

аппарате. Так, фильтрацию лучше производить на мелкопористых фильтрах с большим гидравлическим сопротивлением при малой скорости течения. В кристаллизаторе, наоборот, требуется турбулентное перемешивание, отсутствие застойных зон с малой скоростью. Применение же фильтров с рыхлой набивкой из стружки [5, 6] уменьшает эффективность изотермической фильтрации. Попытки проводить кристаллизацию в зоне фильтрования на охлаждаемых фильтрах малоэффективны по сравнению с оптимальным однозонным кристаллизатором. К тому же установка фильтра приводит к усложнению конструкции и затруднениям в эксплуатации.

Таким образом, пути усовершенствования трехзонной проточной холодной ловушки приводят к ее упрощению до однозонной ловушки.

Подвод примесей в однозонную холодную ловушку не обязательно организовывать за счет турбулизации, как в описанной выше диффузионной ловушке. Можно осуществить направленную подачу жидкого металла в зону кристаллизации с помощью насоса, например, как показано на схеме 6 или 7 рисунка. Для ловушек больших размеров принудительная циркуляция в зоне кристаллизации позволит лучше организовать гидродинамику в кристаллизаторе. После заполнения выкристаллизовавшейся примесью нижней части кристаллизатора в ловушках 6, 7 включаются охлаждение и подача жидкого металла в следующей, верхней секции.

Таким образом, ловушка последовательно заполняется кристаллической примесью подобно тому, как в наших опытах заполняется кристаллами примеси объем диффузионной ловуш-

ки при перемещении зоны охлаждения вверх по мере перемещения фронта кристаллизации [2].

Можно создать много различных вариантов конструкции и компоновки однозонной ловушки-кристаллизатора. Но, чтобы исключить опасность забивания ловушки при резких аварийных повышении концентрации примесей в контуре и опасность выбрасывания примесей в контур при повышении скорости жидкого металла и чтобы обеспечить эффективную работу ловушки, нужно при конструировании соблюдать требования, изложенные в настоящей статье.

По-видимому, нужно считать целесообразным не приспосабливание трехзонных ловушек старых конструкций под эффективные условия работы кристаллизаторов-накопителей, которые здесь были описаны, а создание новых, однозонных аппаратов.

Поступила в Редакцию 26/IV 1968 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. M. Abergdam et al. CPE, February, 1966, p. 74.
2. М. Н. Арнольд и др. Доклад SM-85/47 на Симпозиуме МАГАТЭ. Вена, 1966.
3. М. Н. Арнольд, М. Н. Ивановский, Б. А. Шматко. «Теплофизика высоких температур», 2, 380 (1967).
4. В. И. Субботин и др. «Атомная энергия», 21, 6 (1966).
5. В. И. Субботин, П. Л. Кириллов, Ф. А. Козлов. «Теплофизика высоких температур», 3, 1 (1965).
6. В. И. Субботин, Ф. А. Козлов. Доклад SM-85/48 на Симпозиуме МАГАТЭ. Вена, 1966.

## К вопросу о построении идеальных несимметричных разделительных каскадов

Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ

УДК 621.039.3

На протяжении последних десяти лет в нашей и зарубежной печати опубликовано довольно много работ [4—6] по теории так называемых несимметричных разделительных каскадов. Схемы этих каскадов строятся таким образом, что поток  $L$ , подаваемый в разделительный элемент, после прохождения этого элемента делится на две неравные части:  $A = \theta L$ ,  $B = (1 - \theta) L$ . Коэффициент  $\theta$ , который, очевидно, может изменяться в интервале  $0 \leq \theta \leq 1$  и определяет степень неодинаковости выходящих потоков, в американской литературе называется коэффи-

циентом среза или просто срезом. В симметричных каскадах потоки делятся пополам и  $\theta = 1/2$ .

Хотя исходные уравнения и предпосылки, необходимые для построения несимметричных каскадов, в общем хорошо известны (см., например, работу [7]), однако получаемые различными авторами выводы довольно разноречивы. Это, по-видимому, вызвано разными причинами. Одна из них заключается в том, что для построения каскадов чаще рассматривают общий случай, когда коэффициенты деления могут

заметно отличаться от единицы, и только в пределе переходят к величинам, близким к единице. В результате математический анализ оказывается громоздким и некоторые основные закономерности ускользают от рассмотрения. Второй причиной является недостаточно строго проведенная экстраполяция соотношений, полученных для симметричного каскада, на более общий случай несимметричных каскадов.

