

Повышение эффективности каскадов для разделения изотопов путем применения ступеней с числом выходящих потоков более двух

КОЛОКОЛЬЦОВ Н. А.

УДК 621.039.31

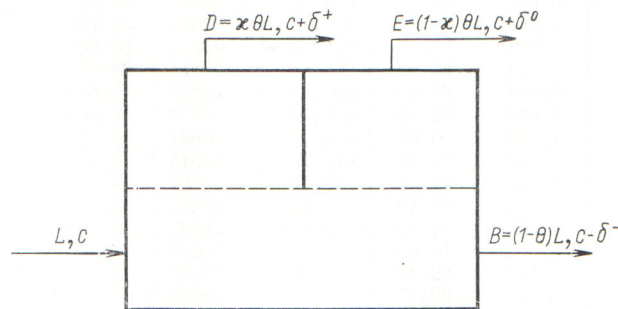
В обычной разделительной ступени, в которую входит поток разделяемой смеси L с концентрацией легкого компонента c , а выходят два потока — обогащенный θL с концентрацией c^+ и обедненный $(1 - \theta)L$ с концентрацией c^- , — смесь, проходя вдоль разделительного канала, обедняется легким изотопом. Вследствие этого уменьшается концентрация легкого изотопа в потоке, проходящем через границу канала в данном сечении. Это приводит к тому, что внутри ступени возникает смешение в потоке легкой фракции, которое при увеличении обеднения вдоль канала ведет к уменьшению эффекта обогащения. Такая взаимосвязь процессов обеднения и обогащения приводит к потере разделительной способности, которая при заданной производительности ступени пропорциональна произведению $\delta^- \delta^+$, где $\delta^+ = c^+ - c = \varepsilon_0 \frac{1-\theta}{\theta} \ln \frac{1}{1-\theta} c(1-c)$, $\delta^- = c - c^- = \varepsilon_0 \ln \frac{1}{1-\theta} c(1-c)$ [1, 2]. В симметричных каскадах, когда потоки в ступенях делятся пополам, внутреннее смешение приводит к появлению в функции обогащения множителя $\ln 2$ [$\delta^+ = \varepsilon_0 \ln 2c(1-c)$] — так называемый логарифмический эффект — и соответственно к уменьшению разделительной способности в $\ln^2 2$ раз, т. е. почти в два раза. Потери на смешение можно уменьшить путем введения несимметричных каскадов, в которых обогащенный поток θL из n -й ступени подается в $n + k$ -ю ступень, а обедненный в $n - (p - 1)$ -ю, где $k \geq 1$, $p \geq 2$ [2]. Наиболее выгодный коэффициент деления потока θ равен примерно 0,8 ($k = 1$, $p = 5$), причем разделительная способность по сравнению с симметричным каскадом увеличивается на 33% [1–3], хотя основная доля эффекта ($\sim 26\%$) достигается при $\theta = \frac{2}{3}$ ($k = 1$, $p = 3$). Этот вариант конструктивно гораздо проще и, по-видимому, более целесообразен [2]. Использование несимметричных каскадов приводит не к ликвидации логарифмического эффекта, а к оптимальному сочетанию двух несимметричностей: несимметричность процесса деления и несимметричность схемы соединения ступеней. При этом в несимметричном каскаде с $\theta > 0,5$ внутреннее сме-

шение больше, чем в симметричном, а разделительная способность увеличивается вследствие интенсификации процесса обеднения вдоль канала.

Существует принципиально иной путь увеличения разделительной способности, основанный на применении ступеней с тремя и более выходящими потоками. Такая ступень с тремя выходящими потоками показана на рисунке. В ней поток разделяемой смеси, проходящий через границу канала θL , разбивается в свою очередь на два потока $\kappa \theta L = D$ и $(1 - \kappa) \theta L = E$ с концентрацией соответственно $c + \delta^+$ и $c + \delta^0$, причем δ^+ при $\kappa \neq 1$ больше, чем δ^+ при $\kappa = 1$, что соответствует обычной ступени с двумя выходящими потоками, и, очевидно, $\delta^+ > \delta^0$. Таким образом, смысл введения нескольких выходов по легкой фракции позволяет уменьшать внутреннее смешение при неизменном обеднении потока вдоль канала. В пределе, если увеличивать число выходов до бесконечности, можно вообще ликвидировать логарифмический эффект. Такая возможность теоретически рассмотрена в работе [3] для одной из комбинаций соединения потоков.

