

раствора и дальнейшего пересчета текущих показаний плотности в показания вязкости, так как при работе оборудования радиохимических производств именно концентрация (плотность) оказывает существенное влияние на вязкость.

Система была испытана в лабораторных испытаниях с условиями, приближенными к производственным. Средняя относительная погрешность измерения расхода азотной кислоты разной концентрации с дистиллированной водой в качестве разделительной среды составила 3,7% в диапазоне 1—50 мл/мин [7].

Разработанная система позволяет измерять малый расход радиоактивных растворов с достаточной точностью и исключением радиоактивного загрязнения прибора в условиях, когда применение других приборов невозможно [8]. При ее использовании можно автоматически дозировать требуемые растворы с заданной точностью, что повысит эффективность ведения технологических процессов путем создания на основе разработанного расходомера систем автоматического дозирования с применением пропорционально-интегрально-дифференцирующего регулятора. Система может применяться в медицинских целях, в том числе в радиофармакологии для точного дозирования препаратов, а также в других отраслях, где необходимо контролировать расход жидкости, не превышающий 50 мл/мин.

Исследование выполнено в рамках федерального проекта «Передовые инженерные

школы», научный проект «Разработка и внедрение алгоритмов и систем автоматизированного управления технологическими процессами», ПИШ-НИР—2023-005.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shadrin A.Y., Ivanov V.B., Skupov M.V. et al. Comparison of closed nuclear fuel cycle technologies. — Atomic Energy, 2016, v. 121, № 2, p. 119—126.
2. Pletnev A.O., Denisevich A.A., Goryunov A.G., Manenti F. Development the device of automatic dispensing low flowrates of aggressive and radioactive liquids. — Chem. Engng Transact., 2018, v. 70, p. 1411—1416. DOI: 10.3303/CET1870236.
3. Солодовников В.В. Измерительные устройства, преобразующие элементы и устройства. М.: Машиностроение, 1973. 671 с.
4. Бирюков Б.В., Данилов М.А., Кивилис С.С. Точные измерения расхода жидкостей. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
5. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. Справочник. Л.: Машиностроение, 1989. 701 с.
6. Мановян А.К., Хачатурова Д.А., Лозин В.В. Лабораторная перегонка и ректификация нефтяных смесей. Учебное пос. М.: Химия, 1984. 239 с.
7. Радкевич Я.М., Схиртладзе А.Г., Лактионов Б.И. Метрология, стандартизация и сертификация. М.: Высшая школа, 2007. 791 с.
8. Сумин Г.В., Денисевич А.А., Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н. Разработка системы измерения малых расходов радиоактивных жидкостей радиохимических производств. — Изв. вузов. Физика, 2021, т. 64, № 2-2, с. 106—112.

Поступила в Редакцию 06.10.23

УДК 621.039.342

РАСЧЕТ КАСКАДА С ОДИНАКОВЫМ ЧИСЛОМ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ В СТУПЕНЯХ И ЗАДАННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ИЗОТОПА В ВЫХОДЯЩИХ ПОТОКАХ

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

e-mail: profp2004@mail.ru

Стабильные изотопы на практике разделяют, как правило, в каскадах с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях. Расчетную схему обычно сводят к прямоугольному каскаду с одинаковыми потоками питания и коэффициентами разделения ступеней. В расчетах задаются параметры исходной изотопной смеси, отношение выходящих потоков, число ступеней и точка подачи питания каскада. Выходными характеристиками являются внутренние парамет-

ры каскада и концентрация изотопов во внешних потоках [1—4].

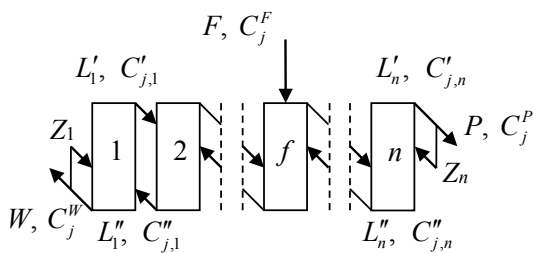
Целью настоящей работы является разработка метода расчета каскада с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях и заданной концентрацией целевого изотопа в выходящих потоках. Основу метода составляют алгоритмы, учитывающие зависимость коэффициентов разделения газовых центрифуг от потока питания и коэффициента деления потока. Рас-

смотрены варианты одинакового потока питания ступеней, который определяется в процессе расчета, и профилированного, рассчитанного по методике [5]. Варианты сравниваются в вычислительном эксперименте по концентрированию ^{70}Ge и ^{76}Ge при разделении тетрафторида германия.

