

0,4%, в случае с диагональным сжатием образцов относительная погрешность не превысила 10%.

Заключение. Сравнение натурных и вычислительных экспериментов позволяет сделать вывод о достоверности и точности математической модели. Совокупность экспериментальных данных, идентифицированной и верифицированной математической модели (определяющих соотношений) теории течений свидетельствует о возможности применения модели для анализа напряженно-деформированного состояния конструкции ТВС, изготовленной из исследуемого материала, в условиях динамического нагружения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Виленский О.Ю., Лапшин Д.А., Новинский Э.Г. и др. Расчетный анализ и оценка последствий падения ТВС с применением верифицированных моделей деформирования конструкционных материалов. — Атомная энергия, 2021, т. 131, вып. 5, с. 295.
2. Кольский Г. Исследование механических свойств материалов при больших скоростях нагружения. — Механика, 1950, № 4, с. 108—119.
3. Брагов А.М., Ломунов А.К. Особенности построения диаграмм деформирования методом Кольского. — В сб.: Прикладные проблемы прочности и пластичности. Статика и динамика деформируемых систем. Горький, 1984, с. 125—137.
4. Bragov A.M., Lomunov A.K. Methodological aspects of studying dynamic material properties using the Kolsky method. — Intern. Impact Engng, 1995, № 16(2), p. 321—330.
5. Nicholas T. Tensile testing of materials at high rates of strain. — Exp. Mech., 1981, v. 21, № 5, p. 177—195.
6. Брагов А.М. Экспериментальный анализ процессов деформирования и разрушения материалов при скоростях деформации 10^2 — 10^5 с⁻¹. Дис. на соискание ученой степени докт. техн. наук. Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 1998.
7. Johnson G., Cook W. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. — In: Proc. of the Seventh Intern. Symp. on Ballistic. Netherlands, 1983, p. 541—547.
8. Константинов А.Ю. Экспериментально-расчетное исследование поведения конструкционных материалов под действием динамических нагрузок. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Нижний Новгород, 2007.
9. Котов В.Л., Константинов А.Ю., Кибец Ю.И. и др. Численное моделирование плоскопараллельного движения конических ударников в упругопластической среде. — Проблемы прочности и пластичности, 2013, т. 75, № 4, с. 303—311.
10. Лапшин Д.А. Расчетно-экспериментальный анализ прочности внутриобъектовых транспортных контейнеров реакторов типа БН в авариях с падением. Дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Нижний Новгород, ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2015.
11. Rodriguez T., Navarro C., Sanchez-Galvez V. Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials. — Physique IV, 1994, p. 101—106.

Поступила в Редакцию 3.06.22

УДК 621.039.342

ТРЕХКАСКАДНАЯ СХЕМА ОЧИСТКИ РЕГЕНЕРИРОВАННОГО ГЕКСАФТОРИДА УРАНА ОТ ²³²U, ²³⁴U, ²³⁶U

Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г Екатеринбург)
e-mail: profp2004@mail.ru

Одной из задач ядерной энергетики является вовлечение в топливный цикл регенерированного урана, полученного из облученного топлива легководных реакторов. Такой уран имеет более высокую концентрацию ²³⁵U по сравнению с природным сырьем [1, 2]. Однако в нем содержатся изотопы ²³²U, ²³⁴U, ²³⁶U, которые существенно снижают его характеристики. Для уменьшения их содержания предложены разные методы каскадирования и операции разбавления гексафторида урана.

Наиболее эффективные методы предусматривают обогащение регенерированного урана в

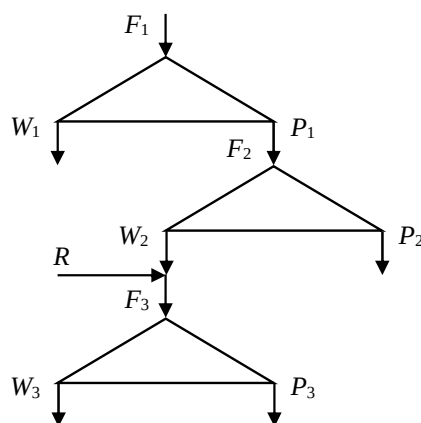
двойном каскаде до концентрации ²³⁵U 96,5% [1], каскады с дополнительным отбором [3, 4], добавление природного и отгального урана на дополнительном питании каскадов [5], а также разбавление низкообогащенным ураном [6, 7]. Содержание ²³²U, ²³⁴U, ²³⁶U в конечном продукте уменьшается, но очищенный большинством способов не соответствует обогащенному промышленному гексафториду урана, который определяется спецификацией ASTM C996—20. При удовлетворении требований спецификации возникают сложности с производительностью метода [4]. Выполнение этих требований позво-

