

УДК 621.039.31

ЗАВИСИМОСТЬ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ ОТ ДЛИНЫ РОТОРА ГАЗОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ

Александров О.Е. (УрФУ, г. Екатеринбург)

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

Основной характеристикой газовой центрифуги является ее разделительная мощность

$$\delta U = PV(N_P) + WV(N_W) - FV(N_F), \quad (1)$$

где F , P , W — поток питания, отбора и отвала соответственно; N_F , N_P , N_W — концентрация смеси в потоке питания, отбора и отвала соответственно; $V(N) = (2N - 1) \ln[N/(1 - N)]$ — функция ценности; N — концентрация смеси.

Формулы, описывающие зависимость разделительной мощности центрифуги (1) от ее параметров, широко известны. Но теоретическая зависимость, связывающая длину ротора и максимальную разделительную мощность центрифуги, только одна [1]. Формула Дирака предсказывает линейную зависимость разделительной мощности от длины ротора центрифуги.

Цель настоящей работы — определение более точной теоретической зависимости максимальной разделительной мощности газовой центрифуги от длины ротора.

Общий недостаток формул [2—4] — недостаточный учет аналитических методов описания разделения в роторе. Формулы строятся на основе аппроксимации эксперимента или численных расчетов. Для записи разделительной мощности реальной центрифуги обычно используют выражение максимальной разделительной мощности центрифуги по Дираку

$$\delta U_{\max} = \frac{\pi}{2} L \rho D \left(\frac{\Delta m (R \Omega)^2}{2kT} \right)^2, \quad (2)$$

где L — длина ротора; ρ — плотность разделяемого газа; D — коэффициент диффузии газовой смеси; $\Delta m = |m_1 - m_2|$ — модуль разности массы молекул изотопов; R — внутренний радиус ротора центрифуги; Ω — угловая скорость вращения ротора; k — универсальная газовая постоянная; T — температура газа.

С помощью формулы (2) разделительную мощность реальной центрифуги выражают [1] как

$$\delta U = \delta U_{\max} \left(\prod_i e_i \right),$$

где e_i — i -й коэффициент эффективности. Обычно один коэффициент e_i отражает влияние одного параметра. Например, можно ввести коэффициент эффективности профиля противоточного течения, который характеризует разницу между реальным радиальным профилем потока в центрифуге и идеальным. Аналогично можно определить и другие коэффициенты эффективности.

Большинство формул, описывающих разделительную способность центрифуги, используют линейную зависимость от длины ротора, как это следует из выражения (2). Примером таких формул могут быть

$$\delta U = (0,038V - 11,5)L \text{ е.р.}/\text{год} —$$

зависимость оптимальной разделительной способности центрифуги в диапазоне скорости 500—800 м/с [2]. Эта формула получена на основе численных расчетов

$$\text{или } \delta U = 12L \left(\frac{V}{700} \right)^2 \left(\frac{2R}{0,12} \right)^{0,4} \text{ е.р.}/\text{год} —$$

формула для центрифуги с длиной ротора около 1 м [5], где длина L и радиус ротора R выражены в м, скорость V — в м/с.

Недостаток подобных формул — использование неполного набора основных параметров центрифуги. Так, не учитывается такой важный параметр, как поток питания центрифуги. В этом они следуют Дираку: формула (2) не содержит характеристику, которая связана с количеством вещества, подвергаемого обработке в единицу времени. Но очевидно, что центрифуга с нулевым потоком питания имеет нулевую

разделительную мощность. Другое важное упущение состоит в том, что предполагается достижимость предела Дирака (2) при конечном потоке питания.

На основе аналитического решения уравнения диффузии для газа внутри ротора центрифуги было показано, что абсолютный максимум разделительной мощности центрифуги для произвольного конечного потока питания и произвольной длины ротора можно выразить в виде [6]

$$\delta U = 2 \frac{\beta_i^2}{l_i} \delta U_{\max}, \quad (3)$$

где максимальная работа разделения по Дираку $\delta U_{\max}$ определена по формуле (2). Термин «абсолютный» означает, что ни при каких условиях разделительная мощность газовой центрифуги с заданными параметрами L , Ω , R и F не может превысить указанную величину.

