

для топлива, устойчивого к авариям. Для использования в этом качестве оболочек из ферритно-мартенситной, ферритной и аустенитной стали требуется проведение комплекса дореакторных и реакторных исследований. Также необходимо учитывать недостатки рассмотренных материалов (возможно применение биметаллических оболочек, покрытий, различных технологических приемов).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никитина А.А., Агеев В.С., Леонтьева-Смирнова М.В. и др. Развитие работ по конструкционным материалам активной зоны быстрых реакторов. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 5, с. 292—300.
2. Savchenko A., Ivanov V., Novikov V. e.a. Review of A.A. Bochvar institute activities in developing potentially accident tolerant fuel for light water reactors. — In: Proc. of the TopFuel-2015 Conf. Zurich, Switzerland, 13—18 September 2015, p. 21—30.
3. Terrani K. Accident tolerant fuel cladding development: promise, status, and challenges. — J. Nucl. Mater., 2018, v. 501, p. 13—30.
4. Солонин М.И., Кондратьев В.П., Вотинов С.Н. и др. Сплав ХНМ-1 как перспективный материал для элементов конструкций ядерных и термоядерных реакторов с водным теплоносителем. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 1995, вып. 1(52), с. 13—20.
5. Solonin M.I., Kondrat'ev V.P., Rechitsky V.N. e.a. ХНМ-1 alloy as a promising structural material for water-cooled fusion reactor components. — J. Nucl. Mater., 1996, v. 233—237, p. 586—591.
6. Solonin M.I., Kondrat'ev V.P., Rechitsky V.N. e.a. Cr—Ni alloys for fusion reactors. — Ibid., 1998, v. 258—263, p. 1762—1766.
7. Ватулин А.В., Кондратьев В.П., Речицкий В.Н. и др. Исследование коррозионной и радиационной стойкости никель-хромового сплава «Бочвалой». — Металловедение и термическая обработка металлов, 2004, № 11, с. 19—24.
8. Кулаков Г.В., Ершов С.А., Коновалов Ю.В. и др. Основные свойства сплава 42ХНМ и перспективы его внедрения в качестве конструкционного материала элементов ВВЭР. Тезисы докл. XI конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, АО «ГНЦ НИИАР», 27—31 мая 2019 г., с. 37—39.
9. Гильмутдинов И.Ф., Шишин В.Ю., Крюков Ф.Н. и др. Радиационная стойкость опытных твэлов с дисперсионной топливной композицией «диоксид урана—силумин» для модернизированной активной зоны реактора СМ. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2017, вып. 4(91), с. 124—133.
10. Гильмутдинов И.Ф., Шишин В.Ю., Крюков Ф.Н. и др. Распухание дисперсионной топливной композиции диоксид урана—силумин в опытных твэлах реактора СМ. — Атомная энергия, 2018, т. 124, вып. 1, с. 23—29.
11. Салатов А.В., Кумачев А.В., Нечаева О.А. и др. Экспериментальные и расчетные исследования поведения твэлов ВВЭР в условиях LOCA (эксперимент МИР—LOCA/60). — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2013, вып. 1(74), с. 26—38.
12. Гринчук П.П., Голованов В.Н., Солонин М.И. и др. Радиационная и коррозионная стойкость сплава ХНМ-1. — Там же, 2005, вып. 1(64), с. 273—280.

Поступила в Редакцию 24.10.19

УДК 621.039.4

ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБОГАЩЕНИЯ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО УРАНА ПРИ МНОГОКРАТНОМ РЕЦИКЛЕ В ЛЕГКОВОДНЫХ РЕАКТОРАХ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Смирнов А.Ю., Гусев В.Е., Сулаберидзе Г.А. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),
Невиница В.А., Бобров Е.А., Белов И.А., Родионова Е.В. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: neviniza_va@nrcki.ru

В соответствии со стратегией развития одним из вариантов решения проблемы накопления отработавшего ядерного топлива является его переработка с рециклом регенерированного уран-плутониевого топлива. Такой вариант может быть особо интересен для обращения с отработавшим топливом, которое накоплено за рубежом в реакторах, построенных по российским проектам. В этом случае возможна переработка с выделением радиоактивных отходов для возврата в страны-поставщики топлива с учетом

утилизации трансурановых элементов в отечественных быстрых реакторах. Описанный вариант коррелирует с современными требованиями, которые предъявляются к ядерным технологиям в Евросоюзе, — использование топлива из регенерированного урана и уран-плутониевой смеси в перспективных АЭС, планируемых к сооружению на территории Евросоюза, а также в третьих странах европейскими компаниями. Ключевыми элементами топливного цикла в этом случае являются каскадные схемы для обогащения

