

УДК 621.039.31

ОЦЕНКА СНИЖЕНИЯ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ СТУПЕНЕЙ КАСКАДА ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ

Палкин В.А. (Уральский федеральный ун-т, г. Екатеринбург)

Технологические схемы производства обогащенного урана рассчитывают по индивидуальным разделительным характеристикам ступеней, которые определяются используемым оборудованием и испытаниями отдельных газовых центрифуг. Характеристики центрифуг необходимо корректировать в процессе эксплуатации из-за влияния временного фактора, выражающегося в появлении дефектов, изменении параметров и снижении разделительной способности. Такую корректировку целесообразно осуществлять на основании измерения параметров состояния эксплуатируемого оборудования, которые коррелируют с колебаниями разделительной способности центрифуг. В промышленных условиях техническое состояние оборудования контролируется с помощью датчика вращения, штатно входящего в состав каждой центрифуги. К характеристикам, измеряемым в массовом порядке, относятся частота вращения и мощность трения центрифуг, для которых разработана система выявления дефектов [1]. С помощью датчика вращения можно также измерять биение горловины ротора центрифуги, также приводящее к снижению разделительной способности [2]. Это позволяет создать соответствующую автоматизированную систему массовых промышленных измерений [3].

Целью настоящей работы являлась разработка методики оценки изменения разделительной способности ступеней каскада во времени по измерению параметров центрифуг с помощью аппарата математической статистики. Возможность его использования обусловлена большим числом центрифуг в ступенях современных разделительных каскадов. На основе моделей марковских диффузионных процессов рассмотрены основные механизмы изменения параметров состояния. Приведены примеры оценки потерь разделительной способности для типичных законов распределения биения горловины ротора и мощности трения центрифуг.

Основные формулы для оценки изменения разделительной способности ступеней. Неидентичность газовых центрифуг выражается в разбросе измеряемых параметров их состояния

и характеристик разделения. Центрифуги одной ступени объединены общими коммуникациями. Поэтому эффект разделения в ступени рассчитывается по суммарным потокам центрифуг в отборе L' , отвале L'' , питании L и соответствующей усредненной концентрации ^{235}U (массовой доли) $\bar{C}', \bar{C}'', \bar{C}$. Полный коэффициент разделения ступени

$$q_c = \frac{\bar{C}'}{1 - \bar{C}'} \bigg/ \frac{\bar{C}''}{1 - \bar{C}''},$$

разделительная способность (мощность) ступени —

$$\Delta U = L'V(\bar{C}') + L''V(\bar{C}'') - LV(\bar{C}),$$

где $V(C) = (2C - 1) \ln C / (1 - C)$ — потенциал разделения, рассчитываемый по концентрации C .

Разделительная способность ΔU меньше суммарной разделительной способности, определяемой по формуле

$$\Delta U_c = \sum_{i=1}^N \delta U_i = \sum_{i=1}^N [l'_i V(C'_i) + l''_i V(C''_i) - l_i V(C_i)],$$

где N — число центрифуг в ступени; δU_i — разделительная способность i -й центрифуги; l'_i, l''_i, l_i — поток отбора, отвала и питания i -й центрифуги соответственно; C'_i, C''_i, C_i — соответствующая концентрация ^{235}U . Разница $\Delta U_{\text{см}} = \Delta U_c - \Delta U$ представляет собой потерю разделительной способности ступени из-за смешения потоков центрифуг с разной концентрацией.

Поскольку в ступенях каскадов по производству обогащенного урана эксплуатируются сотни и тысячи центрифуг, можно перейти в формулах от суммирования к интегрированию распределения измеряемого параметра. Эффект снижения разделительной способности центрифуг мал, следовательно, можно рассматривать отдельно каждый параметр состояния, пренебрегая взаимным влиянием. Обозначим некоторый измеряемый параметр x , плотность распределения центрифуг по этому параметру в мо-

мент времени t как $f(x, t)$. Тогда суммарная раз-
делительная способность центрифуг ступени

$$\Delta U_c = N \int_{x_n}^{x_b} \delta U(x) f(x, t) dx,$$

где x_n , x_b — предел изменения параметра;
 $\delta U(x)$ — разделительная способность центри-
фуги, выраженная как функция x .