В настоящей работе делается попытка последовательного изложения теории несимметричного идеального двухкомпонентного разделительного каскада при заранее сделанных ограничивающих предположениях, позволяющих упростить анализ. Каскад считается идеальным, если в нем не происходит смешения потоков с разными концентрациями.

Главное ограничение заключается в том, что мы считаем каскад предназначенным для разделения двухкомпонентной изотопной смеси средних и тяжелых элементов и что, следовательно, обогащение нужным компонентом в одной разделительной ступени мало. Это значит, что, обозначая концентрацию этого изотопа на входе в разделительный элемент (см. рисунок) через  $c$ , а концентрацию обогащенного и обедненного потоков на выходе соответственно  $c^+$  и  $c^-$ , мы получаем отношения

$$\alpha = \frac{c^+}{1+c^+} : \frac{c}{1-c} \quad \text{и} \quad \beta = \frac{c}{1-c} : \frac{c^-}{1-c^-} \quad (1)$$

близкими к единице. Введем обозначения:

$$\left. \begin{aligned} \alpha - 1 &= \varepsilon^+ \ll 1; & c^+ - c &= \delta^+; \\ \beta - 1 &= \varepsilon^- \ll 1; & c - c^- &= \delta^-; \\ \varepsilon^+ + \varepsilon^- &= \varepsilon; & \delta^+ + \delta^- &= \Delta. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Подставляя эти обозначения в выражения (1) и сохраняя малые первого порядка, запишем

$$\left. \begin{aligned} \delta^+ &= \varepsilon^+ c (1-c); \\ \delta^- &= \varepsilon^- c (1-c); \\ \Delta &= \varepsilon c (1-c). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

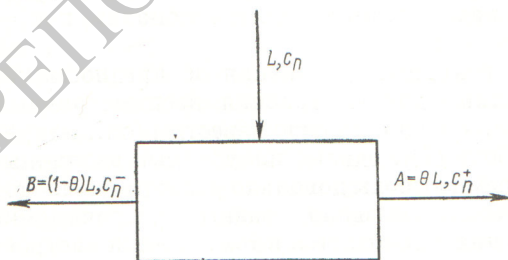


Схема разделительной ступени.

Из условия баланса входящего и двух выходящих потоков можно получить известную связь между этими коэффициентами:

$$\frac{\theta}{1-\theta} \varepsilon^+ = \varepsilon^- = \theta \varepsilon. \quad (4)$$

Здесь необходимо подчеркнуть, что величины  $\varepsilon^+$  и  $\varepsilon^-$  сами зависят от  $\theta$ . Эта зависимость различна для различных методов разделения. Для элементов, в которых разделение происходит вдоль некоторого канала, можно считать [4, 7]

$$\varepsilon^+ = \varepsilon_0 \frac{1-\theta}{\theta} \ln \frac{1}{1-\theta}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_0$  — постоянная величина, определяемая отношением разности масс изотопов к массе изотопной смеси. Следовательно, всякие теоретические построения, в которых при заданном распределении  $\theta$  вдоль каскада величины  $\varepsilon$  и  $\varepsilon^+$  (или в общем случае  $\alpha$  и  $\beta$ ) будут считаться постоянными, должны привести к неправильным результатам.

Рассмотрим теперь каскад, собранный из разделительных ступеней типа представленной на рисунке. Предположим, что каскад рассчитывается для выдачи обогащенного продукта в количестве  $P$  с концентрацией требуемого изотопа  $c_P$ . Отношение  $c_P$  к концентрации  $c_F$  питания  $F$  и отношение  $c_F$  к концентрации  $c_W$  обедненного продукта  $W$  должны быть достаточно большими, чтобы в обогажительной и обеднительной частях требовалось большое число ступеней. В этом случае, как известно, практически на всей длине каскада можно считать  $P$  и  $W$  малыми по сравнению с  $L$ .