лит использовать регенерированный гексафторид урана как замену промышленного природного. Поэтому актуальным является поиск соответствующего способа очистки регенерированного урана.

В настоящей работе для снижения концентрации ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U предложена трехкаскадная схема с операцией разбавления на промежуточной стадии, отличающаяся от тройного каскада с двумя разбавлениями [7]. В первом каскаде регенерированный уран для снижения относительного содержания ^{236}U по сравнению с ^{235}U обогащается до концентрации ^{235}U менее 20%, что соответствует международным нормам по обращению с делящимися материалами [8]. Параметры второго каскада, который питается отбором первого, выбираются из условия получения в отвале концентрации ^{235}U , близкой к питанию этого каскада. При этом содержание ^{232}U , ^{234}U в отвале снижается до уровня, обеспечивающего выполнение требований ASTM C996—20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Разбавленный отвал подается на питание третьего каскада, в отборе которого образуется низкообогащенный уран с заданной концентрацией ^{235}U . Отбор второго каскада, загрязненный ^{232}U , ^{234}U , требует последующего разбавления до ядерно безопасной смеси с концентрацией ^{235}U менее 1%.

Эффективность рассмотренного метода показал вычислительный эксперимент по разделению регенерированного гексафторида урана. Параметры каскадов рассчитывали с помощью методик [9, 10], обеспечивающих минимизацию суммарного потока при больших коэффициентах разделения ступеней.

Особенности расчета трехкаскадной схемы. Расчеты проводили для схемы, состоящей из трех ординарных трехпоточных каскадов (рис. 1). Концентрация изотопов в выходящих потоках зависит от заданных параметров. В отборе рассмотренных каскадов обогащаются легкие изотопы ^{232}U , ^{233}U , ^{234}U , в отвале — тяжелый ^{238}U . Изотопы ^{235}U , ^{236}U обогащаются в отборах первого и третьего каскадов и отвале второго. Исходная концентрация изотопов соответствует регенерированному урану из отработавшего топлива ВВЭР [3], %: ^{232}U $1,5 \cdot 10^{-7}$, ^{233}U $3 \cdot 10^{-7}$, ^{234}U $1,6 \cdot 10^{-2}$, ^{235}U 0,85, ^{236}U 0,35, ^{238}U 98,78. Основным параметром, с помощью которого достигали заданную концентрацию изотопов ура-



Р и с. 1. Трехкаскадная схема очистки регенерированного гексафторида урана (F_i , P_i , W_i — потоки питания, отбора и отвала i -го каскада, R — разбавитель)

на, являлся коэффициент ступеней σ_i (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 компонентов изотопной смеси задавали одинаковыми для всех ступеней. Их рассчитали для каждого изотопа по отношению к ^{238}U , исходя из принятого коэффициента на единицу разности массового числа $q = 1,12$. Суммарный поток питания ступеней характеризовал число разделительных элементов.

Обогащение регенерированного гексафторида урана в ординарном каскаде. В табл. 1 приведены расчеты обогащения регенерированного гексафторида урана UF_6 в ординарных каскадах без очистки от ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U . На питании задавали 100 т/год. Расчеты проводили по методике [10], обеспечивающей заданную концентрацию ^{235}U в выходящих потоках. Для минимизации суммарного потока питания использовали метод Хука—Дживса [11]. Число ступеней n , номер ступени подачи питания f и начальные приближения для концентрации изотопов определяли из расчетов R -каскадов [12].