регенерированного урана. Это связано с тем, что в уране при многократном рецикле возрастает содержание ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U , что осложняет обогащение из-за ограничений на содержание четных изотопов в товарном низкообогащенном уране [1]. Использование модифицированных каскадов центрифуг, позволяющих корректировать изотопный состав регенерата, является в этом случае необходимым условием, ограничивающим рост концентрации ^{232}U в свежем топливе. Как показали расчеты [2], даже в топливе из смеси регенерированного урана и плутония, в котором определяющий вклад в мощность дозы от свежего топлива вносит плутоний, снижение концентрации ^{232}U до $5 \cdot 10^{-7}\%$ (здесь и далее концентрация выражена в массовых долях) приводит к уменьшению мощности дозы на 30%. В топливе, полностью изготовленном из регенерированного урана, ^{232}U является изотопом, определяющим мощность дозы от свежей ТВС.

Концепция предполагает, что смешанное уран-плутониевое топливо из плутония и регенерированного урана может быть загружено в реакторы как отечественных, так и построенных за рубежом АЭС по российским проектам. При этом предполагается максимальное использование продуктов переработки зарубежного отработавшего топлива для возврата в поставившую его страну в виде ТВС для новых загрузок. В силу того, что, начиная со второго рецикла, концентрация ^{232}U в регенерате до его обогащения, как правило, превышает допустимую для низкообогащенного урана, прямое обогащение для получения новой партии топлива становится затруднительным или без разбавления регенерата, или без очистки от ^{232}U .

В настоящее время известны способы дообогащения регенерата, которые позволяют решить проблемы превышения допустимого содержания ^{232}U и ^{234}U , и компенсации ^{236}U [1, 3—8]. Однако для обеспечения условия максимального вовлечения продуктов переработки отработавшего топлива в цикл важно выполнение еще одного требования — израсходовать выделенный из 1 кг отработавшего топлива уран для производства 1 кг товарного низкообогащенного урана. В случае однократно облученного регенерата большинство схем обогащения позволяют удовлетворить это требование. В условиях многократного рецикла большинство каскадных схем не позволяют решить данную

проблему. Основная причина состоит в том, что при превышении концентрации ^{232}U в исходной смеси становится невозможным выполнить ограничения на его содержание в продукте без дополнительного разбавления [1, 8]. В итоге для выполнения ограничений на концентрацию ^{232}U в продукте снижается расход регенерата на единицу получаемого продукта [1]. Это означает, что, начиная с определенного рецикла, использовать весь регенерат, выделенный из топлива конкретной загрузки реактора, для производства топлива последующих загрузок того же реактора не удастся.

Для решения задачи остаются два наиболее очевидных подхода. Первый заключается в увеличении объема производимого из регенерата топлива при сохранении удельного расхода регенерата на единицу производимого продукта. Этот путь фактически приводит к увеличению числа реакторов, которые загружаются топливом из регенерата урана, выделенного из одного конкретного реактора. Такой подход допустим, если перерабатывают топливо отечественных реакторов для изготовления топлива также для отечественных реакторов. Второй путь заключается в отправке неиспользованной части регенерата для складирования на неопределенный срок.

В случае переработки топлива иностранного поставщика оба варианта решения могут оказаться неприемлемыми, во-первых, ввиду невозможности отправления потребителю больше ТВС, чем он может загрузить в реактор, во-вторых, хранение на собственных складах радиоактивного урана, выделенного из отработавшего ядерного топлива реактора другой страны, может также оказаться проблемой, поскольку при возврате топлива из регенерированных материалов и других продуктов переработки приходится исходить из эквивалентности продуктов переработки и активности ввезенных для переработки облученных сборок [9]. В этом случае в соглашениях о переработке отработавшего топлива необходимо заранее оговаривать действия с неизрасходованным регенерированным ураном.

Анализ показывает, что наиболее полное удовлетворение требованиям максимального использования регенерата возможно на основе двойных каскадных схем — последовательное

соединение двух разделительных каскадов при их модификации [4, 6, 7].

Целью настоящей работы явилась разработка модификации двойного каскада для получения низкообогащенного урана товарного качества из регенерата, прошедшего несколько рециклов, при одновременном выполнении условия его полного возврата в цикл.

Двойная каскадная схема для обогащения регенерированного урана. Модифицированная схема двойного каскада позволяет одновременно удовлетворить ограничения, налагаемые на содержание ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в соответствии с техническими условиями и международными спецификациями, и условия полного возврата регенерата в цикл (рис. 1) [8]. Основная задача работы такой схемы состоит в том, чтобы сконцентрировать в одном из выходящих потоков (отбор 2) основную долю ^{232}U вместе с сопутствующими изотопами, а на изготовление топлива направлять нарабатываемый в другом выходящем потоке материал (НОУ-1), обедненный ^{232}U . При этом для достижения требуемого соотношения между исходным регенератом и продуктом необходимо добавлять к этому потоку смесь, не содержащую ^{232}U , низкообогащенный уран природного происхождения. Вычислительные эксперименты 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 ^{232}U (отбор 2), в зависимости от выбора параметров первого и второго каскадов составляет 0,6—3,1% массы всего регенерированного урана, направленного на дообогащение. Другими сло-

вами, задача полного использования всего регенерированного урана для изготовления топлива почти может быть решена.

