

УДК 621.039.31

ТОПЛИВНЫЙ ЦИКЛ ЛЕГКОВОДНОГО РЕАКТОРА С ПОЛНЫМ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА

© 2019 г. В. А. Невиница¹, А. Ю. Смирнов^{1,2,*}, Г. А. Сулаберидзе², В. Е. Гусев², А. М. Павловичев¹, А. И. Щеренко¹, Е. В. Родионова¹, В. Ю. Бландинский¹

¹ Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, 123098, Россия

² Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, 115409, Россия

*e-mail: a.y.smirnoff@rambler.ru

Поступила в редакцию 18.09.2019 г.

После доработки 25.09.2019 г.

Принята к публикации 01.10.2019 г.

Рассмотрена проблема многократного рециклирования урана в топливном цикле реакторов на тепловых нейтронах. Основные пути повторного использования выделенного из отработавшего топлива регенерированного урана связаны с его обогащением по целевому делящемуся изотопу ^{235}U в каскадах газовых центрифуг. Однако этот процесс технически затруднителен из-за присутствия в его изотопном составе искусственных изотопов $^{232}, ^{236}\text{U}$, а также повышенного по отношению к природному урану содержания ^{234}U . Из-за накладываемых на содержание указанных изотопов ограничений, связанных с требованиями к радиационным и нейтронно-физическим характеристикам низкообогащенного урана, при попытке многократного рецикла регенерированного урана возникают препятствия для полного возврата материала в цикл с использованием предложенных на сегодняшний момент схем его обогащения. Это обуславливает необходимость поиска новых схем обогащения регенерата, позволяющих решать указанную проблему.

В работе на основе модифицированного двойного каскада предложен способ, позволяющий получить продукт, удовлетворяющий ограничениям по всем четным изотопам урана, и расходующий на его производство заданное количество регенерата. Предложенную схему каскада целесообразно использовать в условиях многократного рецикла урана, начиная со второго рецикла, а также в условиях постоянного производства регенерированного топлива для парка реакторов на тепловых нейтронах.

Ключевые слова: регенерированный уран, двойной каскад, многопоточный каскад, ОЯТ, разделительный каскад, обогащение урана

DOI: 10.1134/S2304487X19060075

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов возможного удорожания электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, является проблема издержек заключительной стадии топливного цикла [1]. Снижение издержек возможно, в первую очередь, за счет выделения урана и плутония из отработавшего топлива для их последующего рециклирования, а также уменьшения объема захоронения РАО. Более 95% состава ОЯТ приходится на уран, который составляет основную часть потока рециклируемых материалов. Как показали оценки, рецикл дообогащенного регенерированного урана позволяет экономить до 20.5% природного урана при раздельном рецикле с плутонием (вклад плутония в экономию природного урана не превышает 11%, причем он снижается по мере роста числа рециклов, а остальная часть приходится на регенериро-

ванный уран). Вместе с тем, осуществлять рецикл регенерированного урана несколько сложнее, чем использовать для изготовления топлива природный уран. Так, в работе [1] основными трудностями при использовании регенерата считают необходимость компенсировать дополнительным обогащением присутствие в изотопном составе регенерированного урана изотопа ^{236}U , приносящего дополнительное поглощение тепловых нейтронов, а также рост содержания альфа-активного изотопа ^{232}U , цепочка радиоактивного распада которого включает в себя ^{208}Tl , излучающий гамма-кванты с энергией около 2.6 МэВ. Поэтому изотоп ^{232}U принято считать одним из основных загрязнителей замкнутого по урану топливного цикла и строго регламентировать его содержание [2]. С другой стороны, фактически основным альфа-излучателем в регенерированном уране является не ^{232}U , а ^{234}U , содержание ко-

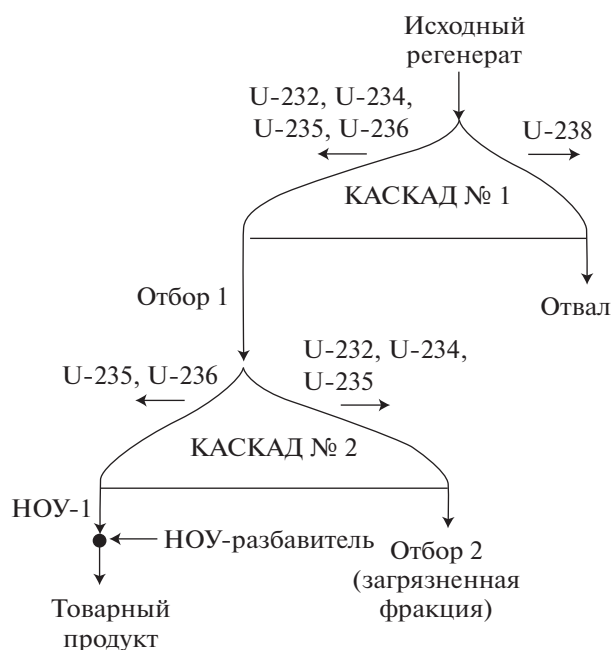


Рис. 1. Схема двойного каскада для рецикла регенерированного урана с разбавлением низкообогащенным ураном на выходе.

