

УДК 621.039.342

ДВУХКАСКАДНАЯ СХЕМА С ДВУМЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМИ ПИТАНИЯМИ И ОТБОРОМ ДЛЯ ОЧИСТКИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА ОТ 232 , 234 , ^{236}U

© 2023 г. В. А. Палкин^а, Е. В. Маслоков^{а, *}

^аФГАОУ ВО «Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

*e-mail: eugene_v_m@mail.ru

Поступила в редакцию 27.11.2022 г.

После доработки 10.12.2022 г.

Принята к публикации 12.12.2022 г.

Для очистки регенерированного гексафторида урана от 232 , 234 , ^{236}U предложена схема двух каскадов. В первом каскаде регенерированный уран обогащается до концентрации ^{235}U менее 20% со снижением отношения масс $^{236}\text{U}/^{235}\text{U}$. На его дополнительное питание подается отвальный гексафторид урана, загрязненный поток которого выводится в дополнительном отборе. На втором дополнительном питании используется природный гексафторид урана. Поток основного отбора первого каскада подается на питание второго каскада. Его отвал, очищенный от 232 , ^{234}U , разбавляется низкообогащенным или природным гексафторидом урана до концентрации ^{235}U менее 5%. Проведен вычислительный эксперимент. Показано, что продукт, образующийся после разбавления отвала второго каскада, по 232 , 234 , ^{236}U удовлетворяет требованиям спецификации ASTM C996–20 для обогащенного промышленного гексафторида урана.

Ключевые слова: очистка регенерированного урана, двойной каскад

DOI: 10.31857/S0040357123010116, **EDN:** VOYVKW

ВВЕДЕНИЕ

Регенерированный уран содержит четные изотопы 232 , 234 , ^{236}U , которые затрудняют воспроизводство ядерного топлива. Предложены разные методы каскадирования и операции разбавления регенерированного гексафторида урана UF_6 , позволяющие снизить содержание этих изотопов. Эффективным методом является обогащение регенерированного урана в двойном каскаде до концентрации ^{235}U 96.5% с последующим разбавлением [1]. Очистку регенерированного урана можно производить в дополнительном отборе двойных и одиночных каскадов [2, 3]. Другими подходами является обогащение с одновременным разбавлением отвальным и природным ураном на дополнительных питаниях каскадов [4, 5], а также разбавление низкообогащенным ураном (концентрация ^{235}U менее 5%) [6, 7].

В большинстве способов концентрация 232 , 234 , ^{236}U не удовлетворяет требованиям спецификации ASTM C996–20 по обогащенному промышленному гексафториду урана. Эти требования установлены, исходя из обогащения промышленного природного гексафторида урана, имеющего низ-

кое содержание 232 , 234 , ^{236}U . Их выполнение позволит использовать регенерированный гексафторид урана как замену промышленного природного. В связи с этим целесообразна разработка соответствующего способа очистки регенерированного урана.

В настоящей работе для снижения концентрации 232 , 234 , ^{236}U предложена схема двух каскадов. В первом шестипоточном каскаде регенерированный гексафторид урана обогащается по ^{235}U с наибольшим снижением отношения масс $^{236}\text{U}/^{235}\text{U}$. Для этого на его дополнительное питание подается отвальный гексафторид урана, загрязненный поток которого образуется в дополнительном отборе. Одновременно на втором дополнительном питании используется природный гексафторид урана. Параметры второго трехпоточного каскада, который питается основным отбором первого, определяются из условия получения в отвале концентрации ^{235}U , близкой к питанию, и снижения содержания 232 , ^{234}U до заданного уровня. В обоих каскадах концентрация ^{235}U в выходящих потоках не превышает 20%, соответствующих международным нормам по обращению с делящимися материалами [8]. Отвал

второго каскада разбавляется низкообогащенным ураном или природным сырьем до требуемой концентрации ^{235}U . Отбор второго каскада, загрязненный $^{232}, ^{234}\text{U}$, подлежит последующему разбавлению до ядерно безопасной смеси с концентрацией ^{235}U менее 1%. Проведен вычислительный эксперимент, показавший эффективность метода. Параметры каскадов рассчитывали с помощью методик [3, 9] при больших коэффициентах разделения ступеней, соответствующих газовым центрифугам.

ОБОГАЩЕНИЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА БЕЗ ОЧИСТКИ ОТ $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$

Регенерированный гексафторид урана, обогащенный в ординарных трехпоточных каскадах, имеет высокую концентрацию $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. При концентрации ^{235}U в отборе 4.4% и отвале 0.17% она составляет [10], %: ^{232}U 9.3×10^{-7} , ^{234}U 9.3×10^{-2} , ^{236}U 1.36. Это удовлетворяет требованиям спецификации ASTM C996–20 для обогащенного регенерированного гексафторида урана. Однако существенно выше установленных границ для обогащенного промышленного гексафторида урана (^{232}U не больше $1 \times 10^{-8}\%$, ^{234}U – 11 000 мкг/г ^{235}U , ^{236}U – 0.025%). Небольшое снижение концентрации $^{232}, ^{234}\text{U}$ возможно при уменьшении концентрации ^{235}U в отвале. Вместе с тем, это приведет к возрастанию концентрации ^{236}U . Наличие этого изотопа требует затрат на дообогащение ^{235}U на 0.2–0.6 доли содержания ^{236}U .

Уменьшить концентрацию ^{236}U можно обогащением до 20% с последующим разбавлением. Число ступеней каскада, номер ступени подачи питания и начальные приближения для концентрации изотопов определяются из расчетов R -каскадов [11]. Наиболее эффективен R -каскад, построенный по ключевым изотопам $^{235}, ^{236}\text{U}$. Однако при разбавлении концентрация ^{236}U остается высокой 0.83% [10]. Снижение концентрации $^{232}, ^{234}\text{U}$ достигается в отвале R -каскада, построенного по ключевым компонентам $^{234}, ^{235}\text{U}$.

ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА МНОГОПОТОЧНОЙ ДВУХКАСКАДНОЙ СХЕМЫ

Схема потоков системы двух каскадов приведена на рисунке. На основное питание первого каскада подается поток регенерированного гексафторида урана F_1 . Дополнительные питания организуются в отборной части каскада. На первое из них подается поток отвального гексафторида

урана природного происхождения D_1 , на второе поток природного гексафторида урана D_2 . Из каскада отбираются потоки отвала W_1 , дополнительного отбора E и основного отбора P_1 . Поток отвала обеднен по $^{232-236}\text{U}$. Поток дополнительного отбора загрязнен ^{236}U и равен потоку питания D_1 . Он выводится из каскада с концентрацией ^{235}U , соответствующей отвальному гексафториду урана на дополнительном питании. Это уменьшает дополнительные затраты работы разделения, связанные с использованием отвального гексафторида урана. Они обусловлены только смешением потоков с разной концентрацией изотопов в ступени дополнительного питания.

Поток основного отбора первого каскада обогащается ^{235}U со снижением отношения масс $^{236}\text{U}/^{235}\text{U}$. Он подается на питание второго каскада, в котором образуются потоки отбора P_2 и отвала W_2 . Поток отвала обеднен $^{232}, ^{233}, ^{234}\text{U}$ и имеет примерно такую же концентрацию $^{235}, ^{236}\text{U}$, что в питании. Продукт P_0 , очищенный от $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$, образуется при разбавлении потока отвала второго каскада разбавителем R до требуемой концентрации ^{235}U . В качестве разбавителя целесообразно использовать низкообогащенный гексафторид урана или природный.

В расчетах задавали исходную концентрацию изотопов, соответствующую регенерированному урану из отработавшего топлива ВВЭР [2], %: ^{232}U 1.5×10^{-7} , ^{233}U 3×10^{-7} , ^{234}U 1.6×10^{-2} , ^{235}U 0.85, ^{236}U 0.35, ^{238}U 98.78. Основным параметром, с помощью которого рассчитывали каскады, является коэффициент σ_i ступеней (нумерация от отвала к отбору, $i = \overline{1, n}$). Он представляет собой отношение коэффициента обогащения изотопных компонентов по отвалу и отбору ступеней и не зависит от рассматриваемого изотопа. Полные коэффициенты разделения изотопов задали одинаковыми для всех ступеней. Их рассчитали для $^{232}, ^{233}, ^{234}, ^{235}, ^{236}\text{U}$ по отношению к ^{238}U , исходя из принятого коэффициента на единицу разности массового числа $q = 1.1$. Суммарный поток питания ступеней $\sum L$ характеризовал число используемых разделительных элементов.

