

УДК 621.039.31

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОДЕРЖАНИЯ ИЗОТОПОВ УРАНА В КАСКАДЕ С ДВУМЯ ПИТАНИЯМИ, ДВУМЯ ОТБОРАМИ И ОДНИМ ОТВАЛОМ

Палкин В.А., Комаров Р.С. (Уральский гос. техн. ун-т — УПИ)

Технические характеристики низкообогащенного урана, производимого на разделительных каскадах для ядерной энергетики, должны удовлетворять требованиям стандартной спецификации ASTM C996-04. Это накладывает жесткие ограничения на содержание изотопов урана ^{232}U , ^{234}U , ^{236}U и требует предварительной оценки их концентрации в отбираемых каскадных потоках.

В работе [1] разработана общая теория квазиидеальных каскадов и R -каскадов, позволяющая оценивать содержание различных изотопов при многокомпонентном разделении в ординарном (трехпоточном) каскаде. Эта теория была развита в работах [2—4] на случай дополнительного потока и малой относительной концентрации. Однако теоретические соотношения имеют ограничения в использовании, которые связаны с отличиями указанных каскадов от оптимальных, применяемых на практике.

В случае, когда содержание $^{232,234,236}\text{U}$ существенно меньше целевого изотопа ^{235}U и эффекты разделения на ступенях малы, оптимальный каскад не отличается от идеального по ^{235}U и ^{238}U [5].

В этом приближении был разработан оригинальный подход к получению аналитического решения системы дифференциальных уравнений для случая разделения многокомпонентной смеси в каскаде, идеальном по двум основным компонентам [6]. Подход распространяется на любое число компонентов и любое число внешних потоков. На основе этого подхода предложены общая методика и алгоритмы расчета разделения изотопов урана, допускающие получение простых оценочных формул. В частности, в работе [7] на основе подхода [6] был показан аналитический метод решения для ординарного каскада с тремя внешними потоками.

В настоящей работе рассмотрена задача аналитической оценки концентрации изотопов урана в более сложном каскаде, использующем на практике, — с двумя питаниями, двумя отборами и одним отвалом. Рассмотрены особенности изменения концентрации ^{234}U по каскаду при различных соотношениях внешних по-

токов. Показана эффективность получения разбавителя для высокообогащенного урана из промежуточного отбора каскада.

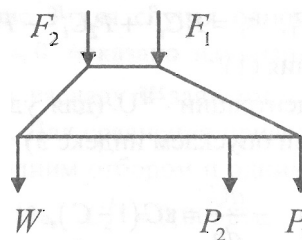
Постановка задачи. Рассмотрим каскад с двумя отборами, двумя питаниями и одним отвалом (рис. 1). Его внешними параметрами являются потоки первого (основного) и второго (промежуточного) отборов P_1 и P_2 , первого и второго питания F_1 и F_2 и отвала W , а также соответствующая концентрация изотопов — $C_i^{P_1}$, $C_i^{P_2}$, $C_i^{F_1}$, $C_i^{F_2}$, C_i^W . Индексом i обозначен номер изотопа. Под ним будем понимать последнюю цифру массы атомов урана $23i$ ($i = 5$ для ^{235}U , $i = 8$ для ^{238}U).

Перечисленные параметры связаны уравнениями баланса вещества и изотопов:

$$P_1 + P_2 + W = F_1 + F_2;$$

$$P_1 C_i^{P_1} + P_2 C_i^{P_2} + W C_i^W = F_1 C_i^{F_1} + F_2 C_i^{F_2}.$$

Для удобства расчетов и анализа эффективности каскада введем дополнительные переменные ϕ и λ , определяющие отношения потоков: $\phi = P_2/P_1$, $\lambda = F_2/F_1$. Пусть задана внешняя концентрация ^{235}U и концентрация $^{232,234,236}\text{U}$ в питаниях каскада. Тогда для любых выбираемых значений потока первого отбора P_1 и переменных ϕ и λ можно оценить концентрацию в отборах и отвале при условиях, что концентрация $^{232,234,236}\text{U}$ как минимум в 100 раз меньше концентрации целевого изотопа и каскад оптимизирован на обогащение ^{235}U . При первом условии распределение $^{232,234,236}\text{U}$ по ступеням каскада определяется содержанием ^{235}U , при втором распределение ^{235}U по ступеням не отличается от его распределения в идеальном бинарном каскаде с малым обогащением на ступенях.



