

сточные воды спецпрачечных, относящиеся к категории низкоактивных отходов. Таких вод при работе АЭС образуется до 30% всего объема жидких отходов, и они вносят основной вклад в поступление балластных солей в захораниваемые вторичные твердые отходы;

дезактивационные растворы, которые содержат большое количество солей и комплексонов, препятствующих удалению из жидких отходов ^{137}Cs и ^{60}Co ;

регенераты ионообменных фильтров. Они составляют не более 5% общего количества образующихся на АЭС жидких отходов, но в их составе также содержится большое количество радионуклидов и солей, поступающих в дальнейшем на выпарные системы.

Создание автономных систем переработки и кондиционирования жидких отходов является наиболее актуальным для АЭС с ВВЭР-1200. Переход к реакторам нового поколения требует и новых подходов к обращению с ними.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Рябчиков Б.Е.** Очистка жидких радиоактивных отходов. М.: ДеЛи Принт, 2008. 516 с.
2. **Сорокин В.Т.** Обоснование безопасности захоронения солевого плава, образующегося на установках глубокого упаривания АЭС. — Радиоактивные отходы, 2019, № 2, с. 1—9.
3. **Стахов М.Р.** Обращение с РАО на АЭС. — В сб.: Координационный научно-технич. совет по обращению с РАО и ВЭ. М., ВНИИАЭС, 2014, с. 7—23.
4. **Пензин Р.А., Беляков В.Н., Гелис В.М., Милютин В.В.** Технология переработки жидких радиоактивных отходов с помощью селективных неорганических сорбентов. Тезисы докл. Межд. научного семинара «Атомная энергетика на море: экология и безопасность». Мурманск, 24—28 сентября 1990 г. М., ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1991, с. 355.
5. **Куликов К.Н., Михеев А.А., Бааль Э.П. и др.** Переработка РАО на ФГУП «ГМП “Звездочка”». — В сб.: 4-я Межд. конф. «Радиационная безопасность: экология—атомная энергия». Санкт-Петербург, 24—28 сентября 2001 г. СПб., 2001, с. 158—162.
6. **Омельчук В.В., Стахов М.Р., Савкин А.Е. и др.** Разработка технологии и переработка кубовых остатков на Кольской АЭС. — Атомная энергия, 2007, т. 103, вып. 3, с. 34—37.
7. **Status and Trends in Spent Fuel and Radioactive Waste Management.** Nuclear Energy Ser. Vienna: IAEA, 2022. 88 p.
8. **Об установлении тарифов на захоронение радиоактивных отходов классов 1, 2, 3, 4, 6 на период 2018—2022 годы и тарифов на захоронение радиоактивных отходов класса 5 на 2018 год.** Приказ ФАС № 1812/17 от 28.12.2017.
9. **Абалкина И.Л.** Опыт захоронения ОНАО: перспективы для России. — Радиоактивные отходы, 2018, № 4(5), с. 15—23.
10. **Ильясов С.В., Иванов А.Ю., Кузнецова Е.О. и др.** Сравнительный анализ стоимости операций по обращению с РАО на российском и международном рынках. — Там же, 2020, № 4(13), с. 14—20.
11. **Обеспечение радиационной безопасности при обращении с промышленными отходами атомных станций, содержащих техногенные радионуклиды (СП 2.6.62572—2010).** Утв. приказом Главного государственного санитарного врача РФ от 18 января 2010 г. № 4.
12. **Палатова С.В.** Исследования в области дезактивации материалов и оборудования при эксплуатации и выводе из эксплуатации АЭС. — Атомная техника за рубежом, 2018, № 3, с. 16—30.
13. **Пензин Р.А., Милютин В.В., Демин А.В.** Способ очистки жидких радиоактивных отходов и установка для его осуществления. Патент РФ № 2697824, МПК G 21F 9/08. Заявл. 14.09.2018, опубл. 22.08.2019.
14. **Лебедев Н.М., Арефьева А.Н., Васильев А.П. и др.** Универсальный промышленный комплекс для дезактивации металлических радиоактивных отходов с использованием ультразвука и электрохимии. — В сб.: IV Межд. научно-технич. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики» (МНТК НИКИЭТ-2016). М., АО «НИКИЭТ», 27—30 сентября 2016 г., с. 33—41.