В первом примере число ступеней каскада 22, номер ступени подачи питания 13. Начальная концентрация изотопов в ступенях и коэффициент σ_i соответствовали R -каскаду с ключевыми изотопами ^{235}U , ^{238}U . Этот каскад оптимизировали на заданную концентрацию ^{235}U 4,4% в отборе и 0,1% в отвале. Суммарный поток питания составил $\sum L = 333$ г/с. Концентрация

Таблица 1. Параметры каскадов с обогащением регенерированного гексафторида урана до концентрации ^{235}U 4,4 и 20%

Параметр	UF_6 , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Питание	100	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,85	0,35
$n = 22, f = 13, \sum L = 333 \text{ г/с}$						
Отбор	17,442	$8,59 \cdot 10^{-7}$	$1,71 \cdot 10^{-6}$	$8,94 \cdot 10^{-2}$	4,4	1,42
Отвал	82,558	$2,72 \cdot 10^{-10}$	$2,3 \cdot 10^{-9}$	$5,02 \cdot 10^{-4}$	0,1	0,124
$n = 40, f = 28, \sum L = 615 \text{ г/с}$						
Отбор	3,769	$3,98 \cdot 10^{-6}$	$7,96 \cdot 10^{-6}$	0,421	20	4,069
Отвал	96,231	$2,2 \cdot 10^{-12}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$	$1,21 \cdot 10^{-4}$	0,1	0,204

^{232}U , ^{234}U , ^{236}U в отборе удовлетворяет требованиям спецификации ASTM C996—20 для обогащенного регенерированного гексафторида урана. Однако она существенно больше установленных границ для обогащенного промышленного гексафторида урана — ^{232}U не больше $1 \cdot 10^{-8}\%$, ^{234}U 11 000 мкг/г ^{235}U , ^{236}U 0,025%. Особенно это касается ^{232}U , ^{236}U , содержание которых в отборном продукте $8,59 \cdot 10^{-7}$ и 1,42% соответственно. Концентрация ^{236}U предполагает введение компенсирующего повышения на 0,3—0,7% содержания ^{235}U относительно требуемой концентрации в отборном продукте. Это соответствует коэффициенту компенсации 0,2—0,5, на который умножается концентрация ^{236}U .

Второй пример характеризует обогащение ^{235}U до 20% в отборе каскада с числом ступеней 40, номером ступени подачи питания 28. Начальная концентрация изотопов в ступенях и коэффициент σ_i соответствовали R-каскаду с ключевыми ^{235}U , ^{236}U . Суммарный поток питания составил 615 г/с. Обогащение до такой концентрации ^{235}U позволяет снизить в отборном продукте отношение массы $^{236}\text{U}/^{235}\text{U}$. При последующем разбавлении до концентрации ^{235}U менее 5% в полученном продукте уменьшается кон-

центрация ^{236}U . Отбор второго каскада можно разбавить отвальным гексафторидом урана природного происхождения с концентрацией ^{235}U 0,3 и ^{234}U 0,0015%. При разбавлении до концентрации ^{235}U 4,4% содержание ^{236}U снижается, но остается высоким 0,85%.

