактически является заранее заданной, поскольку к этому моменту известны пропорция потоков  $W_2$  и  $E_1$  и расход регенерата на единицу конечного продукта. Анализ показывает, что в этом случае единственным параметром, позволяющим влиять на концентрацию  $^{235}\text{U}$  в товарном продукте, является концентра-

ция данного изотопа в разбавителе (поток  $F_p$  на рис. 1). Расчеты показывают, что в качестве разбавителя целесообразно использовать НОУ, полученный обогащением природного урана [12].

Еще одной важной особенностью каскадных схем такого типа является наличие потока отбора  $P_2$  второго каскада, содержащего отходы очистки регенерированного урана от изотопа  $^{232}\text{U}$ . Эта фракция фактически является отходом, проблема обращения с которым состоит в том, что он содержит материал с относительно большим обогащением по изотопу  $^{235}\text{U}$  – до 20%. Масса фракции, где сконцентрирован изотоп  $^{232}\text{U}$  ( $P_2$ ), в зависимости от выбора параметров первого и второго каскадов составляет от 0.6 до 3.1% от массы всего регенерированного урана, направленного на дообогащение [12]. Другими словами, задача почти полного использования всего регенерированного урана для изготовления топлива может быть решена, за исключением той фракции, где собраны отходы очистки от изотопа  $^{232}\text{U}$  и довольно существенное количество изотопа  $^{235}\text{U}$ ; поэтому обращение с этой фракцией вызывает много вопросов. В работе исследовалась возможность снижения массы этой фракции путём сравнения вариантов, где обогащение второго каскада достигало 20-ти и 90%.

Сложность заключается в том, что эквивалентные размножающие свойства топлива ВВЭР, изготовленного из регенерата, можно обеспечить очень большим числом комбинаций параметров двойного каскада (см. рис. 1). Это происходит потому, что параметры низкообогащенного урана, который направляется на изготовление топлива (поток  $P_0$  на рис. 1), на выходе из каскада всегда удовлетворяют условиям компенсации  $^{236}\text{U}$  дополнительным обогащением по  $^{235}\text{U}$ , а также ограничениям по содержанию  $^{232}\text{U}$  и  $^{234}\text{U}$ , которые накладываются соответствующими спецификациями (выполнение всех условий обеспечивается подбором параметров разбавителя).

Каждая уникальная комбинация варьируемых параметров приводит к изменениям таких характеристик, как массовый расход природного урана, величина работы разделения и масса отхода. В статье предложен алгоритм выбора оптимальной комбинации параметров каскадной схемы, обеспечивающей получение НОУ товарного качества. В качестве оптимальной настройки каскадной схемы принималась такая, в которой при получении заданной массы НОУ будут достигнуты минимально возможный расход природного урана, минимально возможная масса сбрасываемой в отход высокообогащенной фракции и затрачена минимальная работа разделения [13].

### **ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА К ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАСКАДНОЙ СХЕМЫ**

Рассматривалась задача выбора оптимальных параметров каскадной схемы для обогащения регенерированного урана второго рецикла для изготовления комплекта ТВС на перегрузку реактора типа ВВЭР-1200, работающего в 18-месячном топливном цикле. Требовалось изготовить 48 ТВС с обогащением 4,95% и 24 ТВС с обогащением 4,4%, общая масса обогащенного урана составляла 33675,3 кг. Для решения задачи поиска оптимальных обогащений использовалась математическая модель каскадной схемы (см. рис. 1), подробно описанной в [12].

Модель построена так, что допускает варьирование трех параметров: концентрации в отборе первого каскада  $b$  – 17%, концентрации в отвале второго каскада  $5$  – 16%, и концентраций в отборе второго каскада до 20%. При этом для всех вариантов концентрация  $^{235}\text{U}$  в отвале первого каскада составляла величину 0,1%.

Каждое полученное решение отвечает требованиям, предъявляемым к продукту. При таком разнообразии получаемых решений масса материала в потоке  $P_2$  фактически высокообогащенного отхода колеблется в интервале от нескольких десятков до почти тысячи килограммов. Сильно изменяются величины расхода природного урана и затрат

работы разделения.