Таким образом, путем подбора соответствующих значений, а также схемы соединения ступеней в каскад можно добиться уменьшения величины суммарного потока каскада — важной интегральной характеристики (эта величина пропорциональна числу разделительных элементов и потребляемой установкой энергии).

С увеличением числа выходящих потоков резко возрастает число возможных схем соеди-



Ступень с тремя выходами.

нения ступеней, однако это приводит к дополнительным трудностям анализа. Усложнение схем, очевидно, повышает стоимость изготовления установки и затрудняет ее эксплуатацию. В настоящей работе рассматриваются наиболее простые схемы соединения ступеней с ограниченным числом потоков, которые без особых трудностей можно реализовать на практике.

Рассмотрим четыре варианта схем. Во всех вариантах ступень имеет три выхода (см. рисунок). Поток $B_n = (1 - \theta) L_n$ подается или на предыдущую $n - 1$ -ю ступень, или на $n - 2$ -ю ступень. Обогащенный поток E_n подается или на последующую $n + 1$ -ю ступень и соответственно D_n на $n + 2$ -ю ступень, или E_n подается на вход своей n -й ступени и соответственно D_n на $n + 1$ -ю ступень. Уравнения баланса полных потоков и потоков ценного компонента смеси в сечении между n -й и $n + 1$ -й ступенями для всех четырех вариантов могут быть записаны в такой форме:

$$sD_{n-1} + D_n + sE_n - B_{n+1} - tB_{n+2} = P, \quad (1)$$

$$sD_{n-1}(c_{n-1} + \delta_{n-1}^+) + D_n(c_n + \delta_n^+) + sE_n(c_n + \delta_n^0) - B_{n+1}(c_{n+1} - \delta_{n+1}^-) - tB_{n+2}(c_{n+2} - \delta_{n+2}^-) = P c_P. \quad (2)$$

Здесь величины s и t для каждого варианта имеют определенные значения, приведенные в табл. 1.

Легко показать, что третий вариант при $\kappa = 1$ соответствует обычному каскаду с двумя коммуникациями в сечении, а второй вариант при $\kappa = 1$ — тоже симметричному каскаду, но с четырьмя коммуникациями. Отметим также четвертый вариант при $\kappa = 1$, дающий несимметричный каскад с обычными ступенями и $\theta = 2/3$.

Считая для изотопных смесей коэффициенты разделения малыми и пренебрегая, как это обычно делается, малыми более высокого порядка, получаем

$$\delta_n^+ = \delta_{n-1}^+ = \dots = \delta^+,$$

$$D_n = D_{n-1} = \dots = D,$$

$$c_{n-1} - c_{n-2} = c_n - c_{n-1} = \dots = \frac{dc}{dn} \text{ и т. д.}$$

Тогда уравнения (1) и (2) можно переписать в виде

$$(1 + s)D + sE - (1 - t)B = P \approx 0, \quad (3)$$

$$(1 + s)D\delta^+ + sE\delta^0 + (1 + t)B\delta^- - \frac{dc}{dn} [sD + (1 + 2t)B] = P(c_P - c). \quad (4)$$

Аналогично тому, как это делается для ступени с двумя выходами, интегрируя уравнение

Варианты схем каскадов

Таблица 1

Вариант	B_n подается в ступень	E_n подается в ступень	D_n подается в ступень	s	t
Первый	$n - 1$	$n + 1$	$n + 2$	1	0
Второй	$n - 2$	$n + 1$	$n + 2$	1	1
Третий	$n - 1$	n	$n + 1$	0	0
Четвертый	$n - 2$	n	$n + 1$	0	1

изменения потока вдоль границы разделения, получаем выражение для ступени с тремя выходами:

$$\delta^+ = \varepsilon_0 c (1 - c) \frac{E + B}{D} \ln \frac{D + E + B}{E + B}, \quad (5)$$

$$\delta^0 = \varepsilon_0 c (1 - c) \frac{B}{E} \ln \frac{E + B}{B}, \quad (6)$$

$$\delta^- = \varepsilon_0 c (1 - c) \ln \frac{E + B}{B}, \quad (7)$$

где ε_0 — первичный коэффициент обогащения. Заменяя D , E и B в уравнении (3) их значениями, согласно рисунку, получаем

$$(1 + s)\kappa\theta + s(1 - \kappa)\theta - (1 + t)(1 - \theta) = 0,$$

откуда

$$\theta = \frac{1 + t}{\kappa + s + t + 1}. \quad (8)$$

После аналогичного преобразования уравнения (4) с использованием выражений (5) — (8) запишем

$$\alpha \frac{dc}{dn} = 2\beta\varepsilon_0 c (1 - c) - \frac{2P}{L} (c_P - c), \quad (9)$$