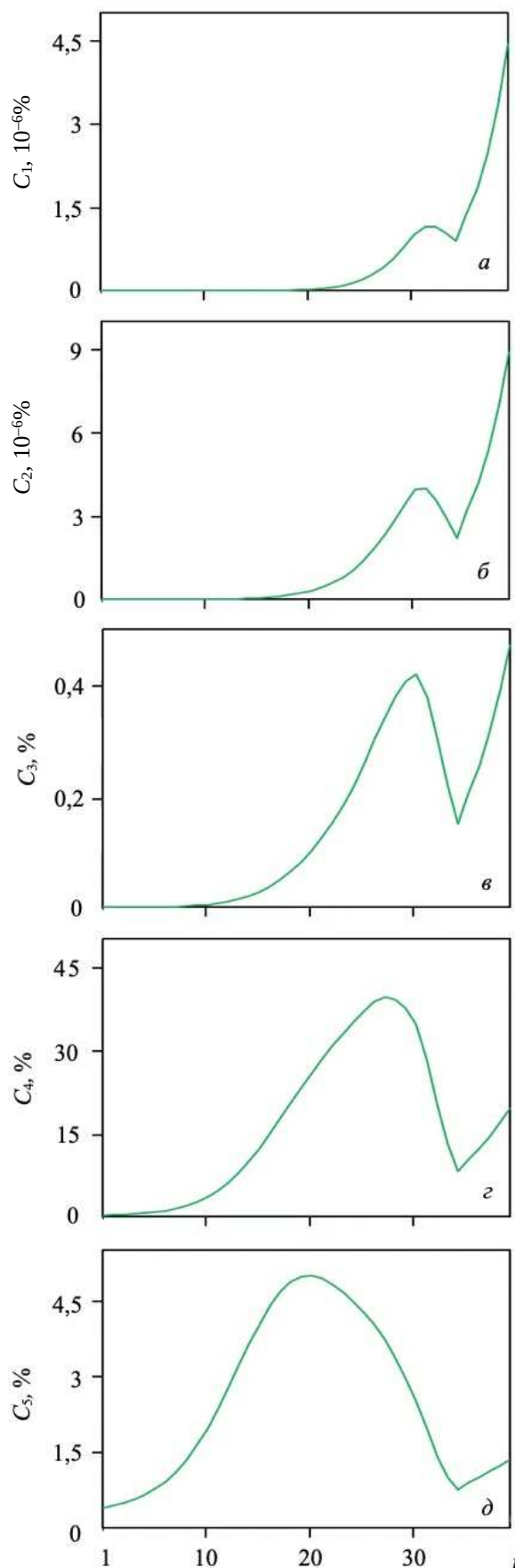
Обогащение регенерированного гексафторида урана в каскаде со снижением отношения массы $^{236}\text{U}/^{235}\text{U}$. В табл. 2 приведены расчеты двух вариантов первого каскада схемы с получением в отборе концентрации ^{235}U 19,5%. В расчетах использовали методику [9]. На питании задавали 100 т/год. В обоих вариантах число ступеней 40, номер ступени подачи питания 35. Начальный коэффициент σ_i задавали 0,5 для ступеней с 1-й по 10-ю, 0,75 для остальных. Соответствующая концентрация ^{235}U в отборе каскада составила 4,2%. Заданную концентрацию ^{235}U 19,5% достигли оптимизацией методом Хука—Дживса. При этом варьировали коэффициент σ_i по ступеням для первого варианта в диапазоне $0,5 \leq \sigma_i \leq 1,35$, для второго $0,4 \leq \sigma_i \leq 1,35$. Дополнительно ограничивали изменение концентрации ^{235}U в отвале от 0,08 до 0,25%.

Таблица 2. Параметры каскадов ($n = 40, f = 35$) с обогащением регенерированного гексафторида урана до концентрации ^{235}U 19,5%

Параметр	UF_6 , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Питание	100	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	0,85	0,35
$\sum L = 1831 \text{ г/с}$						
Отбор	3,815	$3,93 \cdot 10^{-6}$	$7,86 \cdot 10^{-6}$	0,418	19,5	1,788
Отвал	96,185	$1,08 \cdot 10^{-13}$	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$4,14 \cdot 10^{-5}$	0,11	0,293
$\sum L = 2107 \text{ г/с}$						
Отбор	3,371	$4,45 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	0,472	19,5	1,347
Отвал	96,629	$2,45 \cdot 10^{-13}$	$2,84 \cdot 10^{-11}$	$8,78 \cdot 10^{-5}$	0,199	0,315

В результате оптимизации коэффициент σ_i для первых 10 ступеней оказался близким к верхней границе диапазона, для ступеней с 31-й по 36-ю равным нижней границе. Ступени с 11-й по 26-ю и несколько ступеней на отборном конце каскада сохранили коэффициент $\sigma_i = 0,75$. В обоих вариантах концентрация ^{236}U в отборе каскада существенно ниже, чем в табл. 1. В лучшем втором варианте она равна 1,347%. Вместе с тем концентрация $^{232}, ^{234}\text{U}$ более высокая, что обусловлено меньшим коэффициентом σ_i для ступеней с 31-й по 36-ю. На такие изменения в содержании этих изотопов влияет и более высокая концентрация ^{235}U в отвале 0,2% по сравнению с 0,11%. Следствием является уменьшение потока отбора во втором варианте. Следует отметить, что при разделении регенерированного гексафторида урана концентрация ^{235}U может достигать 0,24% [3].

