«АТОМНАЯ ЭНЕРГИЯ», Т. 33, ВЫП. 2 (АВГУСТ 1972)

Предельное обогащение промежуточных изотопов в отборе с концов каскада

В. П. МИНЕНКО

УДК 621.039.31

При разделении многокомпонентных изотопных смесей в каскадах приходится сталкиваться с двумя принципиально различающимися задачами. Одна из них связана с получением крайних по массе компонентов смеси, а другая — с выделением изотопов промежуточных масс. В связи с тем что при любом k обогащение в ступени самого активного компонента смеси $\delta N_k = N_k \sum_{v=1}^{k} \varepsilon_{kv} N_v$ всегда строго положительно, а $\delta N_1 = N_1 \sum_{v=1}^{k} \varepsilon_{1v} N_v$, наоборот, строго меньше нуля, выделить их не представляет проблемы по сравнению с задачей разделения бинарных смесей. В отличие от этого обогащения промежуточных изотопов на некотором удалении от точки подачи питания становятся отрицательными, вследствие чего их концентрации в каскаде в дальнейшем перестают возрастать.

Несмотря на это, при удачном подборе параметров каскада в нем можно достичь заметного обогащения смеси промежуточными компонентами [1]. Как видно из уравнений переноса [1, 2],

$$\frac{dN_m}{ds} = N_m \sum_{v=1}^{k} \varepsilon_{mv} N_v - \frac{P}{L} (N_m^P - N_m), \qquad (1)$$

продольное распределение концентраций зависит от профиля каскада L (s) и от величины потока отбора P. При неизменном L выходные концентрации промежуточных изотопов как функции P изображаются выпуклыми вверх кривыми, так что для каждого m существует значение P, обеспечивающее максимум концентрации. Начальные значения концентраций (N_m^f) зависят от величины потока питания F и от места его подачи. Варьируя эти два параметра, можно, хотя и ограниченно, уменьшать молярные доли всех более активных компонентов смеси в нулевом сечении каскада.

Если сложить эффекты, связанные по отдельности с изменением L, P и F, можно ответить на вопрос о предельно достижимом обогащении в одиночном каскаде. Однако в общем случае не просто выявить каждый из них в чистом виде. Пока это можно сделать только для прямоугольного и Q-каскада, если воспользоваться формулами, выражающими зависимость N_m^P и N_m^W от P, F и чисел ступеней δ^P и σ^W, которые были получены соответственно в работах [3] и [1]. С другой стороны, для практики разделения каждый из этих эффектов сам по себе не столь интересен, как их сумма. Поэтому будем решать задачу сразу в целом, исходя из общих соображений.

Рассмотрим работающий в стационарном режиме каскад кусочно-непрерывного профиля L (s) с одним потоком отбора и одним отвалом. Пренебрегая разрывами концентраций на границах секций, будем считать, что разность $N_m^P N_n - N_n^P N_m$ является непрерывной функцией продольной координаты. В точке $s = \sigma^P$ она равна нулю. Для всех $s \neq \sigma^r$ (границы секций) существует производная $\frac{d}{ds}(N_m^P N_n - N_n^P N_m)$. Вводя переменную

$$l = \sigma^P - s, \qquad (2)$$

с помощью (1) запишем

$$\frac{d}{dl}(N_m^P N_n - N_n^P N_m) = -\left(\varepsilon_n + \frac{P}{L}\right)(N_m^P N_n - N_n^P N_m) + \varepsilon_{mn} N_n^P N_m. \qquad (3)$$

Здесь

$$\varepsilon_n \equiv \sum_{v=1}^{k} \varepsilon_{nv} N_v. \qquad (4)$$

Решение уравнения (3), обращающееся в нуль при $l = 0$, имеет вид

$$N_m^P N_n - N_n^P N_m = \varepsilon_{mn} N_n^P \int_0^l N_m \times \exp\left\{-\int_t^l \left(\varepsilon_n + \frac{P}{L}\right) d\xi\right\} dt. \qquad (5)$$

В силу непрерывности $N_m^P N_n - N_n^P N_m$ и линейности уравнения (3) равенство (5) справедливо д я всех внутренних точек обогащающей части каскада. Следовательно, для всех $l \neq 0$ $(s \neq \sigma^P)$

$$\varepsilon_{mn}\left(\frac{N_m^P}{N_m} - \frac{N_n^P}{N_n}\right) > 0. \qquad (6)$$

Отсюда, обозначив концентрации в нулевом сечении каскада через N_i^f, для пары компонентов m и n с $\varepsilon_{mn} > 0$ получаем

$$\frac{N_m^P}{N_m^f} > \frac{N_n^P}{N_n^f}. \qquad (7)$$

Аналогично для обедняющей части каскада

$$\frac{N_m^W}{N_m^f} < \frac{N_n^W}{N_n^f}. \qquad (8)$$

Таким образом,

$$\frac{N_m^P}{N_n^P} > \frac{N_m^f}{N_n^f} > \frac{N_m^W}{N_n^W}. \qquad (9)$$

Как вытекает из уравнений материального баланса,

$$\frac{N_m^F}{N_m^P} - \frac{N_n^F}{N_n^P} = \frac{W}{F}\left(\frac{N_m^W}{N_m^P} - \frac{N_n^W}{N_n^P}\right). \qquad (10)$$