Однако следует иметь в виду, что при промышленном масштабе переработки отработавшего топлива и последующем обогащении регенерата масса обогащенной ^{235}U и ^{232}U фракции может оказаться существенной с точки зрения процедур обращения с данным материалом.

В табл. 1 приведены расчеты потерь ^{235}U по сравнению с его массой во всех перегружаемых ТВС для трех способов рецикла регенерированного урана:

топливо из регенерированного урана, в котором ТВЭЛЫ изготовлены из дообогащенного регенерированного урана;

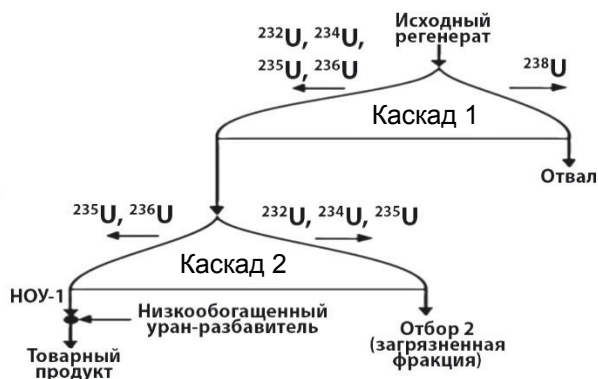
уран-плутониевое топливо, в котором ТВЭЛЫ изготовлены из гомогенной смеси плутония и дообогащенного регенерированного урана;

уран-плутониевое топливо, в котором использована гетерогенная ТВС с ТВЭЛАМИ двух типов: из дообогащенного регенерированного урана и из смеси плутония и необогащенного регенерированного урана. При этом предполагали, что во всех трех типах ТВС использованы ТВЭЛЫ с выгорающим поглотителем на основе гадолиния, изготовленные из обогащенного урана природного обогащения. В качестве базовой схемы обогащения рассмотрен модифицированный двойной каскад при максимальной концентрации ^{235}U в потоке отбора второго каскада 20% [8].

Таблица 1. Потери ^{235}U при очистке регенерированного урана от ^{232}U , % полной массы ^{235}U в перегружаемых ТВС

Номер рецикла	Топливо		
	из регенерата урана	гомогенная смесь урана и плутония	гетерогенное размещение урана и плутония
2	4,76	5,96	3,63
3	4,62	8,46	5,53
4	4,62	8,98	5,90
5	5,26	10,02	6,05
6	4,79	9,79	6,24

Оценки показывают, что, например, при обогащении регенерата, полученного после переработки всех одновременно перегружаемых 72 ТВС реактора типа ВВЭР-1200, масса загрязненной фракции в зависимости от выбранных



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

параметров первого и второго каскадов может составлять от 75 до 960 кг. Этот материал является, с одной стороны, сильно радиоактивным, поскольку концентрация ^{232}U как минимум в 100 раз больше, чем в исходной смеси регенерата, с другой, содержание ^{235}U в этой фракции может составлять около 20% [10]. В соответствии с Основными правилами учета и контроля ядерных материалов НП-030—12 этот материал может быть переведен в радиоактивные отходы лишь в том случае, если его количество в организации не превышает 15 г. Это означает, что обращение с подобным побочным продуктом обогащения регенерата должно осуществляться именно как обращение с ядерным материалом с соблюдением требований ядерной и радиационной безопасности.

Длительное хранение этого материала позволит снизить уровень загрязнения ^{232}U вследствие его распада и получить в итоге слаборадиоактивный уран обогащением 20%, который впоследствии также можно использовать для производства топлива. Хранение может быть осуществлено после обесфторивания в виде U_3O_8 , а также в виде UF_6 . Учитывая, что современные установки по деконверсии обедненного гексафторида урана предназначены для переработки слаборадиоактивного материала, обесфторивание подобного радиоактивного материала может потребовать строительства специальных установок для переработки загрязненного ^{232}U гексафторида урана. Но и хранение в виде гексафторида требует обоснования с точки зрения безопасности вследствие высокого удельного тепловыделения радиоактивного распада, а также радиационной стойкости при длительном (20—30 лет) воздействии α -излучения с одновременным выполнением требований ядерной безопасности (в силу высокого обогащения). Еще одним и, возможно, наиболее простым способом обращения с этим материалом является его разбавление гексафторидом отвального урана. При достаточном разбавлении результирующий гексафторид обедненного урана станет слаборадиоактивным и, следовательно, его можно будет конвертировать на имеющихся установках. При этом будут потеряны часть затраченной первоначальной работы разделения и значительное количество ^{235}U (см. табл. 1).