Обогащенный продукт, поступающий из некоторой  $n$ -й ступени, подается вперед на вход  $n+k$ -й ступени, где  $k \geq 1$ , и соответственно обедненный продукт — на вход  $n+(p-1)$ -й ступени, где  $p \geq 2$ . В частном случае  $k=1$ ,  $p=2$  будем иметь обычный симметричный каскад, у которого  $\theta \approx 1/2$ . Такой же симметрией обладает каскад, для которого  $k=p-1$ . Величины  $p-1$  и  $k$  пока выбираются произвольно, но здесь сразу следует иметь в виду, что они немного больше единицы и что во всяком случае это величины, ничтожно малые по сравнению с числом ступеней  $n_p$  и  $n_w$  в обогажительной и обеднительной частях каскада.

Составим уравнение баланса в поперечном сечении между  $n$ -й и  $n+1$ -й ступенями, расположенными в обогажительной части каскада. Получим

$$\begin{aligned} A_n + A_{n+1} + \dots + A_{n-k+1} - B_{n+1} - B_{n+2} - \dots \\ \dots - B_{n+p-1} = P; \end{aligned} \quad (6)$$

$$A_n(c_n + \delta_n^+) + A_{n-1}(c_{n-1} + \delta_{n-1}^+) + \dots + \delta_{n-k+1}^+ - B_{n+1}(c_{n+1} - \delta_{n+1}^-) - B_{n+2}(c_{n+2} - \delta_{n+2}^-) - \dots - B_{n+p-1}(c_{n+p-1} - \delta_{n+p-1}^-) = P c_P. \quad (7)$$

Введем для разности  $c_{n+1} - c_n$  обозначение  $\frac{dc_n}{dn}$ . Так как величины  $\delta$  и  $\frac{dc}{dn}$  малы, а числа  $p$  и  $k$  невелики (порядка нескольких единиц), можно с точностью до малых второго порядка принимать

$$\begin{aligned} \delta_n^+ &= \delta_{n-1}^+ = \dots = \delta_{n-k+1}^+ = \delta^+; \\ \delta_{n+1}^- &= \delta_{n+2}^- = \dots = \delta_{n+p-1}^- = \delta^-; \\ \frac{dc_n}{dn} &= \frac{dc_{n+1}}{dn} = \dots = \frac{dc}{dn}. \end{aligned}$$

Для каскадов постоянной ширины и для каскадов с непрерывным распределением производительностей ступеней также можно считать

$$A_n = A_{n-1} = \dots = A_{n-k+1} = A = \theta L; \\ B_{n+1} = B_{n+2} = \dots = B_{n+p-1} = B = (1 - \theta) L.$$

Тогда, вычитая из уравнения (7) уравнение (6), запишем результат в виде

$$kA\delta^+ + (p-1)B\delta^- - [(k-1)kA + (p-1)pB] \frac{dc}{dn} = P(c_P - c). \quad (8)$$

Из уравнения (6), пренебрегая величиной  $P$  по сравнению с  $A$  или  $B$ , с той же степенью точности найдем

$$\frac{A}{B} = \frac{\theta}{1-\theta} = \frac{p-1}{k}; \quad \theta = \frac{p-1}{k+p-1}. \quad (9)$$

Разделив уравнение (8) на  $B$ , получим

$$\frac{dc}{dn} = \frac{2}{(p-1)(k+p-1)} [(p-1)(\delta^+ + \delta^-) - \frac{P(c_P - c)}{B}] = \frac{2}{p-1} \left[ \theta \Delta - \frac{P(c_P - c)}{kL} \right]. \quad (10)$$

Дифференциальное уравнение (10) дает распределение концентраций по длине двухкомпонентного каскада с произвольно выбранными  $p$  и  $k$ . По существу такое же соотношение приведено в работе Булигана [4]. Из выражения (10) нетрудно также получить, полагая  $k = 1$ , соотношение

$$\frac{dc}{dn} = 2(1-\theta) \left[ \theta - \frac{P(c_P - c)}{\theta L} \right], \quad (11)$$

ранее представленное в несколько иной форме Левиным [1] для этого частного случая.