При относительно небольшом полном ко-
эффициенте разделения центрифуги $q \sim 1,1$ — $1,5$
можно упростить выражение для определения
разделительной способности, записав в виде [4]

$$\delta U(x) = \frac{1}{2} l \theta (1 - \theta) \ln^2 q(x),$$

получаемом при разложении потенциалов раз-
деления $V(C')$, $V(C'')$ в ряд Тейлора по степе-
ням $C' - C$ и $C'' - C$ соответственно и ограни-
чении членами второго порядка малости. Здесь
 $\theta = l'/l$ — коэффициент разделения потока.

Рассмотрим случай, когда определяющей
является неидентичность центрифуг по коэффи-
циенту разделения. Тогда

$$\Delta U_c = N \overline{\delta U} = \frac{1}{2} L \theta (1 - \theta) \overline{\ln^2 q},$$

где $\overline{\ln^2 q} = \int_{x_n}^{x_b} \ln^2 q(x) f(x, t) dx$.

Аналогичным образом представляется раз-
делительная способность ступени. При разло-
жении в ряд Тейлора потенциалов $V(\overline{C'})$, $V(\overline{C''})$
в тех же приближениях находим

$$\Delta U = \frac{1}{2} L \theta (1 - \theta) \overline{\ln q}^2.$$

Здесь $\overline{\ln q} = \int_{x_n}^{x_b} \ln q(x) f(x, t) dx$. При выводе

использовано соотношение, с хорошей точно-
стью аппроксимирующее полное обогащение
центрифуг при $q \sim 1,1$ — $1,5$ [4]:

$$C' - C'' \approx \ln q C (1 - C).$$

В формулах $\ln q$ можно определить как
полный коэффициент обогащения ϵ . В таких
обозначениях потеря разделительной способнос-
ти ступени от смешения потоков центрифуг с
разной концентрацией пропорциональна дис-

персии полного коэффициента обогащения $D\epsilon$,
т.е.

$$\Delta U_{cm} = \frac{1}{2} L \theta (1 - \theta) \left[\overline{\epsilon^2} - \bar{\epsilon}^2 \right] = \frac{1}{2} L \theta (1 - \theta) D\epsilon.$$

Следует отметить, что с помощью указан-
ных приближений можно оценивать относи-
тельное снижение разделительной способности
ступеней во времени. Абсолютные значения
имеют погрешности в несколько десятых про-
цента. Исключение таких погрешностей воз-
можно при учете большего числа членов в раз-
ложении потенциалов разделения. В частности,
для концентрации ^{235}U , не превышающей 5%, с
погрешностью до сотых процента справедливо
соотношение

$$\delta U = \frac{1}{2} l \theta (1 - \theta) \epsilon^2 \left[1 + \frac{1}{3} (1 - 2\theta) \epsilon - \frac{1}{2} (1 - 3\theta + 3\theta^2) \epsilon^2 \right].$$

Распределения, описывающие изменение параметров состояния центрифуг во времени.

При выборе закона распределения необходимо
учитывать начальный разброс центрифуг по па-
раметру x и его изменение во времени. Общей
формулой для расчета $f(x, t)$ является

$$f(x, t) = \int_{x_n}^{x_b} f(x, t; x_0, t_0) f(x_0, t_0) dx_0,$$

где $f(x, t; x_0, t_0)$ — условное распределение
центрифуг по x в момент времени t , имеющих в
начальный момент времени t_0 параметр состоя-
ния x_0 ; $f(x_0, t_0)$ — распределение начальных
значений x_0 .

Распределение $f(x_0, t_0)$ можно определить
исходя из общих статистических закономернос-
тей. В частности, так как эксцентриситеты вра-
щающихся деталей удовлетворяют закону Релея
[5], его можно принять для определения биения
горловины ротора:

$$f(x_0, t_0) = \frac{x_0}{\sigma^2} \exp \left(-\frac{x_0^2}{2\sigma^2} \right),$$

где параметр σ связан со средним значением
соотношением $\overline{x_0} = \sqrt{\pi/2} \sigma$. Для других парамет-
ров состояния, значения которых существенно
больше нуля, например, мощности трения, мож-
но использовать нормальный закон, формально
полагая $-\infty < x_0 < +\infty$:

$$f(x_0, t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{(x_0 - \mu)^2}{2\sigma^2}\right].$$

Здесь среднее значение x_0 равно μ , дисперсия σ^2 .