При исследовании возможности минимизации потерь ^{235}U при обогащении регенерирован-

ного урана в двойном каскаде исходили из того, что примерно эквивалентные размножающие свойства топлива ВВЭР, изготовленного из обогащенного природного урана и регенерата, можно обеспечить при бесконечно большом числе наборов основных параметров двойного каскада. Такими параметрами являются концентрация ^{235}U в отборе и отвале первого каскада (отбор 1 и отвал соответственно), в отборе второго каскада (отбор 2), в отвале второго каскада (НОУ-1).

Задача была сформулирована следующим образом. Необходимо дообогатить регенерированный уран, полученный после переработки 72 отработавших ТВС реактора типа ВВЭР-1200, которые также изготовлены из регенерированного урана (второй рецикл). Требуется рассчитать изотопный состав свежего (загружаемого) топлива в количестве, необходимом для изготовления 48 ТВС с топливом обогащением 4,95% и 24 ТВС с топливом обогащением 4,4%.

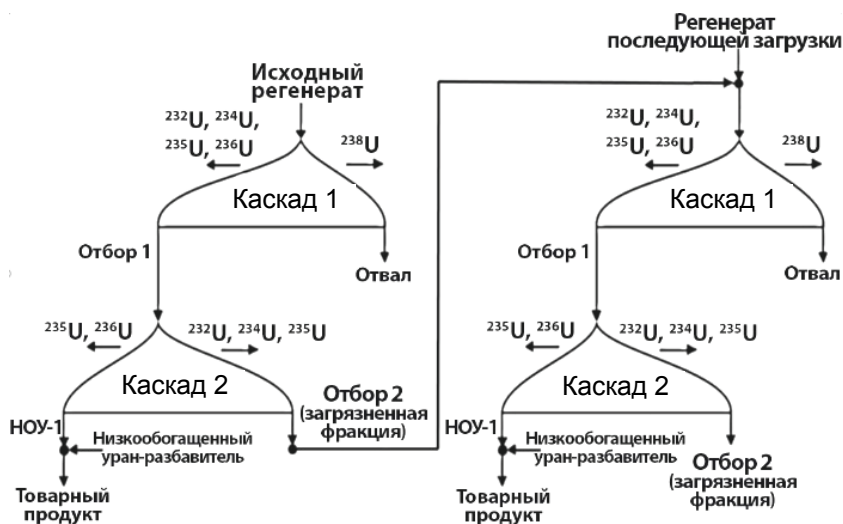
В вычислительных процедурах варьировали обогащение регенерированного урана по ^{235}U в первом каскаде (концентрация в отборе-1) в пределах 7—15%, затем для каждого обогащения варьировали концентрацию ^{235}U 1) в потоке отбора-2 с учетом того, что в качестве верхней границы этой величины приняты 20% и 2) в потоке тяжелой фракции второго каскада (низкообогащенный уран) перед смешиванием с потоком разбавителя. При варьировании указанных величин принимали во внимание только варианты, для которых конечный продукт (товарный низкообогащенный уран) одновременно удовлетворял ограничениям на $^{232,234,236}\text{U}$.

В качестве критерия эффективности использовали величину

$$Q(U_{\text{рец}}) = E(U_{\text{нат}}) - F(\text{SWU}) - F(P_2), \quad (1)$$

где $E(U_{\text{нат}})$ — экономия природного урана, МВт·ч; $F(\text{SWU})$ — затраты работы разделения, МВт·ч; $F(P_2)$ — накопленная масса загрязненной фракции (отбор-2), МВт·ч.

Допустимой паре обогащений первого и второго каскадов соответствовали положительные значения величины (1), запрещенной — отрицательные. В последнем случае отрицательный эффект, обусловленный потерями ^{235}U при очистке регенерата от ^{232}U , превышал поло-



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

жительный эффект, полученный при возвращении регенерированного урана в топливный цикл.

Анализ показал, что число допустимых сочетаний обогащений первого и второго каскадов в рассмотренном диапазоне их изменения не превышает 40% общего числа возможных. Иными словами, в большинстве рассчитанных вариантов потери в балансе энергии, которые обусловлены потерями ^{235}U при очистке регенерата урана от ^{232}U , превосходят выигрыш, обусловленный возвращением регенерированного урана в топливный цикл. Таким образом, эффективность вовлечения регенерата в воспроизводство ядерного топлива при использовании двойных каскадных схем существенно зависит от выбора соотношений между параметрами обоих каскадов.

