

УДК 621.039.31

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ИЗОТОПОВ КСЕНОНА ПО МНОГОЭТАПНОЙ СХЕМЕ В ОРДИНАРНОМ КАСКАДЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

© 2022 г. В. А. Палкин^а, С. С. Лубнин^{а, *}

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

*e-mail: stepalubnin@gmail.com

Поступила в редакцию 26.02.2022 г.

После доработки 14.06.2022 г.

Принята к публикации 16.06.2022 г.

Рассмотрены особенности многоэтапного концентрирования стабильных изотопов ксенона в каскаде с заданным числом газовых центрифуг в ступенях. Проведен вычислительный эксперимент по разделению ксенона в каскаде газовых центрифуг. Использована методика расчета по срезам парциальных потоков ступеней, учитывающая зависимость их коэффициентов разделения от потока питания и коэффициента деления потока. Определены параметры каскада и ступеней, обеспечивающие получение высококонцентрированных изотопов ксенона с разными массовыми числами по девятиэтапной схеме разделения.

Ключевые слова: газовая центрифуга, многокомпонентное разделение, стабильные изотопы, разделительный каскад

DOI: 10.31857/S0040357122050141

ВВЕДЕНИЕ

Стабильные изотопы широко используются в научных исследованиях, медицине, астрономии, лазерной технике, металлургии и других технических приложениях. Поэтому актуальным является решение расчетно-теоретических задач по их эффективному обогащению до высоких концентраций [1, 2]. Особенно это важно для химических элементов, имеющих большое число изотопов с малой распространенностью в природе. К таким элементам относится ксенон с девятью изотопами, среди которых четыре с природным содержанием от доли процента до нескольких процентов. Изотоп ^{124}Xe востребован в медицине в связи с производством из него радионуклидов $^{123}, ^{125}\text{I}$ [3]. Изотоп ^{126}Xe используется в химико-физических исследованиях и при получении радиоизотопа ^{128}Ba [3]. Природная концентрация этих изотопов самая малая и составляет 0.10 и 0.09% соответственно. Другие изотопы ксенона находят применение в спектроскопических исследованиях и характеризуются более высоким содержанием от 1.91% ^{128}Xe до 26.9% ^{132}Xe [3]. В связи с этим возникает задача эффективного концентрирования стабильных изотопов ксенона в каскадах газовых центрифуг.

Для получения высоких концентраций изотопов с наибольшим и наименьшим массовыми числами можно использовать ординарный (трехпоточный) каскад. Если их концентрации малы в исходной изотопной смеси, то обогащение выполняется в несколько этапов. Обогащение изотопов с промежуточными массовыми числами в таком каскаде ограничено предельными значениями, что затрудняет получение высоких концентраций. Данная проблема может быть решена выбором режимов работы ступеней, которые обеспечивают увеличение концентрации промежуточного изотопа на внутренних ступенях каскада, и организацией дополнительного отбора из соответствующей ступени [4, 5]. Аналогичным образом можно одновременно обогащать два промежуточных изотопа в каскаде с двумя дополнительными отборами [6, 7]. При малом содержании целевых изотопов с промежуточными массовыми числами в исходной смеси, концентрация в дополнительных отборах будет невысокой. В совокупности с недостаточной высокой степенью извлечения из сырья применение многопоточного каскада не подходит для получения высококонцентрированных изотопов ксенона.

Другим подходом к разделению многокомпонентной смеси является многоэтапное разделение исходной смеси в системе взаимосвязанных

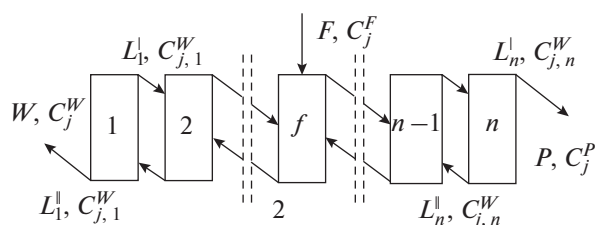


Рис. 1. Схема ординарного каскада: F, P, W – потоки питания, отбора легкой и тяжелой фракции; C_j^F, C_j^P, C_j^W – массовые концентрации j -го изотопа в потоках

питания, отбора легкой и тяжелой фракции; L_i^l, L_i^w – потоки отбора легкой и тяжелой фракции i -й ступени; $C_{j,i}^l, C_{j,i}^w$ – массовые концентрации j -го изотопа в потоках отбора легкой и тяжелой фракции i -й ступени; $1, 2, \dots, n$ – номера ступеней.