Расчеты первого каскада схемы проводили по видоизмененной методике [3]. Эта методика разработана для пятипоточного каскада с двумя питаниями, отвалом, основным и дополнительным отбором и обеспечивает заданную концентрацию ^{235}U во внешних потоках. В расчетных соотношениях для шестипоточного каскада ввели поток второго дополнительного питания. Параметры рассчитывали по ступеням от отвала каскада к основному отбору при заданных внешних потоках,

Таблица 1. Параметры каскадов с обогащением регенерированного гексафторида урана и разбавлением низкообогащенным ураном с концентрацией ^{235}U 3.6%

Параметр	UF_6 , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Обогащение в каскаде 1: $n = 38, f = 15, d_1 = 38, d_2 = 27, \sum L = 5522$ г/с						
F_1	100	1.5×10^{-7}	3×10^{-7}	1.6×10^{-2}	0.85	0.35
D_1	320	—	—	4×10^{-4}	0.15	—
D_2	80	—	—	5.4×10^{-3}	0.711	—
P_1	6.26	2.39×10^{-6}	4.71×10^{-6}	0.327	19.9	0.492
E	320	1.42×10^{-10}	1.24×10^{-9}	2.76×10^{-4}	0.15	7.05×10^{-2}
W_1	173.74	6.19×10^{-11}	6.24×10^{-10}	1.6×10^{-4}	0.1	5.39×10^{-2}
Разделение в каскаде 2: $n = 155, f = 35, \sum L = 94$ г/с						
F_2	6.26	2.39×10^{-6}	4.71×10^{-6}	0.327	19.9	0.492
P_2	1.98×10^{-2}	7.56×10^{-4}	1.48×10^{-3}	83.98	16.02	4.75×10^{-6}
W_2	6.24	5.72×10^{-10}	3.17×10^{-8}	6.17×10^{-2}	19.912	0.493
Разбавление отвала каскада 2						
R	120.93	—	—	2.98×10^{-2}	3.6	—
P_0	127.17	2.81×10^{-11}	1.56×10^{-9}	3.14×10^{-2}	4.4	2.42×10^{-2}

концентрации ^{235}U в них и содержаниях $^{232}, ^{233}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в питаниях. Начальные приближения коэффициента $\sigma_i = 0.867$ определили по R -каскаду с ключевыми изотопами $^{235}, ^{238}\text{U}$.

Особенностью методики [3] является организация дополнительного отбора путем смешения потоков E_{s-1}, E_s из отборов соседних ступеней с номерами $s - 1, s$ и концентрацией ^{235}U $C'_{4,s-1} < C_4^E, C'_{4,s} \geq C_4^E$. Здесь C_4^E — заданная концентрация ^{235}U в дополнительном отборе. При потоке дополнительного отбора E эти параметры равны

$$E_s = E \frac{C_4^E - C'_{4,s-1}}{C'_{4,s} - C'_{4,s-1}}; \quad E_{s-1} = E - E_s.$$

При большом потоке питания отвального гексафторида урана потоки отбора ступеней с номерами $s - 1, s$ могут быть меньше потоков E_{s-1}, E_s . Их увеличивали подачей минимально необходимого потока питания природного гексафторида урана на втором дополнительном питании. Соотношение потоков дополнительных питаний выбирали также, учитывая требуемую концентрацию ^{236}U в основном отборе.

Расчеты второго каскада проводили по методике [9]. Число ступеней, номер ступени подачи питания, коэффициент $\sigma_i = 0.716$ соответствовали R -каскаду с ключевыми изотопами $^{234}, ^{235}\text{U}$.

ОБОГАЩЕНИЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С РАЗБАВЛЕНИЕМ НИЗКООБОГАЩЕННЫМ УРАНОМ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ^{235}U 3.6%.

В табл. 1 приведены расчеты первого варианта схемы. На основном питании первого каскада задавали 100 т/год регенерированного гексафторида урана. На дополнительное питание подавали 320 т/год отвального гексафторида урана с концентрацией ^{235}U 0.15 и ^{234}U $4 \times 10^{-4}\%$. Данный отвальный продукт почти не пригоден для обогащения, но эффективен для очистки регенерированного урана. На второе дополнительное питание подавали 80 т/год природного гексафторида урана с концентрацией ^{235}U 0.711 и ^{234}U $5.4 \times 10^{-3}\%$. Концентрацию ^{235}U в основном отборе приняли 19.9%, в отвале 0.1%. Число ступеней $n = 38$, номер ступени подачи основного питания $f = 15$. Наибольшее снижение концентрации ^{236}U в основном отборе каскада обеспечивает организация питания отвальным гексафторидом урана в

отборной ступени [10]. В связи с этим определили номер ступени $d_1 = 38$. Смещение второго дополнительного питания к основному отбору приводит к аналогичному эффекту. Однако возрастает суммарный поток питания, поэтому номер ступени второго дополнительного питания выбрали ближе к середине каскада: $d_2 = 27$.