Для выбора оптимальных параметров каскадной схемы использовался многокритериальный подход. Особенность подобных подходов состоит в том, что из-за возможной неоднозначности выбора оптимального варианта задача его поиска подменяется задачей выбора наиболее предпочтительного варианта с точки зрения ЛПР (лица, принимающего решение). В данном случае ЛПР (т.е. авторы) выбрали только состав списка оптимизируемых параметров и границы их изменения.

Для выбора наиболее предпочтительного варианта для дальнейших исследований принимались во внимание не только оптимальные значения физических и нормативных показателей, но и наиболее приемлемые с экономической точки зрения. Поэтому варианты, которым отвечали меньшие значения работы разделения, расхода природного урана и получаемой массы высокообогащенного отхода, были признаны более предпочтительными. С точки зрения физики, кроме достижения оптимальных экономических параметров желательно обеспечить по возможности наименьшие содержания изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ , поэтому варианты, удовлетворяющие условиям минимума этих изотопов, также были рассмотрены в качестве оптимальных.

Расчеты с последовательным изменением трех возможных параметров каскадной схемы приводят к значительному количеству (от нескольких сотен до десятков тысяч) возможных вариантов – комбинаций параметров каскадной схемы, обеспечивающих получение НОУ при заданных внешних условиях. Сложность выбора предпочтительного варианта обусловлена не столько их большим количеством, сколько тем, что комбинации параметров каскадной схемы, при которых достигаются минимумы расхода природного урана, затрат работы разделения и массы высокообогащенной фракции, содержания изотопов  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ , не совпадают. Что касается числа рассматриваемых вариантов, то оно существенно снижается в результате применения нормативных ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$  в интервале от  $2 \cdot 10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-7}\%$ . Варианты, в которых содержание  $^{232}\text{U}$  лежит ниже  $2 \cdot 10^{-7}\%$ , заведомо неоптимальны по затратам природного урана и работы разделения, а варианты с содержанием выше  $5 \cdot 10^{-7}\%$  не разрешены из соображений радиационной безопасности.

Для поиска оптимального решения с точки зрения одновременного учета параметров использовался многокритериальный алгоритм их выбора [13]. Из-за громоздкости алгоритма приведем лишь его общую схему.

На первом шаге уменьшение числа вариантов достигается за счет наложения ограничений на содержание  $^{232}\text{U}$ , которое уже обсуждалось выше.

Затем значения каждого из анализируемых параметров каскада (расход природного урана, затраты работы разделения, масса высокообогащенного отхода) для различных комбинаций концентраций в отборе первого, отвале и отборе второго каскадов размещались в двумерной матрице. Таким образом, каждому элементу матрицы единственным образом соответствуют три значения варьируемых параметров каскадной схемы. За каждым элементом закреплялись три «координаты»: обогащение продукта первого каскада, содержание  $^{235}\text{U}$  в отвале второго каскада и обогащение продукта второго каскада, что однозначно описывает его положение в формируемой матрице. Элементы матриц нельзя переставлять или менять местами, поскольку в этом случае нарушится соответствие между параметрами каскадной схемы. Элементы матриц, обозначающие исследуемые параметры (работу разделения, количество отхода, расход природного урана, содержания  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$ ), были пронумерованы в порядке возрастания, и их значения в матрице были заменены их порядковыми номерами.

В такой постановке задачи минимальному значению элементов матрицы, содержащей порядковые номера значений, соответствует наилучшее решение (наименьшее значение исследуемого параметра). Для нахождения оптимального значения по нескольким пара-

метрам необходимо сложить поэлементно все матрицы с порядковыми номерами исследуемых параметров. Таким образом, в результирующей матрице меньшее значение будет соответствовать более предпочтительному варианту. После этого остается лишь определить положение минимального элемента. Его координатам будут соответствовать параметры каскада для наилучшего решения при учете нескольких факторов.