торого регулируется, в частности, спецификациями ASTM и национальными техническими условиями [3]. Присутствие же альфа-активных изотопов в регенерате урана важно контролировать не только с точки зрения безопасности персонала предприятий, на которых происходит дообогащение регенерата и изготовление топлива, но и с точки зрения возможных процессов диссоциации (и рекомбинации) гексафторида урана, происходящих под воздействием альфа-излучения [4].

Как показывают результаты работ [3, 5–18], на текущий момент предложены способы дообогащения регенерата, которые могут справиться и с проблемой не превышения допустимых содержаний изотопов ^{232}U и ^{234}U , и с проблемой компенсации ^{236}U . Одна из нерешенных проблем при использовании регенерированного урана заключается в следующем: в процессе многократного рецикла регенерата концентрация изотопа ^{232}U в нем в определенный момент достигает такого уровня, что одновременное выполнение условий по содержанию ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U становится возможным только при сокращении удельного расхода регенерата на единицу получаемого продукта, даже при условии сохранения достаточно высокой экономии природного урана (до 50%) [3]. Это означает, что, начиная с определенного рецикла, не всегда удастся использовать весь регенерат, выделенный из топлива конкретной загрузки реактора, для производства топлива по-

следующих загрузок этого же реактора. В этой ситуации остаются два наиболее очевидных пути. Первый заключается в увеличении объема производимого из регенерата топлива (при сохранении удельного расхода регенерата на единицу производимого продукта). Этот путь фактически приведет к увеличению количества реакторов, загружаемых топливом из регенерата урана, выделенного из одного конкретного реактора. Второй путь заключается в отправке неиспользованной части регенерата для складирования на неопределенный срок. Указанные возможности не всегда могут быть приемлемыми.

Анализ предложенных на сегодняшний день решений относительно обогащения регенерата урана показывает, что наиболее полно удовлетворяют требованиям максимального использования регенерата так называемые двойные каскадные схемы, представляющие собой последовательное соединение двух разделительных каскадов [6, 8, 14]. В работе [18] предложена модификация схемы двойного каскада, позволяющая одновременно удовлетворить ограничениям, накладываемым на содержания ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в соответствии с техническими условиями и международными спецификациями (рис. 1). Основная идея работы такого каскада состоит в том, чтобы в одном из потоков сконцентрировать гексафторид урана, содержащий основную долю изотопа ^{232}U (естественно, вместе со всеми сопутствующими изотопами), а на изготовление топлива направлять гексафторид урана из другого потока, обедненного по изотопу ^{232}U . При этом для достижения требуемого соотношения между исходным регенератом и продуктом необходимо подмешивание к этому потоку смеси, не содержащей ^{232}U , а именно: низкообогащенного урана природного происхождения. Результаты проведенных вычислительных экспериментов показали, что такая схема позволяет получить продукт с допустимым содержанием четных изотопов и одновременным обеспечением заданного расхода регенерата на единицу продукта. Важно отметить, что масса фракции, в которой сконцентрирован изотоп ^{232}U (“Отбор 2” на схеме рис. 1), в зависимости от выбора параметров первого и второго каскадов, составляет от 0.6% до 3.1% от массы всего регенерированного урана, направленного на дообогащение. Другими словами, задача полного использования всего регенерированного урана для изготовления топлива практически решается.

Проблема заключается в том, что при крупном масштабе переработки ОЯТ и последующем обогащении регенерата масса обогащенной по изотопам ^{235}U и ^{232}U фракции может оказаться существенной с точки зрения процедур обращения с данным материалом. Оценки показывают, что,

например, при обогащении регенерата, полученного после переработки всех одновременно перегружаемых 72 ОТВС реактора типа ВВЭР-1200, масса загрязненной фракции, в зависимости от выбранных параметров первого и второго каскадов, может составлять от 350 до 960 кг. Этот материал является, с одной стороны, сильно радиоактивным, поскольку содержит большую часть изотопа ^{232}U , с другой стороны, содержит большое количество изотопа ^{235}U , поскольку обогащение урана по этому изотопу может составлять величину около 20% [18]. В соответствии с “Основными правилами учета и контроля ядерных материалов” НП-030-12 этот материал может быть переведен в РАО лишь в том случае, если количество такого материала в организации не превышает 15 грамм. Это означает, что обращение с подобным побочным продуктом обогащения регенерата должно осуществляться именно как обращение с ядерным материалом, с соблюдением требований по ядерной и радиационной безопасности.