Метод расчета параметров каскада при одинаковом потоке питания ступеней. На рис. 1 показана схема трехпоточного симметричного каскада газовых центрифуг из n ступеней. Внешние потоки обозначены как F — питание, P , W — отбор и отвал, легкая и тяжелая фракция соответственно. Концентрация j -го изотопа в этих потоках — C_j^F, C_j^P, C_j^W соответственно. На схеме также обозначены аналогичные параметры ступеней — L_i, L_i', L_i'' и $C_{j,i}, C_{j,i}', C_{j,i}''$, $i = \overline{1, n}$, $j = \overline{1, m}$, поток закрутки Z_1, Z_n в первую и последнюю ступень.

Схема рассчитывается, исходя из зависимостей коэффициентов разделения ступеней $q_{j,i}$ от потока питания $l_i = L_i/N_i$ газовых центрифуг и коэффициента деления потока $\theta_i = L_i'/L_i$, где N_i — число газовых центрифуг i -й ступени. При расчете также задается число ступеней, точка подачи питания, внешний поток и концентрация компонентов питания, концентрация целевого изотопа в отборе и отвале каскада. В процессе расчета подбирается поток питания ступеней $L_i = L$, обеспечивающий согласование параметров каскада. Решение возможно в определенном диапазоне изменения потока внешнего питания каскада F . Его наибольшее значение соответствует максимальной эффективности разделения при заданной компоновке каскада и концентрации целевого изотопа во внешних потоках.

Расчет выполняется последовательно по ступеням, начиная с отвала каскада в сторону



Р и с. 1. Схема трехпоточного симметричного каскада: 1, 2, f , n — номер ступени

отбора. Задаются начальные приближения потока L и коэффициента деления потока первой ступени θ_1 . Транзитные потоки вещества в сечении перед i -й ступенью определяются как разность $\tau_i = L_{i-1}' - L_i''$, при $2 \leq i \leq n$. Согласно уравнениям баланса $\tau_i = -W$, $i \leq f$ и $\tau_i = P$, $i > f$. Внешние потоки

$$W = F(C_r^P - C_r^F)/(C_r^P - C_r^W);$$

$$P = F(C_r^F - C_r^W)/(C_r^P - C_r^W),$$

где C_r^W, C_r^F, C_r^P — заданная концентрация целевого r -го изотопа с наименьшей или наибольшей массой или промежуточного изотопа при многоэтапной схеме разделения. Отсюда, исходя из уравнений баланса и определения транзитных потоков, находятся потоки

$$L_1'' = L(1 - \theta_1); \quad Z_1 = L_1'' - W; \quad L_i' = L - L_i'', \quad i = \overline{1, n};$$

$$L_j'' = L_{j-1}' - \tau_j, \quad j = \overline{2, n}; \quad Z_n = L_n' - P.$$

По потокам рассчитываются коэффициенты разделения и концентрация изотопов в ступенях согласно соотношениям ($j = \overline{1, m}$)

$$C_{j,i}' = q_{j,i} C_{j,i}'' / \left(1 + \sum_{k=1}^{m-1} (q_{k,i} - 1) C_{k,i}'' \right), \quad i = \overline{1, n};$$

$$C_{j,i}'' = C_{j,i-1}' - (\tau_{j,i} - \tau_i C_{j,i-1}') / L_i'', \quad i = \overline{2, n},$$

где $\tau_{j,i} = -WC_{j,i}^W$, $i \leq f$, $\tau_{j,i} = PC_{j,i}^P$, $i > f$ — транзитный поток j -го изотопа в сечении перед i -й ступенью.

Концентрация r -го компонента в отвале первой ступени определяется из граничного условия $C_{r,1}' = C_r^W$. Концентрация других изотопов $C_{j,1}' = C_j^W$ до начала расчетов неизвестна. Она выбирается ориентировочно из расчета квазиидеального или другого модельного каскада [6]. Критерием корректности задания концентрации, потока L и коэффициента θ_1 является выполнение с выбранной погрешностью граничных условий в отборе каскада $C_{j,n}' = C_j^P$ ($j = \overline{1, m}$). Концентрация C_j^P рассчитывается из баланса компонентов по каскаду. При невыполнении граничных условий необходимо продолжить варьирование переменных $C_{j,1}'$ ($j \neq r$), L и θ_1 . Для этого можно использовать метод Хука—

Дживса [7] или другие оптимизационные алгоритмы.

Результаты расчетов и обсуждение. В вычислительном эксперименте пренебрегали различием мольной и массовой концентрации изотопов. В расчетах рассматривали каскады с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях $N_i = 4$. Концентрация компонентов в питании принята природной, %: ^{70}Ge 20,5, ^{72}Ge 27,4, ^{73}Ge 7,8, ^{74}Ge 36,5, ^{76}Ge 7,8.