Таблица 1

**Материальные параметры для различных критериев оптимизации**

Критерий	Параметр	Обогащение 4,95%	Обогащение 4,40%	Сумма
Загрузка, изготовленная из природного урана	Расход природного урана, кг	169 104	72 484	241 588
	Работа разделения, ЕРР	249 414	103 571	352 985
Оптimum по всем параметрам	Расход природного урана, кг	139 942	58 478	198 420
	Масса высокообогащенного отхода, кг	251	122	373
	Работа разделения, ЕРР	263 513	110 305	373 818
	Концентрация <sup>232</sup> U	4.405E-07	4.294E-07	
Минимум расхода природного урана	Расход природного урана, кг	139 899	59 254	199 153
	Масса высокообогащенного отхода, кг	256	122	378
	Работа разделения, ЕРР	264 038	110 305	374 343
	Концентрация <sup>232</sup> U	4.478E-07	4.294E-07	
Минимум работ разделения	Расход природного урана, кг	140 133	58 478	198 611
	Масса высокообогащенного отхода, кг	251	122	373
	Работа разделения, ЕРР	263 311	110 305	373 616
	Концентрация <sup>232</sup> U	4.294E-07	4.294E-07	
Минимум потерь урана в каскаде очистки (min отход)	Расход природного урана, кг	139 942	58 478	198 420
	Масса высокообогащенного отхода, кг	251	122	373
	Работа разделения, ЕРР	263 513	110 305	373 818
	Концентрация <sup>232</sup> U	4.405E-07	4.294E-07	
Минимум содержания <sup>232</sup> U	Расход природного урана, кг	150 051	61 862	211 913
	Масса высокообогащенного отхода, кг	648	479	1 127
	Работа разделения, ЕРР	284 722	113 231	397 953
	Концентрация <sup>232</sup> U	2.803E-07	3.281E-07	
Абсолютный минимум содержания <sup>232</sup> U	Расход природного урана, кг	150 995	63 860	214 855
	Масса высокообогащенного отхода, кг	690	342	1 032
	Работа разделения, ЕРР	283 159	120 393	403 552
	Концентрация <sup>232</sup> U	2.018E-07	2.098E-07	
Минимальное содержание <sup>236</sup> U	Расход природного урана, кг	152 661	63 273	215 934
	Масса высокообогащенного отхода, кг	738	313	1 051
	Работа разделения, ЕРР	288 679	118 340	407 019
	Концентрация <sup>232</sup> U	2.134E-07	2.023E-07	

Результаты применения рассмотренной методики поиска оптимальных параметров каскадной схемы представлены в табл. 1.

Поясним результаты, представленные в таблице. В дополнение к упомянутым выше абсолютным минимумам расхода природного урана, затрат работы разделения, массы высокообогащенной фракции, минимальным концентрациям  $^{232}\text{U}$  и  $^{236}\text{U}$  в таблице представлены данные для еще одного случая – концентрации  $^{232}\text{U}$  при минимуме расхода природного урана и массы высокообогащенной фракции. Поясним более детально смысл данного критерия. В ходе реализации разработанного алгоритма для каждого фиксированного значения концентрации  $^{235}\text{U}$  в отборе первого каскада были найдены абсолютные минимумы всех исследуемых параметров, а каждому значению локального минимума были сопоставлены все остальные исследуемые параметры.

Таким образом, для локального минимума концентрации  $^{232}\text{U}$  при одном фиксированном значении концентрации в отборе первого каскада были получены значения расхода природного урана, массы высокообогащенной фракции и затрат работы разделения, отвечающие параметрам каскадной схемы, обеспечивающих локальный минимум.