Поступила в Редакцию 4.06.21

УДК 621.039.31

КОНЦЕНТРИРОВАНИЕ ИЗОТОПОВ ТЕЛЛУРА ПО МНОГОЭТАПНОЙ СХЕМЕ В ОРДИНАРНОМ КАСКАДЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

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

e-mail: profp2004@mail.ru

Получение высококонцентрированных изотопов химических элементов предполагает решение расчетно-теоретических задач, учитывающих их особенности. Особое место занимают

элементы, имеющие изотопы с малой распространенностью в природе. К ним относится теллур, имеющий восемь изотопов, у пяти из которых природная концентрация не превышает не-

сколько процентов. Изотоп ^{123}Te востребован в медицине в связи с производством из него ^{123}I . Природное содержание ^{123}Te составляет всего 0,908%, поэтому его концентрирование связано с большими сложностями. Для получения радиоизотопов иода $^{123}, ^{125m}, ^{131}\text{I}$ можно также использовать $^{122}, ^{124}, ^{130}\text{Te}$. Остальные изотопы теллура представляют интерес в рамках ядерно-физических и других исследований. В связи с этим возникает задача эффективного концентрирования всех изотопов теллура в каскадах газовых центрифуг.

Целевой изотоп с наибольшим или наименьшим массовым числом можно обогатить до высокой концентрации в ординарном (трехпоточном) каскаде за один этап разделения. Для этого необходимы длинный каскад и соответствующее рабочее вещество. При малой исходной концентрации изотопы обогащаются в несколько этапов разделения. Для компонентов с промежуточной массой длинный каскад не обеспечивает высокое содержание из-за предельных ограничений. Однако промежуточный изотоп можно концентрировать в дополнительном отборе одиночного каскада путем создания специального режима увеличения его содержания [1, 2]. Также можно концентрировать одновременно два промежуточных компонента в двух дополнительных отборах каскада [3, 4]. При малом содержании промежуточного изотопа в питании его концентрация в дополнительных отборах не будет высокой. Другим недостатком является недостаточно высокая степень извлечения из сырья. Поэтому эффективней использовать многоэтапную наработку концентрированного изотопа.

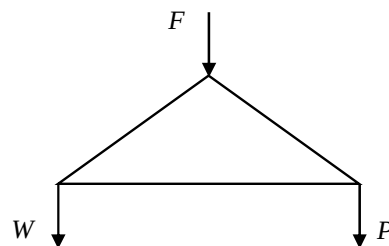
Процесс разделения изотопов с разным массовым числом может быть реализован в системе взаимосвязанных каскадов, каждый из которых заменяет отдельный этап разделения. Путем оптимизации параметров систем прямоугольных каскадов при разделении четырех- и пятикомпонентной смеси выявлена возможность концентрирования промежуточных изотопов до 95—99% [5]. Сравнение двойного каскада со способом концентрирования промежуточного изотопа в дополнительном отборе показало его заметные преимущества [6]. Он также эффективнее ординарного каскада при получении смеси изотопов молибдена с улучшенными свойствами для ядерной энергетики [7, 8]. Од-

нако использование систем каскадов не соответствует практике разделения стабильных изотопов. Выбор, как правило, ограничен одиночными каскадами газовых центрифуг.

Целью настоящей работы являлось определение эффективной многоэтапной схемы концентрирования всех изотопов теллура в одном ординарном каскаде с заданным числом газовых центрифуг в ступенях. Исследования проведены путем вычислительного эксперимента с модельными характеристиками газовых центрифуг при разделении смеси гексафторида теллура. Расчеты выполнены по методике, учитывающей зависимость коэффициентов разделения ступеней от потока питания и коэффициента деления потока [8]. Это позволяет определять наиболее эффективные параметры газовых центрифуг, повышающие концентрацию изотопов в выходящих потоках каскада. Основу методики составляют соотношения расчета индивидуальных срезов парциальных потоков по ступеням [3]. Определены особенности получения высококонцентрированных изотопов теллура с разной атомной массой.

Особенности методики расчетов. Рассчитывали несколько вариантов многоэтапного концентрирования всех изотопов теллура. В каждом варианте рассматривали один ординарный каскад с фиксированным числом ступеней, распределением газовых центрифуг по ступеням и номером ступени подачи питания. Ординарный каскад имеет потоки питания F , отбора P и отвала W (рис. 1). В отборах ступеней и каскада обогащается самый легкий изотоп ^{120}Te , в отвалах тяжелый ^{130}Te . Концентрация промежуточных изотопов теллура в выходящих потоках зависит от принятых параметров ступеней.

