

3. Кухаркин Н.Е., Кулыгин В.М., Павшук В.А. Курчатовский институт воздушно-космическому флоту страны. Опередившие время. М., НИЦ «Курчатовский институт», 2018. 159 с.

4. Горбачев В.М., Замятин Ю.С., Лбов А.А. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник. М.: Атомиздат, 1976. 462 с.

Поступила в Редакцию 22.07.21

УДК 621.039.31

ПОСТРОЕНИЕ ТЕОРИИ ИДЕАЛЬНОГО МНОГОКОМПОНЕНТНОГО РАЗДЕЛИТЕЛЬНОГО КАСКАДА

Александров О.Е. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)

e-mail: aleks.o.e@mail.ru

Эффективное разделение многокомпонентных смесей требует теоретического осмысления и оптимальных способов его организации [1, 2]. Важной частью организации процесса разделения является построение каскада, что обусловлено сравнительно малым обогащением, которое может быть достигнуто на единичном элементе. Для получения требуемой степени обогащения смесь необходимо многократно подвергнуть разделению. Многократное разделение реализуется соединением нескольких разделительных устройств в каскад. Основной задачей построения каскада является достижение максимальной эффективности — получение необходимого обогащения с помощью минимального числа разделительных элементов.

Цель настоящей статьи — разработка теории идеального несмешивающего каскада для разделения многокомпонентных смесей.

Современное состояние теории каскадов.

В основном рассматривается классическая схема бинарного противоточного каскада с дополнительным отбором посредством ее применения для разделения смеси трех и более изотопов [3—5]. Это обусловлено тем, что разделение многокомпонентных смесей проводится с помощью устройств бинарного разделения, например, газовых центрифуг, применяемых в бинарных разделительных каскадах для обогащения урана.

Схемы и теории многокомпонентных каскадов почти не рассматриваются. Исследования показали, что разделение многокомпонентных смесей в устройствах бинарного разделения, газовых центрифугах и бинарных противоточных каскадах не способно обогатить смесь трех и более изотопов до произвольной concentra-

ции по избранному изотопу. Для получения произвольного обогащения эти устройства необходимо снабжать дополнительными отборами, т.е. превращать их из бинарных разделительных устройств — один вход для питания и два выхода для отбора в многокомпонентные разделительные устройства — один вход и три или более выхода. В этой ситуации логичным представляется переход к схемам соединения многокомпонентных разделительных устройств, а также обобщение для них теории бинарных каскадов. Такой подход все еще остается малоизученным [6, 7]. Более того, в некоторых работах высказывается мнение, что для многокомпонентного разделения идеальный каскад невозможен [8].

Построение элементарной теории противоточного каскада для многокомпонентного разделения и поиск идеального несмешивающего каскада являются, таким образом, актуальной задачей. Несмешивающий каскад является наилучшим согласно закону сохранения вещества. Если внутри каскада не смешиваются разделенные компоненты, следовательно, нет потерь работы разделения и каждый элемент используется наилучшим образом.

Численные расчеты бинарных каскадов показали, что несмешивающий каскад при определенных условиях оказывается менее эффективным с точки зрения, например, минимизации числа разделительных элементов в каскаде, чем смешивающий оптимальный каскад [9]. Это следствие выбора метода ступенчатой аппроксимации идеального каскада элементами с коэффициентом разделения значительно больше 1 (около 5). При расчете оптимального каскада предполагается изменение характеристик разде-

лительного элемента, в частности, нарушение симметрии разделительного элемента, т.е. различие коэффициента обогащения для извлекающей и отвалной части разделительного элемента в разных частях каскада. Как следствие оптимальный каскад становится ближе к идеальному, т.е. в нем уменьшаются смешение и число ступеней.

Для упрощения будет рассматриваться разделение смеси трех компонентов, но выводы могут быть обобщены на большее число компонентов.

Разделительный элемент. Теория бинарного разделения начинается с постулирования существования разделительного элемента [10] с одним входом—питанием и двумя выходами—отборами, способного изменять концентрацию смеси в отборах относительно концентрации смеси в питании (рис. 1, а). Для бинарного элемента вводится коэффициент разделения q :

$$q = \frac{C^{(1)}}{(1 - C^{(1)})} \frac{(1 - C^{(2)})}{C^{(2)}},$$

где $C^{(1)}$, $C^{(2)}$ — концентрация в первом и втором отборе соответственно.