каскадов. Рассмотрение разделения четырех- и пятикомпонентных изотопных смесей показало возможность получения высоких концентраций компонентов с промежуточными массовыми числами в системе прямоугольных каскадов [8]. Такая схема получения промежуточных компонентов эффективнее ординарного каскада [9, 10] и получения целевых изотопов в схеме с дополнительными отборами [11]. На практике для получения стабильных изотопов системы каскадов не используются. Обычно, каждый этап проводится в отдельном ординарном каскаде, в отборах легкой или тяжелой фракции которого нарабатывается продукт для следующего этапа.

Настоящая работа посвящена определению эффективной схемы многоэтапной наработки всех стабильных изотопов ксенона с использованием одного ординарного каскада газовых центрифуг. Вычислительный эксперимент был проведен с использованием методики [10], учитывающей зависимость коэффициента разделения модельной газовой центрифуги от коэффициента деления потока и потока питания. В основе метода расчета каскада лежат соотношения для срезов парциальных потоков ступеней [6]. В данной работе рассмотрены особенности многоэтапной схемы концентрирования изотопов ксенона до 98–99%.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Параметры и уравнения ординарного каскада. На рис. 1 приведена схема ординарного каскада с тремя внешними потоками: F – питания, W – отбора тяжелой фракции, P – отбора легкой фракции. Каскад состоит из n ступеней, соединенных по противоточной симметричной схеме. В отборах легкой фракции ступеней и каскада обогаща-

ется самый легкий изотоп ^{124}Xe , в отборах тяжелой фракции ^{136}Xe . Промежуточные изотопы ксенона имеют концентрацию в выходящих потоках в зависимости от принятых параметров ступеней. На схеме обозначены концентрации j -го изотопа в соответствующих внешних потоках – C_j^F, C_j^W, C_j^P . При условии отсутствия потерь внешние параметры удовлетворяют уравнениям баланса вещества и каждого компонента в каскаде

$$F = W + P, \quad FC_j^F = WC_j^W + PC_j^P, \quad j = \overline{1,9}.$$

Аналогичные уравнения справедливы для внутренних параметров каскада, к которым относятся потоки питания, отборов тяжелой и легкой фракций ступеней – L_i, L_i^l, L_i^w и соответствующие концентрации изотопов – $C_{j,i}, C_{j,i}^l, C_{j,i}^w$, $i = \overline{1,n}, j = \overline{1,9}$. Каждая ступень питается потоками отбора легкой и тяжелой фракций соседних ступеней. Ступень f имеет дополнительный внешний поток питания. На основании этого можно также записать уравнения баланса вещества и изотопов для межступенных потоков.

Разделительные характеристики ступеней задаются полными коэффициентами разделения $q_{j,i}$. Изотопы можно пронумеровать в порядке возрастания массового числа. Тогда, принимая в качестве опорного тяжелый изотоп ^{136}Xe , получим связь коэффициентов разделения с концентрациями

$$q_{j,i} = \frac{C_{j,i}^l C_{9,i}^w}{C_{j,i}^w C_{9,i}^l}, \quad j = \overline{1,9}, \quad i = \overline{1,n}.$$

Для газовых центрифуг характерна зависимость коэффициентов разделения от потока питания $l_i = L_i/N_i$ и коэффициента деления потока $\theta_i = L_i^l/L_i$, $i = \overline{1,n}$. Здесь N_i – число газовых центрифуг в i -й ступени. В настоящей работе принимали указанную зависимость для полного коэффициента разделения ^{129}Xe относительно ^{136}Xe в виде

$$q_{4,i} = \exp(a_0 + a_1\theta_i - a_2\theta_i^2 - a_3 \ln l_i),$$

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 ^{136}Xe рассчитывали по формуле

$$q_{j,i} = (q_{4,i})^{\Delta M_{j9}/\Delta M_{49}},$$

где разницы массовых чисел равны $\Delta M_{j9} = M_9 - M_j$, $\Delta M_{49} = M_9 - M_4$.