Длительное хранение этого материала позволит снизить уровень загрязнения изотопом ^{232}U вследствие его распада и получить в итоге слабо-радиоактивный уран с обогащением 20%, который впоследствии также можно использовать для производства топлива. Однако среди способов его хранения должны быть рассмотрены и обесфторивание, с последующим хранением в виде закиси-окиси, и хранение в виде гексафторида урана. С учетом того, что современные установки по конверсии обедненного гексафторида урана предназначены для переработки слабо-радиоактивного материала, первый способ может потребовать строительства специальных установок для переработки сильно радиоактивного гексафторида урана. Но и хранение в виде гексафторида требует обоснования с точек зрения безопасности из-за высокого тепловыделения радиоактивного распада, а также радиационной стойкости гексафторида урана под длительным (порядка 20–30 лет) воздействием альфа-излучения с одновременным выполнением требований ядерной безопасности (в силу обогащения 20%). Третьим, и, возможно, наиболее простым, способом обращения с этим материалом, является его разбавление гексафторидом отвалного урана. При достаточно сильном разбавлении результирующий гексафторид обедненного урана будет слабо-радиоактивным и его можно будет подвергнуть конверсии на существующих установках. Однако это будет означать потерю затраченной работы разделения и потерю от 70 до 190 кг ^{235}U (в виде урана с обогащением 20%) на каждые 72 переработанные ОТВС.

В настоящей работе предложен способ обращения с образовавшимся в результате обогаще-

ния регенерата в двойном каскаде гексафторидом урана с высоким содержанием изотопов $^{232-235}\text{U}$. Предлагается вовлекать этот материал после его накопления в результате обогащения изначальной партии регенерата, поступившей на обогатительное производство в обогащение следующей партии регенерированного урана из переработанных ОТВС. Показано, что реализация предлагаемой схемы позволяет полностью израсходовать как вновь поступивший на повторное обогащение регенерированный уран, так и проблемный промежуточный продукт, оставшийся после прошлой операции по дообогащению – гексафторид высокообогащенного урана с относительно высоким содержанием ^{232}U . Таким образом, предлагаемый способ позволяет избежать необходимости длительного хранения обоих указанных материалов.

ОПИСАНИЕ ПРЕДЛАГАЕМОГО РЕШЕНИЯ

Рассмотрим подробнее способ организации топливного цикла, позволяющий вовлечь накапливаемый при использовании схемы двойного каскада (рис. 1) загрязненный гексафторид урана. Основная идея заключается в том, что поскольку данная схема предназначена для дообогащения регенерата с любым содержанием изотопа ^{232}U , то вполне естественным представляется использовать этот же каскад для того, чтобы утилизировать полученный в потоке отбора загрязненный изотопом ^{232}U гексафторид урана. В этом случае он может быть разбавлен не обедненным ураном, а непосредственно регенератом, полученным из следующей партии отработавшего топлива (рис. 2).

Процесс возврата данного материала в воспроизводство низкообогащенного урана может быть начат практически после дообогащения регенерата уже для одной ТВС и даже для ее части (непрерывный возврат), схема каскада при этом преобразуется к виду, изображенному на рис. 3.

Очевидно, что при использовании предлагаемой схемы и непрерывной работе завода по обогащению, удастся полностью замкнуть топливный цикл по урану, а единственным отходом производства станет только обедненный гексафторид, образующийся в отвале первого каскада. Однако данный продукт можно считать штатным отходом обогатительного производства, для которого на сегодняшний день отработаны технологии хранения и переработки. При этом после вывода завода из эксплуатации (или остановки на планово-предупредительный ремонт) останется невостребованным только тот объем обогащенного по изотопу ^{232}U гексафторида урана, который будет образован после обогащения последней партии регенерата на этом заводе. Таким образом, предлагаемый в настоящей статье подход к дообогаче-