Для разработки теории многокомпонентного разделения необходимо дать определение разделительного элемента. Разделительный элемент для многокомпонентной смеси должен допускать построение каскада, способного разделить исходную смесь до любой заданной концентрации любого компонента. Это означает, что разделительный элемент должен осуществлять обогащение компонента смеси при любой концентрации этого компонента в смеси. Известно, что основная технология бинарного разделения — центрифуга — для компонента смеси, масса молекулы которого больше мини-

мальной массы молекул смеси и меньше максимальной массы молекул смеси, не может обогащать смесь при произвольной концентрации. В противном случае для этого требуется организация дополнительного отбора [11—13].

Примем в качестве элементарного разделительного элемента с одним входом — питанием и числом отборов, равным числу компонентов смеси. На рис. 1, б показан трехкомпонентный разделительный элемент, но точно по такому же принципу можно построить разделительный элемент для любого числа компонентов смеси.

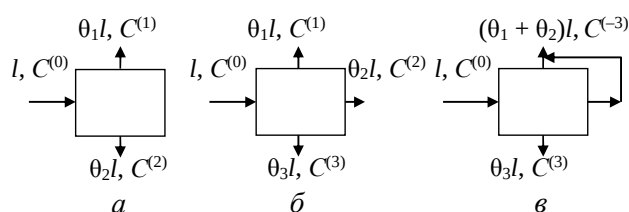
Без потери общности можно полагать, что в i -м отборе происходит обогащение по i -му компоненту. Многокомпонентный разделительный элемент на рис. 1, б можно преобразовать к квазибинарному виду (см. рис. 1, в), объединив два отбора из трех, но такое объединение отборов очевидным образом означает смешение потоков с разной концентрацией и, как следствие, потерю работы разделения.

Компоненты смеси должны полагаться равноправными, т.е. для каждого компонента смеси разделительный элемент должен иметь идентичные характеристики. Нет оснований предполагать, что отделение от смеси молекулы конкретного изотопа требует больших или меньших затрат энергии, чем для молекулы любого другого изотопа. Существует лазерное разделение, где указанное свойство разделительного элемента может быть выполнено. Характерной особенностью лазерного метода разделения изотопов является высокий коэффициент разделения элемента, как правило, заметно превышающий единицу. Коэффициент разделения центрифуги также заметно превосходит единицу, и построение истинного идеального несмешивающего бинарного каскада невозможно, но ступенчатая аппроксимация идеального каскада является практичной, теория идеального каскада — полезной для оценки эффективности реальных разделительных каскадов.

Основной характеристикой разделительного элемента является коэффициент разделения $q^{(i)}$:

$$q^{(i)} = \frac{R_i^{(i)}}{R_i^{(-i)}} = \frac{C_i^{(i)}}{(1 - C_i^{(i)})} \frac{(1 - C_i^{(-i)})}{C_i^{(-i)}}, \quad (1)$$

где $R_i^{(i)} = C_i^{(i)} / (1 - C_i^{(i)})$ — относительная концентрация i -го компонента в (i) -м отборе; $C_i^{(i)}$ —