Внешние и внутренние параметры каскада связаны также граничными условиями

$$W = L_1'', \quad P = L_n', \quad C_j^W = C_{j,1}'', \quad C_j^P = C_{j,n}', \quad j = \overline{1,9}.$$

Покомпонентная сумма концентраций в каждом потоке равна единице. С учетом уравнений баланса, граничных условий и принятых разделительных характеристик общее число независимых параметров каскада равно $2n + 11$.

Расчет параметров ординарного каскада. В расчетах задавали число ступеней n , номер ступени подачи питания каскада f , число газовых центрифуг N_i , $i = \overline{1,n}$, поток питания F и концентрации компонентов в питании C_j^F , $j = \overline{1,9}$. Число оставшихся независимых параметров составляет n переменных. В качестве них целесообразно выбрать коэффициенты σ_i , $i = \overline{1,n}$, представляющие собой отношения коэффициентов обогащения компонентов в отборе тяжелой и легкой фракций ступеней. Эти параметры не зависят от рассматриваемого компонента.

Расчетная схема методики [10] для каскада, схема которого приведена на рис. 1, позволяет определить последовательно все параметры ординарного каскада при заданных коэффициентах разделения ступеней. Вместе с тем, коэффициенты разделения должны удовлетворять принятым зависимостям q_{4i} от l_i и θ_i . В связи с этим необходимо организовать внешнюю итерационную процедуру сшивки задаваемых и рассчитываемых коэффициентов разделения. 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 q_{4i} .

На каждом шаге итераций рассчитывали ($j = \overline{1,9}$, $i = \overline{1,n}$):

1. Срезы парциальных потоков

$$\varphi_{j,i} = \sigma_i q_{j,i} / (1 + \sigma_i q_{j,i}).$$

2. Парциальные потоки компонентов $W_j = WC_j^W$ в отборе тяжелой фракции каскада

$$W_j = FC_j^F A_j / B_j,$$

где коэффициенты A_j и B_j равны

$$A_j = 1 + \sum_{k=f+1}^n \prod_{i=k}^n \frac{\varphi_{j,i}}{1 - \varphi_{j,i}}, \quad B_j = 1 + \sum_{k=1}^n \prod_{i=k}^n \frac{\varphi_{j,i}}{1 - \varphi_{j,i}}.$$

3. Внешние параметры каскада

$$P_j = FC_j^F - W_j, \quad W = \sum_{j=1}^9 W_j, \quad P = \sum_{j=1}^9 P_j, \\ C_j^W = W_j / W, \quad C_j^P = P_j / P.$$

4. Транзитные потоки j -го компонента в сечении перед i -й ступенью

$$W_{j,i} = WC_j^W, \quad i \leq f, \quad W_{j,i} = WC_j^W - FC_j^F, \quad i > f.$$

5. Парциальные потоки отбора тяжелой фракции ступеней $L_{j,i}''$, отбора легкой фракции ступеней $L_{j,i}'$ и питания $L_{j,i}$ ($L_{j,0} = 0$) из определения срезов и соотношений для транзитных потоков

$$\varphi_{j,i} = L_{j,i}' / L_{j,i}, \quad 1 - \varphi_{j,i} = L_{j,i}'' / L_{j,i}, \\ L_{j,i}'' - L_{j,i-1}' = W_{j,i}.$$

6. Потоки питания, отборов легкой и тяжелой фракций ступеней

$$L_i = \sum_{j=1}^9 L_{j,i}, \quad L_i' = \sum_{j=1}^9 L_{j,i}', \quad L_i'' = \sum_{j=1}^9 L_{j,i}''.$$

7. Концентрации компонентов в потоках

$$C_{j,i} = L_{j,i} / L_i, \quad C_{j,i}' = L_{j,i}' / L_i', \quad C_{j,i}'' = L_{j,i}'' / L_i''.$$

ОСОБЕННОСТИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Рассчитывали несколько вариантов девяти-этапного концентрирования стабильных изотопов ксенона. На рис. 2 представлена схема использования отборов легкой и тяжелой фракций каскада на разных этапах разделения. В каждом варианте рассматривали один ординарный каскад с фиксированным числом ступеней, распределением газовых центрифуг по ступеням и номером ступени подачи питания. Концентрацию изотопов в питании каскада на первом этапе разделения принимали природной, %: ^{124}Xe 0.10, ^{126}Xe 0.09, ^{128}Xe 1.91, ^{129}Xe 26.4, ^{130}Xe 4.1, ^{131}Xe 21.2, ^{132}Xe 26.9, ^{134}Xe 10.4, ^{136}Xe 8.9. Концентрации изотопов в потоке питания каскада на других этапах задавали в зависимости от полученных результатов на предыдущих этапах. 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 отбор тяжелой фракции и легких в отбор легкой фракции. Так, параметры разделения на первом этапе определяли таким образом, чтобы в отбор тяжелой фракции попали изотопы 134 , ^{136}Xe , в отбор легкой