После этого именно для концентрации  $^{232}\text{U}$  были рассмотрены два варианта: в первом все значения отвечают абсолютному минимуму среди всех значений параметра концентрации  $^{235}\text{U}$  отбора первого каскада, во втором был выбран абсолютный минимум среди значений расхода природного урана и массы высокообогащенной фракции отхода, которые отвечают локальным минимумам концентраций  $^{232}\text{U}$ . Этот выбор важен, в первую очередь, потому, что концентрация  $^{232}\text{U}$  превышает абсолютный минимум незначительно, на  $0.785 \cdot 10^{-7}\%$ , а масса высокообогащенной фракции снижается при этом практически на 100 кг, что соответствует заметному снижению потерь делящегося изотопа.

Таблица 2

**Баланс изотопа  $^{235}\text{U}$**

Критерий	Расходный параметр	Расход делящегося изотопа, кг	Экономия $^{235}\text{U}$ , кг	Баланс $^{235}\text{U}$ , кг
Загрузка (природный уран)	Исходный расход $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 718		
Оптimum по всем параметрам	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 411	307	232
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-75		
Минимум расхода природного урана	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 416	302	226
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-75		
Минимум работ разделения	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 412	306	231
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-75		
Минимум потерь урана в каскаде очистки (min отход)	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 411	307	232
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-75		
Минимум содержания $^{232}\text{U}$ (минимальные потери в каскаде очистки)	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 507	211	-14
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-225		
Абсолютный минимум содержания $^{232}\text{U}$	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 528	190	-6
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-196		
Минимальное содержание $^{236}\text{U}$	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1 535	182	-28
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-210		

Отметим отдельно, что особое внимание уделялось изменению баланса делящегося

изотопа в случае оптимизации по единственному критерию при изменении критерия оптимизации. Анализ всех вариантов показал, что существует достаточно широкий диапазон параметров каскадной схемы, при которых масса делящегося изотопа, выведенного из цикла, превышает его массу, возвращенную в цикл. В связи с этим были проведены дополнительные исследования по расчету массы делящегося изотопа в высокообогащенном отходе. Они показали, что последняя прямо пропорциональна массе высокообогащенного отхода с различным обогащением. В этой связи можно рассматривать как значимый фактор только массу высокообогащенного отхода.

На основе полученных данных можно сделать выводы об эффективности использования делящегося изотопа  $^{235}\text{U}$ . В таблице 2 приведены результаты расчетов движения делящегося изотопа при различных параметрах каскадной схемы. Положительные значения в графе «Баланс» характеризуют экономию  $^{235}\text{U}$ , отрицательные – потери.

Видно, что наихудшим вариантом использования делящегося изотопа оказывается случай, в котором выбирается абсолютный минимум  $^{236}\text{U}$ , следующий за ним вариант с абсолютным минимумом  $^{232}\text{U}$ .

Наилучшими оказываются варианты, в которых выбирается абсолютный минимум потерь при очистке от изотопа  $^{232}\text{U}$  и расхода природного урана.

Таблица 3

**Относительное отклонение интегральных характеристик каскадной схемы для варианта с обогащением фракции отхода до 90% от варианта с обогащением фракции отхода до 20%**

Критерий	Параметр	Обогащение 4.95%	Обогащение 4.40%
Оптimum по всем параметрам	Расход природного урана, кг	4.4%	-2.8%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	89.1%	45.3%
	Работа разделения, ЕРР	-3.1%	-7.0%
Минимум расхода природного урана	Расход природного урана, кг	5.5%	1.2%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	94.8%	84.1%
	Работа разделения, ЕРР	-2.4%	-13.5%
Минимум работ разделения	Расход природного урана, кг	2.6%	0.5%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	67.4%	21.4%
	Работа разделения, ЕРР	0.4%	0.1%
Минимум потерь урана в каскаде очистки (минимум отхода)	Расход природного урана, кг	5.6%	1.8%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	94.7%	86.4%
	Работа разделения, ЕРР	-2.6%	-29.6%
Минимум содержания $^{232}\text{U}$ (оптимальные потери в каскаде очистки)	Расход природного урана, кг	7.6%	5.2%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	91.6%	95.2%
	Работа разделения, ЕРР	0.9%	-53.2%
Абсолютный минимум содержания $^{232}\text{U}$	Расход природного урана, кг	2.5%	5.3%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	70.7%	78.6%
	Работа разделения, ЕРР	-2.3%	1.4%
Минимальное содержание $^{236}\text{U}$	Расход природного урана, кг	0.5%	-2.2%
	Масса высокообогащённого отхода, кг	62.8%	42.8%
	Работа разделения, ЕРР	-4.3%	-7.9%