Рассмотрим теперь условия, которым должен подчиняться идеальный каскад. Будем считать каскад идеальным, если при соединении потоков на входе в разделительный элемент не происходит смешения различных концентраций. В этом определении заключаются два условия. Концентрации соединяющихся потоков должны быть одинаковыми и должны равняться концентрации потока после соединения, иначе говоря

$$c_{n-k} + \delta^+ = c_n = c_{n+p-1} - \delta^-,$$

или

$$c_n - k \frac{dc}{dn} + \delta^+ = c_n = c_n + (p-1) \frac{dc}{dn} - \delta^-. \quad (12)$$

Ограничиваясь только одним из условий (12), можно прийти к неправильным или неполным выводам. Так, например, в работе [3] условие идеальности представлено в виде  $\frac{p}{k} = \frac{1}{1-\theta}$ , являющемся неполным условием (9).

Условия (12) можно переписать в виде

$$\left. \begin{aligned} \frac{\delta^+ + \delta^-}{p+k-1} &= \frac{\delta^+}{k} = \frac{\delta^-}{p-1}; \\ \frac{dc}{dn} &= \frac{\delta^+ + \delta^-}{p+k-1}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Первое из условий (13) совпадает с условиями (4), которые получены из соотношений баланса. Таким образом, первое условие в каскаде с произвольными  $p$  и  $k$  выполняется автоматически, так же как и для симметричных каскадов. Из сравнения второго условия (13) с уравнением (10) следует, что для отсутствия смешения второй член в квадратных скобках уравнения (10) должен равняться половине первого, т. е.

$$kL = \frac{2P(c_P - c)}{\frac{\theta}{1-\theta} \varepsilon^{+c} (1-c)}. \quad (14)$$

Из второго уравнения (13) получаем зависимость концентрации от числа ступеней, а из уравнения (14) — зависимость  $L$  от концентрации в идеальном каскаде без смешений.

Полная сумма производительностей во всем каскаде

$$\begin{aligned} \Sigma L &= \int_{c_W}^{c_F} \frac{2W(c - c_W) dc}{\varepsilon^{+2c^2} (1-c)^2 \frac{\theta}{1-\theta}} + \\ &+ \int_{c_F}^{c_P} \frac{2P(c_P - c) dc}{\varepsilon^{+2c^2} (1-c)^2 \frac{\theta}{1-\theta}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Вынося за знак интегрирования

$$\frac{\theta}{1-\theta} \varepsilon^{+2} = \varepsilon_0^2 \frac{1-\theta}{\theta} \ln^2 \frac{1}{1-\theta},$$

проводя интегрирование и обозначая известное выражение для функции ценности двухкомпонентного симметричного каскада через  $\Phi(c_P, c_F, c_W)$ , запишем

$$\Sigma \frac{L\varepsilon_0^2}{2} = P\Phi(c_P, c_F, c_W) \frac{\theta}{(1-\theta) \ln^2 \frac{1}{1-\theta}}. \quad (16)$$

Это уравнение, полученное нами для каскада без смешения концентраций, найдено в работе [4] из условия минимума суммарной производительности  $\Sigma L$ . Таким образом, оказывается, что всегда можно построить схемы несимметричных каскадов с любыми  $p$  и  $k$ , удовлетворяющие условиям несмещения потоков различных концентраций, и что, как и в случае симметричных каскадов, выполнение этих условий эквивалентно условию минимума  $\Sigma L$ .

Из формулы (16) найдем наиболее выгодную величину  $\theta$ , которая соответствует минимуму функции  $\frac{\theta}{(1-\theta) \ln^2 \frac{1}{1-\theta}}$  и оказывается равной

$\theta \approx 0,8$ . Отметим сразу, что разница в суммарной разделительной способности для  $\theta = 0,8$  и  $\theta = \frac{2}{3}$  невелика (около 7%), а конструктивно первый вариант значительно сложнее. Поэтому, вероятно, наиболее целесообразно использовать вариант  $\theta = \frac{2}{3}$ , соответствующий одному потоку «вперед» и двум потокам «назад».