Оценки показывают, что наличие в двойной каскадной схеме второго выходящего потока (отбор-2), обогащенного ^{235}U , обуславливает его дополнительные потери. При этом оптимизация подобной схемы по обогащению первого и второго каскадов позволяет уменьшить данный эффект и добиться положительных значений критерия (1). Однако потери ^{235}U в подобной схеме тем не менее есть. Рассмотрим модификации двойной каскадной схемы, позволяющей устранить указанные потери и максимально использовать энергопотенциал ^{235}U , содержащегося в регенерате.

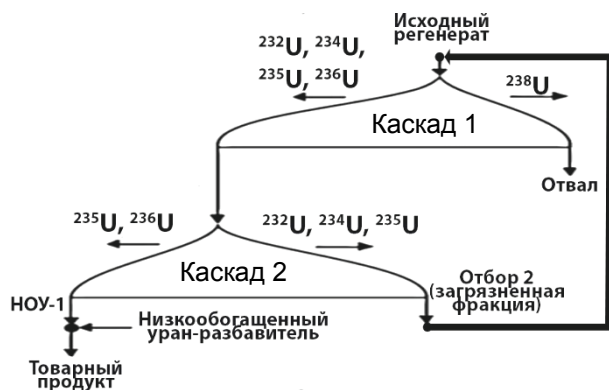
Предлагаемый способ модификации двойной каскадной схемы. Рассмотрим способ ор-

ганизации топливного цикла, позволяющий вовлечь в воспроизводство ядерного топлива накапливаемый при использовании схемы двойного каскада загрязненный гексафторид урана (поток отбора-2) [10]. Принцип работы заключается в использовании этого же каскада для утилизации полученного в потоке отбора высокообогащенного гексафторида урана за счет его разбавления регенератом, который поступит на разделительное производство после переработки следующей партии топлива, а не обедненным ураном для последующего хранения (рис. 2). При таком подходе фракция потока отбора-2 хранится на разделитель-

ном производстве примерно 1,5—2 года до поступления на обогащение регенерата следующей перегрузки эксплуатируемого реактора. Затем обе смеси перемешивают, образующийся регенерат направляют на вход двойного каскада.

Одной из проблем, которая может возникнуть при таком подходе, является радиоллиз гексафторида урана, обусловленный воздействием внутренних источников излучения. Для оценки масштаба возможного влияния данного фактора был проведен теоретический анализ радиоллиза гексафторида урана, загрязненного внутренними источниками излучения (поток отбора-2) [11]. Основная цель — оценить устойчивость гексафторида при длительном воздействии излучения, обусловленного в несколько раз большим содержанием $^{232,234}\text{U}$ по отношению к характерному для товарного низкообогащенного урана. Расчетные исследования радиоллиза гексафторида урана с содержанием $^{232,234}\text{U}$, более чем в 10 раз превышающим соответствующие допустимые значения для низкообогащенного урана, показали, что концентрация молекул пентафторида урана, образовавшегося при радиоллизе гексафторида урана за время до 1,5 года, существенно ниже (в 10^7 раз) концентрации молекул гексафторида. Это позволяет сделать вывод о том, что радиоллиз не оказывает существенного влияния на состав гексафторида урана отбора-2 до времени поступления следующей партии регенерированного урана на обогащение.

Следует отметить, что рассматриваемая постановка задачи подразумевает работу в замкну-



Р и с. 3. Схема двойного каскада с возвратом потока отбора

том топливном цикле только одного реактора. Извлекаемый регенерат будет использован для производства топлива для этого же реактора.

Описанный процесс возврата отбора-2 в воспроизводство низкообогащенного урана может быть начат почти сразу после дообогащения регенерата уже для одной ТВС и даже для ее части (непрерывный возврат). Схема каскада при этом преобразуется к виду, показанному на рис. 3. Использование предлагаемой схемы позволяет замкнуть топливный цикл энергетического реактора по урану, используя почти полностью энергопотенциал содержащегося в регенерате ^{235}U . Единственным потоком, содержащим ^{235}U и выходящим из системы, будет обедненный гексафторид, образующийся в отвале первого каскада. Однако данный продукт можно считать штатным отходом обогащательного производства, для которого в настоящее время отработаны технологии хранения и переработки.

Результаты и 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 в рамках настоящего рассмотрения не важно, в каком виде осуществляется многократный рецикл регенерированного урана — в виде диоксида уранового топлива или оксида дообогащенного регенерированного урана в смеси с плутонием. Для определенности рассмотрим диоксида урановое топливо. Топливо стационарной топливной загрузки, с которой начат переход к работе ВВЭР-1200 в замкнутом топливном цикле, изготовлено из природного урана. После перехода к замкнутому ядерному топливному

циклу отработавшее топливо первой загрузки направляют на переработку, полученный в результате переработки уран — на дообогащение. Предполагаем, что твэлы с поглотителем на основе гадолиния в силу их малой массы по отношению к массе основного топлива изготавливают только путем обогащения природного урана независимо от того, какое основное топливо загружено в реактор — на основе природного урана или регенерата. В этом случае регенерат урана, получаемый после переработки 72 ТВС, направляется на обогащение и последующее изготовление двух партий топлива — обогащением 4,95 и 4,4%. Поскольку полученный регенерат, направляемый на первый рецикл, т.е. тот, топливо для которого изготовлено из природного урана, наименее загрязнен ^{232}U , то его дообогащение может быть выполнено в одной из модификаций трехпоточного каскада (отбор, отвал, питание) [5].