Концентрацию изотопов в питании каскада на первом этапе разделения принимали природной, %: ^{120}Te 0,096, ^{122}Te 2,6, ^{123}Te 0,908, ^{124}Te 4,82, ^{125}Te 7,14, ^{126}Te 18,95, ^{128}Te 31,69,



Р и с. 1. Схема ординарного каскада (F , P , W — потоки питания, отбора и отвала)

^{130}Te 33,8. Содержание изотопов в потоке питания каскада на других этапах задавали в зависимости от полученного на предыдущих этапах. Так как фтор имеет один стабильный изотоп, разделение смеси гексафторида теллура характеризовало распределение изотопов теллура. Параметры ступеней каскада рассчитывали по срезам парциальных потоков компонентов, которые определяли в зависимости от рассматриваемого варианта и этапа разделения.

Целью каждого этапа являлось разделение смеси на две части с преимущественным попаданием более тяжелых изотопов в отвал и легких в отбор. Например, параметры разделения на первом этапе определяли таким образом, чтобы в отвал попали $^{128}, ^{130}\text{Te}$, в отбор $^{120-126}\text{Te}$ с минимальным взаимным перекрытием. На втором этапе отбор первого этапа разделяли на части с преимущественным выделением $^{125}, ^{126}\text{Te}$ в новый отвал и $^{120-124}\text{Te}$ в отбор. Такая схема разделения обусловлена целесообразностью поэтапного обогащения в отборе каскада легких изотопов с малой природной концентрацией. Следующие этапы рассчитывали с аналогичным разделением получаемых отборов и отвалов до концентрирования отдельных изотопов.

Срезы парциальных потоков ступеней, необходимые для заданного разделения изотопов, определяли по выбранному коэффициенту σ [8]. Он представляет собой отношение коэффициента обогащения компонентов по отвалу и отбору и не зависит от рассматриваемого изотопа. Коэффициент σ задавали разным по ступеням отвальной и отборной частей каскада. На последних этапах разделения коэффициент σ выбирали в зависимости от задаваемой конечной концентрации, близкой к максимально возможной. При этом степень извлечения изотопов по отношению к первоначальному содержанию на питании первого этапа должна была быть не меньше 85%.

Особенностью методики [8] является итерационная сшивка задаваемых в начале расчетов и определяемых при завершении вычислений коэффициентов разделения ступеней. Это связано с тем, что в расчетной схеме невозможно выделить все независимые параметры, по которым можно последовательно вычислить остальные переменные каскада. Для сходимости итерационного процесса в начале каждого следующего

расчета задавали новые коэффициенты разделения ступеней как линейную комбинацию заданных и рассчитанных на предыдущей итерации. Расчеты проводили при погрешности итерационной сходимости 10^{-8} для коэффициентов разделения ступеней.

Зависимость полного коэффициента разделения ^{124}Te относительно ^{130}Te от потока питания газовой центрифуги l_i и коэффициента деления потока θ_i i -й ступени принимали в виде

$$q_i = \exp(a_0 + a_1\theta_i - a_2\theta_i^2 - a_3 \ln l_i),$$

где $a_0 = 1,2$, $a_1 = 1,2$, $a_2 = 1,2$, $a_3 = 0,2$ — константы, выбранные с учетом потока питания газовой центрифуги, мг/с. Эта зависимость характеризуется увеличением коэффициента разделения с уменьшением потока питания газовой центрифуги и приближением коэффициента деления потока к 0,5. Коэффициенты разделения других изотопов относительно ^{130}Te рассчитывали, исходя из коэффициента q_i и разницы массового числа.

Концентрирование изотопов теллура в каскаде с двумя типами ступеней по числу газовых центрифуг. В табл. 1 приведено расчетное содержание изотопов теллура на восьми этапах разделения в каскаде с числом ступеней 80 при подаче питания в 50-ю ступень. Ступени пронумерованы от отвала каскада к отбору. Число газовых центрифуг равно четырем в ступенях с 21-й по 60-ю и двум в остальных ступенях. Суммарное число газовых центрифуг составляет 240. Поток питания каскада на всех этапах разделения гексафторида теллура равен 4 мг/с. Расчеты проведены для каждого этапа при выбранном коэффициенте σ_1 для ступеней с 1-й по 50-ю и σ_2 для с 51-й по 80-ю. На рис. 2 представлена схема использования отвалов и отборов каскада на разных этапах разделения.