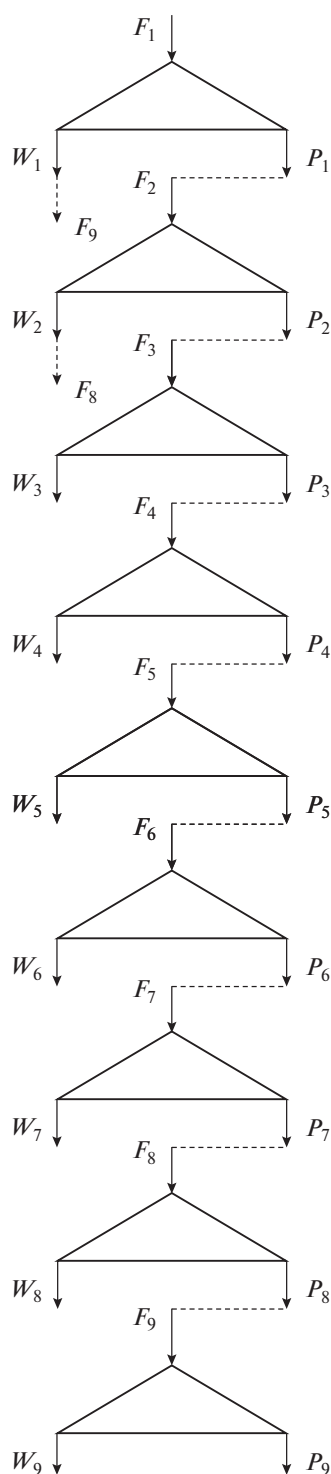


Рис. 2. Схема этапов разделения каскада: F_i , P_i , W_i – потоки питания, отбора легкой и тяжелой фракции i -го этапа разделения.

фракции $^{124-132}\text{Xe}$ с минимальным взаимным перекрытием. На втором этапе отбор легкой фракции первого этапа разделяли на части с преимущественным выделением $^{131, 132}\text{Xe}$ в отбор тяжелой

и $^{124-130}\text{Xe}$ в отбор легкой фракции. Такая схема разделения обусловлена целесообразностью поэтапного обогащения в отборе легкой фракции каскада легких изотопов, имеющих малую природную концентрацию. Расчет следующих этапов проводили с аналогичным разделением получаемых отборов легкой и тяжелой фракций до концентрирования отдельных изотопов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1 приведены расчетные концентрации высококонцентрированных изотопов ксенона в выходящих потоках каскадов с суммарным числом газовых центрифуг равным 240. Рассмотрено четыре варианта каскадов. Во всех вариантах концентрированные ^{130}Xe и ^{128}Xe получаются в отборе тяжелой фракции третьего и шестого этапов соответственно. Концентрированный ^{129}Xe отбирается в отвалах четвертого и пятого этапов. Эти два этапа введены для постепенного повышения концентраций $^{124, 126}\text{Xe}$ в отборах легкой фракции. На седьмом этапе концентрируются $^{124, 126}\text{Xe}$ в отборе легкой и тяжелой фракции соответственно, на восьмом аналогично $^{131, 132}\text{Xe}$, на девятом $^{134, 136}\text{Xe}$. Для каждого этапа в рассмотренных вариантах выбирали индивидуальные коэффициенты σ_1 для ступеней с 1-й по f -ю и σ_2 с $(f + 1)$ -й по n -ю.

