

не превысить контрольный уровень облучения персонала группы А, принимавшего непосредственное участие в работах.

Вывод из эксплуатации исследовательского корпуса Б сопровождался образованием радиоактивных отходов. За весь период работ образовалось 1603,1 м³ твердых радиоактивных отходов суммарной активностью 78,2 ГБк, которые в контейнерах КМЗ-Радон, Крад-3,0, ПУ-2ЭЦ-СХ, ПУ-2ЭЦ-СТ транспортировали в ФГУП «Радон», — 726,9 м³, 75,2 ГБк, в Приволжский и северо-западный территориальный округ РосРАО — 846,2 м³, 2,53 ГБк и 30 м³, ~0,45 ГБк соответственно.

Успешная ликвидация радиоактивно загрязненного объекта, находящегося в городской черте, стала возможной благодаря тесному взаимодействию заказчика работ — Госкорпорации «Росатом», эксплуатирующей организации — АО «ВНИИНМ», исполнителей — ООО «Квант» и АО «ВНИИНМ», специализированных организаций: ФГУП «Радон», филиалов «Приволжский территориальный округ» и «Северо-западный территориальный округ» ФГУП «РосРАО», проектировщика — АО «РАОПРОЕКТ», экспертных организаций — АО «ТВЭЛ», ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна, ФГБУЗ ГЦГиЭ, АО

«ФЦ ЯРБ», ООО «Матэк», других предприятий и организаций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бажанов М.С., Белоусов С.В., Гришин Е.Ж. и др. Опыт проведения комплексного инженерного и радиационного обследования зданий и территории ВНИИНМ имени А.А. Бочвара. — Безопасность окружающей среды, 2012, № 3, с. 90—92.
2. Кузнецов А.Ю., Белоусов С.В., Савин С.К. и др. Исследование осадков и отложений в системах специальных коммуникаций корпуса Б АО «ВНИИНМ». — Атомная энергия, 2016, т. 120, вып. 3, с. 162—164.
3. Анциферова Е.Ю., Кузнецов А.Ю., Кочергина Н.В. Оценка воздействия исследовательского корпуса Б АО «ВНИИНМ» на недра при выводе из эксплуатации. — Там же, с. 159—161.
4. Кузнецов А.Ю., Радченко М.В., Савин С.К. и др. Проект вывода из эксплуатации исследовательского корпуса ВНИИНМ. — Безопасность окружающей среды, 2011, № 3, с. 74—77.
5. Кузнецов А.Ю., Азовсков М.Е., Анциферова Е.Ю. и др. Работы начального этапа по выводу из эксплуатации исследовательского корпуса «Б» ОАО «ВНИИНМ». — Ядерная и радиационная безопасность России, 2014, вып. 17, с. 73—84.
6. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Санитарные правила и нормативы. М., 2010.

Поступила в Редакцию 23.07.17

УДК 621.039.31

ПОЛУЧЕНИЕ РАЗБАВИТЕЛЯ ДЛЯ ВЫСОКООБОГАЩЕННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА В КАСКАДЕ ПО ДВУХ- И ТРЕХЭТАПНОЙ СХЕМЕ

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

Для переработки высокообогащенного гексафторида урана в низкообогащенный используют разбавитель с массовой концентрацией ²³⁵U 1,5% (1,5 г ²³⁵U на 100 г U) [1]. Так как высокообогащенный уран имеет повышенное содержание ²³⁴U, разбавитель получают путем обогащения обедненных отвалов гексафторида урана природного происхождения в разделительном каскаде. Это позволяет выполнить требования международной спецификации ASTM C 996—15 по концентрации ²³⁴U в низкообогащенном гексафториде урана, но приводит к значительным затратам работы разделения. В качестве альтернативного метода предложен способ получения разбавителя из природного сырья при очистке высокообогащенного гексафторида

урана от ²³⁴U в специальном каскаде [2]. Однако он связан с получением и необходимостью утилизации высокоактивного отбора, имеющего концентрацию ²³⁴U до 18% и сохраняющего высокую концентрацию ²³⁵U.

