

УДК 621.039.342

DOI: 10.17223/00213411/64/2-2/131

А.А. УШАКОВ¹, А.А. ОРЛОВ²

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ КАСКАДА ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ НИКЕЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ВЕЛИЧИНЕ ПОТОКА ПИТАНИЯ

Приведены результаты исследований процесса заполнения каскада газовых центрифуг на примере разделения смеси изотопов никеля. Установлены закономерности распределения изотопов никеля по длине каскада в соответствии с их массовыми числами. Определены условия, при которых увеличивается концентрация целевого изотопа в потоке легкой или тяжелой фракции после заполнения каскада, что повышает эффективность процесса разделения изотопной смеси.

Ключевые слова: каскад, разделение, изотоп, никель, нестационарный процесс.

Введение

При эксплуатации каскада газовых центрифуг (ГЦ) для разделения многокомпонентных изотопных смесей (МИС) возникают нестационарные гидравлические процессы, в ходе которых изменяются величины давлений и потоков рабочего вещества в ступенях каскадов и выходящих потоках. Нестационарный гидравлический процесс порождает нестационарный разделительный процесс, в ходе которого происходит изменение изотопного состава рабочего вещества в ступенях и потоках каскадов. Во всех нестационарных процессах необходимо обеспечить безопасность разделительного оборудования и свести к минимуму потери работы разделения.

Каскады ГЦ имеют меньшее газосодержание по сравнению с газодиффузионными каскадами, следовательно, и меньшую инерционность. Малая инерционность приводит к усилению влияния нестационарных процессов на эффективность работы каскадов. Особенно это может отразиться на работе каскадов ГЦ для разделения МИС, которые, в отличие от каскадов для разделения изотопов урана, имеют существенно меньшее количество ГЦ и отличаются регулируемыми устройствами.

В связи с этим приобрело актуальность решение задачи изучения и полномасштабного учета нестационарных процессов при разделении МИС. Использование экспериментального подхода к решению данной задачи является достаточно затратным и требует создания дополнительных исследовательских установок. Поэтому целесообразно изучать нестационарные процессы путем их математического моделирования.

Известные математические модели [1–5] описывают нестационарные гидравлические процессы для случая длинного каскада и нестационарные разделительные процессы при постоянных гидравлических параметрах. Для устранения указанных недостатков нами была разработана математическая модель нестационарных гидравлических и разделительных процессов [6–8] и проведена ее верификация на примере разделения изотопов германия, криптона и кремния.

Стационарному режиму разделения МИС в каскаде ГЦ предшествует нестационарный процесс, который условно можно разделить на две стадии: 1) заполнение каскада рабочим веществом, 2) установление равновесных концентраций компонентов в каскаде. Основное внимание исследователей было приковано ко второй стадии в виду ее значительной длительности [1–5].

Изучение процесса заполнения каскада до настоящего времени не проводилось, поэтому для расчета второй стадии при задании начальных условий использовалось допущение, что концентрации компонентов в ступенях каскада после его заполнения соответствуют их концентрациям в МИС. Учитывая, что от начальных условий зависит характер изменения концентраций компонентов в ходе нестационарного процесса и его длительность [7, 8], целесообразно провести исследование процесса разделения МИС в ходе заполнения каскада и проверить справедливость этого допущения. Ранее в работе [9] установлено, что концентрации изотопов в потоках легкой и тяжелой фракции каскада после его заполнения зависят от номера ступени подачи потока питания.

В данной работе приведены результаты моделирования процесса заполнения каскада при различной величине потока питания для случая разделения изотопов никеля, которые используются в ядерно-физических исследованиях и для получения радиоактивных изотопов (например,

изотоп ^{62}Ni используется в качестве стартового материала для получения радиоактивного изотопа ^{63}Ni) [10].

Описание математической модели

Разделение МИС происходит в каскаде ГЦ. Рабочее вещество содержит n компонентов (изотопов) с индексом j ($j = \overline{1; n}$). Каскад состоит из S ступеней (рис. 1) с индексом i ($i = \overline{1; S}$). Ступени соединены по противоточно-симметричной схеме. В каскад подается поток питания F и отбираются потоки легкой P и тяжелой W фракции. Поток питания подается в ступень с индексом S_F , поток тяжелой фракции отбирается из первой ступени, поток легкой фракции – из ступени S .