В первом варианте разделения изотопов каскад имеет число ступеней 80 при подаче питания в 50-ю ступень. Ступени пронумерованы от отвала каскада к отбору. В каскаде два типа ступеней. Число газовых центрифуг равно четырем в ступенях с 21-ю по 60-ю и двум в остальных ступенях. Поток питания каскада на всех этапах разделения ксенона равен 4 мг/с. Наибольшие концентрации имеют изотопы с крайними массовыми числами $^{124, 136}\text{Xe}$: 99.73, 99.90% соответственно. Степень их извлечения по отношению к первоначальной концентрации в природном сырье также высока и составляет более 99.7%. Концентрация 99.79% рассчитывается для ^{134}Xe при соответствующей степени извлечения. Остальные изотопы характеризуются заметно меньшими концентрациями от 88.91% для ^{130}Xe до 96.43% ^{128}Xe . При этом степень извлечения $^{128, 130}\text{Xe}$ наименьшая – 69.9 и 69.3% соответственно.

Эффективность разделения изотопов можно повысить уменьшением потока питания каскада и соответствующим увеличением коэффициентов разделения ступеней. Во втором варианте рассматривали аналогичный каскад, как и в первом варианте, но поток питания задавали равным 3 мг/с на первом, шестом и седьмом этапах и 2 мг/с на остальных. Концентрации всех изотопов увеличились и составили от 95.09% ^{130}Xe до 99.98% ^{136}Xe . Концентрацию более 99% имеют

Таблица 1. Содержание высококонцентрированных изотопов ксенона в выходящих потоках каскада, %

Вариант	¹²⁴ Xe	¹²⁶ Xe	¹²⁸ Xe	¹²⁹ Xe	¹³⁰ Xe	¹³¹ Xe	¹³² Xe	¹³⁴ Xe	¹³⁶ Xe
1	99.73	95.09	96.43	94.90	88.91	92.12	95.68	99.79	99.90
2	99.89	99.10	97.00	97.02	95.09	96.60	97.02	99.91	99.98
3	99.87	99.82	97.60	97.66	97.24	97.51	98.03	99.97	99.98
4	99.91	99.94	98.51	98.52	98.01	98.13	98.13	99.99	99.99

Таблица 2. Концентрации изотопов ксенона в потоках каскада при числе ступеней 100 и подаче питания в 60-ю ступень (этапы 1–3), %

Изотоп	¹²⁴ Xe	¹²⁶ Xe	¹²⁸ Xe	¹²⁹ Xe	¹³⁰ Xe	¹³¹ Xe	¹³² Xe	¹³⁴ Xe	¹³⁶ Xe
Этап 1, $F_1 = 3$ мг/с, $\sigma_1 = 0.7$, $\sigma_2 = 0.6159$									
C_j^F	0.10	0.09	1.91	26.4	4.1	21.2	26.9	10.4	8.9
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	3.5×10^{-8}	1.9×10^{-3}	53.88	46.11
C_j^P	0.12	0.11	2.37	32.71	5.08	26.27	33.33	8.6×10^{-4}	3.8×10^{-8}
Этап 2, $F_2 = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0.47$, $\sigma_2 = 0.3943$									
C_j^F	0.12	0.11	2.37	32.71	5.08	26.27	33.33	8.6×10^{-4}	3.8×10^{-8}
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	3.3×10^{-10}	4.1×10^{-5}	0.16	43.94	55.90	1.4×10^{-3}	6.3×10^{-8}
C_j^P	0.31	0.28	5.86	81.04	12.35	0.17	2.2×10^{-4}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
Этап 3, $F_3 = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0.477$, $\sigma_2 = 0.4421$									
C_j^F	0.31	0.28	5.86	81.04	12.35	0.17	2.2×10^{-4}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	5.4×10^{-6}	0.56	98.01	1.43	1.9×10^{-3}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^P	0.35	0.31	6.63	91.53	1.18	4.0×10^{-5}	4.3×10^{-10}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$

также ¹²⁴, ¹²⁶, ¹³⁴Xe: 99.89, 99.10 и 99.91% соответственно. Возросла и степень извлечения, наименьшая составляет 82.5% для ¹³⁰Xe. Еще лучшие результаты рассчитываются для третьего варианта каскада, в котором он имеет 90 ступеней при подаче питания в 55-ю ступень. В каскаде три типа ступеней. Число газовых центрифуг равно четырем с 26-й по 65-ю ступень, двум с 11-й по 25-ю и с 66-й по 80-ю ступень и одному в остальных ступенях. Потоки питания каскада на всех этапах заданы такие же, как во втором варианте. Расчетная концентрация изотопов ¹²⁴, ¹²⁶, ¹³⁴, ¹³⁶Xe составляет 99.87, 99.82, 99.98, 99.97% соответственно. Концентрации остальных изотопов находятся в пределах от 97.24% ¹³⁰Xe до 98.03 ¹³²Xe.