Таблица 4

**Баланс изотопа  $^{235}\text{U}$  для случая, когда обогащение по этому изотопу фракции отхода достигает 90%**

Критерий	Расходные параметры	Расход делящегося изотопа, кг	Экономия $^{235}\text{U}$ , кг	Баланс $^{235}\text{U}$ , кг
Загрузка (природный уран)	Исходный расход природного урана, кг	1718		
Оптимум по всем параметрам	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1378	340	280
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-60		
Минимум рас- хода природ- ного урана	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1356	362	335
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-27		
Минимум работ разделения	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1384	334	282
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-54		
Минимум по- терь урана в каскаде очистки (min отход)	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1345	370	343
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-27		
Минимум содер- жания $^{232}\text{U}$ при оптимальных потерях в каска- де очистки	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1403	315	245
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-70		
Абсолютный минимум содержания $^{232}\text{U}$	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1477	241	97
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-144		
Минимальное содержание $^{236}\text{U}$	Израсходованное кол-во $^{235}\text{U}$ из природного урана, кг	1540	178	-48
	Потери $^{235}\text{U}$ , кг	-226		

Вариант, выбранный в результате оптимизации по нескольким критериям, обеспечивает достаточно высокую экономию делящегося изотопа.

Представляет интерес анализ изменения эффективности предложенного метода использования регенерата при наличии возможности повышения обогащения фракции, которая выводится из цикла. Для этого была проведена серия вычислительных экспериментов, в которой допускалось, что концентрация  $^{235}\text{U}$  в отходе может достигать 90%. По результатам было проведено сравнение вариантов с обогащением фракции отхода 20 и 90%. Результаты сравнения представлены в табл. 3. В таблице приведены отклонения варианта, в котором обогащение сбрасываемой в отход фракции достигает 90%, от варианта, где обогащение фракции, сбрасываемой в отход, достигает 20%. В таблице 4 приведены числовые значения экономии и потерь делящегося изотопа в цикле для случая, когда обогащение фракции отхода может достигать 90%.

Как следует из данных табл. 4, в отличие от случая, в котором обогащение отхода ограничено 20%, при использовании во втором каскаде величины обогащения 90% баланс делящегося изотопа отрицательный только тогда, когда в качестве оптимизируемого критерия рассматривается абсолютный минимум концентрации изотопа  $^{236}\text{U}$ .

**ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ**

При анализе результатов необходимо отметить еще ряд обстоятельств.

Первое – аспекты нераспространения. Общепринято считать, что достижение в обо-

гатительном каскаде величин обогащения 90% свидетельствует либо о производстве топлива для реакторов малой мощности, исследовательского или транспортного назначения, либо о производстве оружейных ядерных материалов. В рассматриваемом случае это не так. Во-первых, техническая возможность получения 90%-ой концентрации изотопа  $^{235}\text{U}$  во втором каскаде неочевидна, поскольку сопровождается экстремальным ростом содержания изотопа  $^{232}\text{U}$ , что ставит под вопрос саму возможность обслуживания технологической линии такого каскада. Поэтому такие результаты в сильной степени являются теоретическими и важными, в первую очередь, с точки зрения понимания физики процесса. Кроме того, само по себе топливо из регенерированного урана является достаточно хорошо защищенным с точки зрения осуществления гарантий МАГАТЭ [14], и незаявленное использование даже относительно небольшого количества такого материала можно будет идентифицировать достаточно легко.