Р и с. 1. Каскад с двумя отборами, двумя питаниями и одним отвалом

Решение задачи. При условии отсутствия потерь рабочего вещества изменение концентрации изотопов урана по ступеням каскада непрерывного профиля описывается уравнением [6]

$$-\frac{dC_i}{dn} = 2\varepsilon_0 (\bar{\mu} - \mu_i) C_i - \frac{2(\tau_5 - \tau C_i)}{G},$$

где $C_i = C_i(n)$ — концентрация i -го изотопа в питании n -й ступени; n — номер ступени (для выбранной модели эта величина непрерывная) при их отсчете от отбора каскада; ε_0 — коэффициент обогащения на единицу разности атомной массы; $\bar{\mu} = \sum_i \mu_i C_i$ — средняя атомная масса изотопной смеси, вычисляемая суммированием по всем изотомам смеси; μ_i — атомная масса i -го изотопа; τ , τ_5 — транзитный поток смеси и i -го изотопа в направлении отбора, зависящий от рассматриваемого участка каскада; $G = G(n)$ — производительность (поток питания) n -й ступени каскада.

Выражение $(\bar{\mu} - \mu_i)$ можно преобразовать к виду $(\bar{\mu} - \mu_i) \approx 3(1 - C_5) - (\mu_i - \mu_5)$ [7]. Отсюда

$$-\frac{dC_i}{dn} = 2\varepsilon_0 [3(1 - C_5) - (\mu_i - \mu_5)] C_i - \frac{2(\tau_5 - \tau C_i)}{G}. \quad (1)$$

В идеальном каскаде потоки питания ступеней рассчитываются по формуле

$$G = 2(\tau_i - \tau) / [\varepsilon C_5 (1 - C_5)].$$

Поэтому, подставляя значения транзитных потоков на конкретных участках каскада, можно получить соответствующие дифференциальные уравнения для концентрации.

На участке между вторым питанием каскада и промежуточным отбором транзитные потоки вещества и изотопа в направлении отбора равны $\tau = P_1 + P_2 - F_1$, $\tau_i = P_1 C_i^{P_1} + P_2 C_i^{P_2} - F_1 C_i^{F_1}$. Отсюда из уравнения (1)

для концентрации ^{235}U (для удобства дальнейшей записи опускаем индекс 5)

$$-\frac{dC}{dn} = \varepsilon C (1 - C), \quad (2)$$

для концентрации, например, ^{234}U ($i = m$)

$$-\frac{dC_m}{dn} = 2\varepsilon C_m \left[(1 - C) - \frac{1}{3} \Delta\mu_m \right] - \varepsilon C (1 - C) \times \frac{P_1 (C_m^{P_1} - C_m) + P_2 (C_m^{P_2} - C_m) - F_1 (C_m^{F_1} - C_m)}{P_1 (C^{P_1} - C) + P_2 (C^{P_2} - C) - F_1 (C^{F_1} - C)}, \quad (3)$$

где $\Delta\mu_m = \mu_m - \mu_5$. Переходя в уравнении (3) от d/dn к d/dc и используя соотношение (2), находим

$$\frac{dC_m}{dC} = \frac{2C_m}{C} \left(1 - \frac{\Delta\mu}{3(1 - C)} \right) - \frac{P_1 (C_m^{P_1} - C_m) + P_2 (C_m^{P_2} - C_m) - F_1 (C_m^{F_1} - C_m)}{P_1 (C^{P_1} - C) + P_2 (C^{P_2} - C) - F_1 (C^{F_1} - C)}.$$

Общее решение этого уравнения имеет вид

$$C_m = \frac{(P_1 C_m^{P_1} + P_2 C_m^{P_2} - F_1 C_m^{F_1}) C^2 R^{2/3 \Delta\mu_m}}{\left[P_1 (C^{P_1} - C) + P_2 (C^{P_2} - C) - F_1 (C^{F_1} - C) \right] \left(1 - \frac{2}{3} \Delta\mu_m \right)} \times (R^d + K),$$

где $R = C/(1 - C)$ — относительная концентрация ^{235}U ; $d = 2/3 \Delta\mu_m - 1$; K — константа интегрирования.