При определении условной плотности $f(x, t; x_0, t_0)$ можно использовать математический аппарат марковских диффузионных случайных процессов [6], в соответствии с которым распределение $f(x, t; x_0, t_0)$ удовлетворяет уравнению Фоккера—Планка—Колмогорова

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x}(af) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2}(bf),$$

где $a = a(x, t)$ — коэффициент сноса; $b = b(x, t)$ — коэффициент диффузии. Начальное условие для уравнения определяется через дельта-функцию $f(x, t_0; x_0, t_0) = \delta(x - x_0)$. Граничные условия задают в зависимости от рассматриваемого процесса.

В соответствии с аналитическим методом решения уравнения вводят новые переменные: $\tau = \tau(t)$, являющуюся непрерывной неубывающей функцией t , и $y = y(x, t)$, допускающую непрерывные производные по x . В новых переменных можно записать уравнение Фоккера—Планка—Колмогорова для плотности $f_1(y, \tau; y_0, \tau_0)$. При соответствующем выборе $\tau = \tau(t)$, $y = y(x, t)$ получим коэффициент сноса $a_1 = 0$ и коэффициент диффузии $b_1 = 1$. В результате уравнение преобразуется к удобному виду, характерному для диффузионных процессов:

$$\frac{\partial f_1}{\partial \tau} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f_1}{\partial y^2},$$

который при условиях $f_1(y, \tau_0; y_0, \tau_0) = \delta(y - y_0)$ и $f_1(\pm\infty, \tau; y_0, \tau_0) = 0$ приводит к нормальному распределению

$$f_1(y, \tau; y_0, \tau_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left[-\frac{(y - y_0)^2}{2\tau}\right].$$

Далее переходим обратно к переменным x, t , подставляя функции $\tau = \tau(t)$, $y = y(x, t)$ в формулу

$$f(x, t; x_0, t_0) = f_1(y, \tau; y_0, \tau_0) \left| \frac{\partial y}{\partial x} \right|.$$

Для расчета изменения параметров состояния газовых центрифуг важную роль играют два преобразования: $\tau = \tau(t)$, $y = y(x, t)$. Первое из них записывают для коэффициентов сноса и диффузии $a(x, t) = \alpha(t)(x - c_0)$, $b(x, t) = \beta(t)(x - c_0)^2$, где $\alpha(t)$, $\beta(t)$ — заданные функции t , определяемые по изменению рассматриваемого параметра состояния; c_0 — произвольная константа. В этом случае

$$\tau(t) = \int_{t_0}^t \beta(s) ds; \quad y(x, t) = \ln(x - c_0) + \int_{t_0}^t [\beta(s) - \alpha(s)] ds.$$

Условное распределение $f(x, t; x_0, t_0)$ получается в виде логарифмически нормального закона относительно переменной x :

$$f(x, t; x_0, t_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\tau(t)(x - c_0)}} \times \exp\left\{-\frac{[\ln(x - c_0) - \ln(x_0 - c_0) + \tau(t) - \rho(t)]^2}{2\tau(t)}\right\},$$

где $\rho = \int_{t_0}^t \alpha(s) ds$. Характерно, что параметры этого закона изменяются во времени.

Второе преобразование определяют для коэффициентов сноса и диффузии, записываемых в виде $a(x, t) = \alpha(t)x + \beta(t)$, $b(x, t) = \gamma(t)$:

$$\begin{aligned} \tau(t) &= \frac{1}{\gamma(t_0)} \int_{t_0}^t \gamma(v) \exp\left[-2 \int_{t_0}^v \alpha(s) ds\right] dv; \\ y(x, t) &= \frac{1}{\sqrt{\gamma(t_0)}} \left\{ x \exp\left[-\int_{t_0}^t \alpha(s) ds\right] - \int_{t_0}^t \beta(v) \exp\left[-\int_{t_0}^v \alpha(s) ds\right] dv \right\}. \end{aligned}$$