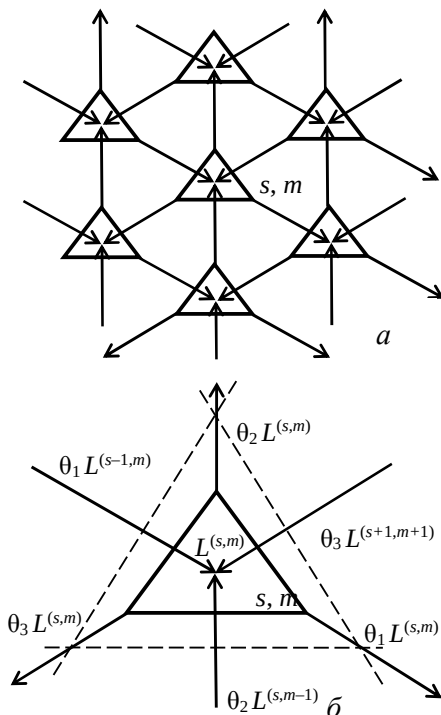
Р и с. 1. Бинарный (а), трехкомпонентный (б), квазибинарный разделительный элемент (в): I — поток питания; $\theta_1 I$, $\theta_2 I$, $\theta_3 I$ — поток отбора; $C^{(0)}$, $C^{(1)}$, $C^{(2)}$, $C^{(3)}$ — концентрация питания, первого, второго и третьего отбора соответственно; $C_i^{(-3)} = \sum_{j \neq 3} \theta^{(j)} C_i^{(j)} / \sum_{j \neq 3} \theta^{(j)}$

концентрация i -го компонента в (i) -м отборе; $R_i^{(-i)}$ — относительная средняя концентрация i -го компонента во всех отборах разделительного элемента, кроме i -го; $C_i^{(-i)}$ — средняя концентрация i -го компонента во всех отборах, кроме (i) -го:

$$C_i^{(-i)} = \sum_{j \neq i} \theta_j C_i^{(j)} / \sum_{j \neq i} \theta_j, \quad (2)$$

где θ_j — коэффициенты деления потока. Далее будем предполагать, что коэффициент разделения (1) слабо отличается от 1 или $|q^{(i)} - 1| \ll 1$.

Разделительный каскад. В реальных разделительных устройствах коэффициенты обогащения для разных компонентов смеси могут отличаться, но для базовой теории следует предположить равноправие компонентов смеси. Коэффициент обогащения $q^{(i)}$ полагаем одинаковым для всех компонентов смеси. В работах [6, 14] предложена схема соединения разделительных элементов (см. рис. 1, б), которая при равенстве коэффициентов обогащения разделительного элемента для всех компонентов смеси обеспечивает отсутствие смешения в каскаде (рис. 2, а). Под ступенью каскада здесь и далее



Р и с. 2. Схема несмешивающего трехкомпонентного каскада: а — соединение ступеней; б — схема для вывода уравнений сохранения массы в ступени (s, m) : Δ — разделительная ступень; $\rightarrow$ — межступенные потоки; - - - — граница, для которой записываются уравнения сохранения массы

понимается соединение нескольких разделительных элементов, работающих параллельно, т.е. имеющих общее питание и их соответствующие отборы объединены. Схема приведена для трехкомпонентного разделения, но очевидно, что аналогичная схема может быть построена для любого числа компонентов в смеси [6]. Рассмотрение схемы для числа компонентов больше трех не меняет принципиально выкладки, но значительно увеличивает громоздкость изложения.

Схема на рис. 2, а для расчета неудобна. Ее можно преобразовать к прямоугольному представлению (рис. 3). В этом варианте схема топологически тождественна исходной, но допускает введение двух осей для нумерации элементов каскада. Разделительный элемент с номером $(0, 0)$ будем полагать точкой ввода потока питания L в каскад.

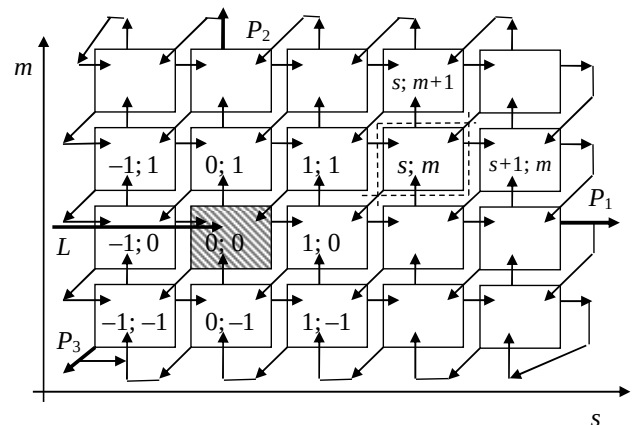
Анализ. Для прямоугольной схемы можно записать уравнения сохранения массы для разделительного элемента. Будем предполагать выполнение условий несмешивания [10]. Детальное рассмотрение условий несмешивания для исходной схемы (см. рис. 2, а) приведено в [6].