Зависимость $q_{3,i} = q_{3,i}(l_i, \theta_i)$ коэффициента разделения ^{73}Ge относительно ^{76}Ge принимали в виде

$$q_{3,i} = \exp(a_0 + a_1\theta_i - a_2\theta_i^2 - a_3 \ln l_i),$$

где $a_0 = 1,5$, $a_1 = 1,5$, $a_2 = 1,5$, $a_3 = 0,3$ при потоке питания газовой центрифуги в мг/с. Коэффициенты разделения других изотопов определяли, исходя из $q_{3,i}$ и соответствующей разности массовых чисел. Каскады с профилированным потоком питания ступеней рассчитывали по методике [5], предусматривающей варьирование срезов парциальных потоков компонентов и получение заданной концентрации целевого изотопа в одном из выходящих потоков. Для этого минимизировали сумму квадратов невязок рассчитываемой и заданной концентрации алгоритмом пчелиной колонии [8].

Расчеты показателей эффективности каскадов и разделительной способности газовых центрифуг проводили с потенциалом разделения [9]

$$V(C_1, C_2, \dots, C_m) = \left(\frac{\Delta M_{rm}}{\Delta M_{rb}} \right)^2 (C_r - C_b) \ln \frac{C_r}{C_b} + \sum_{k=1, k \neq r, b}^m \left(\frac{\Delta M_{rm}}{\Delta M_{rk}} \right)^2 C_k \ln \frac{C_k}{C_r},$$

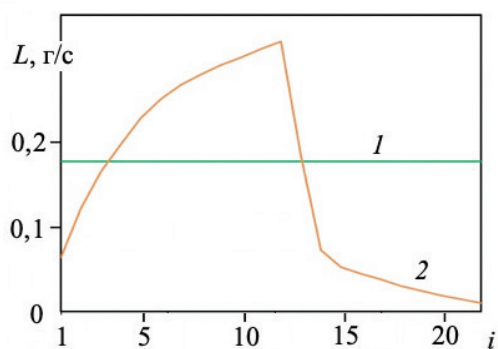
где C_j — концентрация j -го изотопа в рассматриваемом потоке ($j = 1, 2, \dots, m$); r, b — индексы, определяющие пару изотопов, которые требуют наибольшей затраты работы разделения. Разность массовых чисел ΔM_{rm} введена для нормировки. В расчетах при заданной концентрации ^{70}Ge в отборе каскада использовали $r = 1$, $b = 2$, $m = 5$, при концентрировании ^{76}Ge в отвале каскада — $r = 5$, $b = 4$, $m = 1$. Оптимальный поток питания рассматриваемой газовой центрифуги, определяемый максимумом разделительной способности, составляет 70,1 мг/с. Соответствующий коэффициент деления потока равен 0,5, коэффициент разделения ^{96}Mo — 1,82.

В табл. 1 приведены расчеты двух вариантов каскадов с одинаковым потоком питания ступеней. Поток питания каскадов является максимально возможным для заданных параметров. В первом каскаде число ступеней $n = 22$, точка подачи питания $f = 10$. Каскад рассчитан на концентрацию ^{70}Ge в отборе 99% и отвале 2%. Поток питания каскада и ступеней составляет 39,95 и 178 мг/с соответственно. Изменение потока питания, коэффициента деления потока, коэффициента разделения ^{73}Ge по ступеням показано на рис. 2—4. Характерно циклическое изменение коэффициента деления потока с повторением через ступень в диапазоне 0,32—0,54. Это не приводит к существенным изменениям коэффициента разделения ^{73}Ge , который по ступеням равен 1,99 и 2,09.

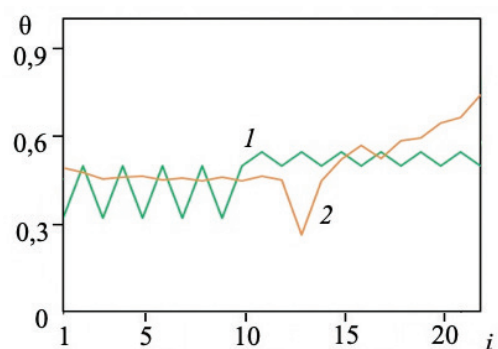
Второй каскад, концентрирующий ^{76}Ge в отвале до 99%, имеет такое же число ступеней. Точка подачи питания сдвинута в сторону отбора на три ступени. Концентрация ^{76}Ge в отборе составляет 1%. Поток питания каскада меньше, чем у первого каскада, и равен 37,42 мг/с. Характеристики ступеней почти не отличаются от первого каскада.