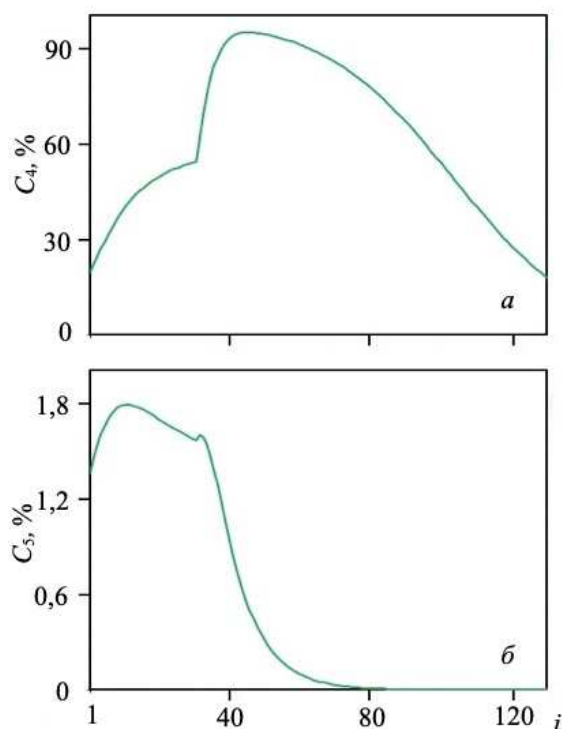
Уменьшение концентрации ^{236}U в отборе рассмотренных каскадов по сравнению с табл. 1 связано со сложным характером изменения параметров ступеней. Распределение потока питания имеет типичную форму с одним максимумом на 10-й ступени, а не в точке подачи. Суммарный поток питания выше примерно в 3 раза, чем в аналогичном каскаде из табл. 1. Изменение концентрации изотопов по ступеням немонотонно. На рис. 2 показана зависимость концентрации $^{232}-^{236}\text{U}$ от номера ступени для второго варианта каскада. Характер изменения концентрации этих изотопов одинаков — сначала рост с замедлением, затем снижение к ступени подачи питания и снова рост. Начальный рост и последующее уменьшение объясняются изменением коэффициента σ_i в обеднительной части каскада от отвала до точки подачи питания. Так, при коэффициенте $\sigma_i = 0,4$ отмечается массоперенос перечисленных изотопов в сторону отвала, что приводит к снижению их концентрации на соответствующем участке ступеней. Концентрация ^{236}U начинает уменьшаться уже в середине каскада, после достижения максимума 5% в отборе 21-й ступени. Это объясняется тем, что массоперенос ^{236}U наблюдается уже при $\sigma_i = 0,75$. Таким образом, каскад с увеличенным потоком питания и сложным характером изменения параметра σ_i по ступеням обеспечивает существенное снижение кон-



Р и с. 2. Концентрация ^{232}U (а), ^{233}U (б), ^{234}U (в), ^{235}U (г), ^{236}U (д) в отборе ступеней первого каскада схемы

центрации ^{236}U в отборе. Для второго варианта рассмотренные эффекты проявляются наиболее сильно.