Втекающие в ступень (s, m) потоки считаем объединенными в точке питания и обозначим $L^{(s,m)}$ — поток питания ступени (см. рис. 2, б). Втекающие из ступени потоки определим через коэффициенты деления потока θ_i :

$$L^{(s,m,i)} = \theta_i L^{(s,m)}, \quad i = 1, 2, 3;$$

$$\theta_1 + \theta_2 + \theta_3 = 1,$$

где $L^{(s,m,i)}$ — поток, вытекающий из ступени (s, m) в направлении i . Для симметричного каскада $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = 1/3$. Направление $i = 1$ будем



Р и с. 3. Прямоугольная схема несмешивающего каскада: - - - — граница, для которой записываются уравнения сохранения массы для ступени (s, m)

считать совпадающим с осью OS , направление $i = 2$ — OM (см. рис. 3).

Уравнения сохранения массы для ступени (s, m) могут быть записаны в виде (см. рис. 2, б)

$$\begin{aligned}\theta_1 L^{(s-1,m)} &= 0,5(\theta_2 + \theta_3) L^{(s,m)} + P_1; \\ \theta_2 L^{(s,m-1)} &= 0,5(\theta_1 + \theta_3) L^{(s,m)} + P_2; \\ \theta_3 L^{(s+1,m+1)} &= 0,5(\theta_1 + \theta_2) L^{(s,m)} + P_3,\end{aligned}\quad (3)$$

где P_i — транзитный поток в направлении i . Транзитный поток течет не во всех ступенях каскада (см. рис. 3). Поток P_1 отличен от нуля для ступеней с номерами $s > 0$ и $m = 0$, P_2 — $s = 0$ и $m > 0$, P_3 — $s = m$, $s < 0$ и $m < 0$. Уравнения (3) должны выполняться вместе, т.е. сумма втекающих потоков на замкнутой границе вокруг ступени должна быть равна сумме вытекающих потоков. В силу предполагаемой симметрии каскада можно требовать выполнения каждого уравнения (3) в отдельности.

Заменяя $s - 1$ на s для первого уравнения (3), $m - 1$ на m — для второго и $s + 1$ на s , $m + 1$ на m — для третьего, получим

$$\begin{aligned}\theta_1 L^{(s,m)} &= 0,5(\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)} + P_1; \\ \theta_2 L^{(s,m)} &= 0,5(\theta_1 + \theta_3) L^{(s,m+1)} + P_2; \\ \theta_3 L^{(s,m)} &= 0,5(\theta_1 + \theta_2) L^{(s-1,m-1)} + P_3.\end{aligned}\quad (4)$$

Уравнения сохранения изотопа для ступени (s, m) можно записать аналогично (см. рис. 2):

$$\begin{aligned}\theta_1 L^{(s,m)} C^{(s,m,1)} &= 0,5(\theta_2 C^{(s+1,m,2)} + \theta_3 C^{(s+1,m,3)}) L^{(s+1,m)} + \\ &+ P_1 C_{P_1}; \\ \theta_2 L^{(s,m)} C^{(s,m,2)} &= 0,5(\theta_1 C^{(s,m+1,1)} + \theta_3 C^{(s,m+1,3)}) L^{(s,m+1)} + \\ &+ P_2 C_{P_2}; \\ \theta_3 L^{(s,m)} C^{(s,m,3)} &= 0,5(\theta_1 C^{(s-1,m-1,1)} + \theta_2 C^{(s-1,m-1,2)}) \times \\ &\times L^{(s-1,m-1)} + P_3 C_{P_3},\end{aligned}\quad (5)$$

где C_{P_i} — концентрация в i -м отборе каскада; $C^{(s,m,i)}$ — концентрация в i -м отборе ступени (s, m) . Уравнения (4), (5) похожи на уравнения противоточного бинарного каскада. Для малых коэффициентов обогащения их можно переписать. На примере первого уравнения систем (4), (5)

$$\theta_1 L^{(s,m)} = 0,5(\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)} + P_1$$