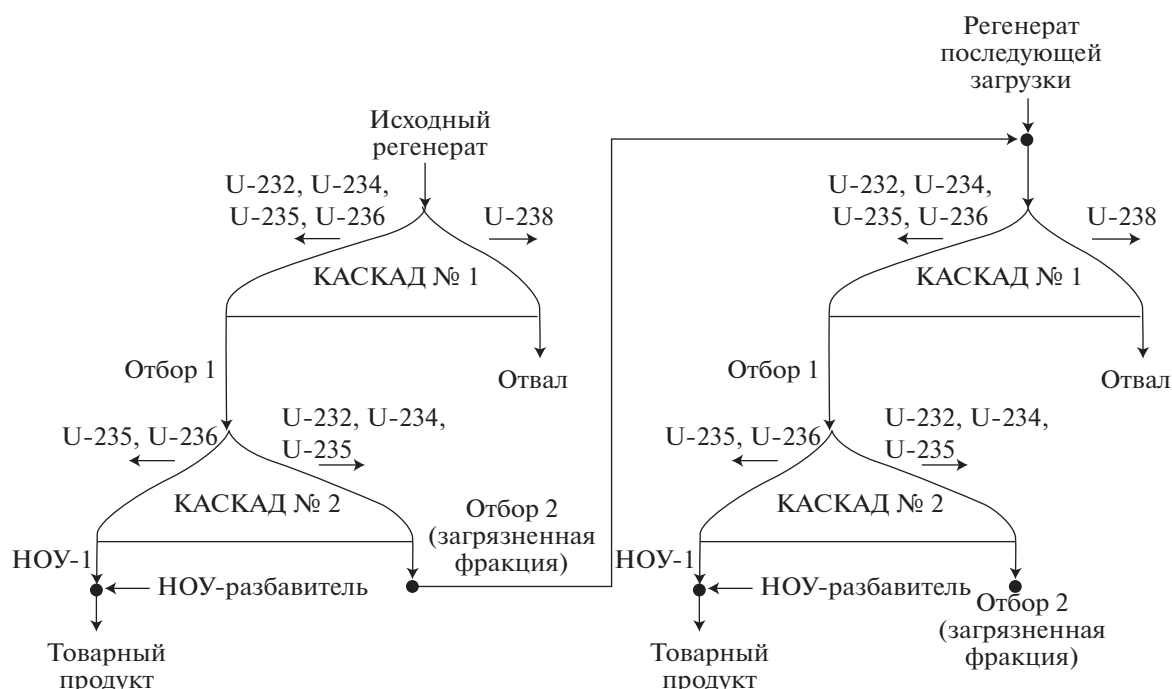


Рис. 2. Схема передачи загрязненной изотопом ^{232}U фракции гексафторида урана в двойном каскаде от первой партии дообогащенного регенерированного урана к последующей.

щению регенерата урана позволяет организовать полный возврат регенерированного урана в топливный цикл в течение практически всего жиз-

ненного цикла топлива легководных реакторов, работающих в замкнутом топливном цикле.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим возможную организацию топливного цикла легководного реактора с полным использованием регенерированного урана на примере реактора типа ВВЭР-1200, работающего в установившемся режиме перегрузок. Следует отметить, что для данного рассмотрения, в целом, безразлично, в каком виде осуществляется многократный рецикл регенерированного урана – в виде топлива из диоксида урана (РУТ-топливо) или в виде оксида дообогащенного регенерированного урана в смеси с плутонием (РЕМИКС-топливо), поскольку в обоих случаях схема обогащения регенерата будет одной и той же. Для определенности рассмотрим РУТ-топливо. Считаем, что топливо стационарной топливной загрузки, с которой начат переход к работе ВВЭР-1200 в замкнутом топливном цикле, изготовлено из природного урана. При этом в активную зону загружают 24 и 48 свежих ТВС с обогащением топлива твэлов 4.4% и 4.95% соответственно. В ТВС установлены уран-гадолиниевые выгорающие поглотители в количестве от 6 до 24 штук. После перехода к ЗЯТЦ топливо направляется на переработку, а полученный в результате переработки уран – на дообогащение. Предполагаем, что твэги (тепловыделяющие элементы, содержащие выгораю-

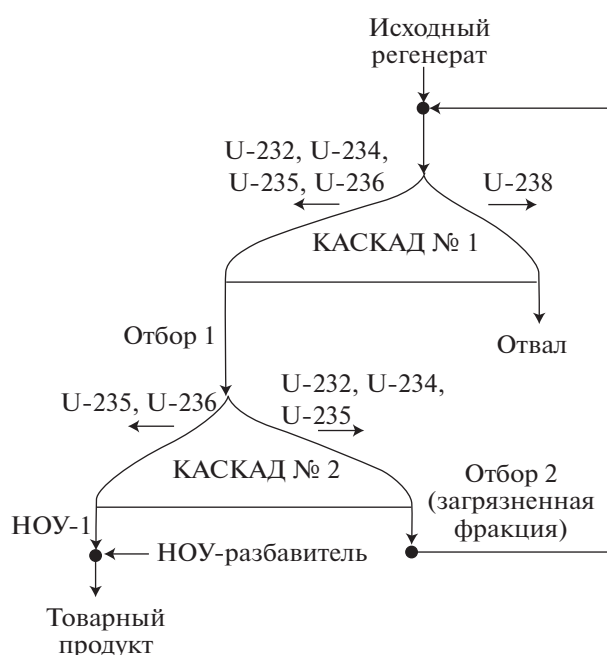


Рис. 3. Схема двойного каскада с возвратом потока отбора.