Очистка регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}\text{U}$ и разбавление. В табл. 3 приведены расчеты второго каскада схемы. На его питании принимали параметры отбора второго варианта каскада из табл. 2. В расчетах использовали методику [9]. Число ступеней в каскаде 130, номер ступени подачи питания 31. Расчеты проводили при одинаковом коэффициенте $\sigma_i = 0,675$ для всех ступеней, что близко к R -каскаду с ключевыми изотопами $^{234}, ^{235}\text{U}$. В отвале каскада концентрация ^{235}U составляет 19,52%, немного больше, чем на питании. Концентрация четных изотопов урана равна, %: ^{232}U $6,13 \cdot 10^{-10}$, ^{234}U $7,31 \cdot 10^{-2}$, ^{236}U 1,353. Для $^{232}, ^{234}\text{U}$ это существенно меньше, чем на питании. Извлечение гексафторида урана в отвал составляет 99,5%. Изменение потока питания по ступеням имеет характерную форму с максимумом в ступени подачи питания. Суммарный поток питания равен 39 г/с. Концентрация $^{232}, ^{233}, ^{234}\text{U}$ резко возрастает к отбору каскада. Наиболее существен рост концентрации ^{234}U , которая в отборе составляет 83,63%. Зависимость концентрации ^{235}U от номера ступени характеризуется наличием максимума 94,59% в отвале 46-й ступени (рис. 3, а). Его содержание в отборе уменьшается до 16,37%, что объясняется замещением в обогащательной части каскада ^{234}U . Зависимость



Р и с. 3. Концентрация ^{235}U (а), ^{236}U (б) в отвале ступеней второго каскада схемы

концентрации ^{236}U от номера ступени отмечает-ся небольшим максимумом 1,78% на 11-й ступени (см. рис. 3, б).

Отвал каскада можно разбавить отвальным гексафторидом урана природного происхождения. Для примера в табл. 3 приведены расчеты с разбавителем концентрацией ^{235}U 0,3% и ^{234}U $1,5 \cdot 10^{-3}\%$. При разбавлении до концентрации

Т а б л и ц а 3. Параметры каскада для очистки регенерированного гексафторида урана от $^{232}, ^{234}\text{U}$ и разбавления до концентрации ^{235}U 4,4 и 0,85%

Параметр	UF ₆ , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
Разделение в каскаде $n = 130, f = 31, \sum L = 39$ г/с						
Питание	3,371	$4,45 \cdot 10^{-6}$	$8,9 \cdot 10^{-6}$	0,472	19,5	1,347
Отбор	$1,61 \cdot 10^{-2}$	$9,31 \cdot 10^{-4}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	83,63	16,37	$1,67 \cdot 10^{-5}$
Отвал	3,355	$6,13 \cdot 10^{-10}$	$4,11 \cdot 10^{-8}$	$7,31 \cdot 10^{-2}$	19,52	1,353
Разбавление отвала № 1						
Разбавитель	12,369	—	—	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,3	—
Продукт	15,725	$1,31 \cdot 10^{-10}$	$8,78 \cdot 10^{-9}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	4,4	0,289
Разбавление отвала № 2						
Разбавитель	113,87	—	—	$1,5 \cdot 10^{-3}$	0,3	—
Продукт	117,22	$1,75 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	0,85	$3,87 \cdot 10^{-2}$
Разбавление отвала № 3						
Разбавитель	13,748	—	—	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,711	—
Продукт	17,103	$1,2 \cdot 10^{-10}$	$8,07 \cdot 10^{-9}$	$1,86 \cdot 10^{-2}$	4,4	0,265
Разбавление отвала № 4						
Разбавитель	450,55	—	—	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,711	—
Продукт	453,9	$4,53 \cdot 10^{-12}$	$3,04 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	0,85	0,01

^{235}U 4,4% содержание $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ существенно ниже, чем при прямом обогащении регенерированного гексафторида урана. Концентрация $^{232}, ^{234}\text{U}$ удовлетворяет с большим запасом требованиям спецификации ASTM C996—20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Концентрация ^{236}U в 5 раз меньше, чем в табл. 1, и составляет 0,289%. Однако указанные требования по концентрации не выполняются. Аналогичные результаты характеризуют разбавление природным гексафторидом урана с концентрацией ^{235}U 0,711% и ^{234}U $5,4 \cdot 10^{-3}\%$ (см. табл. 3). В этом случае есть небольшие отличия концентрации $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$. Содержание ^{236}U немного меньше и равно 0,265%. Очистку регенерированного гексафторида урана от ^{236}U можно улучшить путем разбавления отвала каскада до исходной концентрации ^{235}U 0,85% с последующим обогащением в третьем каскаде (см. табл. 3).

Высокоактивный отбор второго каскада схемы необходимо также разбавлять до ядерно безопасной смеси с концентрацией ^{235}U менее 1%. Для этой цели целесообразно использовать отвальный гексафторид урана с низкой концентрацией ^{235}U из первого каскада схемы. После разбавления такой продукт можно отправить на длительное хранение.