Эффективным способом снижения затрат работы разделения на наработку разбавителя является очистка уранового сырья в каскаде с двумя питаниями, двумя отборами и одним отвалом [3, 4]. На питаниях каскадов используют природный гексафторид урана и обедненный отвальный гексафторид урана с известной концентрацией ²³⁴U. В основном отборе производят товарный продукт низкообогащенного гексафторида урана с заданной концентрацией ²³⁵U до 5%, в промежуточном — продукт с концент-

рацией ^{235}U 0,3—1,5% и пониженным содержанием ^{234}U . Данный способ позволяет получать разбавитель для высокообогащенного урана из продукта промежуточного отбора с концентрацией ^{235}U , которая существенно превышает содержание ^{235}U в обедненных отвалах при наработке разбавителя в ординарном трехпоточном каскаде.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности наработки разбавителя в два и три этапа из обедненных отвалов гексафторида урана при неизвестном содержании в них ^{234}U . Схема наработки разбавителя в два этапа позволяет на практике сортировать полупродукты с концентрацией ^{235}U 0,7—1%, полученные на первом этапе, по измеряемой концентрации ^{234}U [5]. Это обеспечивает использование лучших из них на втором этапе, что приводит к снижению затрат работы разделения на производство разбавителя или повышению его качества. В настоящей работе на основе вычислительного эксперимента показана эффективность разных вариантов этой схемы. Кроме того, рассмотрена возможность трехэтапной наработки разбавителя, обеспечивающей существенное снижение концентрации ^{234}U . Расчеты проведены с использованием аналитической методики оценки внешних параметров многопоточных каскадов, оптимизированных на обогащение ^{235}U [6].

Производство разбавителя в каскаде по одноэтапной схеме. В табл. 1 приведен расчет одноэтапной наработки разбавителя в каскаде из отвалов с неизвестным содержанием ^{234}U . На питаниях каскада использованы отвалы гексафторида урана с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35%. Содержание ^{234}U в них принято средним в диапазоне возможных значений — 0,00128 и 0,00181% соответственно. Данный пример выбран в качестве базового для сравнения с вариантами наработки разбавителя по двух- и трехэтапной схеме. Он характеризуется производством 21,8 т разбавителя с содержанием ^{234}U 0,00856%. Для получения такого разбавителя потребовалось 100 и 50 т отвалов с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35% соответственно. Затраты работы разделения каскада составляют 72,59 тыс. е.р.р. Расчет работы разделения проведен с использованием потенциала разделения бинарной смеси изотопов $^{235}, ^{238}\text{U}$ [7], соответствующего оптимальному выбору всех внут-

ренних параметров каскадов и малому содержанию ^{234}U .

Т а б л и ц а 1. Производство разбавителя в каскаде из отвалов со средним содержанием ^{234}U по одноэтапной схеме при затратах работы разделения 72,59 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %
Питание 1	100	0,28	0,00128
Питание 2	50	0,35	0,00181
Отбор	21,8	1,5	0,00856
Отвал	128,2	0,1	0,00025

Предельная концентрация ^{234}U в высокообогащенном гексафториде урана, удовлетворяющая требованиям ASTM C 996—15 для низкообогащенного (концентрация ^{235}U менее 5%), рассчитывается по формуле

$$A_4 = C_4 + \frac{A_5 - C_5}{C_5 - B_5} (C_4 - B_4),$$

где C_4 — требуемое содержание ^{234}U в низкообогащенном гексафториде урана; A_5 , C_5 , B_5 — концентрация ^{235}U в высокообогащенном гексафториде урана, низкообогащенном, разбавителе соответственно; B_4 — содержание ^{234}U в разбавителе. Отсюда, рассчитав требуемое содержание ^{234}U в низкообогащенном гексафториде урана, исходя из предельного значения 10 000 мкг/г ^{235}U (без предварительного соглашения заказчика с поставщиком), можно получить соответствующую концентрацию A_4 . Разбавитель с концентрацией ^{234}U 0,00856% пригоден для переработки высокообогащенного гексафторида урана с содержанием ^{235}U 90% в низкообогащенный с концентрацией $C_5 = 4,95\%$ при предельном содержании в нем ^{234}U $A_4 = 1,06\%$. При содержании в низкообогащенном гексафториде урана 4,4% ^{235}U предельная концентрация ^{234}U в высокообогащенном составляет 1,09%, при 4% — 1,12%.