Второе – это аспекты многокритериального подхода к выбору параметров каскадных схем. Предложенный в статье подход универсален, и его применение не ограничивается двухкаскадными схемами. Он может быть использован, например, в каскадных схемах с подпиткой природным и отвальным ураном, для поиска оптимального соотношения между потоками природного и отвального урана, причем как для однокаскадных схем, так и для двойных и даже тройных каскадов. При этом, в зависимости от типа рассматриваемого каскада, расширяется или сужается набор рассматриваемых критериев и параметров.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Показано, что применение двойного каскада может обеспечить практически полный возврат регенерированного урана в топливный цикл с незначительными потерями, наличие которых обусловлено необходимостью очистки от изотопа  $^{232}\text{U}$ .

Показано, что некорректно выбранные критерии оптимизации могут приводить к тому, что потери изотопа  $^{235}\text{U}$  в цикле будут превышать его экономию.

Задача выбора оптимальных параметров двойного каскада является сложной и многопараметрической.

На примере оптимизации двухкаскадной схемы по различным критериям эффективности продемонстрированы возможности разработанного алгоритма, позволяющего выбирать оптимальные варианты для любых каскадных схем и любого спектра их варьируемых параметров. Это обстоятельство делает предложенный подход гибким и легко применимым в дальнейших исследованиях.

### **Благодарности**

Авторы выражают свою признательность профессору Б.Я. Зильберману (АО «Радиовый институт») за высказанные им ценные замечания.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский Институт», приказ №1879 от 22.08.2019.

### **Литература**

1. *Виллани С.* Обогащение урана. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 320 с.
2. *Uranium 2007: Resources, Production and Demand.* – OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD 2008. NEA, issue 6345.
3. *Соловьева А.П., Ульянов Ю.А., Харитонов В.В., Юршина Д.Ю.* Оценки ОЯТ как сырья для топлива реакторов на тепловых нейтронах. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 140-152
4. *Dudnikov A.A., Nevinitza V.A., Chibinyaev A.V., Proselkov V.N., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A.* Complex Approach to Study Physical Features of Uranium Multiple Recycling in Light Water Reactors. IAEA-CN-178/12-02. / Proc. of the Int. Conf. on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors, Vienna, Austria, 2010. – IAEA,

Vienna, Austria (on CD-ROM).

5. Smirnov A. Yu., Sulaberidze G. A., Dudnikov A. A., Nevinitza V. A., Proselkov V. N., Chibinyayev A. V., Alekseev P. N. Evolution of isotopic composition of reprocessed uranium during the multiple recycling in light water reactors with natural uranium feed. // Physics of Atomic Nuclei. – 2012. – Vol. 75. – Iss. 13. – PP. 1616-1625.

6. Кислов А. И., Титов А. А., Дмитриев А. М., Синцов А. Е., Романов А. В. Радиационные аспекты использования регенерированного урана на ОАО «МСЗ» при производстве ядерного топлива. // Ядерная и радиационная безопасность, специальный выпуск. – 2012. – С. 52-59.

7. Орлов А. А., Кравченко А. В., Титов Е. С., Лебедев А. Я. Обзор перспективных методов рециркуляции урана в ядерно-топливном цикле. // Известия вузов. Физика. – 2015. – Т. 58. – Вып. 2/2. – С. 35-40.

8. Прусаков В. Н., Сазыкин А. А., Соснин Л. Ю. и др. Коррекция изотопного состава регенерированного урана по  $^{232}\text{U}$  центробежным методом с введением газа-носителя. // Атомная энергия. – 2008. – Т. 105. – Вып. 3. – С. 150-156.

9. Палкин В. А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением  $^{235}\text{U}$  до 5%. // Атомная энергия. – 2013. – Т. 115. – Вып. 1. – С. 28-33.

10. Палкин В. А., Маслюков Е. В. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе R-каскада и его обогащение в ординарном каскаде. // Теор. основы хим. технологии. – 2016. – Т. 50. – Вып. 5. – С. 711-717.

11. Смирнов А. Ю., Сулаберидзе Г. А. Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением  $^{232-236}\text{U}$  природным сырьем и отвальным ураном. // Атомная энергия. – 2014. – Т. 117. – № 1. – С. 36-42.