Так как переменная y зависит от переменной x линейным образом, условное распределение можно записать в виде нормального закона относительно переменной x :

$$f(x, t; x_0, t_0) = \sqrt{\frac{\gamma(t_0)}{2\pi\tau(t)}} \exp\left\{-\frac{[y(x, t) - y(x_0, t_0)]^2}{2\tau(t)}\right\}.$$

Граничное условие $f_1(-\infty, \tau; y_0, \tau_0) = 0$ для первого типа преобразований соответствует $f(c_0, t; x_0, t_0) = 0$. Его целесообразно применять

при параметрах состояния, близких к постоянной c_0 , и ограничении пределов изменения параметра состояния центрифуг $x \geq c_0$. Для второго типа преобразований условие $f_1(-\infty, \tau; y_0, \tau_0) = 0$ равносильно $f(-\infty, t; x_0, t_0) = 0$. Его можно использовать для параметров состояния, имеющих отрицательные и положительные значения. Кроме того, это условие применимо при положительных параметрах состояния существенно больше нуля при $f(-\infty, t; x_0, t_0) \approx f(0, t; x_0, t_0) = 0$.

Приведенные функции $f(x, t; x_0, t_0)$ исчерпывают возможные законы распределения для газовых центрифуг. Вместе с тем при необходимости может быть введено более сложное распределение. Так, для второго типа преобразований ограничение $x \geq 0$ при параметрах состояния, близких к нулю, может потребовать строгого выполнения условия $f(0, t; x_0, t_0) = 0$. В таком случае существует решение в виде

$$f(x, t; x_0, t_0) = \sqrt{\frac{\gamma(t_0)}{2\pi\tau(t)}} \left\{ \exp \left[-\frac{[y(x, t) - y(x_0, t_0)]^2}{2\tau(t)} \right] - \exp \left[-\frac{[y(x, t) + y(x_0, t_0)]^2}{2\tau(t)} \right] \right\}.$$

Другим условием может быть так называемый отражающий экран, соответствующий равенству производной f по x нулю при $x = 0$. Тогда

$$f(x, t; x_0, t_0) = \sqrt{\frac{\gamma(t_0)}{2\pi\tau(t)}} \left\{ \exp \left[-\frac{[y(x, t) - y(x_0, t_0)]^2}{2\tau(t)} \right] + \exp \left[-\frac{[y(x, t) + y(x_0, t_0)]^2}{2\tau(t)} \right] \right\}.$$

При выбранных распределениях $f(x_0, t_0)$ и $f(x, t; x_0, t_0)$ можно рассчитать распределение $f(x, t)$ путем аналитических преобразований и численного интегрирования. Возможны также упрощения на основе аппроксимации полученных законов более простыми. Так, плотность $f(x, t; x_0, t_0)$ для случая отраженного экрана хорошо описывается усеченным нормальным распределением. Другим подходом является определение приближенного закона распределения

$f(x, t)$ на основе анализа взаимного влияния $f(x_0, t_0)$ и $f(x, t; x_0, t_0)$. В частности, при малом отработанном времени закон распределения $f(x, t)$ будет определяться $f(x_0, t_0)$, при большом — $f(x, t; x_0, t_0)$.

Оценки снижения разделительной способности ступеней. Исходя из опытных данных, можно установить связь характеристик разделения центрифуг с параметром состояния. Допустим, что для биения горловины ротора центрифуги она выражается в виде линейной зависимости $\varepsilon^2 = \varepsilon_0^2(1 - hx)$, $x \geq 0$, где ε_0 — полный коэффициент обогащения, соответствующий $x = 0$; h — коэффициент, учитывающий уменьшение ε^2 и потери разделительной способности при $x > 0$. Тогда

$$\Delta U_c = N\delta U_0(1 - h\bar{x});$$

$$\Delta U \approx N\delta U_0 \left(1 - \frac{h}{2}\bar{x} - \frac{h^2}{8}\overline{x^2} \right)^2,$$

где δU_0 — разделительная способность газовой центрифуги при заданных потоке питания g , коэффициенте деления потока θ и полном коэффициенте обогащения ε_0 ; $\bar{x}$, $\overline{x^2}$ — среднее значение и средний квадрат биения горловины. Формула для ΔU получена путем разложения в ряд $(1 - hx)^{1/2}$ при условии малости эффекта снижения разделительной способности.