Концентрация четных изотопов урана в основном отборе первого каскада существенно меньше, чем в аналогичном каскаде без дополнительных питаний, и составляет, %: ^{232}U 2.39×10^{-6} , ^{234}U 0.327, ^{236}U 0.492. Наибольшее снижение в 11 раз характерно для ^{236}U . Данный эффект достигается увеличением суммарного потока питания каскада до 5522 г/с. Это объясняется значительными потоками дополнительных питаний. Следует отметить, что концентрация $^{232-236}\text{U}$ монотонно возрастает от отвала каскада к основному отбору. Профиль потока питания по ступеням имеет максимум в ступени подачи основного питания.

На питании второго каскада принимали параметры основного отбора первого каскада. Число ступеней в каскаде 155, номер ступени подачи питания 35. В отвале каскада образуется концентрация ^{235}U 19.912%. Концентрация четных изотопов урана в отвале равна, %: ^{232}U 5.72×10^{-10} , ^{234}U 6.17×10^{-2} , ^{236}U 0.493. Для 232 , ^{234}U это существенно меньше, чем в питании. Степень извлечения гексафторида урана в отвал составляет 99.7%. Поток питания изменяется по каскаду с максимумом в ступени подачи внешнего питания. Суммарный поток питания равен 94 г/с. Концентрация 232 , 233 , ^{234}U монотонно возрастает к отбору каскада. Концентрация ^{234}U в отборе составляет 83.98%. Зависимость концентрации ^{235}U от номера ступени характеризуется наличием максимума 95.83% в отвале 53-й ступени. Содержание ^{235}U в отборе уменьшается до 16.02%. Концентрация ^{236}U имеет небольшой максимум 0.695% в отборе 11-й ступени.

Отвал второго каскада можно разбавить потоком дополнительного отбора первого каскада до концентрации ^{235}U 4.4%. Разбавленный отвал по 232 , ^{234}U соответствует требованиям спецификации ASTM C996–20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Концентрация ^{236}U достаточно низкая 0.16%. Разбавитель в виде низкообогащенного гексафторида урана с концентрацией ^{235}U 3.6% и ^{234}U $2.98 \times 10^{-2}\%$ обеспечивает выполнение указанных требований по всем четным изотопам урана. Их содержание в 127.17 т/год продукта с концентрацией ^{235}U 4.4% составляет, %: ^{232}U 2.81×10^{-11} , ^{234}U 3.14×10^{-2} , ^{236}U 0.024.

Для производства 120.93 т/год разбавителя в каскаде с концентрацией ^{235}U в отвале 0.1% требуется 692.75 т/год природного гексафторида урана. Суммарный поток питания такого каскада равен 2065 г/с. С учетом 80 т/год на питании первого каскада общий расход природного гексафторида урана составляет 772.75 т/год. Из них можно наработать в каскаде 109.8 т/год продукта, обогащенного по ^{235}U до 4.4%, при концентрации отвала 0.1%. Следовательно, рассмотренная схема двух каскадов позволяет дополнительно образовывать путем переработки 100 т/год регенерированного гексафторида урана 17.37 т/год обогащенного промышленного. Для производства аналогичного продукта потребовалось бы 123.3 т/год природного гексафторида урана.

ОБОГАЩЕНИЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С РАЗБАВЛЕНИЕМ НИЗКООБОГАЩЕННЫМ УРАНОМ СКОНЦЕНТРАЦИЕЙ ^{235}U 2.7%