Т а б л и ц а 1. Параметры каскадов с одинаковым потоком питания ступеней

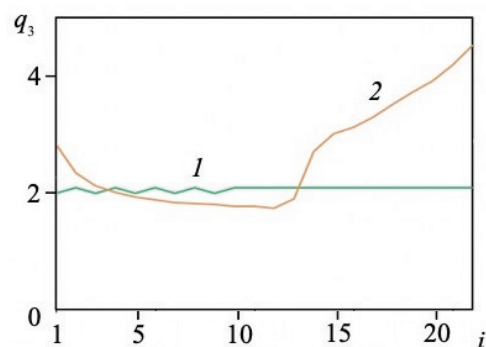
Поток	GeF ₄ , мг/с	^{70}Ge , %	^{72}Ge , %	^{73}Ge , %	^{74}Ge , %	^{76}Ge , %
Концентрирование ^{70}Ge , $n = 22, f = 10, \eta = 68,62\%, \eta_p = 89,84\%$						
Питание F	39,95	20,5	27,4	7,8	36,5	7,8
Отвал W	32,33	2	33,62	9,64	45,1	9,64
Отбор P	7,62	99	0,99	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-7}$
Концентрирование ^{76}Ge , $n = 22, f = 13, \eta = 49,17\%, \eta_p = 88,79\%$						
Питание F	37,42	20,5	27,4	7,8	36,5	7,8
Отвал W	2,6	$5,2 \cdot 10^{-7}$	$5,9 \cdot 10^{-4}$	$5,4 \cdot 10^{-3}$	0,99	99
Отбор P	34,82	22,03	29,44	8,38	39,15	1



Р и с. 2. Поток питания ступеней каскада: одинаковый (1) и профилированный (2)



Р и с. 3. Коэффициент деления потока ступеней каскада с одинаковым (1) и профилированным потоком питания (2)



Р и с. 4. Коэффициент разделения ^{73}Ge ступеней каскада с одинаковым (1) и профилированным потоком питания (2)

В табл. 2 приведены расчеты двух каскадов с профилированным потоком питания ступеней. Число ступеней $n = 22$ аналогично каскадам из

табл. 1, точка подачи питания немного отличается. Первый каскад рассчитан с заданной концентрацией ^{70}Ge в отборе 99%. Его поток питания такой же, как у каскада из табл. 1. В отличие от него концентрация ^{70}Ge в отвале составляет 2,36%, что свидетельствует о менее эффективном процессе разделения. Поток питания ступеней имеет характерную пикобразную форму по каскаду с максимумом 319,4 мг/с в точке подачи питания и минимумом 63,8 и 10,2 мг/с на конечных ступенях (см. рис. 2). Для большинства ступеней коэффициент деления потока изменяется в диапазоне 0,45—0,66 (см. рис. 3), коэффициент разделения ^{73}Ge — 1,75—4,2 (см. рис. 4).

Второй каскад рассчитан с заданной концентрацией ^{76}Ge в отвале 99%. В отличие от каскада из табл. 1 он характеризуется более высокой концентрацией ^{76}Ge в отборе 1,24%. Таким образом, и этот каскад уступает по эффективности разделения соответствующему каскаду с одинаковым потоком питания ступеней. Это объясняется лучшими параметрами работы ступеней при одинаковом потоке питания, определяющими высокий коэффициент технологического режима η_p [9]. Данный эффект компенсирует потери разделительной способности этих каскадов, вызванные большим смещением потоков с разной концентрацией изотопов и характеризующиеся относительно низким коэффициентом полезного действия η .

Заключение. Разработанный метод позволяет рассчитать оптимальные параметры каскадов с одинаковым числом газовых центрифуг в ступенях, переменными коэффициентами разделения и заданной концентрацией целевого изотопа в выходящих потоках. Такие каскады характеризуются одинаковым потоком питания ступеней, определяемым в процессе расчета, и

Т а б л и ц а 2. Параметры каскадов с профилированным потоком питания ступеней

Поток	GeF_4 , мг/с	^{70}Ge , %	^{72}Ge , %	^{73}Ge , %	^{74}Ge , %	^{76}Ge , %
Концентрирование ^{70}Ge , $n = 22, f = 12, \eta = 77,01\%, \eta_p = 72,55\%$						
Питание F	39,95	20,5	27,4	7,8	36,5	7,8
Отвал W	32,45	2,36	33,5	9,6	44,94	9,6
Отбор P	7,5	99	0,99	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-8}$
Концентрирование ^{76}Ge , $n = 22, f = 12, \eta = 76,99\%, \eta_p = 51,67\%$						
Питание F	37,42	20,5	27,4	7,8	36,5	7,8
Отвал W	2,51	$< 1 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$9,2 \cdot 10^{-4}$	0,999	99
Отбор P	34,91	21,97	29,37	8,36	39,05	1,24