Расчетный изотопный состав топлива первого рецикла совпадает для всех перегрузок, поскольку на вход каскада поступал регенерат одного и того же состава, а в силу невысокого содержания ^{232}U ограничения на его допустимое содержание выполнялись на одинаковом для всех перегрузок уровне. Ситуация изменяется со второго рецикла, поскольку в нем содержание ^{232}U возрастает по сравнению с первым и, следовательно, необходим переход к использованию двойного каскада. В настоящей работе для моделирования использовали схему каскада, показанную на рис. 1. После обогащения первой партии регенерата, кроме штатного отхода — отвального урана, образовался и отход второго типа — загрязненная ^{232}U фракция потока отбора второго каскада с относительно высоким содержанием ^{235}U (20%).

Указанная фракция (отбор второго каскада) в соответствии с рис. 2 была смешана с пришедшим на обогащение регенератом второй перегрузки, состав которого совпадал с составом регенерата первой перегрузки. После смешивания с оставшейся от обогащения регенерата первой перегрузки загрязненной фракцией состав питающей каскадную схему смеси изменился, что привело к изменению состава полученного низкообогащенного урана. Далее аналогичный алгоритм был применен к регенерату третьей перегрузки, который был смешан с

Таблица 2. Расходные характеристики каскадной схемы с возвратом загрязненной фракции в цикл при обогащении регенерата трех перегрузок на 1 кг низкообогащенного урана

Характеристика	Перегрузка					
	первая		вторая		третья	
Обогащение, %	4,95	4,4	4,95	4,4	4,95	4,4
Расход, кг:						
природного урана	6,56	5,66	6,36	5,47	6,42	5,52
регенерата	0,967		0,978		0,982	
Работа разделения, отн. ед.	12,36	10,66	11,93	10,29	12,16	10,51
Масса возвращаемой загрязненной фракции, кг	0,012		0,015		0,022	

загрязненной фракцией, полученной в результате обогащения регенерата второй перегрузки.

Описанный способ организации возврата загрязненной фракции в топливный цикл реактора ВВЭР-1200 был смоделирован при следующих условиях. На обогащение поступал регенерат второго рецикла со следующей концентрацией компонента, %: ^{232}U $6,62 \cdot 10^{-7}$, ^{233}U $1,87 \cdot 10^{-6}$, ^{234}U $3,28 \cdot 10^{-2}$, ^{235}U 1,43, ^{236}U 0,99. Данный регенерат был использован для изготовления низкообогащенного урана 4,4 и 4,95%. При этом в полученном низкообогащенном уране для двух обогащений концентрация ^{232}U не должна была превышать $5 \cdot 10^{-7}\%$, отношение

Таблица 4. Концентрация в выходящих потоках двойного каскада, %

Характеристика	Перегрузка					
	первая		вторая		третья	
Обогащение, %	4,95	4,4	4,95	4,4	4,95	4,4
Отбор первого каскада			7,5		9	
Отвал второго каскада			6,5		7,5	
Концентрация разбавителя			4,9	4,23	4,75	4,1

концентрации ^{234}U к ^{235}U не должно превышать 0,02, наличие ^{236}U компенсировали повышенным обогащением [8].

Интегральные характеристики схемы обогащения регенерата в соответствии с рис. 2 на 1 кг низкообогащенного урана следующие: расход природного урана и регенерата, работа разделения и масса возвращаемой фракции — табл. 2, изотопный состав регенерата, получаемого на разных стадиях процесса, — табл. 3. Во всех случаях обогащение ^{235}U в потоке отбора второго каскада составляло 20%. Обогащение в отборе первого каскада и отвале второго каскада, а также обогащение НОУ-разбавителя варьировали с тем, чтобы обеспечить необходимые условия для концентрации четных изотопов в продукте (табл. 4). Концентрация в отвале первого каскада для всех случаев составляла 0,1%. Состав регенерата до начала обогащения

Таблица 3. Изотопный состав товарного низкообогащенного урана и возвращаемого отхода, %