Таблица 1. Изотопные составы и расходы природного урана для изготовления топлива для перегрузок реактора типа ВВЭР-1200 (без учета твэгов): исходный состав и топливо первого рецикла

Источник сырья	Исходный состав		Топливо первого рецикла	
Обогащение, %	4.95	4.4	4.95	4.4
Расход природного урана, кг	169103.5	72483.98	134470.00	55795.00
Расход регенерата, кг	—	—	20620	9969
Расход работы разделения, отн. ед	249413	103570	230570	98143
Изотопный состав, %				
^{232}U	0	0	3.09×10^{-7}	3.09×10^{-7}
^{233}U	0	0	1.13×10^{-6}	1.13×10^{-6}
^{234}U	4.1×10^{-2}	3.7×10^{-2}	5.52×10^{-2}	5.05×10^{-2}
^{235}U	4.95	4.4	5.133	4.586
^{236}U	0	0	4.13×10^{-1}	4.21×10^{-1}
^{238}U	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное

щий поглотитель гадолиния), в силу их незначительного количества, всегда изготавливаются только на основе обогащенного природного урана. В этом случае, регенерат урана, получаемый после переработки 72 ОТВС направляют на обогащение и последующее изготовление двух партий твэлов, используемых в стационарной загрузке: с обогащением 4.95% и 4.4%. Поскольку полученный из ОЯТ регенерат, направляемый на первый рецикл, имеет наименьшее содержание изотопа ^{232}U , то его дообогащение (с одновременным выполнением условия полного использования регенерата) может быть выполнено в одной из модификаций трехпоточного (питание, отбор и отвал) или ординарного каскада [3, 7].

В настоящей работе для получения состава обогащенного регенерата после первого цикла облучения рассмотрена простейшая модификация ординарного каскада — каскад с разбавлением на входе [7]. В табл. 1 представлены экономически значимые параметры (расход природного урана и затраты работы разделения) такого каскада для двух уровней обогащения по ^{235}U и сопоставлены с аналогичными параметрами базового варианта каскада, обогащающего природный уран для получения низкообогащенного топлива. Помимо указанных параметров в табл. 1 приведены также изотопные составы получаемых продуктов. При этом следует заметить, что во всех приводимых данных концентрации выражены в массовых долях. В качестве расчетной модели выступала модель квазиидеального каскада [16], часто используемая в теории разделения многокомпонентных изотопных смесей.

Поскольку на первом рецикле в отходах обогащения не образовывалось отдельной фракции

(потока), обогащенной по изотопу ^{232}U , то параметры облученного топлива первого рецикла одинаковы для всех перегрузок реактора, относящихся к первому рециклу. После облучения в реакторе, выдержки в течение 6 лет и с учетом изменения изотопного состава за время транспортировки и переработки, отработавшее РУТ-топливо содержит существенно больше изотопа ^{232}U , чем ОЯТ, для изготовления которого использовали природный уран. Поэтому, начиная со второго рецикла, для дообогащения регенерированного урана с одновременным выполнением условия его полного возврата использование ординарных каскадов затруднительно [18]. В рамках настоящей работы предполагали, что ординарный каскад заменяют двойным каскадом, схема которого изображена на рис. 1. Полученная после дообогащения регенерата первой партии регенерата (или регенерата, выделенного из первой выгруженной группы ТВС из реактора, работающего на РУТ-топливе первого рецикла) фракция, обогащенная по изотопу ^{232}U и имеющая 20% содержание изотопа ^{235}U смешивается с регенератом, полученным после переработки второй партии ОТВС. Полученную смесь направляют на дообогащение (рис. 2). Результаты расчета параметров двойных каскадов для этого случая приведены в табл. 2. В случае, когда возврата потока отбора не происходит, параметры топлива для всех перегрузок второго рецикла совпадают с параметрами первой перегрузки из табл. 2, а изотопный состав урана, попадающего в отходы на каждой перегрузке, и его количество, совпадает с составом возвращаемой фракции первой перегрузки из табл. 2. При расчете параметров двойных каскадных схем в качестве расчетной модели также использован квазиидеальный каскад.

Таблица 2. Изотопные составы и расходы природного урана для изготовления топлива для перегрузок реактора типа ВВЭР-1200 (без учета твэгов): топливо второго рецикла