Эти выражения можно использовать для распределения Релея, к которому будет близко распределение $f(x, t)$ при малом отработанном времени. При подстановке $\bar{x} = \sqrt{\pi/2}\sigma$ и $\overline{x^2} = 2\sigma^2$ получим

$$\Delta U_c = N\delta U_0 \left(1 - h\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma \right);$$

$$\Delta U = N\delta U_0 \left(1 - \frac{h}{2}\sqrt{\frac{\pi}{2}}\sigma - \frac{h^2}{4}\sigma^2 \right)^2.$$

Оценки показывают, что суммарная разделительная способность центрифуг ΔU_c может отличаться от $N\delta U_0$ на десятые доли процента, потери от смешения потоков центрифуг с разной концентрацией в ступени $\Delta U_{см}$ не превышают сотой процента.

При большом отработанном времени закон Релея в соответствии с $f(x, t; x_0, t_0)$ для первого типа преобразований может трансформироваться в логарифмически нормальное распределение вида

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(t)x} \exp\left\{-\frac{[\ln x - \mu(t)]^2}{2\sigma^2(t)}\right\}.$$

Здесь $\mu(t)$, $\sigma(t)$ — изменяющиеся во времени параметры. В этом случае $\bar{x} = \exp[\mu + \sigma^2/2]$, для среднего квадрата биения ротора центрифуги $\overline{x^2}$ получается сложное выражение. Снижение разделительной способности ступени по сравнению с $N\delta U_0$ будет больше, чем для распределения Релея, из-за увеличения во времени среднего значения $\bar{x}$ и среднего квадрата $\overline{x^2}$. Однако потери от смещения потоков $\Delta U_{\text{см}}$ будут также невелики.

Аналогичным образом оцениваются потери разделительной способности ступени по другим параметрам состояния. Особым случаем является наличие явно дефектных центрифуг, выявляемых по мощности трения. Для оценок распределения центрифуг $f(x, t)$ можно представить как сумму двух распределений. Первое из них будет описывать нормально работающие центрифуги с разделительной способностью δU_0 , второе — центрифуги с потерей разделительной способности $\delta U_0 [1 - h(x - x_r)]$ при превышении некоторого граничного значения x_r .

Для простоты можно принять распределение $f(x, t)$ нормальным при $x \leq x_r$, т.е.

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right],$$

и равномерным в области $x_r < x \leq x_b$: $f(x, t) = d/(x_b - x_r)$. Здесь d — доля дефектных центрифуг, которая рассчитывается исходя из нормального закона при условии $x > x_r$:

$$d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{x_r}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] dx = \Phi\left(\frac{\mu - x_r}{\sigma}\right),$$

где $\Phi(z) = 1/\sqrt{2\pi} \int_{-\infty}^z \exp(-u^2/2) du$ — нормированная нормальная функция распределения.

Верхний предел x_b в выражении для равномерной плотности можно выбрать исходя из максимальной мощности трения или условия $h(x_b - x_r) = 1$.

Отсюда, интегрируя выражения с нормальным распределением в интервале граничных значений $-\infty < x \leq x_r$ и равномерным при $x_r < x \leq x_b$, находим

$$\begin{aligned} \Delta U_c &= N\delta U_0 \left[1 - \frac{dh}{2}(x_b - x_n) \right]; \\ \Delta U &= N\delta U_0 \left\{ \Phi\left(\frac{x_r - \mu}{\sigma}\right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{2d}{3h(x_b - x_n)} \left[1 - [1 - h(x_b - x_n)]^{3/2} \right] \right\}. \end{aligned}$$

Дефекты могут приводить к существенному повышению мощности трения центрифуг и заметной потере разделительной способности ступеней каскада [7].