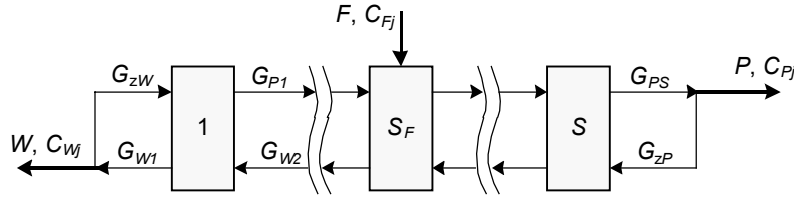


Рис. 1. Разделительный каскад

Разделительная ступень состоит из N_i параллельно соединенных ГЦ. В нее подается поток питания G_{Fi} . Из ступени отбираются потоки легкой G_{Pi} и тяжелой G_{Wi} фракций. Концентрацию j -го компонента в потоках питания, легкой и тяжелой фракций i -й ступени обозначили C_{Fij} , C_{Pij} и C_{Wij} соответственно. Тяжелая фракция первой ступени может частично возвращаться потоком закрутки тяжелой фракции G_{zW} на питание первой ступени. Легкая фракция ступени S может частично возвращаться потоком закрутки легкой фракции G_{zP} на питание ступени S .

При отсутствии коррозионных потерь рабочего вещества потоки ступеней и концентрации компонентов в них в стационарном гидравлическом режиме связаны уравнениями баланса рабочего вещества и компонента (изотопа):

$$G_{Fi} = G_{Pi} + G_{Wi}; \quad (1)$$

$$G_{Fi}C_{Fij} = G_{Pi}C_{Pij} + G_{Wi}C_{Wij}. \quad (2)$$

Сумма концентраций всех компонентов для любого потока равна единице. Разделение компонентов в ступени определяется выражениями [11, 12]:

$$\chi_{ijl} = \frac{C_{Pij}C_{Wil}}{C_{Pil}C_{Wij}}; \quad (3)$$

$$\chi_{ijl} = \chi_{0i}^{M_j - M_l}, \quad (4)$$

где χ_{ijl} – коэффициент разделения j -го и l -го компонента в i -й ступени; χ_{0i} – коэффициент разделения, приходящийся на единицу разности массовых чисел; M_j , M_l – массовые числа j -го и l -го компонента соответственно.

Потоки каскада в стационарном гидравлическом режиме связаны уравнениями баланса:

$$F = P + W; \quad (5)$$

$$FC_{Fj} = PC_{Pj} + WC_{Wj}. \quad (6)$$

Алгоритм решения дифференциальных уравнений, описывающих нестационарные гидравлические и разделительные процессы, приведен в работах [6, 7].

Результаты и их обсуждение

Рассмотрен каскад постоянной ширины (КПШ), состоящий из 60 ступеней ($S = 60$) и имеющий одинаковую производительность G_F всех ступеней в стационарном режиме. Поток питания подается в ступень № 30 ($S_F = 30$). Коэффициент разделения ГЦ $\chi_0 = 1.1$. В качестве рабочего вещества для разделения изотопов никеля использовался тетраakis никеля ($\text{Ni}(\text{PF}_3)_4$, молярная масса $M = 411$ кг/кмоль). В начальный момент времени каскад пуст (газосодержание равно нулю). В процессе заполнения в каскад подается поток питания постоянной величины, величины потоков

легкой и тяжелой фракции каскада равны нулю. В ходе заполнения происходит увеличение давлений, газосодержаний и потоков рабочего вещества в ступенях каскада до стационарных значений. Проведено моделирование процесса заполнения каскада рабочим веществом при различной величине потока питания, которая выражена относительно производительности ступени как F/G_F . На рис. 2 приведены концентрации изотопов никеля в потоках легкой и тяжелой фракции каскада после его заполнения в зависимости от величины F/G_F .