имеют преимущество перед каскадами с профилированным потоком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борисевич В.Д., Литвин Ю.В., Сулаберидзе Г.А. Расчетно-теоретические исследования при обогащении изотопов кадмия на газовых центрифугах. — Теор. основы хим. технологии, 2007, т. 41, № 6, с. 655—661. // *Borisevich V.D., Litvin Yu.V., Sulaberidze G.A. Calculational study of the enrichment of cadmium isotopes in gas centrifuges. — Theor. Found. Chem. Engng, 2007, v. 41, № 6, p. 851—858.*
2. Mansourzadeh F., Safdary J., Khamseh A. e.a. Comparison of optimum tapered cascade and optimal square cascade for separation of xenon isotopes using enhanced TLBO algorithm. — Sep. Sci. Techn., 2018, v. 53, № 13, p. 2074—2087.
3. Mirmohammadi S., Safdary J., Mallah M., Ezazy F. Designing a squared-off cascade for separation of the ^{92}Mo and ^{100}Mo isotopes to high purity. — Инж.-физ. журн., 2024, т. 97, № 4, с. 846—859.
4. Азизов Т.Э., Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Оптимизация прямоугольного каскада центрифуг для разделения многокомпонентных смесей изотопов. — Атомная энергия, 2020, т. 128, вып. 5, с. 270—275. // *Azizov T.E., Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A. Optimization of a Square Cascade of Centrifuges for Separation of Multicomponent Mixtures of Stable Isotopes. — Atomic Energy, 2020, v. 128, № 5, p. 291—296.*
5. Палкин В.А. Получение изотопомодифицированного молибдена в ординарных и двойных каскадах газовых центрифуг. — Инж.-физ. журн., 2021, т. 94, № 4, с. 855—862.
6. 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.
7. Hooke R., Jeeves T. Direct search solution of numerical and statistical problems. — J. Assoc. Comp. Mach., 1961, № 8, p. 212—229.
8. Karaboga D. An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization. Techn. Rep. TR06. Turkey, Erciyes University, 2005. 10 p.
9. Палкин В.А. Определение разделительной способности при концентрировании изотопов многокомпонентной смеси. — Атомная энергия, 2023, т. 135, вып. 1—2, с. 35—41. // *Palkin V.A. Determination of Separation Power for the Separation of a Multicomponent Isotope Mixture. — Atomic Energy, 2023, v. 135, № 1—2, p. 47—54.*

Поступила в Редакцию 26.08.24

УДК 537.525.99

РЕЖИМЫ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ РАЗРЯДОВ В КАМЕРАХ С ИНЕРЦИАЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ УДЕРЖАНИЕМ ПЛАЗМЫ

Масленников С.П. (НИЯУ МИФИ, ФГУП «ВНИИА», г. Москва),

Михайлов Ю.В., Прокураторов И.А. (ФГУП «ВНИИА», г. Москва)

e-mail: spmaslennikov@mephi.ru

Нейтронные генераторы, принцип действия которых основан на реакциях термоядерного синтеза, применяются в ядерной физике, мощной импульсной электрофизике, физике высокой плотности энергии, геофизике, ядерной медицине, системах безопасности и неразрушающего контроля, космических исследованиях. Отдельный класс составляют системы с инерциальным электростатическим удержанием плазмы (ИЭУП), в которых при подаче высокого напряжения на электродную систему образуется и удерживается локализованная в центре разрядной камеры плазма. Реакции термоядерного синтеза, сопровождающиеся нейтронным излучением, протекают в результате взаимодействия ускоренных ионов с газоплазменной мишенью, которая сохраняет реакционную способность за счет ее непрерывного воспроизводства при ионизации газа в рабочей камере.

Установки этого типа обладают преимуществами, среди которых следует отметить существенно больший ресурс по сравнению с генераторами, использующими твердотельные нейтронообразующие мишени, а также возможность генерации и удержания плазмы с разным составом исходной газовой смеси для оптимизации термоядерных реакций. Кроме того, вследствие малой плотности газоплазменной мишени такие источники нейтронов характеризуются относительно большими размерами излучающей области.

В настоящей работе приведены результаты исследования режимов формирования импульсных разрядов и генерации нейтронов энергией 2,5 МэВ в системе с инерциальным электростатическим удержанием плазмы в условиях импульсно-периодического питания с предварительной ионизацией газа.