12. Смирнов А. Ю., Невиница В. А., Фомиченко П. А., Гусев В. Е., Сулаберидзе Г. А. Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его полным возвратом в воспроизводство топлива. // Вестник НИЯУ МИФИ. – 2018. – Т. 7. – № 6. – С. 449-457.

13. Rodionova E. V., Nevinitza V. A., Smirnov A. Yu. Fuel cycle of Light Water Reactor with Full Consumption of Recycled Uranium. // KERNTECHNIK. – 2020. – Vol. 85. – Iss. 4. – PP. 314-320.

14. Волков Ю. Н., Гусев В. Е., Смирнов А. Ю., Сулаберидзе Г. А., Бландинский В. Ю., Невиница В. А., Фомиченко П. А. Защищенность экспортных поставок топлива легководных реакторов из регенерированного урана с точки зрения гарантий МАГАТЭ. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 128. – № 6. – С. 337-343.

Поступила в редакцию 04.06.2020 г.

#### Авторы

Родионова Екатерина Викторовна, научный сотрудник

E-mail: Rodionova\_EV@nrcki.ru

Невиница Владимир Анатольевич, руководитель отделения, канд. техн. наук

E-mail: Neviniza\_VA@nrcki.ru

Смирнов Андрей Юрьевич, старший научный сотрудник, доцент, канд. физ.-мат. наук

E-mail: AYSmirnov@mephi.ru

## MULTI-CRITERIA APPROACHES TO ECONOMIC OPTIMIZATION OF CASCADE SCHEMES FOR RECYCLED URANIUM ENRICHMENT

Rodionova E.V.\*, Nevinitsa V.A.\*, Smirnov A.Yu.\*,\*\*

\* NRC «Kurchatov Institute»

1 Akademika Kurchatova Sq., 123182 Moscow, Russia

\*\* National Research Nuclear University «MEPhI»

31 Kashirskoe Hwy, 115409 Moscow, Russia

### ABSTRACT

The possibility of multiple using of regenerated uranium is presented in the article. Additional regenerate enrichment is carried out using a modified double cascade. An algorithm for selecting a set of cascade parameters is proposed. It minimizes the consumption of natural uranium, separation operations, and the minimum amount of highly enriched fraction sent to waste.

The article considers the possibility of using multiple use of recycled uranium. It is shown that the problem of purifying recycled uranium from the  $^{232}\text{U}$  isotope can be solved by using double cascade schemes. Since approximately the same neutron-physical properties of the fuel of a light-water reactor of the VVER-1200 type can be obtained with a very large combination of enrichment values pairs of the first and second stages, the main problem is to choose the optimal parameters of the cascade scheme (the values of the enrichment of the first and second stages). In this study, we consider the problem of choosing the optimal parameters of the enrichment cascade by the example of fabrication a set of fuel assemblies for reloading a single VVER-1200 reactor. Additional enrichment of the recycled uranium is carried out using a modified double cascade. A multi-criteria algorithm for selecting a set of cascade parameters is proposed, which minimizes the consumption of natural uranium, the separation work expenditures, and the minimum amount of the highly enriched  $^{235}\text{U}$  fraction sent to waste along with the  $^{232}\text{U}$  isotope extracted from recycled uranium. It is shown that the mass of the highly enriched fraction contaminated with the  $^{232}\text{U}$  isotope (i.e., the fraction containing waste of the recycled uranium purification from the  $^{232}\text{U}$  isotope) decreases, as well as the loss of the  $^{235}\text{U}$  isotope with an increase in the enrichment value of the second stage from 20% to 90%.

**Key words:** double cascade, separate work units, optimization, economy, natural real indicators, recycled uranium, close fuel cycle, natural uranium.