Вместе с (9) это дает

$$N_m^F N_n^P < N_n^F N_m^P. \qquad (11)$$

Пронумеровав компоненты в порядке возрастания активности

$$\varepsilon_{mn}(m-n) > 0 \qquad (12)$$

и суммируя (11) по всем $m \geqslant n$, получим

$$N_n^P \sum_{m \geqslant n} N_m^F < N_n^F \sum_{m \geqslant n} N_m^P. \qquad (13)$$

Поскольку $\sum N_m^P \leqslant 1$, окончательно имеем

$$N_n^P < N_n^F \left(\sum_{m \geqslant n} N_m^F\right)^{-1}. \qquad (14)$$

В связи с тем что в правую часть полученного неравенства входят только концентрации смеси в потоке питания, оно обладает универсальной общностью.

Можно подумать, что неравенство (14) является слишком явным. Однако это не так. Для доказательства обратимся к Q-каскаду [1]. Его выходные концентрации определяются по формулам

$$N_n^P = \frac{(\exp Q_n\sigma^W - 1)\, N_n^F}{\exp Q_n\sigma^W - \exp(-Q_n\sigma^P)} \times \left[\sum_{m=1}^{k} \frac{(\exp Q_m\sigma^W - 1)\, N_m^F}{\exp Q_m\sigma^W - \exp(-Q_m\sigma^P)}\right]^{-1}. \qquad (15)$$

Задавая Q_n так, чтобы оно оказалось больше нуля, а $Q_{n-1} = Q_n - \varepsilon_{n,\,n-1}$ было еще отрицательно, перейдем в (15) к бесконечным σ^P и σ^W. Это дает

$$\lim_{\sigma^P,\, \sigma^W \to \infty} N_n^P = N_n^F \left(\sum_{m \geqslant n} N_m^F\right)^{-1}. \qquad (16)$$

Итак, дробь (16) является точной верхней границей множества значений N_n^P, и всякое заметное отклонение от этой границы в эксперименте объясняется лишь несовершенством параметров каскада.

В заключение следует сказать об определении максимально возможного переноса PN_n^P по принципу приравнивания к нулю градиентов концентраций (dN_n/ds) в нулевом сечении каскада, как это делается, например, в работе [3]. Представим себе каскад непрерывного профиля с емким резервуаром вместо отвальной секции, вначале быстро сужающийся, а затем переходящий в прямоугольный. Если заполнить эту систему бинарной смесью, то для оценки максимума PN^P следует, очевидно, положить $dN/ds = 0$ в начале прямоугольного участка. При этом везде слева будет $dN/ds > 0$. Таким образом, критическое сечение каскада $(dN/ds = 0)$ в этом случае не совпадает с нулевым $(s = 0)$. Перейдя к общему случаю, запишем систему уравнений переноса в виде

$$\frac{d}{ds} \ln \frac{N_n}{N_m} = \varepsilon_{nm} - \frac{PN_n^P}{LN_n} + \frac{PN_m^P}{LN_m}. \qquad (17)$$

Отсюда видно, что перенос PN_n^P определяется произведением LN_n. Поскольку максимум переноса находится только для обогащающихся компонентов смеси, в прямоугольном каскаде все критические сечения будут совпадать с нулевым, а в сужающемся каскаде они разделяются в соответствии с индивидуальными сдвигами в сторону $s > 0$. Очевидно, сдвиг будет тем больше, чем медленнее возрастает соответствующая концентрация в области малых s. Таким образом, этот принцип в общем случае пригоден только для проведения качественных оценок.

Выражаю благодарность И. Г. Гвердцители за интерес к работе.

Поступило в Редакцию 16/XII 1971 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Колокольцов и др. «Атомная энергия», 29, 425 (1970).
2. Р. Я. Кучеров, В. П. Миненко. «Атомная энергия», 19, 128 (1965).
3. A. Narten. Z. Naturforsch, 20a, No. 5 (1965).

Условия оптимизации реальных прямоугольно-ступенчатых каскадов для разделения многокомпонентных изотопных смесей

Н. А. КОЛОКОЛЬЦОВ, Г. А. СУЛАБЕРИДЗЕ, Н. И. ЛАГУНЦОВ

УДК 621.039.31

В работе [1] показана принципиальная возможность моделирования многокомпонентного каскада непрерывного профиля (НПК) реальным прямоугольно-ступенчатым каскадом (ПСК).

В настоящей работе формулируются условия, при которых суммарный поток ПСК с заданным числом секций, моделирующего НПК, минимален, т. е. максимальная величина к.п.д. формы ПСК, определяемого