Дальнейшее увеличение числа ступеней при сохранении суммарного числа газовых центрифуг обеспечивает концентрацию изотопов ксенона в пределах от 98 до 99.99%. В четвертом варианте рассматривали каскад с числом ступеней 100 при подаче питания в 60-ю ступень. Число газовых центрифуг равно четырем с 31-й по 70-ю ступень, двум с 21-й по 30-ю и с 71-й по 80-ю ступень и од-

ному в остальных ступенях. В табл. 2–4 приведены результаты расчетов каждого этапа разделения изотопов в этом каскаде. Потоки питания каскада заданы такие же, как в третьем варианте. Концентрации ¹²⁴, ¹²⁶, ¹³⁴, ¹³⁶Xe в отборах легкой и тяжелой фракций седьмого и девятого этапов равна 99.91, 99.94, 99.99 и 99.99% соответственно. Наименьшую концентрацию среди остальных концентрированных изотопов имеет ¹³⁰Xe в отборе тяжелой фракции третьего этапа – 98.01%. Степень его извлечения 89.8%. Концентрации ¹²⁸, ¹²⁹, ¹³¹, ¹³²Xe превышают 98% в отборных потоках легкой и тяжелой фракций шестого, четвертого, пятого и восьмого этапов. Степень их извлечения составляет 97% и более.

Изотопы ксенона концентрируются при характерных зависимостях изменения потока питания L и коэффициента разделения q_4 по ступеням. На рис. 3, 4 приведены соответствующие графики, полученные для первого этапа четвертого варианта каскада. Наибольший поток имеет ступень подачи питания каскада, наименьший концевые ступени. Число газовых центрифуг изменяется по

Таблица 3. Концентрации изотопов ксенона в потоках каскада при числе ступеней 100 и подаче питания в 60-ю ступень (этапы 4–6), %

Изотоп	^{124}Xe	^{126}Xe	^{128}Xe	^{129}Xe	^{130}Xe	^{131}Xe	^{132}Xe	^{134}Xe	^{136}Xe
Этап 4, $F_4 = 3$ мг/с, $\sigma_1 = 0.53$, $\sigma_2 = 0.288$									
C_j^F	0.35	0.31	6.63	91.53	1.18	4.0×10^{-5}	4.3×10^{-10}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	8.9×10^{-9}	7.0×10^{-2}	98.55	1.38	4.7×10^{-5}	5.1×10^{-10}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^P	2.45	2.20	46.27	49.08	8.2×10^{-4}	4.2×10^{-11}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
Этап 5, $F_5 = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0.46$, $\sigma_2 = 0.3396$									
C_j^F	2.45	2.20	46.27	49.08	8.2×10^{-4}	4.2×10^{-11}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	2.3×10^{-8}	2.00	98.00	1.7×10^{-3}	5.7×10^{-11}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^P	4.83	4.35	89.47	1.35	6.9×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
Этап 6, $F_6 = 3$ мг/с, $\sigma_1 = 0.54$, $\sigma_2 = 0.158$									
C_j^F	4.83	4.35	89.47	1.35	6.9×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^W	3.4×10^{-8}	4.2×10^{-3}	98.51	1.49	7.6×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^P	52.65	47.34	9.6×10^{-3}	2.3×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$

Таблица 4. Концентрации изотопов ксенона в потоках каскада при числе ступеней 100 и подаче питания в 60-ю ступень (этапы 7–9), %