Обозначим концентрацию ^{234}U в ступени подачи первого питания $\tilde{C}_m^{F_1}$. Тогда при условии $C_m(C)|_{C=C^{F_1}} = \tilde{C}_m^{F_1}$ константа интегрирования

$$K = - (R^{F_1})^d \times \left\{ 1 + \frac{d \tilde{C}_m^{F_1} [P_1 (C^{P_1} - C^{F_1}) + P_2 (C^{P_2} - C^{F_1})]}{C^{F_1} (1 - C^{F_1}) (P_1 C_m^{P_1} + P_2 C_m^{P_2} - F_1 C_m^{F_1})} \right\},$$

где $R^{F_1} = C^{F_1}/(1 - C^{F_1})$.

Аналогично можно показать, что на других участках каскада концентрация между первым и вторым отбором

$$C_m(C) = - \frac{C_m^{P_1} C^2 R^{2/3 \Delta\mu_m} [R^d - (R^{P_1})^d]}{d (C^{P_1} - C)},$$

где $R^{P_1} = C^{P_1}/(1 - C^{P_1})$;

между первым питанием и вторым отбором

$$C_m(C) = \frac{(P_1 C_m^{P_1} + P_2 C_m^{P_2}) C^2 R^{2/3 \Delta \mu_m}}{d [P_1 (C^{P_1} - C) + P_2 (C^{P_2} - C)]} \times \left\{ (R^{P_2})^d \left(1 + \frac{d C_m^{P_2} P_1 (C^{P_1} - C^{P_2})}{C^{P_2} (1 - C^{P_2}) (P_1 C_m^{P_1} + P_2 C_m^{P_2})} \right) - R^d \right\},$$

где $R^{P_2} = C^{P_2} / (1 - C^{P_2})$;

между вторым питанием и отвалом

$$C_m^W(C) = - \frac{C_m^W C^2 R^{2/3 \Delta \mu_m} \left((R^W)^d - R^d \right)}{d (C - C^W)},$$

где $R^W = C^W / (1 - C^W)$.

Тогда, принимая во внимание условия непрерывности концентрации в точках подачи питания и точке второго отбора, находим концентрацию ^{234}U в отборах:

$$C_m^{P_1} = \alpha \tilde{C}_m^{F_1}; \quad C_m^{P_2} = \beta \tilde{C}_m^{F_1},$$

$$\text{где } \alpha = \alpha_1 / D_1; \quad \beta = \beta_1 / D_1; \quad \alpha_1 = [P_1 (C^{P_1} - C^{F_1}) + P_2 (C^{P_2} - C^{F_1})] (R^{F_1})^d (R^{P_2})^d d^2 (C^{P_1} - C^{P_2}); \quad \beta_1 = d C^{P_2} (1 - C^{P_2}) [P_1 (C^{P_1} - C^{F_1}) + P_2 (C^{P_2} - C^{F_1})] \times [(R^{P_1})^d - (R^{P_2})^d] (R^{F_1})^d; \quad D_1 = C^{F_1} (1 - C^{F_1}) \times \left\{ d P_1 (C^{P_1} - C^{P_2}) (R^{P_2})^d [(R^{P_1})^d - (R^{F_1})^d] - P_2 C^{P_2} \times [(1 - C^{P_2}) [(R^{P_2})^d - (R^{F_1})^d] [(R^{P_2})^d - (R^{P_1})^d] \right\}.$$

Концентрация ^{234}U в отвале

$$C_m^W = \delta \tilde{C}_m^{F_1} + \zeta (C_m^{P_1} P_1 + C_m^{P_2} P_2 - C_m^{F_1} F_1),$$