умножаем на $C^{(s,m,1)}$, получаем

$$C^{(s,m,1)} \theta_1 L^{(s,m)} = 0,5 C^{(s,m,1)} (\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)} + C^{(s,m,1)} P_1.$$

Вычитаем это уравнение из первого уравнения системы (5)

$$\theta_1 L^{(s,m)} C^{(s,m,1)} = 0,5(\theta_2 C^{(s+1,m,2)} + \theta_3 C^{(s+1,m,3)}) L^{(s+1,m)} + P_1 C_{P_1},$$

получаем

$$0 = 0,5[(\theta_2 C^{(s+1,m,2)} + \theta_3 C^{(s+1,m,3)}) - C^{(s,m,1)}(\theta_2 + \theta_3)] L^{(s+1,m)} + P_1[C_{P_1} - C^{(s,m,1)}].$$

Перегруппируем члены

$$C^{(s,m,1)} - \frac{\theta_2 C^{(s+1,m,2)} + \theta_3 C^{(s+1,m,3)}}{\theta_2 + \theta_3} = \frac{2P_1(C_{P_1} - C^{(s,m,1)})}{(\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)}}. \quad (6)$$

Из определения (2) следует, что

$$\frac{\theta_2 C^{(s+1,m,2)} + \theta_3 C^{(s+1,m,3)}}{\theta_2 + \theta_3} = C^{(s+1,m,-1)},$$

тогда уравнение (6) можно записать в виде

$$C^{(s,m,1)} - C^{(s+1,m,-1)} = \frac{2P_1(C_{P_1} - C^{(s,m,1)})}{(\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)}}.$$

Выражаем $C^{(s+1,m,-1)}$ из определения коэффициента разделения (1) с учетом $\varepsilon = q - 1$:

$$C^{(s+1,m,-1)} = \frac{C^{(s+1,m,1)}}{1 + \varepsilon C^{(s+1,m,1)} (1 - C^{(s+1,m,1)})}.$$

В случае малых коэффициентов обогащения с точностью до линейных по ε членов

$$C^{(s+1,m,-1)} = C^{(s+1,m,1)} - \varepsilon C^{(s+1,m,1)} (1 - C^{(s+1,m,1)}).$$

Подставляем в уравнение и получаем

$$C^{(s+1,m,1)} - C^{(s,m,1)} = \varepsilon C^{(s+1,m,1)} (1 - C^{(s+1,m,1)}) - \frac{2P_1(C_{P_1} - C^{(s,m,1)})}{(\theta_2 + \theta_3) L^{(s+1,m)}}.$$

В случае малых коэффициентов обогащения уравнение принимает вид

$$\begin{aligned}C^{(s+1,m)} - C^{(s,m)} &= \varepsilon C^{(s+1,m)} (1 - C^{(s+1,m)}) - \\ &- \frac{\delta(m,s) 2P_1(C_{P_1} - C^{(s,m)})}{(1 - \theta_1) L^{(s+1,m)}} \text{ для оси } OS, \\ C^{(s,m+1)} - C^{(s,m)} &= \varepsilon C^{(s,m+1)} (1 - C^{(s,m+1)}) - \\ &- \frac{\delta(s,m) 2P_2(C_{P_2} - C^{(s,m)})}{(1 - \theta_2) L^{(s,m+1)}} \text{ для оси } OM,\end{aligned}\quad (7)$$

где $\delta(m, s)$ — функция, равная 1 при $m = 0$ и $s > 0$, и равная 0 при любых других значениях m, s .