Изотоп	Изотопный состав					
	Низкообогащенный уран					
^{232}U	$4,43 \cdot 10^{-7}$	$4,34 \cdot 10^{-7}$	$4,80 \cdot 10^{-7}$	$4,85 \cdot 10^{-7}$	$4,90 \cdot 10^{-7}$	$4,92 \cdot 10^{-7}$
^{233}U	$1,33 \cdot 10^{-6}$	$1,32 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$	$1,51 \cdot 10^{-6}$	$1,49 \cdot 10^{-6}$	$1,50 \cdot 10^{-6}$
^{234}U	0,059	0,054	0,062	0,057	0,061	0,056
^{235}U	5,154	4,607	5,208	4,658	5,186	4,634
^{236}U	0,476	0,491	0,616	0,614	0,561	0,561
^{238}U	Остальное					
	Возвращаемая фракция					
^{232}U	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$2,32 \cdot 10^{-5}$	$2,36 \cdot 10^{-5}$	$2,29 \cdot 10^{-5}$	$2,34 \cdot 10^{-5}$
^{233}U	$3,98 \cdot 10^{-5}$	$4,17 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$5,21 \cdot 10^{-5}$	$5,16 \cdot 10^{-5}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$
^{234}U	0,588	0,603	0,678	0,68	0,678	0,673
^{235}U	20	20	20	20	20	20
^{236}U	7,11	7,04	6,54	6,54	6,54	6,55
^{238}U	Остальное					

Таблица 5. Изотопный состав регенерата, поступающего на обогащение, %

Изотоп	Перегрузка					
	первая		вторая		третья	
Обогащение, %	4,95	4,4	4,95	4,4	4,95	4,4
^{232}U	$6,62 \cdot 10^{-7}$		$8,52 \cdot 10^{-7}$	$8,62 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-6}$	$1,01 \cdot 10^{-6}$
^{233}U	$1,87 \cdot 10^{-6}$		$2,33 \cdot 10^{-6}$	$2,34 \cdot 10^{-6}$	$2,64 \cdot 10^{-6}$	$2,65 \cdot 10^{-6}$
^{234}U	$3,28 \cdot 10^{-2}$		$3,96 \cdot 10^{-2}$	$3,97 \cdot 10^{-2}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$	$4,28 \cdot 10^{-2}$
^{235}U	1,43		1,66	1,65	1,72	1,72
^{236}U	0,99		1,07	1,07	1,08	1,08
^{238}U	Остальное					

(табл. 5) для каждой из перегрузок получен при смешивании массы исходного регенерата (для всех перегрузок 0,967 г на 1 кг продукта) указанного состава с соответствующим отходом, масса и состав которого приведены в табл. 2, 3.

Отметим, что расход природного урана полностью определяется каскадом, нарабатывающим разбавитель для потока отвала второго каскада, работа разделения рассчитана интегрально по всем каскадам схемы в совокупности. Вследствие относительно малого расхода регенерата на единицу продукта основной вклад в формирование продукта вносит НОУ-разбавитель. С точки зрения суммарных затрат работы разделения его вклад также является определяющим. Следует отметить, что в настоящем исследовании под работой разделения понимали величину, прямо пропорциональную числу центрифуг в каскадной схеме.

Следует отметить, что изотопному составу второго и первого рецикла при обогащении регенерированного урана предъявлялись одинаковые требования, поэтому в первом приближении подготовленные составы должны обеспечивать примерно одинаковые эксплуатационные характеристики топлива, в первую очередь, такие, как длительность кампании и концентрация борной кислоты, добавляемой в теплоноситель для компенсации избыточной реактивности топлива в начальный период. Для рассмотренных изотопных составов топлива были рассчитаны зависимости критической концентрации борной кислоты от времени топливной кампании. Как показали результаты, по сравнению с загрузкой из природного урана длительность кампании реактора изменяется не более чем на 5 сут в сторону увеличения. На рис. 4 видно, что для рассмотренных перегрузок зависимость критической

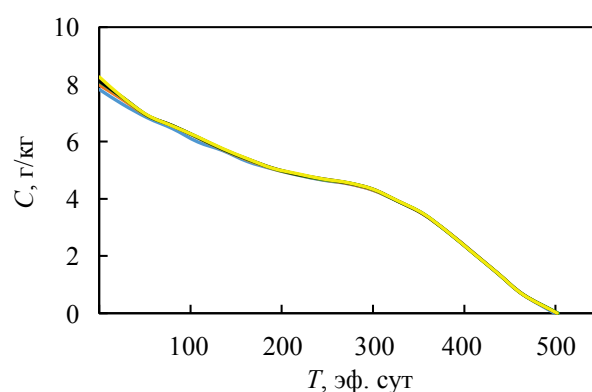


Рис. 4. Критическая концентрация борной кислоты в реакторе на номинальной мощности: — диоксидурановое топливо из природного урана; — топливо из регенерата первого рецикла, полученное при обогащении в однокаскадном режиме с подпиткой природным ураном; —, — три первые перегрузки второго рецикла соответственно

концентрации борной кислоты от длительности кампании почти совпадает.