где

$$\delta = d (R^{F_1})^d (C^{F_2} - C^W) [P_1 (C^{P_1} - C^{F_1}) + P_2 (C^{P_2} - C^{F_1})] / [(1 - C^{F_1}) D_2];$$

$$\zeta = (C^{F_2} - C^W) [(R^{F_1})^d - (R^{F_2})^d] / D_2,$$

$$\text{где } D_2 = [(R^{F_2})^d - (R^W)^d] [P_1 (C^{P_1} - C^{F_2}) + P_2 (C^{P_2} - C^{F_2}) - F_1 (C^{F_1} - C^{F_2})].$$

Концентрация $\tilde{C}_m^{F_1}$, входящая в приведенные соотношения, рассчитывается из условия выполнения баланса по изотопу, которое выражается в виде

$$(\alpha P_1 + \beta P_2) \tilde{C}_m^{F_1} + \{ \delta \tilde{C}_m^{F_1} + \zeta [(\alpha P_1 + \beta P_2) \tilde{C}_m^{F_1} + C_m^{F_1} F_1] \} \times W = C_m^{F_1} F_1 + C_m^{F_2} F_2.$$

Отсюда следует

$$\tilde{C}_m^{F_1} = \frac{C_m^{F_1} F_1 (1 - \zeta W) + C_m^{F_2} F_2}{[\zeta (\alpha P_1 + \beta P_2) + \delta] W + \alpha P_1 + \beta P_2}.$$

Значения потоков F_1, F_2, P_2, W находятся из уравнений баланса и заданных ϕ и λ :

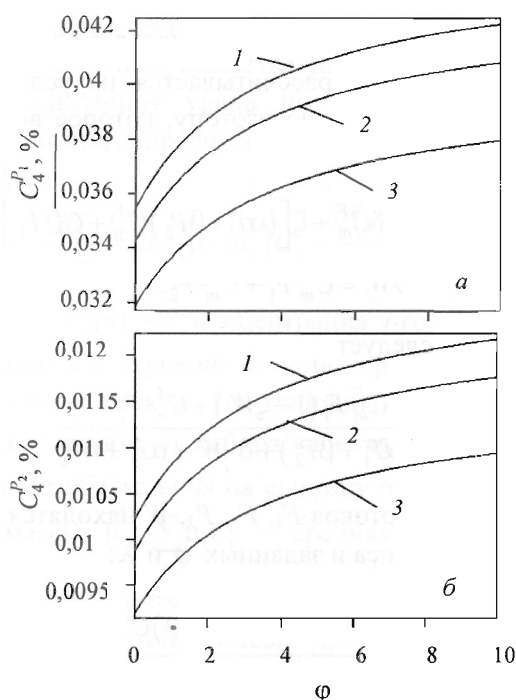
$$F_1 = \frac{P_1 [C^{P_1} + \phi C^{P_2} - (1 + \phi) C^W]}{C^{F_1} + \lambda C^{F_2} - (1 + \lambda) C^W};$$

$$F_2 = \lambda F_1; \quad P_2 = \phi P_1; \quad W = (1 + \lambda) F_1 - (1 + \phi) P_1.$$

Приведенные соотношения переходят в формулы работы [1] при условии $\phi \rightarrow 0, \lambda \rightarrow 0$. Также из данных формул можно получить соотношения для каскада с двумя питаниями и одним отбором. Для этого необходимо принять $\lambda = 0$. Соотношения для каскада с одним питанием и двумя отборами получаются при $\phi = 0$.

Особенности изменения концентрации ^{234}U по каскаду. На рис. 2 приведены результаты расчетов параметров каскадов для трехкомпонентной смеси изотопов $^{234}\text{U}, ^{235}\text{U}, ^{238}\text{U}$. Концентрация в питании принята такой: $C^{F_1} = 0,711\%$, $C_4^{F_1} = 0,0058\%$, $C^{F_2} = 0,355\%$, $C_4^{F_2} = 0,0023\%$. Концентрация ^{235}U в отборах и отвале $C^{P_1} = 4\%$, $C^{P_2} = 1,5\%$, $C^W = 0,1\%$, поток основного отбора $P = 1$ г/с.