где

$$\alpha = \frac{s\kappa(1 + t) + (s + \kappa)(1 + 2t)}{\kappa + s + t + 1}, \quad (10)$$

$$\beta = \frac{1 + s + t(1 - \kappa)}{\kappa + s + t + 1} \ln \frac{\kappa + s + t + 1}{1 + s + t(1 - \kappa)} + \frac{(1 + s + t)(\kappa + s)}{\kappa + s + t + 1} \ln \frac{\kappa + s + t + 1}{\kappa + s}. \quad (11)$$

Уравнение (9) дает распределение концентраций для всех рассматриваемых вариантов схем соединения ступеней в каскаде. Особенность этих схем заключается в том, что на входе каждой ступени соединяются не два потока, а три. Если попытаться ввести определение идеального каскада без смешения концентраций на входе, то потребуются выполнить условие равенства концентраций всех трех потоков. Нетрудно показать, что такое условие невыполнимо, а точнее, при его выполнении ступень с тремя выходами вырождается в обычную ступень.

Результаты расчета каскадных схем

Таблица 2

Номер варианта	κ																			
	0,1		0,2		0,3		0,4		0,5		0,6		0,7		0,8		0,9		1	
	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ	α/β^2	θ
Первый	1,048	0,476	1,093	0,455	1,138	0,435	1,182	0,417	1,227	0,400	1,272	0,385	1,319	0,370	1,365	0,357	1,413	0,345	1,460	0,333
Второй	0,799	0,645	0,807	0,625	0,819	0,606	0,835	0,588	0,854	0,571	0,877	0,556	0,903	0,541	0,932	0,526	0,964	0,513	1,000	0,500
Третий	0,941	0,909	0,789	0,833	0,760	0,769	0,767	0,714	0,791	0,667	0,823	0,625	0,862	0,588	0,905	0,555	0,951	0,526	1,000	0,500
Четвертый	0,948	0,952	0,728	0,909	0,660	0,870	0,638	0,833	0,638	0,800	0,652	0,769	0,675	0,741	0,707	0,714	0,748	0,690	0,796	0,666

пень с двумя выходами. Поэтому при анализе эффективности рассматриваемого типа каскадов следует отказаться от принципа несмещения концентраций и ограничиться менее жестким условием минимума суммарного потока ΣL при работе на заданные внешние условия. Наложение этого условия, как известно [3], эквивалентно нахождению минимума функции α/β^2 в уравнении (9). Эта функция зависит от переменной κ , изменяющейся в пределах $0 \leq \kappa \leq 1$, и от s и t , имеющих в каждом варианте схем фиксированные значения.

В табл. 2 представлены результаты проведенных на ЭВМ вычислений. Все значения функции α/β^2 отнесены к ее величине, соответствующей обычному симметричному каскаду (третий вариант, $\kappa = 1$); здесь же приведены соответствующие значения θ . Наибольший интерес представляют третий и четвертый варианты. Третий вариант принадлежит к серии комбинаций, рассмотренных Булигандом [3]. При оптимальном значении κ , несколько большем 0,3, суммарный поток уменьшается примерно на 32%, т. е. почти так же, как и в несимметричном каскаде, состоящем из ступеней с двумя выходами при $\theta = 0,8$. Наиболее эффективным

представляется четвертый вариант, дающий при $\kappa \approx 0,45$ уменьшение суммарного потока на 57%. При этом варианте выгодно сочетаются возможности ступени с тремя выходами и возможности несимметричных каскадов. Интересно отметить, что оптимальный результат получается при θ порядка 0,8, т. е. так же, как и в обычных несимметричных каскадах, но при меньшем конструктивном усложнении (обратный поток подается не в $n - 4$ -ю, а в $n - 2$ -ю ступень). Следует отметить, что полученные оптимальные соотношения могут быть несколько смещены при использовании газодиффузионного метода разделения, если при оптимизации учитывать не только суммарную производительность, но и площадь пористых перегородок [3].

Поступила в Редакцию 4/III 1974 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen K. The Theory of Isotope Separation. N.Y., 1951.
2. Колокольцов Н. А. «Атомная энергия», 1969, т. 27, вып. 1, с. 9.
3. Bouligand G. CEA, Rep. 2622, UK AEA, Prod. Group, Inform. Ser. 16, 1965.