В табл. 2 приведены расчеты второго варианта схемы. Число ступеней, номера ступеней подачи питаний, концентрацию ^{235}U во внешних потоках и содержание изотопов в питаниях первого каскада задавали так же, как в первом варианте схемы. На питании этого каскада приняли 100, 590 и 240 т/год регенерированного, отвального и природного гексафторида урана соответственно. Концентрация четных изотопов урана в основном отборе меньше, чем в первом варианте схемы и составляет, %: ^{232}U 1.34×10^{-6} , ^{234}U 0.267, ^{236}U 0.245. Значительное увеличение потоков отвального и природного гексафторида урана на дополнительных питаниях привело к возрастанию суммарного потока питания до 10473 г/с. Число ступеней во втором каскаде 155, номер ступени подачи питания 33. В отвале каскада образуется концентрация ^{235}U 19.906%. Концентрация четных изотопов урана в отвале равна, %: ^{232}U 5.15×10^{-10} , ^{234}U 5.53×10^{-2} , ^{236}U 0.246. Суммарный поток питания составляет 157 г/с. Характер изменения концентрации $^{232-236}\text{U}$ и потока питания по ступеням в каскадах не изменился по сравнению с первым вариантом. Исключение составляет первый каскад, для которого характерны два максимума потока питания рядом со ступенями подачи дополнительных питаний.

Отвал второго каскада эффективно разбавляется низкообогащенным гексафторидом урана с концентрацией ^{235}U 2.7% и ^{234}U $2.22 \times 10^{-2}\%$. Разбавленный отвал по 232 , 234 , ^{236}U соответствует требованиям спецификации ASTM C996–20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Содержание четных изотопов урана в

Таблица 2. Параметры каскадов с обогащением регенерированного гексафторида урана и разбавлением низкообогащенным ураном с концентрацией ^{235}U 2.7%

Параметр	UF_6 , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Обогащение в каскаде 1: $n = 38, f = 15, d_1 = 38, d_2 = 27, \sum L = 10473$ г/с						
F_1	100	1.5×10^{-7}	3×10^{-7}	1.6×10^{-2}	0.85	0.35
D_1	590	—	—	4×10^{-4}	0.15	—
D_2	240	—	—	5.4×10^{-3}	0.711	—
P_1	11.19	1.34×10^{-6}	2.64×10^{-6}	0.267	19.9	0.245
E	590	7.65×10^{-11}	5.53×10^{-10}	1.89×10^{-4}	0.15	3.83×10^{-2}
W_1	328.81	3.33×10^{-11}	2.78×10^{-10}	1.09×10^{-4}	0.1	2.93×10^{-2}
Разделение в каскаде 2: $n = 155, f = 33, \sum L = 157$ г/с						
F_2	11.19	1.34×10^{-6}	2.64×10^{-6}	0.267	19.9	0.245
P_2	2.87×10^{-2}	5.21×10^{-4}	1.02×10^{-3}	82.48	17.52	2.19×10^{-6}
W_2	11.16	5.15×10^{-10}	2.37×10^{-8}	5.53×10^{-2}	19.906	0.246
Разбавление отвала каскада 2						
R	101.84	—	—	2.22×10^{-2}	2.7	—
P_0	113.01	5.09×10^{-11}	2.34×10^{-9}	2.55×10^{-2}	4.4	2.43×10^{-2}

113.01 т/год продукта с концентрацией ^{235}U 4.4% составляет, %: ^{232}U 5.09×10^{-11} , ^{234}U 2.55×10^{-2} , ^{236}U 0.024. Для производства 101.84 т/год разбавителя в каскаде с концентрацией ^{235}U в отвале 0.1% требуется 433.36 т/год природного гексафторида урана. Суммарный поток питания такого каскада равен 1146 г/с. С учетом 240 т/год на питании первого каскада общий расход природного гексафторида урана составляет 673.36 т/год. Из них можно наработать в каскаде 95.68 т/год продукта, обогащенного по ^{235}U до 4.4%, при концентрации отвала 0.1%. Таким образом, производство обогащенного промышленного гексафторида урана из регенерированного составляет 17.33 т/год.

ОБОГАЩЕНИЕ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА С РАЗБАВЛЕНИЕМ ПРИРОДНЫМ УРАНОМ С КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ^{235}U 0.711%

В табл. 3 приведены расчеты третьего варианта схемы. Увеличение потоков отвального и природного гексафторида урана до 1100 и 500 т/год соответственно на питаниях первого каскада позволяет еще больше снизить концентрацию четных изотопов урана. В основном отборе каскада, аналогичном первым двум вариантам, концентрация четных изотопов урана составляет, %: ^{232}U 7.78×10^{-7} , ^{234}U 0.236, ^{236}U 0.129. Суммарный поток питания равен 19445 г/с. Во втором каскаде число ступеней 155, номер ступени подачи питания 31. В отвале каскада образуется концентрация ^{235}U