Заключение. Разработанный подход позволяет находить измеряемые параметры состояния газовых центрифуг. На основе этих распределений, установив корреляционную связь параметров состояния с коэффициентом обогащения центрифуг, можно оценивать снижение разделительной способности ступеней каскада и корректировать их характеристики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамович А.В., Афанасьев В.Г., Горохов В.Е. и др.** Способ выявления дефектов (возмущений) в газовых центрифугах изотопно-разделительного каскада и система диагностики для его реализации. Пат. РФ № 2236308 от 20.09.2004. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2004, № 25, с. 562.
2. **Зайцев Е.С., Домненко А.И.** Контроль биений горловин роторов газовых центрифуг с использованием штатных датчиков вращения. — Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика, 2011, № 5, с. 56—60.
3. **Зайцев Е.С., Скорынин Г.М., Ткачев С.В., Астафуров В.Г.** Автоматизированная система измерения биений горловин роторов газовых центрифуг. — Там же, 2012, № 11, с. 43—46.
4. **Палкин В.А.** Потенциал и разделительная способность в процессах разделения бинарных смесей изотопов. — Атомная энергия, 1998, т. 84, вып. 3, с. 253—259.
5. **Шор Я.Б.** Статистические методы анализа и контроля качества и надежности. М.: Сов. радио, 1962.

6. Тихонов В.А., Миронов М.А. Марковские процессы. М.: Сов. радио, 1977.
7. Арсеньев Д.Г., Бурлаков С.П., Евсюков А.М. и др. Способ восстановления проходимости трасс газовой

центрифуги. Пат. РФ № 2279926 от 20.07.2006. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2006, № 20, с. 562.

Поступила в Редакцию 25.12.13

УДК 621.039.31

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИРКУЛЯЦИИ В ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГАХ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ УРАНА С РАЗНЫМИ ГЕОМЕТРИЧЕСКИМИ И СКОРОСТНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Борисевич В.Д. (НИЯУ МИФИ, г. Москва),

Годисов О.Н., Яценко Д.В. (ЗАО «Центротех-СПб», г. Санкт-Петербург)

Газовые центрифуги для обогащения урана, работающие в разных странах мира, имеют много общих базовых элементов, но при этом отличаются геометрическими параметрами и частотой вращения ротора. Основной характеристикой центрифуги является разделительная способность, зависящая от длины и диаметра ротора, частоты его вращения, а также других элементов конструкции и характеристик процесса, обеспечивающих оптимальные условия для создания осевого противоточного течения (циркуляции), умножающего радиальный эффект разделения в процессе эксплуатации. Поскольку технология центробежного обогащения урана имеет двойное назначение, обсуждаются, как правило, теоретические зависимости разделительных характеристик от параметров центрифуги [1—9]. Такие зависимости, получаемые с помощью различных приближений, часто существенно различаются. В результате не удается сделать однозначного вывода о том, какие из коротких (отношение длины ротора L к диаметру $D \sim 4—10$), средней длины ($L/D \sim 10—20$) или очень длинных центрифуг ($L/D > 25$) являются предпочтительными с точки зрения оптимальных характеристик осевого циркуляционного течения и соответственно максимальной разделительной способности.

В настоящей статье сравнивается эффективность циркуляционного течения в газовых центрифугах, применявшихся для обогащения урана в разное время в отечественных промышленных установках, центробежных машинах ТС-12, 21 европейского концерна Urenco и американской AC-100, а также с теоретической моделью, известной как центрифуга Игуасу, в целях поиска общих закономерностей.

При проведении анализа считалось, что конструктивные характеристики рассмотренных центрифуг обеспечивают оптимальное осевое циркуляционное течение, при котором их разделительная способность максимальна. Справедливость этого предположения обосновывается тем, что промышленное применение начинается только после полного цикла расчетно-конструкторской и экспериментальной оптимизации, направленного на получение максимальной разделительной способности центрифуги при выбранных частоте вращения и геометрии ротора.

Теоретические предпосылки и формулы для расчета. Как известно, радиальный, или первичный эффект разделения значительно умножается по оси ротора за счет создания противоточного течения, что позволяет существенно уменьшить число разделительных ступеней в промышленных каскадах. Циркуляция выполняет еще одну важную роль: разделенные в осевом направлении фракции значительно проще вывести из центрифуги с помощью неподвижных газоотборников, установленных вблизи верхнего и нижнего торцов ротора. Циркуляцию рабочего газа в роторе создают разными способами [10]. В основном, параметры внутреннего противотока определяются совместным действием двух факторов:

механическим возбуждением за счет неподвижного газоотборника тяжелой фракции, который может быть установлен как в верхней, так и в нижней части ротора, определяя тем самым направление циркуляции;

тепловым возбуждением, при котором циркуляция возникает за счет температурного градиента по длине ротора.