На первых трех этапах в отвалах каскада последовательно концентрируются пары изотопов $^{128}, ^{130}\text{Te}$, $^{125}, ^{126}\text{Te}$ и $^{123}, ^{124}\text{Te}$. Их концентрация в соответствующих потоках существенно превышает содержание других изотопов. Так, в отвале каскада на первом этапе концентрация $^{128}, ^{130}\text{Te}$ составляет 48,39 и 51,61% соответственно, других изотопов не более $3 \cdot 10^{-3}\%$. Еще выше содержание ^{126}Te на втором этапе — 72,11%, ^{124}Te на третьем — 82,44%. Это позво-

Т а б л и ц а 1. Содержание изотопов теллура в потоках каскада с двумя типами ступеней при потоке питания 4 мг/с, %

Параметр	^{120}Te	^{122}Te	^{123}Te	^{124}Te	^{125}Te	^{126}Te	^{128}Te	^{130}Te
Разделение природного TeF_6 , $\sigma_1 = 0,7$, $\sigma_2 = 0,49$								
Питание	0,096	2,6	0,908	4,82	7,14	18,95	31,69	33,8
Отвал 1	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	48,39	51,61
Отбор 1	0,28	7,53	2,63	13,97	20,69	54,9	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$
Разделение отбора 1, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,32$								
Отвал 2	$<1 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$3,6 \cdot 10^{-5}$	0,86	27,02	72,11	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$
Отбор 2	1,17	31,56	11,02	55,77	0,47	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 2, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,2481$								
Отвал 3	$5,6 \cdot 10^{-8}$	0,95	15,9	82,44	0,7	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 3	3,6	95,57	0,82	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 3, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,258$								
Отвал 4	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-4}$	2,01	97,16	0,83	$5,6 \cdot 10^{-3}$	$3,7 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 4	$3,5 \cdot 10^{-7}$	6,02	90	3,98	$1 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 3, $\sigma_1 = 0,41$, $\sigma_2 = 0,19$								
Отвал 5	$1,2 \cdot 10^{-4}$	99,04	0,95	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,9 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 5	25,46	74,53	$4,1 \cdot 10^{-3}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 5, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,1553$								
Отвал 6	0,27	99,72	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-7}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 6	99,98	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,8 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 2, $\sigma_1 = 0,62$, $\sigma_2 = 0,418$								
Отвал 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-4}$	3,59	96,4	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-7}$
Отбор 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	3,32	94,3	2,37	$4 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 1, $\sigma_1 = 0,88$, $\sigma_2 = 0,76$								
Отвал 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-3}$	99,99
Отбор 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	99,95	$5 \cdot 10^{-2}$

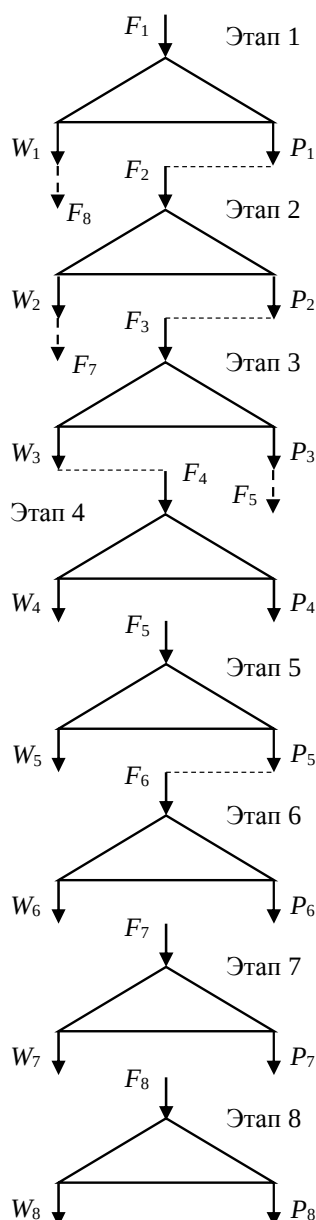
ляет достичь высокую концентрацию перечисленных изотопов на последующих этапах.

На четвертом этапе рассматривали разделение отвала третьего этапа, который характеризуется наибольшим содержанием изотопов ^{122} , ^{125}Te , затрудняющих обогащение ^{123} , ^{124}Te . Концентрация ^{123}Te в отборе и ^{124}Te в отвале составляет 90 и 97,16% соответственно, степень извлечения — 87,2 и 94,59%. Для концентрирования ^{123} , ^{124}Te необходимо накопить достаточное количество отвалов третьего этапа для потока питания 4 мг/с. Еще в большей мере это затрагивает обогащение ^{120} , ^{122}Te . На третьем этапе в отборе каскада рассчитывается высокая концентрация ^{122}Te 95,57%. Однако содержание самого легкого изотопа ^{120}Te остается невысоким — 3,6%. Для его повышения требуется провести пятый и шестой этапы разделения. В результате концентрация ^{120}Te в отборе каскада на шестом этапе равна 99,98% при степени извлечения 99,21%. Изотоп ^{122}Te отбирается с содер-

жанием более 99% на пятом и шестом этапах разделения со степенью извлечения 97,96%.