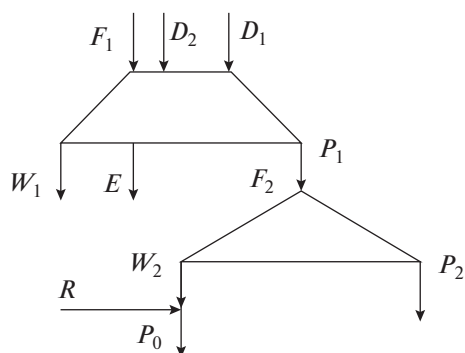
19.904%. Концентрация четных изотопов урана в отвале равна, %: ^{232}U 4.83×10^{-10} , ^{234}U 5.39×10^{-2} , ^{236}U 0.129. Суммарный поток питания составляет 253 г/с. Характер изменения концентрации $^{232-236}\text{U}$ и потока питания по ступеням в каскадах не изменился по сравнению с вторым вариантом схемосравнению с вторым вариантом схемы.

Отвал второго каскада можно разбавить природным гексафторидом урана. Разбавленный отвал по $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ соответствует требованиям спецификации ASTM C996–20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Содержание четных изотопов урана в 99.76 т/год продукта с концентрацией ^{235}U 4.4% составляет, %: ^{232}U 9.28×10^{-11} , ^{234}U 1.47×10^{-2} , ^{236}U 0.025. Общий расход природного гексафторида урана равен 580.59 т/год. Из них можно произвести в каскаде 82.5 т/год продукта, обогащенного по ^{235}U до 4.4%, при концентрации ^{235}U в отвале 0.1%. Следовательно, производство обогащенного промышленного гексафторида из регенерированного составляет 17.26 т/год.

Рассмотренные примеры показывают, что переход к разбавителю с меньшей концентрацией ^{235}U снижает расход природного гексафторида урана. Однако возрастает число разделительных элементов, характеризуемое суммарным потоком питания. Следует отметить, что высокоактивный отбор второго каскада схемы необходимо разбавлять до ядерно безопасной смеси с концентрацией ^{235}U менее 1%. Для этой цели подходит отваль-

Таблица 3. Параметры каскадов с обогащением регенерированного гексафторида урана и разбавлением природным сырьем с концентрацией ^{235}U 0.711

Параметр	UF_6 , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Обогащение в каскаде 1: $n = 38, f = 15, d_1 = 38, d_2 = 27, \sum L = 19445$ г/с						
F_1	100	1.5×10^{-7}	3×10^{-7}	1.6×10^{-2}	0.85	0.35
D_1	1100	—	—	4×10^{-4}	0.15	—
D_2	500	—	—	5.4×10^{-3}	0.711	—
P_1	19.22	7.78×10^{-7}	1.54×10^{-6}	0.236	19.9	0.129
E	1100	4.21×10^{-11}	3.06×10^{-10}	1.42×10^{-4}	0.15	2.11×10^{-2}
W_1	580.72	1.83×10^{-11}	1.54×10^{-10}	8.21×10^{-5}	0.1	1.61×10^{-2}
Разделение в каскаде 2: $n = 155, f = 30, \sum L = 312$ г/с						
F_2	19.22	7.78×10^{-7}	1.54×10^{-6}	0.236	19.9	0.129
P_2	4.27×10^{-2}	3.5×10^{-4}	6.85×10^{-4}	82.09	17.91	9.96×10^{-7}
W_2	19.17	4.83×10^{-10}	1.83×10^{-8}	5.39×10^{-2}	19.904	0.129
Разбавление отвала каскада 2						
R	80.59	—	—	5.4×10^{-3}	0.711	—
P_0	99.76	9.28×10^{-11}	3.53×10^{-9}	1.47×10^{-2}	4.4	2.49×10^{-2}

**Рис. 1.** Схема потоков системы двух каскадов (F_i, P_i – потоки основного питания и отбора i -го каскада, D_i, E – потоки дополнительного питания и отбора; W_i – потоки отвала i -го каскада, R – разбавитель, P_0 – поток продукта).

ный гексафторид урана с низкой концентрацией ^{235}U 0.1% из первого каскада схемы. После разбавления данный продукт следует отправить на долговременное хранение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Многопоточная двухкаскадная схема существенно снижает концентрацию $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в обогащенном регенерированном гексафториде урана. Ее эффективность обусловлена использованием отвального, природного и низкообогащенного гексафторида урана на отдельных стадиях процесса.