Безразмерные параметры β_i и l_i , входящие в формулу (3), определяются через физические параметры центрифуги следующим образом:

$$\beta_i = \frac{v_i \ln \alpha_i}{fa}; \quad l_i = L_i v_i; \quad v_i = \frac{F \Theta_i}{\pi R^2 \rho D}; \quad a = R \sqrt{1/2};$$

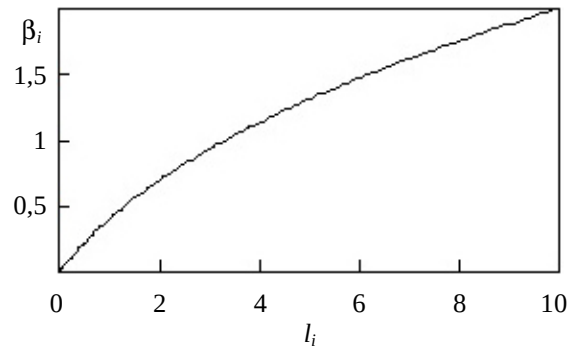
$$f = \frac{\Delta m \Omega}{kT}; \quad \alpha_i = \frac{N_F (1 - N_i)}{N_i (1 - N_F)}. \quad (4)$$

Здесь i — индекс обогащательной или извлекающей части ротора, ротор на две части делится по точке подачи питания; Θ_i — коэффициент деления потока; L_i — длина i -й части ротора; N_F , N_i — концентрация питания и в i -м отборе соответственно. Максимум разделительной мощности достигается при $\Theta_i = 1/2$ и $L_i = L/2$.

При максимуме разделительной мощности безразмерный коэффициент обогащения β_i и безразмерная длина ротора l_i (4) связаны уравнением [6]

$$l_i = \beta_i \left(\sqrt{1 + \beta_i^2} + \beta_i \right) + \ln \left(\sqrt{1 + \beta_i^2} + \beta_i \right). \quad (5)$$

Кривая $\beta_i(l_i)$ показана на рис. 1, соответствующая уравнению (5) относительная разделительная мощность $\delta U / \delta U_{\max}$ как функция безразмерной длины ротора l_i — на рис. 2.

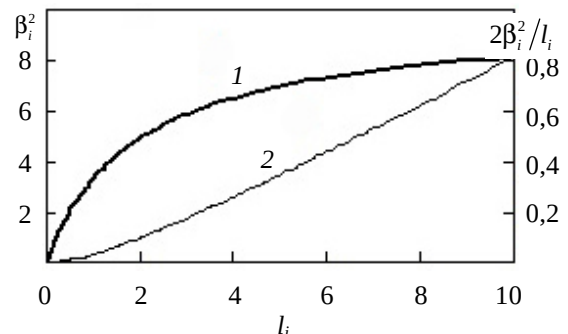


Р и с. 1. Связь безразмерного коэффициента обогащения центрифуги β_i и безразмерной длины ротора l_i

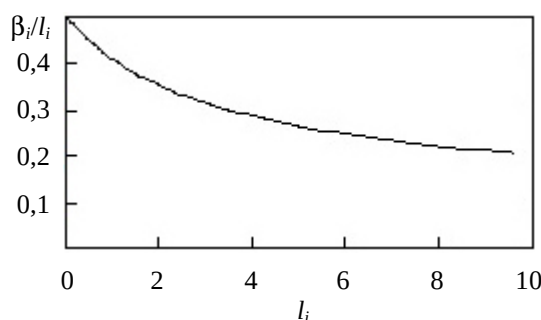
Учитывая, что при фиксированном потоке питания максимальная работа разделения по Дираку $\delta U_{\max} \propto L$ и безразмерная длина ротора $l_i \propto L$, по уравнению (3) получим $\delta U \propto \beta_i^2$. Зависимость $\beta_i^2(l_i)$ показана на рис. 2.

Отличием выражений (3)—(5) от предшествующих для разделительной мощности является учет потока питания (4).