На седьмом и восьмом этапах рассматривали концентрирование четырех тяжелых изотопов из отвалов первого и второго этапов. При их разделении в отборах и отвалах наибольшее содержание имеют ^{128} , ^{130}Te : 99,95 и 99,99% соответственно при степени извлечения более 99,9%. Концентрация ^{125} , ^{126}Te меньше: 94,3 и 96,4% при степени извлечения 89,64 и 99,14% соответственно.

Изменение потока питания по ступеням каскада одинаково для разных этапов разделения. Наибольший поток имеет ступень подачи питания каскада, наименьший — концевые ступени. Число газовых центрифуг изменяется по каскаду ступенчато с наибольшим в середине каскада. В результате минимальный поток питания газовой центрифуги имеют первая и последняя ступени, максимальный рассчитывается в ступени подачи питания. Это определяет зависимость коэффициентов разделения от номера



Р и с. 2. Схема этапов разделения каскада (F_i , P_i , W_i — потоки питания, отбора и отвала i -го этапа разделения)

ступени. Для концевых ступеней коэффициенты разделения наибольшие, для ступени в точке питания наименьшие. Для первого этапа разделения природного гексафторида теллура средний по ступеням поток питания равен 61,1 мг/с, коэффициент разделения потока 0,49, коэффициент разделения q 2,66. Разброс параметра q составляет от 1,97 на 50-й ступени до 4,31 на 80-й. Другие этапы разделения характеризуются большими потоками и меньшими коэффициентами разделения.

Концентрирование изотопов теллура в каскаде газовых центрифуг с разным потоком питания. Эффективность концентрирова-

ния промежуточных изотопов можно повысить в заданной конфигурации каскада посредством уменьшения потока питания. В этом случае возрастают коэффициенты разделения газовых центрифуг, что приводит к большей концентрации промежуточных изотопов. В табл. 2 приведено содержание изотопов теллура в аналогичном каскаде газовых центрифуг, как в табл. 1. В отличие от него на отдельных этапах разделения гексафторида теллура поток питания задавали равным 2 мг/с.

Первый этап разделения с концентрированием $^{128}, ^{130}\text{Te}$ в отвале соответствует табл. 1 при потоке питания 4 мг/с. Аналогичный поток рассмотрен на восьмом этапе при разделении отвала первого этапа. В результате достигается такая же концентрация $^{128}, ^{130}\text{Te}$: 99,95 и 99,99% соответственно. При обогащении $^{125}, ^{126}\text{Te}$ на втором и седьмом этапах поток питания каскада задавали равным 2 мг/с. Это позволяет увеличить концентрацию ^{125}Te до 97,2% в отборе и ^{126}Te до 99,02% в отвале седьмого этапа, степень извлечения до 97,14 и 99,3% соответственно.

Уменьшение потока питания каскада на третьем и четвертом этапах меняет порядок концентрирования $^{123}, ^{124}\text{Te}$. Высокая концентрация ^{124}Te 99,07% при степени извлечения 98,19% достигается в отвале каскада на третьем этапе. Изотоп ^{123}Te , имеющий заметно меньшее содержание в исходной природной смеси, концентрируется слабее. Его содержание в отвале каскада на четвертом этапе составляет 95,06%, степень извлечения 93,69%. Повышение концентрации $^{123}, ^{124}\text{Te}$ сопровождается некоторым снижением содержания ^{122}Te в отвалах каскада на пятом и шестом этапах, проводимых при потоке питания 4 мг/с. Средняя концентрация этого изотопа по обоим отвалам равна 98,71% при увеличении степени извлечения до 99,02%. Концентрация ^{120}Te в отборе каскада на шестом этапе составляет, как и в табл. 1, 99,98% при степени извлечения 99,32%.

При потоке питания каскада 2 мг/с потоки ступеней меньше, коэффициенты разделения выше, чем для 4 мг/с. Так, для каскада на втором этапе средний поток питания ступени составляет 49 мг/с, коэффициент разделения q 2,95. При потоке питания 4 мг/с соответствующие параметры примера из табл. 1 равны 59 мг/с и 2,72.