Номер перегрузки	Первая перегрузка		Вторая перегрузка		Третья перегрузка	
Обогащение, %	4.95	4.4	4.95	4.4	4.95	4.4
Расход природного урана, кг	139802.03	58291.31	135568.06	56351.24	133649.39	56868.39
Расход регенерата, кг	20604.65	9961.54	20860.12	10082.89	20929.42	10118.12
Расход работы разделения, отн. ед.	263368.8	109887.15	254313.79	106009.0	252276.2	108260.45
Масса возвращаемой фракции, кг	255.47	121.36	324.77	156.59	329.34	220.37
Изотопный состав топлива, %						
^{232}U	4.43×10^{-7}	4.34×10^{-7}	4.80×10^{-7}	4.85×10^{-7}	5.92×10^{-7}	4.92×10^{-7}
^{233}U	1.33×10^{-6}	1.32×10^{-6}	1.50×10^{-6}	1.51×10^{-6}	1.74×10^{-6}	1.50×10^{-6}
^{234}U	5.87×10^{-2}	5.40×10^{-2}	6.14×10^{-2}	5.68×10^{-2}	6.38×10^{-2}	5.63×10^{-2}
^{235}U	5.154	4.607	5.207	4.658	5.212	4.634
^{236}U	4.76×10^{-1}	4.91×10^{-1}	6.16×10^{-1}	6.14×10^{-1}	6.22×10^{-1}	5.61×10^{-1}
^{238}U	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное
Изотопный состав возвращаемой фракции, %						
^{232}U	1.64×10^{-5}	1.75×10^{-5}	2.32×10^{-5}	2.36×10^{-5}	2.57×10^{-5}	2.34×10^{-5}
^{233}U	3.98×10^{-5}	4.17×10^{-5}	5.16×10^{-5}	5.21×10^{-5}	5.49×10^{-5}	5.15×10^{-5}
^{234}U	5.88×10^{-1}	6.03×10^{-1}	6.78×10^{-1}	6.81×10^{-1}	6.96×10^{-1}	6.73×10^{-1}
^{235}U	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
^{236}U	7.11	7.04	6.54	6.54	6.46	6.55
^{238}U	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное	Остальное

Как видно из данных табл. 2 предложенная схема рециклирования действительно позволяет полностью израсходовать и исходный регенерированный уран и образующийся в результате использования двойного каскада высокообогащенный отход.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен способ организации работы двойного каскада с полным возвратом регенерата урана в производство топлива. При этом возврат высокообогащенного регенерата, загрязненного изотопом ^{232}U , при изготовлении топлива для второй и третьей стационарных перегрузок реактора позволяет снизить суммарные затраты природного урана и работы разделения по сравнению с затратами природного урана и работы разделения для изготовления топлива первой перегрузки второго рецикла. В первую очередь это происходит за счет увеличения доли регенерированного урана, используемого при изготовлении топлива. Это преимущество не является основным при переходе на схему двойного каскада с возвратом потока отбора. Основным преимуществом является отсутствие поступления на склад

при изготовлении топлива для каждой перегрузки урана с обогащением 20% и содержанием изотопа ^{232}U на уровне $10^{-5}\%$, которое на два порядка превосходит допустимые содержания этого изотопа. В силу того, что содержание изотопа ^{234}U также существенно превышает уровни, допустимые спецификацией ASTM, уровень тепловыделения радиоактивного распада и необходимость обеспечить ядерную безопасность серьезно затрудняют обращение с этой фракцией. Отсутствие указанных проблем и является главным преимуществом от использования подобной схемы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при поддержке НИЦ “Курчатовский институт”, приказ о проведении НИР № 1879 от 22.08.2019.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Похитонов Ю.А.* Как можно снизить стоимость переработки облученного топлива и обеспечить надежную изоляцию всех отходов? // Радиохимия. 2017. Т. 59. № 6. С. 481–487.

2. Кислов А.И., Титов А.А., Дмитриев А.М., Синцов А.Е. Радиационные аспекты использования регенерированного урана на ОАО “МСЗ” при производстве ядерного топлива // Ядерная и радиационная безопасность. 2012. Специальный выпуск.
3. Бландинский В.Ю., Гроль А.В., Дудников А.А., Невиница В.А., Фомиченко П.А., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Согласованный подход к моделированию выгорания при облучении и молекулярно-селективных процессов в разделительном каскаде для оценки перспектив раздельного рецикла регенерированного урана топлива в легководном реакторе // Вопросы атомной науки и техники, серия: “Ядерно-реакторные константы”. 2018. № 1. С. 68–75.
4. Bernhardt H.A., Davis Jr. W., Shiflett C.H. Radiation Effects of Alpha Particles on Uranium Hexafluoride. // In Proc. of International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, Switzerland, 1958. Report P/522.
5. 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. № 2/2. С. 35–40.
6. Прусаков В.Н., Сазыкин А.А., Соснин Л.Ю., Утробин Д.В., Чельцов А.Н. Коррекция изотопного состава регенерированного урана по ^{232}U центробежным методом с введением газа-носителя // Атомная энергия. 2008. Т. 105. № 3. С. 150–156.
7. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А., Дудников А.А., Шмелев А.Н. Каскадные схемы в задачах исследования закономерностей изменения изотопного состава многократно регенерированного урана // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 5. С. 396–403.
8. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5% // Атомная энергия. 2013. Т. 115. № 1. С. 28–33.
9. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Теоретические основы химической технологии. 2006. Т. 40. № 1. С. 7–16.
10. Палкин В.А. Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором // Перспективные материалы. 2010. № 8. С. 11–14.
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. Палкин В.А. Применение квазиидеальных каскадов и операции разбавления для очистки регенерированного гексафторида урана // Атомная энергия. Т. 121. № 3. С. 152–157.
13. Палкин В.А., Маслюков Е.В. Очистка регенерированного урана в дополнительном отборе R-каскада и его обогащение в ординарном каскаде // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 5. С. 711–717.
14. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в двухкаскадной схеме при использовании в одном из каскадов промежуточного отбора // Атомная энергия. 2016. Т. 121. № 1. С. 37–41.
15. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. О некоторых разделительных проблемах при вовлечении регенерированного урана в топливный цикл // Сб. докладов IX Всероссийской (Международной) научной конференции “Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул”. Россия, Звенигород, 4–8 октября 2004. С. 78–85.
16. Сазыкин А.А. Квазиидеальные каскады для разделения многокомпонентных смесей изотопов // Сб. докладов 5-й научной конференции “Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул”. Звенигород, ЦНИАТОМИНФОРМ, 2000. С. 51–57.
17. De la Garza A., Garrett G.A., Murphy J.E. Multicomponent isotope separation in cascades // Chemical Engineering Science. 1961. V. 15. P. 188–209.
18. Смирнов А.Ю., Гусев В.Е., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А., Фомиченко П.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.