Производство разбавителя в каскаде по двухэтапной схеме. В табл. 2 представлены расчеты по наработке разбавителя в два этапа из лучших и худших отвалов по содержанию ^{234}U . На питаниях каскада использовано 100 т с концентрацией ^{235}U 0,28% и 50 т с 0,35% для каждого вида отвалов. По результатам первого этапа работы каскада предполагается сортировка полупродукта с концентрацией ^{235}U 0,8% по со-

держанию ^{234}U . На втором этапе производится такое же количество разбавителя 21,8 т, как и при одноэтапной наработке. При использовании лучших отвалов с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35%, характеризующихся содержанием ^{234}U 0,00119 и 0,00171% соответственно, концентрация ^{234}U в разбавителе составляет 0,00801%. Это существенно ниже, чем в производстве разбавителя в один этап, при таких же суммарных затратах работы разделения 72,59 тыс. е.р.р. Такой разбавитель позволяет перерабатывать высокообогащенный гексафторид урана в низкообогащенный при более высокой предельной концентрации ^{234}U . Так, для переработки высокообогащенного гексафторида урана с содержанием ^{235}U 90% в низкообогащенный с концентрацией $C_5 = 4,95\%$ предельное содержание ^{234}U в нем составляет $A_4 = 1,07\%$. Разбавитель, изготовленный из худших отвалов гексафторида урана, характеризуется более высоким содержанием ^{234}U 0,00912% и меньшей предельной концентрацией $A_4 = 1,04\%$.

Т а б л и ц а 2. Производство разбавителя в каскаде из лучших и худших отвалов по содержанию ^{234}U в два этапа при затратах работы разделения 72,59 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %	
			Лучшие отвалы	Худшие отвалы
Первый этап:				
питание 1	100	0,28	0,00119	0,00137
питание 2	50	0,35	0,00171	0,00192
отбор	43,6	0,8	0,00409	0,00466
отвал	106,4	0,1	0,00025	0,00028
Второй этап:				
питание	43,6	0,8	0,00409	0,00466
отбор	21,8	1,5	0,00801	0,00912
отвал	21,8	0,1	0,00017	0,00019

Производство низкообогащенного гексафторида урана и разбавителя в каскаде по трехэтапной схеме. Худшие полупродукты, выявленные на первом этапе работы каскада, можно эффективно использовать на втором этапе для производства низкообогащенного гексафторида урана. При этом концентрация ^{234}U в низкообогащенном гексафториде урана будет удовлетворять требованиям спецификации ASTM C 996—15. В табл. 3 для примера приведены расчеты наработки полупродукта с природной

концентрацией ^{235}U 0,711% на первом и низкообогащенного гексафторида урана с концентрацией 4,4% на втором этапе. При высоком содержании ^{234}U 0,00137 и 0,00192% в отвалах с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35%, использованных на питании каскада в первом этапе, содержание ^{234}U в низкообогащенном продукте второго этапа составляет 0,0323% — 7343 мкг/г ^{235}U .

Т а б л и ц а 3. Производство разбавителя и низкообогащенного гексафторида урана в каскаде из худших отвалов по содержанию ^{234}U в три этапа при затратах работы разделения 86,48 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %
Первый этап:			
питание 1	100	0,28	0,00137
питание 2	50	0,35	0,00192
отбор	49,9	0,711	0,00409
отвал	100,1	0,1	0,00029
Второй этап:			
питание	49,9	0,711	0,00409
отбор	4,4	4,4	0,03231
отвал	45,5	0,35	0,00133
Третий этап:			
питание	45,5	0,35	0,00133
отбор	8,1	1,5	0,00661
отвал	37,4	0,1	0,00018

При производстве низкообогащенного урана на втором этапе может быть выбрана высокая концентрация ^{235}U отвала каскада, что обеспечивает использование этого отвала для производства разбавителя высокого качества на третьем этапе. В приведенном примере выбрана концентрация ^{235}U в отвале 0,35%. Содержание ^{234}U составило 0,00133%. Это существенно ниже, чем для лучших отвалов, использованных на первом этапе (см. табл. 2). Из такого отвала на третьем этапе работы каскада получается разбавитель с низкой концентрацией ^{234}U 0,00661% (см. табл. 3). Он пригоден для переработки высокообогащенного гексафторида урана с содержанием ^{235}U 90% в низкообогащенный с концентрацией $C_5 = 4,95\%$ при предельном содержании в нем ^{234}U $A_4 = 1,11\%$. При содержании в низкообогащенном гексафториде урана 4,4% ^{235}U предельная концентрация ^{234}U в высокообогащенном составляет 1,15%, при 4% — 1,19%.

Следует отметить, что трехэтапная схема наработки разбавителя лучше его получения по одноэтапной схеме в каскаде с промежуточным

отбором [3, 4]. В табл. 4 для сравнения приведен пример расчета параметров такого каскада с двумя питаниями, двумя отборами и одним отвалом. Внешние потоки и концентрация ^{235}U каскада соответствуют трехэтапной схеме из табл. 3. При одинаковых затратах работы разделения 86,48 тыс. е.р.р. содержание ^{234}U составляет 0,00777%. Это меньше, чем при использовании в каскаде лучших отвалов с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35% по двухэтапной схеме (см. табл. 2), однако выше, чем в рассмотренном примере (см. табл. 3).