Таблица 2. Содержание изотопов теллура в потоках каскада с двумя типами ступеней при разных потоках питания F , %

Параметр	^{120}Te	^{122}Te	^{123}Te	^{124}Te	^{125}Te	^{126}Te	^{128}Te	^{130}Te
Разделение природного TeF_6 , $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,7$, $\sigma_2 = 0,49$								
Питание	0,096	2,6	0,908	4,82	7,14	18,95	31,69	33,8
Отвал 1	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$8,6 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	48,39	51,61
Отбор 1	0,28	7,53	2,63	13,97	20,69	54,9	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-8}$
Разделение отбора 1, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,2775$								
Отвал 2	$<1 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	0,26	27,24	72,49	$5,5 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-8}$
Отбор 2	1,15	31,04	10,84	56,73	0,24	$5 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 2, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,245$								
Отвал 3	$6,8 \cdot 10^{-12}$	$3,6 \cdot 10^{-4}$	0,51	99,07	0,42	$8,8 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 3	2,67	72,25	24,56	0,52	$2,3 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 3, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,2585$								
Отвал 4	$1,2 \cdot 10^{-7}$	2,85	95,06	2,09	$9,3 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 4	3,55	95,22	1,23	$6,2 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 4, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,42$, $\sigma_2 = 0,2$								
Отвал 5	$1,1 \cdot 10^{-4}$	98,53	1,47	$7,4 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 5	21,38	78,61	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 5, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,1466$								
Отвал 6	0,18	99,81	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 6	99,98	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 2, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,605$, $\sigma_2 = 0,376$								
Отвал 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	0,97	99,02	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-7}$
Отбор 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$9,6 \cdot 10^{-9}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	0,96	97,2	1,84	$5 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 1, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,88$, $\sigma_2 = 0,76$								
Отвал 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-3}$	99,99
Отбор 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$2,6 \cdot 10^{-11}$	$1,8 \cdot 10^{-7}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	99,95	$5 \cdot 10^{-2}$

Концентрирование изотопов теллура в каскаде с тремя типами ступеней по числу газовых центрифуг. Эффективность концентрирования изотопов зависит от конфигурации каскада. В более длинных каскадах при большем числе типов ступеней по числу газовых центрифуг можно получить лучшие характеристики. В табл. 3 приведено расчетное содержание изотопов теллура в каскаде с числом ступеней 90 при подаче питания в 55-ю ступень. Этот каскад имеет суммарное число газовых центрифуг, аналогичное приведенным каскадам в табл. 1, 2. Число газовых центрифуг равно четырем в ступенях с 26-й по 65-ю, двум в ступенях с 11-й по 25-ю и с 66-й по 80-ю и одному в остальных ступенях. Поток питания каскада на всех этапах задавали так же, как в табл. 2. Расчеты проведены для каждого этапа при выбранном коэффициенте σ_1 для ступеней с 1-й по 55-ю и σ_2 для ступеней с 56-й по 90-ю.

Характеристики процессов разделения улучшаются при почти таких же коэффициентах разделения ступеней, как в примерах табл. 2. Изотопы концентрируются в аналогичных потоках. Для всех изотопов теллура достигается концентрация более 98—99%. У изотопов с крайним массовым числом $^{120,130}\text{Te}$ она составляет 99,99% со степенью извлечения, превышающей 99,9%. Для $^{124,126,128}\text{Te}$ характерно содержание более 99% с такой же высокой степенью извлечения. Их концентрация равна 99,28, 99,34 и 99,98% соответственно. Для $^{123,125}\text{Te}$ концентрация возрастает по сравнению с приведенной в табл. 2 до 98,4% при степени извлечения 93,02 и 98,08% соответственно. Концентрация ^{122}Te в среднем по отвалам на пятом и шестом этапах разделения немного уменьшается — 98,45% при увеличении степени разделения до 99,73%.

Заключение. Разработанный метод позволяет эффективно концентрировать изотопы теллура с разным массовым числом в каскаде с за-

Таблица 3. Содержание изотопов теллура в потоках каскада с тремя типами ступеней при разных потоках питания F , %