Изотоп	^{124}Xe	^{126}Xe	^{128}Xe	^{129}Xe	^{130}Xe	^{131}Xe	^{132}Xe	^{134}Xe	^{136}Xe
Этап 7, $F_7 = 3$ мг/с, $\sigma_1 = 0.45$, $\sigma_2 = 0.217$									
C_j^F	52.65	47.34	9.6×10^{-3}	2.3×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^W	3.6×10^{-2}	99.94	2.0×10^{-2}	4.8×10^{-8}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
C_j^P	99.91	8.6×10^{-2}	1.8×10^{-10}	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$
Этап 8, $F_8 = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0.65$, $\sigma_2 = 0.5151$									
C_j^F	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	3.3×10^{-10}	4.1×10^{-5}	0.16	43.94	55.90	1.4×10^{-3}	6.3×10^{-8}
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	2.6×10^{-6}	1.87	98.13	2.6×10^{-3}	1.1×10^{-7}
C_j^P	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	7.5×10^{-10}	9.4×10^{-5}	0.36	98.13	1.51	4.5×10^{-10}	$<1 \times 10^{-12}$
Этап 9, $F_9 = 2$ мг/с, $\sigma_1 = 0.85$, $\sigma_2 = 0.7974$									
C_j^F	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	3.5×10^{-8}	1.9×10^{-3}	53.88	46.11
C_j^W	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	1.4×10^{-2}	99.99
C_j^P	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	$<1 \times 10^{-12}$	6.5×10^{-8}	3.5×10^{-3}	99.99	1.1×10^{-2}

каскаду ступенчато с наибольшими значениями 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 ступени. Для конечных ступеней коэффициенты разделения наибольшие, для ступени в точке питания наименьшие. Для первого этапа разделения средний по ступеням поток питания

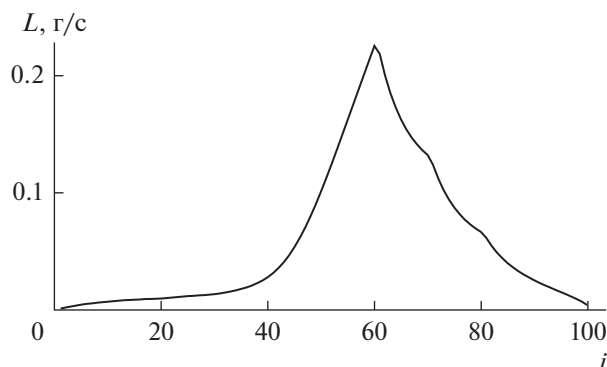


Рис. 3. Распределение потоков питания L по ступеням каскада.

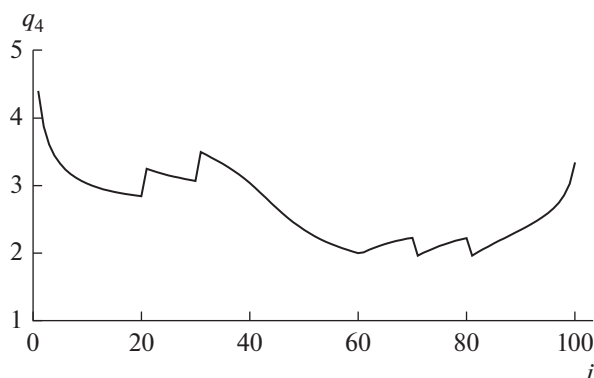


Рис. 4. Распределение коэффициентов разделения q_4 по ступеням каскада.

равен 58.2 мг/с, коэффициент разделения q_4 – 2.66. Разброс параметра q_4 составляет от 2.00 на 60-й ступени до 4.4 на 1-й.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный метод позволяет эффективно концентрировать изотопы ксенона с разными атомными массами в каскаде с заданным числом газовых центрифуг в ступенях. Это достигается в длинных каскадах, при выборе индивидуального отношения коэффициентов обогащения ступеней, большом числе типов ступеней и малых потоках питания каскада.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

- C_j^F массовая концентрация j -го изотопа в потоке внешнего питания
- C_j^P массовая концентрация j -го изотопа в потоке отбора легкой фракции каскада