Т а б л и ц а 4. Производство разбавителя и низкообогащенного гексафторида урана в каскаде с промежуточным отбором при затратах работы разделения 86,48 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %
Питание 1	100	0,28	0,00137
Питание 2	50	0,35	0,00192
Отбор 1	8,1	1,5	0,00777
Отбор 2	4,4	4,4	0,03021
Отвал	137,5	0,1	0,00026

Особенности двухэтапной наработки разбавителя в каскаде. При изменении концентрации ^{235}U в отвалах гексафторида урана, используемых на первом этапе, может возникнуть необходимость варьирования содержания ^{235}U в отборном полупродукте. В результате к второму этапу могут накопиться полупродукты с разной концентрацией ^{235}U . Эти полупродукты можно использовать на разных питаниях каскада во втором этапе. В табл. 5 приведен пример расчетов такого случая. На первом этапе из лучших отвалов гексафторида урана с концентрацией ^{235}U 0,28 и 0,35% получается полупродукт с природным содержанием ^{235}U 0,711%, из лучших отвалов с концентрацией ^{235}U 0,4% — полупродукт с содержанием ^{235}U 0,9%. На втором этапе производится 21,8 т разбавителя с таким же содержанием ^{234}U 0,00856%, что и в базовом варианте. В отличие от него суммарные затраты работы разделения на 12,2% меньше и составляют 63,72 тыс. е.р.р.

После наработки в каскаде полупродукта из лучших отвалов гексафторида урана на втором этапе могут также использоваться отвалы с неизвестной концентрацией ^{234}U . В табл. 6 приведены расчеты при использовании на первом этапе лучших отвалов с концентрацией ^{235}U 0,35% и ^{234}U 0,00171%. На первом этапе получа-

Т а б л и ц а 5. Производство разбавителя в каскаде по двухэтапной схеме при получении на первом этапе двух полупродуктов с разной концентрацией ^{235}U с затратами работы разделения 63,72 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %
Первый этап — получение первого полупродукта:			
питание 1	47	0,28	0,00119
питание 2	23,5	0,35	0,00171
отбор	23,5	0,711	0,00359
отвал	47	0,1	0,00025
Первый этап — получение второго полупродукта:			
питание	53,9	0,4	0,00213
отбор	20,2	0,9	0,00525
отвал	33,7	0,1	0,00026
Второй этап:			
питание 1	23,5	0,711	0,00359
питание 2	20,2	0,9	0,00525
отбор	21,8	1,5	0,00856
отвал	21,9	0,1	0,00018

ется полупродукт с природным содержанием ^{235}U 0,711% и ^{234}U 0,00381%. На втором этапе этот полупродукт подается на основном питании каскада, отвальный гексафторид урана с концентрацией ^{235}U 0,4% и средним содержанием ^{234}U 0,00223% — на дополнительном. Соотношение питающих потоков каскада обеспечивает получение 21,8 т разбавителя на втором этапе с таким же содержанием ^{234}U 0,00856%, что и в базовом примере. Суммарные затраты работы разделения в данном случае на 12,7% меньше и составляют 63,39 тыс. е.р.р.

Т а б л и ц а 6. Производство разбавителя в каскаде по двухэтапной схеме при использовании на втором этапе дополнительного отвала ^{235}U с затратами работы разделения 63,39 тыс. е.р.р.

Параметр	Масса UF_6 , т	^{235}U , %	^{234}U , %
Первый этап:			
питание	113,8	0,35	0,00171
отбор	46,6	0,711	0,00381
отвал	67,2	0,1	0,00026
Второй этап:			
питание 1	6,8	0,4	0,00223
питание 2	46,6	0,711	0,00381
отбор	21,8	1,5	0,00856
отвал	31,6	0,1	0,00019

Закключение. Двух- и трехэтапная схема производства разбавителя в каскаде из отвального гексафторида урана при неизвестном со-