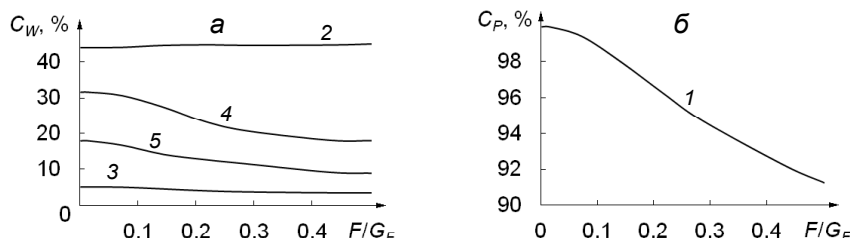


Рис. 2. Концентрация изотопов никеля после заполнения каскада в зависимости от величины F/G_F : а – поток тяжелой фракции каскада; б – поток легкой фракции каскада; кр. 1 – ^{58}Ni ; кр. 2 – ^{60}Ni ; кр. 3 – ^{61}Ni ; кр. 4 – ^{62}Ni ; кр. 5 – ^{64}Ni

Из рис. 2 видно, что концентрации изотопов никеля в потоках легкой и тяжелой фракции каскада после его заполнения зависят от величины потока питания (или от величины F/G_F). С увеличением потока питания каскада и, как следствие, с увеличением F/G_F происходит снижение концентрации ^{58}Ni в потоке легкой фракции каскада и концентраций ^{62}Ni и ^{64}Ni в потоке тяжелой фракции каскада. При этом концентрация изотопов ^{60}Ni и ^{61}Ni остается практически неизменной.

Изменение концентраций изотопов никеля в потоках легкой и тяжелой фракции каскада объясняется изменением концентраций изотопов в ступенях каскада в процессе заполнения. На рис. 3 приведено распределение изотопов никеля по ступеням каскада при различной величине F/G_F и для случая $F/G_F = 0$, который соответствует стационарному режиму каскада после заполнения и отключения внешних потоков ($F = P = W = 0$).

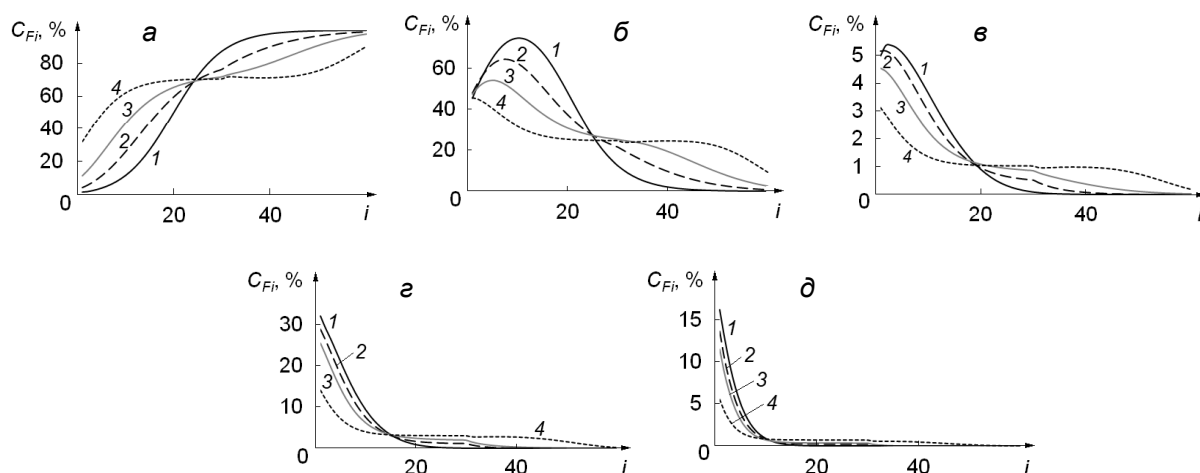


Рис. 3. Распределение концентрации изотопов никеля по ступеням каскада в зависимости от величины F/G_F : а – ^{58}Ni ; б – ^{60}Ni ; в – ^{61}Ni ; г – ^{62}Ni ; д – ^{63}Ni ; кр. 1 – $F/G_F = 0$; кр. 2 – $F/G_F = 0.07$; кр. 3 – $F/G_F = 0.15$; кр. 4 – $F/G_F = 0.50$

Как видно из рис. 3, при $F/G_F = 0$ (кривая 1) имеет место максимальный градиент концентраций изотопов по ступеням каскада. Изотопы распределены по ступеням каскада в соответствии с их массовыми числами: ^{58}Ni имеет максимальную концентрацию в ступени $i = 60$, ^{60}Ni – в ступени $i = 10$, ^{61}Ni – в ступени $i = 3$, ^{62}Ni и ^{64}Ni сконцентрированы в ступени $i = 1$. При увеличении потока питания каскада (величины F/G_F) обратно пропорционально уменьшается продолжительность заполнения каскада, что приводит к снижению максимальных значений концентраций изотопов и их перераспределению по каскаду. Это обусловлено интенсификацией процесса смешения изотопов, что происходит одновременно с процессом их разделения в ГЦ. Таким образом, оптимизация ве-

личины потока питания при заполнении каскада позволяет повысить концентрацию целевого изотопа в потоке легкой или тяжелой фракции после заполнения. Это уменьшит продолжительность установления стационарного распределения концентраций изотопов.