### REFERENCES

1. Villani S. *Uranium Enrichment*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1983, 320 p. (in Russian).
2. *Uranium 2007: Resources, Production and Demand*. OECD Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency, OECD 2008 NEA, iss. 6345.
3. Solovyeva A.P., Ulyanin Yu.A., Kharitonov V.V., Yupshina D.Yu. About the value of SNF as a raw material for fuel for thermal neutron reactors. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 2, pp. 140-152; DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.2.12> (in Russian).
4. Dudnikov A.A., Nevinitsa V.A., Chibinyaev A.V., Proselkov V.N., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Complex Approach to Study Physical Features of Uranium Multiple Recycling in Light Water Reactors. IAEA-CN-178/12-02. *Proc. of the Int. Conf. on Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors*. Vienna, Austria, 2010. IAEA, Vienna, Austria (on CD-ROM).
5. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Dudnikov A.A., Nevinitsa V.A., Proselkov V.N.,

Chibinyayev A.V., Alekseev P.N. Evolution of isotopic composition of reprocessed uranium during the multiple recycling in light water reactors with natural uranium feed. *Physics of Atomic Nuclei*. 2012, v. 75, iss. 13, pp. 1616-1625.

6. Kislov A.I., Titov A.A., Dmitriev A.M., Sintsov F.E., Romanov A.V. Radiation issues of implementation of recycled uranium at JSK «MSZ» under fuel fabrication conditions. *Yadernaya i Radiatsionnaya Bezopasnost*. 2012, spec. iss., pp.52-59 (in Russian).

7. Orlov A.A., Kravchenko A.V., Titov E.S., Lebedev A.Ya. Review of promising methods of uranium recycling in the nuclear-fuel cycle. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015, v. 58, iss. 2/2, pp. 35-40 (in Russian).

8. Prusakov V.N., Sazykin A.A., Sosnin L.Yu. Correction of the isotopic composition of regenerated uranium by  $^{232}\text{U}$  using the centrifugal method with the introduction of a carrier gas. *Atomnaya Energiya*. 2008, v. 105, iss. 3, pp. 150-156 (in Russian).

9. Palkin V.A. Purification of regenerated uranium in cascades with  $^{235}\text{U}$  enrichment up to 5%. *Atomnaya Energiya*. 2013, v. 115, iss. 1, pp. 28-33 (in Russian).

10. Palkin V.A., Maslyukov E.V. Purification of regenerated uranium in the additional selection of the R-cascade and its enrichment in the ordinary cascade. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoy Tekhnologii*. 2016, v. 50, iss. 5, pp. 711-717 (in Russian).

11. Smirnov A.Y., Sulaberidze G.A. Enrichment of regenerated uranium with simultaneous dilution of  $^{232-236}\text{U}$  with natural raw materials and waste uranium. *Atomnaya Energiya*. 2014, v. 117, iss. 1, pp. 36-42 (in Russian).

12. Smirnov A.Yu., Nevinitza V.A., Fomichenko P.A., Gusev V.E., Sulaberidze G.A. Enrichment of regenerated uranium in a double cascade of gas centrifuges with its full return to fuel reproduction. *Vestnik NIYaU MIFI*. 2018, v. 7, no. 6, pp. 449-457 (in Russian).

13. Rodionova E.V., Nevinitza V.A., Smirnov A.Yu. Fuel cycle of Light Water Reactor with Full Consumption of Recycled Uranium. *KERNTECHNIK*. 2020, v. 85, iss. 4, pp. 314-320.

14. Volkov Yu.N., Gusev V.E., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Blandinsky V.Yu., Nevinitza V.A., Fomichenko P.A. Protection of Light-Water Reactor Fuel Export Deliveries with Regenerated Uranium in Terms of IAEA Safeguards. *Atomnaya Energiya*. 2020, v. 128, iss. 6, pp. 337-343 (in Russian).

#### Authors

Rodionova Ekaterina Viktorovna, Researcher

E-mail: Rodionova\_EV@nrcki.ru

Nevinitza Vladimir Anatolievich, Head of Division, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: Neviniza\_VA@nrcki.ru

Smirnov Andrey Yurievich, Senior Researcher, Associate Professor, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: AYSmirnov@mephi.ru