- C_j^W массовая концентрация j -го изотопа в потоке отбора тяжелой фракции каскада
- $C_{j,i}$ массовая концентрация j -го изотопа в потоке питания i -й ступени
- $C'_{j,i}$ массовая концентрация j -го изотопа в потоке отбора легкой фракции i -й ступени
- $C''_{j,i}$ массовая концентрация j -го изотопа в потоке отбора тяжелой фракции i -й ступени
- F поток питания каскада, г/с
- L_i поток питания i -й ступени, г/с
- L'_i поток отбора легкой фракции i -й ступени, г/с
- $L'_{j,i}$ парциальный поток j -го изотопа в отборе легкой фракции i -й ступени, г/с
- L''_i поток отбора тяжелой фракции i -й ступени, г/с
- $L''_{j,i}$ парциальный поток j -го изотопа в отборе тяжелой фракции i -й ступени, г/с
- l_i поток питания газовой центрифуги i -й ступени, мг/с
- M_j массовое число j -го изотопа
- n число ступеней каскада
- N_i число газовых центрифуг i -й ступени
- P поток отбора легкой фракции каскада, г/с
- P_j парциальный поток j -го изотопа в отборе легкой фракции каскада, г/с
- $q_{j,i}$ полный коэффициент разделения j -го изотопа i -й ступени
- W поток отбора тяжелой фракции каскада, г/с
- W_j парциальный поток j -го изотопа в отборе тяжелой фракции каскада, г/с
- $W_{j,i}$ транзитный поток j -го изотопа в сечении перед i -й ступенью, г/с
- θ_i коэффициент деления потока i -й ступени; отношение коэффициентов обогащения изотопов по отборам тяжелой и легкой фракции i -й ступени
- σ_i отношение коэффициентов обогащения изотопов по отборам тяжелой и легкой фракции i -й ступени
- σ_1, σ_2 отношение коэффициентов обогащения изотопов по отборам тяжелой и легкой фракции для ступеней каскада с 1-й по f -ю и σ_2 с $(f+1)$ -й по n -ю
- $\Phi_{j,i}$ срез парциального потока j -го изотопа i -й ступени

ИНДЕКСЫ

- i номер ступени каскада ($i = \overline{1, n}$)
- j номер изотопа ($j = \overline{1, 9}$)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P.* Separation of nickel isotopes during the filling of a cascade of centrifuges with different numbers of stages // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 53. № 2. P. 193. [*Орлов А.А., Ушаков А.А., Совач В.П.* Разделение изотопов никеля в процессе заполнения каскада газовых центрифуг с различным количеством ступеней // *Теор. основы хим. технологии.* 2019. Т. 53. № 2. С. 146.]
2. *Orlov A.A., Ushakov A.A., Sovach V.P.* Change of external flows of a separating cascade to shorten the duration of a transient process // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2019. V. 126. № 5. P. 294. [*Орлов А.А., Ушаков А.А., Совач В.П.* Изменение внешних потоков разделительного каскада для сокращения продолжительности переходного процесса // *Теор. основы хим. технологии.* 2019. Т. 126. № 5. С. 260.]
3. *Изотопы: свойства, получение, применение.* В 2 т. Т. 2 / Под ред. Баранова В.Ю. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005.
4. *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. Eng.* 2010. V. 44. № 6. P. 888. [*Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д.* Влияние профиля потока питания ступеней каскада на массоперенос промежуточных компонентов // *Теор. основы хим. технологии.* 2010. Т. 44. № 6. С. 672.]
5. *Zeng S., Jiang D.J., Zhang Y.N.* Enhancing the performance of Q-cascade for separating intermediate components // *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2016. V. 751. 012004.
6. *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.]
7. *Fomin D.N., Smirnov A. Yu., Sulaberidze G.A., Mustafin A.R.* Cascades with Flow Expansion for Simultaneous Concentration of Intermediate Components // *Atomic Energy.* 2019. V. 126. № 5. P. 300. [*Фомин Д.Н., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А., Мустафин А.Р.* Каскады с расширением потока для одновременного концентрирования промежуточных компонентов // *Атомная энергия.* 2019. Т. 126. № 5. С. 264.]
8. *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.
9. *Shmelev A.N., Smirnov A. Yu., Bonarev A.K., Borisevich V.D., Kulikov G.G., Sulaberidze G.A.* Isotopically modified molybdenum for safe nuclear power // *Theor. Found. Chem. Eng.* 2016. V. 50. № 6. P. 1049. [*Шмелев А.Н., Смирнов А.Ю., Бонарев А.К., Борисевич В.Д., Куликов Г.Г., Сулаберидзе Г.А.* Изотопомодифицированный молибден для безопасной ядерной энергетики // *Теор. основы хим. технологии.* 2016. Т. 50. № 6. С. 663.]
10. *Palkin V.A.* Obtaining Isotopically Modified Molybdenum in Ordinary and Double Cascades of Gas Centrifuges // *J. Eng. Phys. Termoph.* 2021. V. 94. № 4. P. 829. [*Палкин В.А.* Получение изотопомодифицированного молибдена в обычных и двойных каскадах газовых центрифуг // *Инж.-физич. журн.* 2021. Т. 94. № 4. С. 855.]
11. *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 // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2022. V. 2147. 012006.