Обогащение разбавленного регенерированного гексафторида урана. В табл. 4 приведены расчеты вариантов третьего каскада схемы. Каскады рассчитывали по методике [10]. Первый вариант соответствует обогащению до

концентрации ^{235}U 4,4% продукта разбавления отвальным гексафторидом урана из табл. 3. Расчеты проводили аналогично первому примеру из табл. 1. Число ступеней каскада 22, номер ступени подачи питания 13. Начальная концентрация изотопов в ступенях и коэффициент σ_i соответствовали R-каскаду с ключевыми $^{235}, ^{238}\text{U}$. Суммарный поток питания составил 388 г/с. Концентрация $^{232}, ^{234}\text{U}$ в отборе мало изменилась по сравнению с разбавлением отвала второго каскада схемы до концентрации ^{235}U 4,4%. Содержание ^{236}U снизилось до 0,157%.

Более эффективным является второй вариант, соответствующий обогащению продукта разбавления природным гексафторидом урана. При таких же задаваемых конструктивных параметрах и коэффициенте σ_i в отборе каскада концентрация ^{236}U составляет $4,06 \cdot 10^{-2}\%$, что почти удовлетворяет требованиям спецификации ASTM C996—20 для обогащенного промышленного гексафторида урана. Особенностью этого варианта является большой суммарный поток питания 1501 г/с. Это объясняется потоком питания 453,9 т/год, в 4,5 раза превышающим исходный регенерированный гексафторид урана. Такой поток образовался из 450,55 т/год разбавителя природным сырьем.

Третий вариант каскада также характеризует обогащение продукта разбавления природным гексафторидом урана. Параметры рассчитывали аналогично первым каскадам схемы. Число ступеней каскада 39, номер ступени по-

Таблица 4. Параметры каскадов для обогащения разбавленного регенерированного гексафторида урана до концентрации ^{235}U 4,4%

Параметр	UF ₆ , т/год	^{232}U , %	^{233}U , %	^{234}U , %	^{235}U , %	^{236}U , %
$n = 22, f = 13, \sum L = 388 \text{ г/с}$						
Питание	117,22	$1,75 \cdot 10^{-11}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$	$3,55 \cdot 10^{-3}$	0,85	$3,87 \cdot 10^{-2}$
Отбор	20,446	$1 \cdot 10^{-10}$	$6,71 \cdot 10^{-9}$	$1,98 \cdot 10^{-2}$	4,4	0,157
Отвал	96,775	$3,15 \cdot 10^{-14}$	$8,07 \cdot 10^{-12}$	$1,11 \cdot 10^{-4}$	0,1	$1,37 \cdot 10^{-2}$
$n = 22, f = 13, \sum L = 1501 \text{ г/с}$						
Питание	453,9	$4,53 \cdot 10^{-12}$	$3,04 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	0,85	0,01
Отбор	79,17	$2,59 \cdot 10^{-11}$	$1,73 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	4,4	$4,06 \cdot 10^{-2}$
Отвал	374,73	$8 \cdot 10^{-15}$	$2,32 \cdot 10^{-12}$	$1,85 \cdot 10^{-4}$	0,1	$3,54 \cdot 10^{-3}$
$n = 39, f = 36, \sum L = 4693 \text{ г/с}$						
Питание	453,9	$4,53 \cdot 10^{-12}$	$3,04 \cdot 10^{-10}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$	0,85	0,01
Отбор	77,27	$2,66 \cdot 10^{-11}$	$1,79 \cdot 10^{-9}$	$3,46 \cdot 10^{-2}$	4,4	0,025
Отвал	376,63	$< 10^{-15}$	$1,7 \cdot 10^{-14}$	$2,02 \cdot 10^{-5}$	0,122	$6,92 \cdot 10^{-3}$

дачи питания 36. Начальный коэффициент σ_i задавали 0,5 для ступеней с 1-й по 8-ю, 0,75 для остальных. При оптимизации на заданную концентрацию ^{235}U 4,4% варьировали коэффициент σ_i по ступеням в диапазоне $0,6 \leq \sigma_i \leq 1,35$ и ограничивали изменение концентрации ^{235}U в отвале от 0,05 до 0,25%. Суммарный поток питания оптимизированного каскада больше в 3 раза, чем каскада второго варианта. Результатом расчетов является удовлетворение требований спецификации ASTM C996—20 для обогащенного промышленного гексафторида урана по всем четным изотопам.