Для малых изменений концентрации уравнения (7) можно преобразовать к дифференциальным уравнениям, считая s и m непрерывными координатами [10]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(s, m)}{\partial s} &= \varepsilon C(s, m)[1 - C(s, m)] - \\ &- \frac{\delta(m, s) 2P_1 [C_{P_1} - C(s, m)]}{(1 - \theta_1)L(s, m)} \text{ для оси OS,} \\ \frac{\partial C(s, m)}{\partial m} &= \varepsilon C(s, m)[1 - C(s, m)] - \\ &- \frac{\delta(s, m) 2P_1 [C_{P_1} - C(s, m)]}{(1 - \theta_1)L(s, m)} \text{ для оси OM.} \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (8) имеют аналогичный уравнению для бинарного каскада вид. Отличие заключается в том, что каждое из них распадается на два:

$$\text{для } m = 0: \frac{\partial C}{\partial s} = \varepsilon C(1 - C) - \frac{2P_1(C_{P_1} - C)}{(1 - \theta_1)L}; \quad (9)$$

$$\text{для } m \neq 0: \frac{\partial C}{\partial s} = \varepsilon C(1 - C). \quad (10)$$

Для второго уравнения системы (8) — аналогично. Уравнение (9) подобно уравнению для бинарного каскада [10]. Уравнение (10) является уравнением для безотборного режима бинарного каскада. Точно так же, как в теории бинарного каскада, можно потребовать, чтобы отношение градиента концентрации $\partial C/\partial s$ к потоку L было максимальным в каждой точке каскада.

В этом случае уравнение (9) позволяет записать оптимальное распределение потока по оси OS [10]

$$L_{\text{опт}}(s) = \frac{2P_1(C_{P_1} - C)}{(1 - \theta_1)\varepsilon C(1 - C)}$$

и уравнение для оптимального градиента концентрации

$$\frac{\partial C}{\partial s} = \frac{\varepsilon}{2} C(1 - C).$$

Уравнение (10) не накладывает ограничений на распределение $L(s)$, поэтому можно для всех $m \neq 0$ полагать $L(s) = L_{\text{опт}}(s)$.

Для согласования градиента концентрации по оси OS достаточно, чтобы все ступени каскада при $m \neq 0$ имели коэффициент обогащения ε ,

равный половине коэффициента обогащения ступеней при $m = 0$.

Таким образом, распределение потока в идеальном трехкомпонентном каскаде похоже на распределение потока в идеальном бинарном каскаде. Максимальный поток $L(s)$ достигается в точке подачи питания и уменьшается до 0 в точке отбора, следовательно, стремится к нулю на всей границе каскада, кроме точек отборов.

Закключение. Дано определение разделительного элемента для многокомпонентного разделения и предложена схема для расчета противоточного каскада. Получены уравнения для концентрации смеси и потоков в разделительном каскаде для трехкомпонентного разделения. Получены дифференциальные уравнения для несмешивающего (идеального) каскада в случае малого обогащения. Уравнения совпадают с уравнением бинарного идеального каскада, поэтому их решения известны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов А.А., Ушаков А.А., Совач В.П., Малюгин Р.В. Математическое моделирование нестационарных разделительных процессов в каскаде газовых центрифуг для разделения изотопов вольфрама. — ИФЖ, 2018, т. 91, № 3, с. 605—614.
2. Фарахов М.М., Лаптева Е.А. Экспериментальные исследования бинарной и многокомпонентной ректификации смесей в колонне с новыми насадками. — В сб.: Труды Академэнерго, 2020, № 2(59), с. 43—54.
3. De La Garza, Garrett G., Murphy J. Multicomponent isotope separation in cascades. — Chem. Engng Sci., 1961, v. 15, p. 188—209.
4. Kinoshita M., Naruse Y. Mathematical simulation procedure of multicomponent separating cascade. Application to analysis of hydrogen isotope separation system by porous membrane method. — J. Nucl. Sci. Technol., 1981, № 18(9), p. 718—726.
5. Borisevich V., Sulaberidze G., Wood H. The theory of isotope separation in cascades: problems and solutions. — Ars Separatoria Acta, 2003, № 2, p. 107—124.
6. Гадельшин В.М., Александров О.Е., Шульгин Б.В. Разработка квазиидеального каскада разделительных элементов с тремя отборами. — Перспективные материалы, 2013, № 14, с. 65—70.
7. Палкин В.А. Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 2, с. 101—105.
8. Смирнов А.Ю., Сулаберидзе Г.А. Универсальный разделительный потенциал для многокомпонентных смесей: причины отсутствия. — Журн. физ. химии, 2019, т. 93, № 4, с. 627—631.
9. Палкин В.А., Фролов Е.С. Неоптимальные свойства идеального каскада с симметричными ступенями. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 3, с. 184—190.