Vestnik Natsional'nogo issledovatel'skogo yadernogo universiteta “MIFI”, 2019, vol. 8, no. 6, pp. 498–506

LWR Fuel Cycle with Reprocessed Uranium Complete Recycling

V. A. Nevinita^b, A. Yu. Smirnov^{a,b,#}, G. A. Sulaberidze^a, V. E. Gusev^a, A. M. Pavlovichev^b,
A. I. Scherenko^b, E. V. Rodionova^b, and V. Yu. Blandinsky^b

^a National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, 115409 Russia

^b National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, 123098 Russia

[#]e-mail: a.y.smirnoff@rambler.ru

Received September 18, 2019; revised September 25, 2019; accepted October 1, 2019

Abstract—In this study, we consider the problem of multiple recycling of uranium in the fuel cycle of thermal neutron reactors. The general approach to reusing recovered uranium extracted from spent fuel is related to its enrichment by the target fissile isotope ^{235}U in cascades of gas centrifuges. However, the reprocessed ura-

nium enrichment has difficulties related to $^{232}, ^{236}\text{U}$ isotopes presence and a higher concentration of ^{234}U comparing to natural uranium. The low-enriched uranium product should meet the requirements on these even-numbered isotopes owing to radiation and neutron-physical characteristics. These conditions lead to obstacles for the complete return of the material to the cycle using the known enrichment schemes. This necessitates the search for new regeneration enrichment schemes that can solve this problem.

In this paper, we propose a new configuration based on the modified double cascade of gas centrifuges, which allows consuming the whole amount of reprocessed uranium during the enrichment process. It is preferable to use the proposed cascade scheme when we deal with multiple uranium recycling, starting from the second recycle round. It corresponds to sustainable fuel recovery for a fleet of thermal neutron reactors.

Keywords: reprocessed uranium, double cascade, multi-flow cascade, SNF, separation cascades theory