держании ^{234}U обеспечивает его более высокое качество или уменьшение затрат работы разделения по сравнению с наработкой разбавителя в один этап.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корнилов В.Ф., Кнутарев А.П., Соловьев Г.С. и др. Способ переработки оружейного высокообогащенного урана и его сплавов в топливный материал для атомных реакторов. Пат. РФ № 2057377 от 27.03.1996. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 1996, № 9, с. 876.
2. Скорынин Г.С., Филимонов С.В., Шубин А.Н. и др. Способ получения гексафторида низкообогащенного урана из оружейного высокообогащенного урана. Пат. РФ № 2225362 от 10.03.2004. — Там же, 2004, № 7, с. 655.
3. Вандышев В.И., Герцог В.И., Палкин В.А. и др. Способ получения разбавителя для переработки оружейного высокообогащенного урана в низкообогащенный

уран. Пат. РФ № 2321544 от 10.04.2008. — Там же, 2008, № 10, с. 863—864.

4. Водолазских В.В., Глухов Н.П., Палкин В.А. и др. Способ переработки загрязненного уранового сырья. Пат. РФ № 2377674 от 27.12.2009. — Там же, 2009, № 36, с. 1207—1208.
5. Гордиенко В.С., Иовик И.Э., Палкин В.А. и др. Способ получения разбавителя для переработки оружейного высокообогащенного урана в низкообогащенный уран. Пат. РФ № 2479489 от 20.04.2013. — Там же, 2013, № 11, с. 150.
6. Палкин В.А., Маслюков В.А. Аналитическая оценка содержания минорных изотопов урана в оптимальных каскадах. — В сб.: XII Межд. научная конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул в лазерных, плазменных и нанотехнологиях». М., ЦНИИатоминформ, 2008, с. 31—34.
7. Cohen K. The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large Scale Production of ^{235}U . NY: McGraw-Hill, 1951.

Поступила в Редакцию 31.12.16

УДК 621.384.6.038.628

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НЕЙТРОНОВ ГЕНЕРАТОРОВ С ЗАПЯЯНЫМИ ТРУБКАМИ

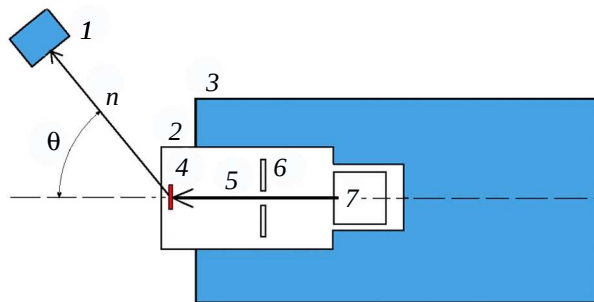
Сыромуков С.В. (ВНИИА им. Н.Л. Духова, г. Москва)

Генераторы нейтронов с запаянными газонаполненными трубками используются в различных ядерных технологиях и научных исследованиях. В них нейтроны образуются в результате взаимодействия ускоренных ионов дейтерия и трития с мишенью, насыщенной изотопами водорода. Мишень представляет собой пленку гидрида, обычно гидрида титана, толщиной несколько микрон, находящуюся на подложке [1]. В трубке имеется регулируемый геттер, который до отпайки прибора насыщают изотопами водорода. При использовании трубки с геттером, насыщенным дейтерием, образуются нейтроны по реакции $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$. Трубки с дейтерий-третиевым насыщением обеспечивают получение нейтронов по реакции $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$. Благодаря высокой эффективности этих реакций с помощью портативных генераторов с запаянными трубками получают потоки нейтронов интенсивностью до 10^{11} с^{-1} [2, 3].

Генераторы используются для облучения разных объектов в целях элементного анализа и физических экспериментов. Типичная геометрия облучения показана на рис. 1. В качестве примера на рис. 2 показаны генераторы НГ-24 и

НГ-14 с потоком 10^{11} и 10^{10} с^{-1} . Их излучатели имеют цилиндрическую форму, мишени находятся на фланцах [4, 5].

Основной характеристикой генераторов является поток нейтронов. Характеризуя энергию нейтронов реакций $^3\text{H}(d, n)^4\text{He}$ и $^2\text{H}(d, n)^3\text{He}$, обычно указывают 14,1 и 2,5 МэВ. Однако нейтроны такой энергией можно наблюдать только под углом примерно 90° к пучку ионов. Фактически спектр нейтронов имеет сложную форму, которая зависит от угла θ , энергии и атомно-молекулярного состава пучка ионов.



Р и с. 1. Типичная схема облучения образца с генератором нейтронов: 1 — облучаемый образец; 2 — запаянная трубка; 3 — излучатель; 4 — мишень; 5 — пучок ионов; 6 — электрод; 7 — источник ионов