10. Обогащение урана. Под ред. С. Виллани. М.: Энергоатомиздат, 1983. 320 с.
11. Палкин В.А., Сбитнев Н.А., Фролов Е.С. Расчет оптимальных параметров каскада для разделения многокомпонентной смеси изотопов. — Атомная энергия, 2002, т. 92, вып. 2, с. 130—133.
12. Kholpanov L.P., Sulaberidze G.A., Potapov D.V., Chuzhinov V.A. Multicomponent isotope separating cascade with losses. — Chem. Engng Proc., 1997, № 36, p. 89—193.
13. Zeng S., Ying Z. A truly ideal cascade: net cascade. — Separat. Sci. Technol., 2012, № 47, p. 929—935.
14. Гадельшин В.М., Шульгин Б.В., Палкин В.А. Способ разделения изотопов. Патент на изобретение № 2500461 РФ. Заявл. 11.03.2012. Опубл. 10.12.2013. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2013, № 34.

Поступила в Редакцию 25.01.21

УДК 621.039

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ В ЗАДАЧАХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕЙТРОНОВ В СЛАБОСВЯЗАННЫХ СИСТЕМАХ

*Бибердорф Э.А. (Ин-т математики им. С.Л. Соболева СО РАН, г. Новосибирск),
Митенкова Е.Ф. (ИБРАЭ РАН, г. Москва), Семенова Т.В. (ФГУП «РФЯЦ — ВНИИЭФ», г. Саров)
e-mail: mit@ibrae.ac.ru*

Наиболее точное распределение нейтронов при моделировании переноса в сложных гетерогенных средах можно получить, используя статистические алгоритмы Монте-Карло. Для решения задач на критичность в отечественных и зарубежных кодах реализован итерационный метод поколений, обеспечивающий корректное вычисление эффективного коэффициента размножения нейтронов $K_{\text{эф}}$, что было основной целью разрабатываемых программ для полномасштабных нейтронно-физических расчетов систем с реальной 3D-геометрией [1, 2]. При этом алгоритмические особенности метода поколений могут приводить к значительным погрешностям и даже некорректным результатам в слабосвязанных системах [3, 4]. Заметная чувствительность распределения к малым возмущениям композиционного состава, не изменяющим нейтронно-физические свойства системы, также обуславливает получение неустойчивого распределения нейтронов [5]. Вычисление распределения нейтронов в слабосвязанных системах предлагается с помощью матрицы деления, применяемой ранее при решении уравнения Больцмана в малогрупповом приближении, позднее в задачах переноса, используя методы Монте-Карло и непрерывные ядерные данные [6].

В расчетах на критичность уравнение переноса $A\mathbf{v}_i = k_i \mathbf{v}_i$ ($i = 1, \dots, n$) представляется относителем источника нейтронов деления, где A —

матрица деления размерностью n , зависящей от пространственного разбиения системы, правый собственный вектор $\mathbf{v}_i$ отражает распределение нейтронов деления в i -й области. В формируемой по программе TDMCC матрице деления, являющейся дискретным представлением ядра интегрального оператора $K(r', r)$ перехода нейтрона деления из r' в r , в полной мере учитывается пространственная и материальная специфика системы [7, 8]. В задаче на собственные значения для матрицы деления A значения k_i и $\mathbf{v}_i$ характеризуют локальные свойства i области системы ($i = 1, \dots, n$).

В качестве слабосвязанной системы рассматривается плоская система длиной $l = 425,7$ см, состоящая из нескольких топливных зон разного обогащения w_i ($i = 1, \dots, n$) и двух слоев воды по 30 см на концах. В плане система задается в виде бесконечной квадратной решетки с шагом 1,33 см с размещенным по центру твэлом диаметром 0,95 см, окруженным водой [9]. Ставится задача вычисления распределения нейтронов деления.

Спектральный анализ. Стандартный подход. Задачи на собственные значения требуются в разных прикладных областях физики. При этом решение часто базируется на использовании главных собственных значений и соответствующих собственных векторов (собственных функций). В задачах механики и спе-