Выводы

Проведено исследование процесса заполнения каскада для разделения изотопов никеля при различной величине потока питания. Установлено, что изотопы никеля распределяются по длине каскада в соответствии с их массовыми числами независимо от величины потока питания каскада. Концентрации изотопов в ступенях, потоках легкой и тяжелой фракции после заполнения каскада зависят от величины потока питания каскада. Увеличение потока питания каскада приводит к снижению максимальных значений концентраций изотопов и их перераспределению по каскаду. Показано, что оптимизация величины потока питания при заполнении каскада позволяет повысить концентрацию целевого изотопа в потоке легкой или тяжелой фракции после заполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Levin D.M. and Zapelin Yu.P. // Proc. Physical and Chemical Process During Separation of Atoms and Molecules and in Laser, Plasma and Nanotechnology. – 2008. – P. 417–419.
2. Levin E.V., Laguntcov N.I., and Sulaberidze G.A. // J. Eng. Phys. – 1982. – V. 43. – P. 456–462.
3. Laguntcov N.I., Levin E.V., Nikolaev B.I., and Sulaberidze G.A. // Atomic Energy. – 1987. – V. 62. – P. 394–398.
4. Smirnov A.Yu., Sulaberidze G.A., Borisevich V.D., et al. // Chem. Eng. Sci. – 2015. – V. 127. – P. 418–424.
5. Smirnov A.Yu., Bonarev A.K., Sulaberidze G.A., et al. // J. Phys.: Conf. Ser. – 2016. – V. 751. – P. 012006.
6. Orlov A.A., Ushakov A.A., and Sovach V.P. // MATEC Web of Conf. – 2017. – V. 92. – P. 01033.
7. Orlov A.A., Ushakov A.A., and Sovach V.P. // J. Eng. Phys. Thermophys. – 2017. – V. 90. – No. 2. – P. 258–265.
8. Орлов А.А., Ушаков А.А., Совач В.П. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2017. – № 3. – С. 51–61.
9. Orlov A.A., Ushakov A.A., and Sovach V.P. // MATEC Web of Conf. – 2017. – V. 110. – P. 01063.
10. Sosnin L.J., Suvorov I.A., Tcheltsov A.N., et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. – 1993. – V. A334. – P. 43–44.
11. De la Garza A., Garrett G.A., and Murphy J.E. // Chem. Eng. Sci. – 1961. – V. 15. – P. 188–209.
12. Ying C., Guo Z., and Wood H.G. // Separation Sci. Technol. – 1996. – V. 31. – P. 2455–2471.

Поступила в редакцию 20.10.2020.

¹ АО «ПО «Электрохимический завод», г. Зеленогорск, Россия

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
г. Томск, Россия

Ушаков Антон Андреевич, к.т.н., инженер-технолог ПО ЭХЗ, e-mail: ushakovaa2015@sibmail.com;

Орлов Алексей Алексеевич, д.т.н., профессор НИ ТПУ, e-mail: orlovaa@tpu.ru.

A.A. USHAKOV¹, A.A. ORLOV²

MATHEMATICAL MODELING OF FILLING OF GAS CENTRIFUGE CASCADE FOR NICKEL ISOTOPE SEPARATION BY VARIOUS FEED FLOW RATE

This article presents the research results of the process of filling gas centrifuge cascade for example of separation of nickel isotope mixture. The regularities of the distribution of nickel isotopes along the cascade length in accordance with their mass numbers have been established. The conditions for increasing the concentration of the target isotope in light or heavy fraction flow after filling the cascade are determined. This also increases the efficiency of the isotope mixture separation process.

Keywords: cascade, separation, isotope, nickel, nonstationary process.

¹ Electrochemical Plant JSC, Zelenogorsk, Russia

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

Ushakov Anton Andreevich, Ph.D., Process Engineer Electrochemical Plant JSC, e-mail: ushakovaa2015@sibmail.com;

Orlov Alexey Alexeevich, D.Sc. (Technics), Professor NR TPU, e-mail: orlovaa@tpu.ru.