Параметр	^{120}Te	^{122}Te	^{123}Te	^{124}Te	^{125}Te	^{126}Te	^{128}Te	^{130}Te
Разделение природного TeF_6 , $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,75$, $\sigma_2 = 0,515$								
Питание	0,096	2,6	0,908	4,82	7,14	18,95	31,69	33,8
Отвал 1	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1,1 \cdot 10^{-11}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	48,39	51,61
Отбор 1	0,28	7,53	2,63	13,97	20,69	54,9	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-8}$
Разделение отбора 1, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,3004$								
Отвал 2	$<1 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$1,1 \cdot 10^{-6}$	0,14	27,3	72,56	$2,4 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$
Отбор 2	1,14	30,95	10,81	56,95	0,14	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 2, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,268$								
Отвал 3	$1,1 \cdot 10^{-12}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,47	99,28	0,25	$2,2 \cdot 10^{-4}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 3	2,68	72,46	24,68	0,19	$2,6 \cdot 10^{-7}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 3, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,47$, $\sigma_2 = 0,289$								
Отвал 4	$1 \cdot 10^{-8}$	0,82	98,4	0,78	$1,1 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 4	3,52	95	1,49	$9,3 \cdot 10^{-6}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 4, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,43$, $\sigma_2 = 0,22$								
Отвал 5	$6,5 \cdot 10^{-5}$	98,23	1,77	$1,1 \cdot 10^{-5}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 5	22,21	77,79	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$4,9 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отбора 5, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,46$, $\sigma_2 = 0,1715$								
Отвал 6	$2,4 \cdot 10^{-2}$	99,98	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$6,2 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Отбор 6	99,99	$9,8 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-10}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 2, $F = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0,6$, $\sigma_2 = 0,4$								
Отвал 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$6,1 \cdot 10^{-6}$	0,66	99,34	$3,3 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-8}$
Отбор 7	$<1 \cdot 10^{-12}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-6}$	0,5	98,39	1,1	$4 \cdot 10^{-11}$	$<1 \cdot 10^{-12}$
Разделение отвала 1, $F = 4$ мг/с, $\sigma_1 = 0,88$, $\sigma_2 = 0,765$								
Отвал 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	99,99
Отбор 8	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$<1 \cdot 10^{-12}$	$2,4 \cdot 10^{-11}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	99,98	$1,6 \cdot 10^{-2}$

данным числом газовых центрифуг в ступенях. Это достигается в длинных каскадах, при выборе индивидуального отношения коэффициента обогащения ступеней, большом числе типов ступеней по числу газовых центрифуг и малых потоках питания каскада.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д. Влияние профиля потока питания ступеней каскада на массоперенос промежуточных компонентов — Теор. основы хим. технол., 2010, т. 44, № 6, с. 672—680. // Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Borisevich V.D. Influence of Feed Flow Profile of Cascade Stages on the Mass Transfer of Intermediate Components. — Theor. Found. Chem. Engng, 2010, v. 44, № 6, p. 888—896.
2. Zeng S., Jiang D., Zhang Y. e.a. Enhancing the performance of Q-cascade for separating intermediate components. — J. Phys.: Conf. Ser., 2016, v. 751, 012004.
3. 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.
4. Фомин Д.Н., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Мустафин А.Р. Каскады с расширением потока для одновременного концентрирования промежуточных компонентов. — Там же, 2019, т. 126, вып. 5, с. 264—268. // Fomin D.N., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Mustafin A.R. Cascades with Flow Expansion for Simultaneous Concentration of Intermediate Components. — Ibid., 2019, v. 126, № 5, p. 300—304.
5. Azizov T.E., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Mustafin A.R. Optimization of a system of square cascades for efficient concentration of intermediate isotopes. — J. Phys.: Conf. Ser., 2020, v. 1696, 012010.
6. Azizov T.E., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Comparison of the efficiency of square cascades with an additional product flow and double cascades to concentrate intermediate isotopes. — Ibid., 2022, v. 2147, 012006.
7. Шмелев А.Н., Смирнов А.Ю., Бонарев А.К. и др. Изотопомодифицированный молибден для безопасной ядерной энергетики. — Теор. основы хим. технол., 2016, т. 50, № 6, с. 663—672. // Shmelev A.N., Smirnov A.Yu., Bonarev A.K. e.a. Isotopically Modified Molybdenum for Safe Nuclear Power. — Theor. Found. Chem. Engng, 2016, v. 50, № 6, p. 1049—1057.

8. Палкин В.А. Получение изотопомодифицированного молибдена в ординарных и двойных каскадах газовых центрифуг. — Инж.-физ. журн., 2021, т. 94, № 4, с. 855—862. // Palkin V.A. Obtaining Isotopically Modi-

fied Molybdenum in Ordinary and Double Cascades of Gas Centrifuges. — J. Engng Phys. Termoph., 2021, v. 94, № 4, p. 829—836.