Исходя из уравнения (14), которое для  $\theta > \frac{1}{2}$  (при  $k = 1$ ) совпадает с уравнением (10), Левин [1] пришел к неожиданному результату (удивившему его самого): наиболее выгоднее  $\theta$  равно нулю. Этот результат, по-видимому, вызван главным образом тем, что в работе [1] не учитывается зависимость  $\varepsilon(\theta)$ , на недопустимость чего указывал еще Коэн [7]. В работе [2] для каскада из центрифуг рекомендуется величина  $\theta = \frac{1}{3}$ , но эта рекомендация связана не с общими теоретическими выводами, а с экспериментальными данными, полученными для конкретной использованной авторами центрифуги. Автор работы [5] без особых теоретических обоснований, опираясь лишь на возможность облегчения математического анализа, рассматривал идеальные каскады при  $\theta < \frac{1}{2}$ , а в качестве численного примера для расчета использовал величину  $\frac{\theta}{1-\theta} = \frac{1}{5}$ , как мы видели, очень далекую от оптимума. Заметим, что авто-

ры работы [6], хотя и оценивали случай  $\theta \neq \frac{1}{2}$ , но ограничились в своем рассмотрении каскадами, у которых  $k = 1$  и  $p = 2$ .

Вернемся к нашему анализу. Мы показали, что в каскаде с произвольными  $p$  и  $k$  всегда можно найти распределение  $L$ , обеспечивающее отсутствие смешения различных концентраций, т. е. идеальность каскада. Это позволяет отыскать величину оптимального  $\theta$  простым путем.

Еще Коэн [7] получил для разделительной способности ступени при неодинаковых потоках  $\theta L$  и  $(1-\theta)L$  известное выражение  $z = \frac{L\varepsilon^2}{2} \cdot \frac{\theta}{1-\theta}$ , в котором  $\varepsilon$  — коэффициент  $\alpha - 1$ , т. е. по нашим обозначениям  $\varepsilon^+$ . Следовательно, пользуясь формулой (5), можно записать

$$z = \frac{L\varepsilon_0^2}{2} \cdot \frac{1-\theta}{\theta} \ln^2 \frac{1}{1-\theta}. \quad (17)$$

В идеальном каскаде смешения концентраций не происходит, т. е. полная разделительная способность определяется как

$$\Sigma z = \frac{1-\theta}{\theta} \ln^2 \frac{1}{1-\theta} \Sigma \frac{L\varepsilon_0^2}{2}. \quad (18)$$

Условие минимальности  $\Sigma \frac{L\varepsilon_0^2}{2}$  при заданной  $\Sigma z$  совпадает с условием, полученным из выражения (16). Это еще раз подтверждает правильность наших выводов.

В заключение сделаем еще одно замечание. Мы до сих пор ограничивались каскадами для разделения двухкомпонентных схем. Нетрудно убедиться, что общее дифференциальное уравнение изменения концентраций в несимметричном каскаде сохраняет свой вид (10) и для многокомпонентных смесей. Только в этом случае будет не одно, а  $m$  уравнений для всех концентраций  $c_i$   $m$ -компонентной смеси, а  $\Delta$  следует определять вместо формулы (3) по формуле  $c_i \sum_{j=1}^m \varepsilon_{ij} c_j$  [8]. Так как в этом более общем случае не удастся построить идеальный каскад с отсутствием смешения концентраций по всем компонентам, то здесь условия определения идеального каскада по минимуму производительностей и по отсутствию смешения различных концентраций могут не совпадать.

Автор благодарит Б. И. Николаева и Г. А. Сулаберидзе за ценные замечания при обсуждении.

Поступила в Редакцию 3/IV 1969 г.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. S. Levin, E. Von Halle. Applicability of a separation process for large scale isotope production. Second Unit. Nat. Intern. conf. on the peaceful uses of atomic energy (June 1958).

2. Bulang et al. Z. Phys. Chemie, 24, 249 (1960).
3. Е. М. Кузнецова и др. ЖФХ, XXXV, № 9 (1961).
4. G. Bouligand. CEA Rep. 2622, U.K. AEA Prod. Group, inform. ser. 16, 1965.
5. J. Takashima. Bull. Tokyo Inst. of Technol., No. 69 (1965).
6. A. Apelblat, J. Flamed-Lehrer. J. Nucl. Energy, 22, No. 1 (1968).
7. K. Cohen. The theory of isotope separation. New York, 1951.
8. Р. Я. Кучеров, В. П. Миненко. «Атомная энергия», 19, 360 (1965).