Продукт, образованный после разбавления отвала второго каскада, удовлетворяет требованиям ASTM C996–20, установленным для обогащенного промышленного гексафторида урана.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

C_4^E	заданная концентрация ^{235}U в дополнительном отборе, %
$C_{4,s}^i$	концентрация ^{235}U в отборе ступени с номером s , %
D_1	поток отвального гексафторида урана на дополнительном питании первого каскада, т/год
D_2	поток природного гексафторида урана на дополнительном питании первого каскада, т/год
d_1	номер ступеней подачи первого дополнительного питания
d_2	номер ступеней подачи второго дополнительного питания
E	поток дополнительного отбора первого каскада, т/год
F_1	поток регенерированного гексафторида урана на основном питании первого каскада, т/год
F_2	поток питания второго каскада, т/год
f	номер ступени подачи основного питания
n	количество ступеней в каскаде, шт.
P_0	поток очищенного продукта, т/год
P_1	поток основного отбора первого каскада, т/год

P_2	поток отбора второго каскада, т/год
q	полные коэффициенты разделения ступеней
R	поток разбавителя, т/год
s	номер рассматриваемой ступени каскада
W_1	поток отвала первого каскада, т/год
W_2	поток отвала второго каскада, т/год
$\sum L$	суммарный поток питания ступеней, т/год
σ_i	отношение коэффициента обогащения изотопных компонентов по отвалу и отбору ступеней

ИНДЕКСЫ

i, s	номера рассматриваемых ступеней каскада
--------	---

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Водолазских В.В., Козлов В.А., Мазин В.И. и др.* Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. 2282904 РФ. 2006.
2. *Мазин В.И., Водолазских В.В., Журин В.А. и др.* Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. 2497210 РФ. 2013.
3. *Палкин В.А.* Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором // Перспективные материалы. 2010. № 8. С. 11.
4. *Smirnov A. Yu., Sulaberidze G.A.* Enrichment of Regenerated Uranium with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Raw and Waste Uranium // Atomic Energy. 2014. V. 117. № 1. P. 44. [*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.]
5. *Бобров Е.А., Гурин А.В., Теплов П.С.* Расчетно-аналитическое моделирование изотопного состава свежего топлива для РУ типа ВВЭР на основе регенерированного урана в рамках программного комплекса STEM-ES для проведения сценарных исследований развития ЯЭ // Вопросы атомной науки и техники, серия: Физика ядерных реакторов. 2019. № 5. С. 31.
6. *Smirnov A. Yu., Sulaberidze G.A., Dudnikov A.A., Nevinititsa V.A.* Enrichment of Regenerated Uranium in a Gas Centrifuge Cascade with Simultaneous Dilution of $^{232-236}\text{U}$ by Waste and Low-Enrichment Uranium // Atomic Energy. 2017. V. 122. № 5. P. 353. [*Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Дудников А.А., Невиница В.А.* Обогащение регенерированного урана в каскаде газовых центрифуг с одновременным разбавлением $^{232-236}\text{U}$ отвальным и низкообогащенным ураном // Атомная энергия. 2017. Т. 125. № 5. С. 287.]
7. *Smirnov A. Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinititsa V.A.* A Method to enrich reprocessed uranium with various initial contents of even-numbered isotopes // AIP Conf. Proc., 2019. V. 2101. P. 020006.
8. Management of High Enriched Uranium for Peaceful Purposes. Status and Trends // Vienna: IAEA. 2005.
9. *Palkin V.A.* Multistream Cascades for Separation of Multicomponent Isotopic Mixtures // Atomic Energy. 2015. V. 119. № 2. P. 125. [*Палкин В.А.* Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 2015. Т. 119. № 2. С. 101.]
10. *Palkin V.A.* Dual-Cascade Scheme with Additional Feed and Product Streams for Purification of Regenerated Uranium Hexafluoride from $^{232, 234, 236}\text{U}$ // Atomic Energy. 2021. V. 129. № 5. P. 290. [*Палкин В.А.* Двухкаскадная схема с дополнительным питанием и отбором для очистки регенерированного гексафторида урана от $^{232, 234, 236}\text{U}$ // Атомная энергия, 2020. Т. 129. № 5. С. 281.]
11. *Сазыкин А.А.* Термодинамический подход к разделению изотопов // Изотопы: свойства, получение, применение. М.: ИздАТ, 2000. С. 72.