Заключение. Таким образом, рассмотренный способ организации топливного цикла энергетического реактора, основанный на возврате высокообогащенной фракции второго каскада в воспроизводство топлива для последующих загрузок, позволяет замкнуть топливный цикл по урану, максимально используя энергетический потенциал содержащегося в регенерате ^{235}U .

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бландинский В.Ю., Невиница В.А., Смирнов А.Ю. и др. 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. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2018, вып. 1, с. 68—75.
2. Bobrov E.A., Fomichenko P.A., Grol A.V. et al. Evaluation of technical and economic indicators of REMIX fuel application in the LWR fuel cycle. — In: Proc. Intern. Conf. on Management of Spent Fuel Nuclear Power Reactors: Learning from the Past, Enabling for the Future. Austria, Vienna, 24—28 June, 2019.
 3. Орлов А.А., Кравченко А.В., Титов Е.С., Лебедев А.Я. Обзор перспективных методов рециркуляции урана в ядерно-топливном цикле. — Изв. вузов. Физика, 2015, т. 58, вып. 2/2, с. 35—40.
 4. Прусаков В.Н., Сазыкин А.А., Соснин Л.Ю. и др. Коррекция изотопного состава регенерированного урана по ^{232}U центробежным методом с введением газаносителя. — Атомная энергия, 2008, т. 105, вып. 3, с. 150—156.
 5. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Невиница В.А. и др. Каскадные схемы в задачах исследования закономерностей изменения изотопного состава многократно регенерированного урана. — Ядерная физика и инжиниринг, 2012, т. 3, вып. 5, с. 396—403.
 6. Палкин В.А. Очистка регенерированного урана в каскадах с обогащением ^{235}U до 5%. — Атомная энергия, 2013, т. 115, вып. 1, с. 28—33.
 7. Палкин В.А., Маслоуков 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.
 8. Смирнов А.Ю., Невиница В.А., Фомиченко П.А. и др. Обогащение регенерированного урана в двойном каскаде газовых центрифуг с его полным возвратом в воспроизводство топлива. — Вестник НИЯУ МИФИ, 2018, т. 7, вып. 6, с. 449—457.
 9. Курындин А.В., Киркин А.М., Гусаков-Станюкович И.В. и др. Реализуемые и перспективные подходы к возврату продуктов переработки отработавшего ядерного топлива в государство поставщика. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Материаловедение и новые материалы, 2019, вып. 2(98), с. 48—59.
 10. Смирнов А.Ю., Павловичев А.М., Щеренко А.И. и др. Топливный цикл легководного реактора с полным использованием регенерированного урана. — Вестник НИЯУ МИФИ, 2019, т. 8, вып. 6, с. 498—506.
 11. Белов И.А., Гроль А.В., Невиница В.А. и др. Радиоллиз обогащенного $^{232,234}\text{U}$ гексафторида регенерированного урана на этапе временного хранения на раздельном производстве. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 5, с. 268—272.

Поступила в Редакцию 26.12.19

УДК 621.039.31;621.039.516.22

ОЧИСТКА РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА ОТ ^{232} , ^{234} , ^{236}U В ПЯТИПОТОЧНЫХ КАСКАДАХ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)

e-mail: profp2004@mail.ru

Регенерированный уран, выделенный из отработавшего ядерного топлива, целесообразно использовать в качестве ядерного материала из-за его непрерывного накопления и сокращения запасов природного урана. В регенерированном уране концентрация основного делящегося изотопа ^{235}U обычно выше, чем в природном сырье, но содержатся ^{232} , ^{234} , ^{236}U , затрудняющие его использование. Разработанные способы изотопного восстановления регенерированного урана с применением каскадных методов и операций разбавления позволяют снизить их концентрацию до приемлемой, но имеют определенные недостатки [1—7]. Основные из них приводят к потере ценного природного сырья и обогащенного продукта, а также к дополнительным затратам работы разделения.

Эффективный метод уменьшения концентрации предусматривает использование пятипоточного каскада с двумя питаниями, двумя от-

борами и отвалом [2]. На основном питании каскада подается природный гексафторид урана, на дополнительном — регенерированный. В основном отборе каскада нарабатывается низкообогащенный уран, характеристики которого определяются природным ураном. При этом удовлетворяются требования международной спецификации ASTM C996—15, установленные для коммерческой градации гексафторида урана. Поток и концентрация ^{235}U дополнительного отбора совпадают с аналогичными параметрами регенерированного урана в питании. Концентрация ^{232} , ^{234} , ^{236}U в этом отборе, соответствующем очищенному регенерированному урану, значительно снижается. Эффект очистки обусловлен смешением регенерированного и природного урана внутри каскада, а также массопереносом указанных изотопов в его отвал. Способ [2] характеризуется небольшими дополнительными затратами работы разделения на