DOI: 10.1134/S2304487X19060075

REFERENCES

1. Pohitonov Yu.A., Kak mozno snizit' stoimost' pererabotki obluchennogo topliva i obespechit' nadezhnyuyu izolyatsiyu vseh otdokhov? [How can the cost of processing irradiated fuel be reduced and reliable isolation of all waste products ensured?], *Radiochemistry*, 2017, vol. 59, no. 6, pp. 481–487 (in Russian).
2. Kislov A.I., Titov A.A., Dmitriev A.M., Sintsov A.E., Radiacionnye aspekty ispol'zovaniya regenerirovannogo urana na OAO "MSZ" pri proizvodstve yadernogo topliva [Radiation aspects of the use of regenerated uranium at JSC "MSZ: in the production of nuclear fuel], *Journal of Nuclear and Radiation Safety*, 2012, special issue (in Russian).
3. Blandinskij V.Yu., Grol A.V., Dudnikov A.A. Nevinita V.A., Fomichenko P.A., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Soglasovannyj podhod k modelirovaniyu vygoraniya pri obluchenii i molekulyarno-selektivnyh processov v razdelitel'nom kaskade dlya ocenki perspektiv razdel'nogo recikla regenerirovannogo urana topliva v legkovodnom reaktore [A coordinated approach to the simulation of fuel burnup during irradiation and molecular selective processes in the separation stage to assess the prospects of separate recycling of regenerated uranium in a light water reactor], *Questions of atomic science and technology, the series "Nuclear-Reactor Constants"*, 2018, no. 1, pp. 65–72 (in Russian).
4. Bernhardt H.A., Davis Jr.W., Shiflett C.H., Radiation Effects of Alpha Particles on Uranium Hexafluoride. In Proc. of International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy. Geneva, Switzerland, 1958. Report p. 522.
5. Orlov A.A., Kravchenko A.V., Titov E.S., Lebedev A.Ya., Obzor perspektivnyh metodov recirkulyatsii urana v yaderno-toplivnom cikle [An overview of recycling methods uranium nuclear fuel cycle], *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 58, no. 2/2, pp. 35–40 (in Russian).
6. Prusakov V.N., Sazykin A.A., Sosnin L.Yu., Utrobin D.V., Cheltsov A.N., Korrektsiya izotopnogo sostava regenerirovannogo urana po ^{232}U centrobezhnym metodom s vvedeniem gaza-nositelya [Correcting the isotopic composition of regenerated uranium with respect to ^{232}U by a centrifuge method with introduction of a carrier gas], *Atomic Energy*, 2008, vol. 105, no. 3, pp. 194–201 (in Russian).
7. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Nevinita V.A., Dudnikov A.A., Shmelev A.N., Kaskadnye skhemy v zadachah issledovaniya zakonomernostej izmeneniya izotopnogo sostava mnogokratno regenerirovannogo urana [Cascade schemes in problems of studying the patterns of variation in the isotope composition of multiply regenerated uranium], *Nuclear physics and engineering*, 2012, vol. 3, no. 5, pp. 396–403 (in Russian).
8. Palkin V.A., Ochistka regenerirovannogo urana v kaskadah s obogashcheniem ^{235}U do 5% [Purification of regenerated uranium in cascades with enrichment of ^{235}U to 5%], *Atomic Energy*, 2013, vol. 115, no. 1, pp. 28–33 (in Russian).
9. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., Xie Q.X., Quasi-ideal cascades with an additional flow for separation of multicomponent isotope mixtures, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2006, vol. 40, no. 1, pp. 5–14.
10. Palkin V.A., Razdelenie izotopov urana v kaskade s prozhutochnym otborom [Uranium Isotope Separation in a Cascade with Additional Product Flow], *Prospective Materials*, 2010, vol. 8, pp. 11–14 (in Russian).
11. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Obogashchenie regenerirovannogo urana s odnovremennym razbavleniem $^{232-236}\text{U}$ prirodnyim syr'em i otval'nyim uranom [Enrichment of Regenerated Uranium with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Raw and Waste Uranium], *Atomic Energy*, 2014, vol. 117, no. 1, pp. 36–42 (in Russian).
12. Palkin V.A., Primenenie kvaziideal'nyh kaskadov i operatsii razbavleniya dlya ochistki regenerirovannogo geksaforida urana [Application of Quasiideal Cascades and the Operation of Dilution for Purification of Regenerated Uranium Hexafluoride], *Atomic Energy*, 2016, vol. 121, no. 3, pp. 152–157 (in Russian).
13. Palkin V.A., Maslyukov E.V., Ochistka regenerirovannogo urana v dopolnitel'nom otbore R-kaskada i ego obogashchenie v ordinarnom kaskade [Purification of reprocessed uranium in an additional product flow of a matched abundance ratio cascade and its enrichment in an ordinary cascade], *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2016, vol. 50, no. 5, pp. 711–717 (in Russian).
14. Palkin V.A., Purification of Regenerated Uranium in a Two-Cascade Scheme Using Intermediate Product Extraction in One of the Cascades, *Atomic Energy*, 2016, vol. 121, no. 1, pp. 43–47.
15. Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., Quanxin Xie., O nekotoryh razdelitel'nyh problemah pri vovlechenii rege-

- nerirovannogo urana v toplivnyj cikl [On some separation problems involving the recycled uranium in the fuel cycle], *Sbornik dokladov IX mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fiziko-khimicheskiye protsessy pri selektsii atomov i molekul"*, Rossiya, Zvenigorod [Proc. of the 9th international scientific conference "Physico-chemical processes in the selection of atoms and molecules", Russia, Zvenigorod], 2004, pp. 78–85 (in Russian).
16. Sazykin A.A., Kvaziideal'nye kaskady dlya razdeleniya mnogokomponentnykh smesey izotopov [Quasidial cascades for separation of multicomponent mixtures of isotopes], *Sbornik dokladov V mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Fiziko-khimicheskiye protsessy pri selektsii atomov i molekul"*, Rossiya, Zvenigorod [Proc. of the 5th scientific conference "Physico-chemical processes in the selection of atoms and molecules", Russia, Zvenigorod], 2000, pp. 51–57 (in Russian).
17. De la Garza A., Garrett G.A., Murphy J.E. Multicomponent isotope separation in cascades, *Chemical Engineering Science*, 1961, vol. 15, pp. 188–209.
18. Smirnov A.Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinita V.A., Fomichenko P.A., Obogashchenie regenerirovannogo urana v dvojnomo kaskade gazovykh centrifug s ego polnym vozvratom v vosproizvodstvo topliva [Reprocessed uranium re-enrichment in a double cascade of gas centrifuges providing its complete return to the nuclear fuel cycle], *Vestnik NIYaU MIFI*, 2018, vol. 7, no. 6, pp. 449–457 (in Russian).