Поступила в Редакцию 31.01.22

УДК 539.172.8.15

ИЗМЕРЕНИЕ ВЫХОДА РАДИОИЗОТОПОВ ПРОТАКТИНИЯ $^{230,232,233}\text{Pa}$ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ МИШЕНЕЙ ИЗ ThO_2 ЯДРАМИ ^1H И ^3He

Смирнов А.А., Герман М.Н., Загрядский В.А., Маковеева К.А., Маламут Т.Ю.,
Новиков В.И., Унежев В.Н. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)
e-mail: alexandersmirnov601@gmail.com

Терапия онкологических заболеваний с применением α -эмиттеров является одним из наиболее перспективных направлений ядерной медицины. В большинстве случаев в качестве α -эмиттеров рассматриваются такие радионуклиды, как ^{211}At , $^{212,213}\text{Bi}$, ^{225}Ac , ^{223}Ra . Сложность и высокая стоимость их получения стимулируют поиск новых удобных и эффективных α -эмиттеров. В частности, для иммунотерапии предлагается использовать ^{230}U .

^{230}U ($T_{1/2}$ 20,8 сут) претерпевает каскад распадов с излучением пяти α -частиц до долгоживущего ^{210}Pb по цепочке $^{230}\text{U}(T_{1/2} 20,8 \text{ сут}) \rightarrow ^{226}\text{Th}(T_{1/2} 30,9 \text{ мин}) \rightarrow ^{222}\text{Ra}(T_{1/2} 38 \text{ с}) \rightarrow ^{218}\text{Rn}(T_{1/2} 0,035 \text{ с}) \rightarrow ^{214}\text{Po}(T_{1/2} 1,6 \cdot 10^{-4} \text{ с}) \rightarrow ^{210}\text{Pb}(T_{1/2} 22,3 \text{ года})$. Общая энергия α -частиц в пяти распадах составляет около 33,5 МэВ. Для длительных терапевтических процедур может быть использован непосредственно долгоживущий α -эмиттер ^{230}U . Для ограниченных во времени процедур может быть применен дочерний α -эмиттер ^{226}Th , извлекаемый из изотопного генератора $^{230}\text{U}/^{226}\text{Th}$. Обычно ^{230}U получают генераторным способом при распаде предшественника $^{230}\text{Pa}(T_{1/2} 17,4 \text{ сут}) \rightarrow ^{230}\text{U}(T_{1/2} 20,8 \text{ сут})$. На циклотроне У-150 НИЦ «Курчатовский институт» ^{230}Pa может быть получен путем облучения мишени с природным торием ядрами ^1H и ^3He . Экспериментальные данные о выходе ^{230}Pa в реакциях тория с ускоренными ядрами ^1H и ^3He отсутствуют. Для их получения и уточнения эффективности ядерных реакций, приводящих к получению ^{230}Pa , был измерен выход ^{230}Pa и сопутствующих $^{232,233}\text{Pa}$ путем облучения толстых мишеней из ThO_2 ядрами ^1H и ^3He . Экспериментальный выход сопоставлялся с расчет-

ным с использованием ядерных данных библиотеки TENDL-2019 [1].

Экспериментальная методика. Выход $^{230,232,233}\text{Pa}$ определяли с помощью активационной методики. Мишени в форме дисков диаметром 8, толщиной от 3 до 9 мм из порошка ThO_2 упаковывали в мишенные устройства, имеющие на входе пучка окна из алюминиевой фольги толщиной 40 мкм. Мишенные устройства устанавливали в камеру циклотрона У-150 и облучали ядрами ^1H и ^3He током $\sim 0,15$ мкА до достижения суммарного заряда $\sim 0,3$ мкА·ч. Мишени имели насыпную плотность 2,15—2,6 г/см³, определяемую взвешиванием. Энергия ядер ^1H и ^3He на входе в мишень из ThO_2 составляла 55, 65, 32 и 28 МэВ соответственно, пробег, рассчитанный по программе SRIM, укладывался в толщину мишеней, которая составляла 3,5, 3,1, 9 и 6 мм [2]. Во время облучения с помощью специального интегрирующего прибора регистрировали суммарный заряд ядер, падающих на облучаемые мишени. Энергия ускоренных ядер задавалась параметрами циклотрона.

После облучения и выдержки определяли активность радиоизотопов протактиния в мишенях по пику полного поглощения γ -квантов: ^{230}Pa по линии $E_\gamma = 951,88$ кэВ ($K_\gamma = 29,6\%$), ^{232}Pa по линии $E_\gamma = 894,35$ кэВ ($K_\gamma = 19,6\%$), ^{233}Pa по линии $E_\gamma = 311,9$ кэВ ($K_\gamma = 38,2\%$) [3—5]. Измерения проводили с помощью гамма-спектрометра с детектором из сверхчистого германия фирмы ORTEC (США). Мишени во время измерений устанавливали на расстоянии 6—40 см над поверхностью детектора в зависимости от загрузки спектрометра. «Мертвое» время при измерениях не превышало 5%. Энергетическую