Как следует из рис. 2, разделительная мощность центрифуги нелинейно зависит от длины ротора. Разделительная мощность асимптотически стремится к линейной зависимости при стремлении безразмерной длины ротора l_i к бесконечности или, другими словами, при стремлении к бесконечности длины ротора или потока питания. Для конечного значения безразмерной длины ротора l_i достижимая максимальная разделительная мощность существенно меньше предела Дирака (2). Для малой безразмерной длины ротора l_i максимальная разделительная мощность возрастает пропорционально квадрату длины ротора L . При этом разделительная мощ-



Р и с. 2. Зависимость максимальной разделительной мощности β_i^2 (1) и отношения максимальной разделительной мощности к разделительной мощности центрифуги по Дираку $2\beta_i^2/l_i$ (2) от безразмерной длины ротора l_i



Р и с. 3. Безразмерный коэффициент обогащения центрифуги на единицу длины ротора β_i/l_i как функция безразмерной длины ротора l_i

ность значительно меньше предсказываемой формулой (2).

Центрифуги проектируются не только из соображений достижения максимальной разделительной мощности, но и с учетом конечного коэффициента обогащения. Требование конечного коэффициента обогащения $\epsilon_i = \ln(\alpha_i)$ не позволяет чрезмерно увеличивать поток питания.

Можно рассмотреть зависимость отношения β_i/l_i от безразмерной длины ротора l_i (рис. 3). Отношение β_i/l_i — это величина, пропорциональная коэффициенту разделения центрифуги, приходящемуся на единицу длины ротора, или ϵ_i/L . На рис. 3 видно, что β_i/l_i и соответственно ϵ_i/L монотонно снижаются с увеличением длины ротора.

Реальные центрифуги работают в диапазоне $l_i \sim 3$ —6. Этот диапазон является компромиссом между желанием получить максимальную разделительную мощность $\sim 0,5\delta U_{\max}$ и максимальный коэффициент обогащения ϵ_i на единицу длины ротора $\sim 0,5$ максимального ϵ_i/L . В этом диапазоне зависимость разделительной мощности от безразмерной длины ротора l_i нелинейная (см. рис. 2). Для небольшого интервала изменения l_i в силу гладкости зависимости β_i^2 от l_i аппроксимация разделительной мощности линейной зависимостью может давать удовлетвори-

тельное совпадение с экспериментом или численным расчетом. Но при более значительных изменениях длины ротора будет наблюдаться нелинейность.

Более того, зависимость разделительной мощности от длины ротора монотонная только для одинакового (постоянного) потока питания. Если пытаться получить зависимость максимальной разделительной мощности от длины ротора для центрифуг с разным потоком питания, но без его учета, то она может демонстрировать немонотонное изменение. Примером этого может служить зависимость максимальной разделительной мощности от длины ротора, приведенная в работе [3].

Полученная аналитическая зависимость максимальной разделительной мощности газовой центрифуги от длины ротора и потока питания позволяет точнее оценить максимальную разделительную мощность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Cohen K.** The Theory of Isotope Separation as Applied to the Large-Scale Production of ^{235}U . New York: McGraw-Hill Book, 1951.
2. **Doneddu F., Roblin P., Wood H.** Optimization studies for gas centrifuges. — Sep. Sci. Technol., 2000, v. 35, № 8, p. 1207—1215.
3. **Borisevich V.D., Borman V.D., Bogovalov S.V. et al.** On a formula to evaluate the separative power of long gas centrifuges. — Sep. Sci. Technol., 2014, v. 49, № 3, p. 329—337.
4. **Боговалов С.В., Кислов В.А., Тронин И.В.** Зависимость оптимальной разделительной способности газовой центрифуги от геометрических параметров и скорости вращения ротора. — Изв. вузов. Физика, 2015, т. 58, № 2/2, с. 25—37.
5. **Сенченков А.П., Сенченков С.А., Борисевич В.Д.** Газовые центрифуги. — В кн.: Изотопы: свойства, получение, применение. М.: Физматлит, 2005, т. 1, с. 168.
6. **Aleksandrov O.E.** The upper limit of the separation efficiency of a gas centrifuge. — Sep. Sci. Technol., 2013, v. 48, № 6, p. 833—841.

Поступила в Редакцию 02.06.2018