## Получение $Sr^{85}$ на циклотроне

Н. Н. КРАСНОВ, П. П. ДМИТРИЕВ, В. П. ЕРЛЫЧЕНКО, И. О. КОНСТАНТИНОВ,  
Н. А. КОНЯХИН, Ю. Г. СЕВАСТЬЯНОВ, В. М. ТУЕВ, И. ГРУБЫ,  
В. КНОБЛОХ, Б. МУДРОВА \*

УДК 621.039.8.002:621.039.6

Изотоп  $Sr^{85}$  ( $T_{1/2} = 64$  дня) распадается в результате электронного захвата с испусканием  $\gamma$ -кванта с энергией 514 кэв. Этот изотоп широко применяется в медицине.

Разработка метода получения любого радиоактивного изотопа на циклотроне сводится в основном к решению трех проблем: 1) выбор наиболее эффективной ядерной реакции, приводящей к образованию требуемого изотопа; 2) создание мишеней для облучения соответствующего материала на достаточно высоком уровне мощности; 3) разработка метода выделения радиоактивного изотопа из облученной мишени, обеспечивающего высокой химический выход и минимальные примеси.

Авторы настоящей работы исследовали выходы  $Sr^{85}$  и способы его получения без носителя. Результаты исследований использованы при производстве  $Sr^{85}$  на циклотроне Института ядерных исследований Академии наук Чехословацкой Социалистической Республики [1] и на циклотроне Физико-энергетического института Государственного комитета по использованию атомной энергии СССР [2].

Опубликовано очень мало данных по выходам  $Sr^{85}$ . В работе [3] измерен выход  $Sr^{85}$  при облучении RbCl протонами и дейтонами энергией 15 Мэв, а в работе [4] приводится расчетное значение выхода  $Sr^{85}$  при облучении металлического рубидия протонами с энергией 22 Мэв.

Все возможные способы получения на циклотроне радиоактивного изотопа  $Sr^{85}$  указаны в таблице. Три первых способа позволяют получать  $Sr^{85}$  без носителя, а два последних — с носителем. Производство на циклотроне  $Sr^{85}$  с носителем не представляет особого интереса, так как он может быть получен в ядерном реакторе более дешевым способом [5]. Получение  $Sr^{85}$  путем облучения криптона  $\alpha$ -частица-

Значения выходов  $Sr^{85}$  при различных способах его получения

Способы получения  $Sr^{85}$

Способ получения	Реакция образования	Содержание изотопа в естественной смеси, %	Данные по выходам		Ссылка					
			энергия частиц, Мэв	выход, мкюри/мкач						
Rb+d	Rb <sup>85</sup> (d2n)	72,2	22	116	*					
			12,5	75 (RbCl)	*					
			15	16 (RbCl)	*					
			15	16 (RbCl)	[3]					
Rb+p	Rb <sup>85</sup> (pn)	72,2	23	168	*					
			23	109 (RbCl)	*					
			15	23 (RbCl)	[3]					
			22	63	[4]					
Kr+ $\alpha$	Kr <sup>82</sup> ( $\alpha n$ ) Kr <sup>83</sup> ( $\alpha 2n$ ) Kr <sup>84</sup> ( $\alpha 3n$ )	11,56 11,52 56,9	42	10	**					
						Sr+p	Sr <sup>86</sup> (pn) Sr <sup>86</sup> (ppn)	23	20	**
0,56										
9,86										
0,56										
		9,86								

\* Экспериментальные данные, полученные авторами настоящей работы.

\*\* Оценка авторов настоящей работы, полученная путем сравнения с выходами аналогичных реакций в данной области масс.

ми нецелесообразно из-за сложности изготовления криптоновой мишени и выделения из нее  $Sr^{85}$ .

Таким образом, наиболее целесообразно получать  $Sr^{85}$  путем облучения рубидия протонами или дейтонами. Именно эти два способа и были тщательно исследованы.

\* Авторы И. Грубы, В. Кноблех, Б. Мудрова — сотрудники Института ядерных исследований АН ЧССР.