Как видно на рис. 2, изменяя параметры каскада ϕ и λ , можно регулировать содержание ^{234}U в основном и промежуточном отборах каскада. На рис. 3 для случая одного питания при $\phi = 1$ и $\lambda = 0$ показано изменение концентрации ^{234}U по каскаду в зависимости от концентрации ^{235}U . Для сравнения приведен график для каскада с одним отбором и одним питанием при $C^{F_1} = 0,711\%$, $C_4^{F_1} = 0,0058\%$, $C^{P_1} = 1,5\%$. Видно, что при одинаковой концентрации ^{235}U 1,5% концентрация ^{234}U в каскаде с двумя отбо-



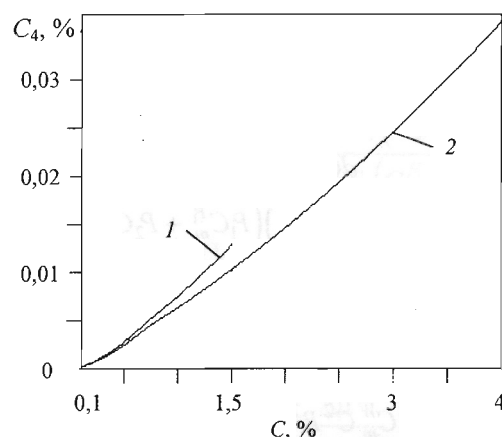
Р и с. 2. Зависимость изменения концентрации ^{234}U в основном (а) и промежуточном отборе каскада (б) от соотношений между потоками отбора и потоками питания, равными 0,1 (1), 1 (2), 10 (3)

рами меньше. Данный факт можно использовать при производстве более качественного разбавителя с концентрацией ^{235}U 1,5% для высокообогащенного урана. Уменьшение содержания ^{234}U в разбавителе достигается путем его наработки в промежуточном отборе каскада при малых ϕ и большой концентрации ^{235}U низкообогащенного урана, получаемого в основном отборе.

Рассмотренная методика может быть распространена на каскады, характеризующиеся большим числом потоков. Для этого необходимо использовать соответствующие транзитные потоки в уравнении (1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сазыкин А.А. Квазиидеальные каскады для разделения многокомпонентных смесей изотопов. — В сб.: V Научная конф. «Физико-химические процессы при селек-



Р и с. 3. Зависимость распределения ^{234}U по каскаду с одним (1) и двумя отборами (2) от концентрации ^{235}U

- ции атомов и молекул». М., ЦНИИАтоминформ, 2000, с. 51—57.
2. Zeng S., Ying C. Separating isotope components of small abundance. — Sep. Sci. Technol., 2002, v. 37(15), p. 3577—3598.
3. Сазыкин А.А. Разделение многокомпонентных смесей изотопов в квазиидеальном каскаде с двумя точками питания. — В сб.: IX Всерос. (межд.) конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». М., ЦНИИАтоминформ, 2004, с. 18—23.
4. Сулаберидзе Г.А., Борисевич В.Д., Цюаньсинь Се. Квазиидеальные каскады с дополнительным потоком для разделения многокомпонентных изотопных смесей. — Теоретические основы хим. технологии, 2006, т. 40, № 1, с. 7—16.
5. Палкин В.А., Фролов Е.С. Оптимальный каскад с заданными концентрациями по целевому изотопу: свойства и сравнение с R-каскадом. — В сб.: VIII Всерос. (межд.) конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». М., ЦНИИАтоминформ, 2003, с. 23—28.
6. Жигаловский Б.В. Лекционные материалы по многокомпонентным смесям. Новоуральск, УЭХК, 1999.
7. Израилевич А.И. Формулы расчета содержания минорных изотопов для трехпоточных каскадов. — В сб.: VIII Всерос. (межд.) конф. «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул». М., ЦНИИАтоминформ, 2003, с. 40—42.

Поступила в Редакцию 1.06.06