Из 450,55 т/год природного гексафторида урана можно произвести 62,03 т/год продукта, обогащенного до 4,4% по ^{235}U , при концентрации отвала 0,122%. В аналогичном варианте трехкаскадной схемы, использующей такой же гексафторид урана при разбавлении, образуется 77,27 т/год в отборе. Следовательно, эта схема позволяет дополнительно путем переработки 100 т/год регенерированного урана получить 15,24 т/год обогащенного промышленного гексафторида урана. Для производства аналогичного продукта потребовалось бы 110,69 т/год природного гексафторида урана.

Заключение. Трехкаскадная схема существенно снижает концентрацию $^{232}, ^{234}, ^{236}\text{U}$ в обогащенном регенерированном уране. При разбавлении природным гексафторидом урана очищенного отвала второго каскада можно полностью удовлетворить для совокупного продукта требования ASTM C996—20, установленные для обогащенного промышленного гексафторида урана.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Водолазских В.В., Козлов В.А., Мазин В.И. и др.** Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2282904 от 27.08.2006. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2006, № 24, с. 549—550.
2. **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.
3. **Мазин В.И., Водолазских В.В., Журин В.А. и др.** Способ изотопного восстановления регенерированного урана. Пат. РФ № 2497210 от 27.10.2013. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2013, № 30, с. 714—715.
4. **Палкин В.А.** Разделение изотопов урана в каскаде с промежуточным отбором. — Перспективные материалы, 2010, № 8, с. 11—14.
5. **Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А.** Обогащение регенерированного урана с одновременным разбавлением ^{232} — ^{236}U природным сырьем и отвальным ураном. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 1, с. 36—41. // **Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A.** Enrichment of Regenerated Uranium with Simultaneous Dilution of ^{232} — ^{236}U by Raw and Waste Uranium. — Atomic Energy, 2014, v. 117, № 1, p. 44—51.
6. **Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Дудников А.А., Невиница В.А.** Обогащение регенерированного урана в каскаде газовых центрифуг с одновременным разбавлением ^{232} — ^{236}U отвальным и низкообогащенным ураном. — Там же, 2017, т. 125, вып. 5, с. 287—290. // **Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Dudnikov A.A., Nevinitsa V.A.** Enrichment of Regenerated Uranium in a Gas Centrifuge Cascade with Simultaneous Dilution of ^{232} — ^{236}U by Waste and Low-Enrichment Uranium. — Ibid., 2017, v. 122, № 5, p. 353—357.
7. **Smirnov A.Yu., Gusev V.E., Sulaberidze G.A., Nevinitsa 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. **Палкин В.А.** Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 2, с. 101—105. // **Palkin V.A.** Multistream Cascades for Separation of Multicomponent Isotopic Mixtures. — Atomic Energy, 2015, v. 119, № 2, p. 125—131.
10. **Палкин В.А., Сбитнев Н.А., Фролов Е.С.** Расчет оптимальных параметров каскада для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Там же, 2002, т. 92, вып. 2, с. 130—133. // **Palkin V.A., Sbitnev N.A., Frolov E.S.** Calculation of the Optimal Parameters of a Cascade for Separating a Multicomponent Mixture of Isotopes. — Ibid., 2002, v. 92, № 2, p. 141—146.
11. **Hooke R., Jeeves T.A.** Direct Search Solution of Numerical and Statistical Problems. — J. Ass. Comput. Mach., 1961, № 8, p. 212—229.
12. **Сазыкин А.А.** Термодинамический подход к разделению изотопов. — В кн.: Изотопы: свойства, получение, применение. Под ред. В.Ю. Баранова. М.: ИздАТ, 2000, с. 72—108.

Поступила в Редакцию 09.06.22