

УДК 621.34+66.067.5

ОЧИСТКА РАСТВОРОВ УРАНОСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ МЕТОДОМ ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЯ

И.А. Колодников, С.Н. Кладиев, С.И. Кривопустов

Северский технологический институт НИЯУ «МИФИ», г. Северск

E-mail: kladiev@ssti.ru

Показана возможность очистки растворов урановой руды от нерастворимых труднофильтруемых компонентов на осадительной шнековой центрифуге. Выбор оптимального режима работы для конкретного вида сырья осуществляется подбором угловых частот вращения ротора и шнека. Сделан вывод о том, что автоматизированное управление частотой вращения электроприводов ротора и шнека и относительного отставания шнека от ротора с помощью частотных преобразователей является оптимальным для исследования режимов разделения суспензий на шнековых центрифугах.

Ключевые слова:

Урановые руды, фильтрование, центрифуга, разделение, относительная скорость шнека, управление, частотно-регулируемый электропривод.

Key words:

Uranium ore, filtration, centrifuge, separation, the relative velocity of the screw, control, variable-frequency electric drives.

Введение

Россия является одним из лидеров в мировой энергетике и непрерывно наращивает долю электроэнергии, вырабатываемой на АЭС. Государственная корпорация «Росатом» обладает всеми технологиями необходимыми для обеспечения функционирования ядерного энергетического комплекса. Имея в своём составе один из крупнейших холдингов по добыче урана и редких металлов («Урановый холдинг АРМЗ»), корпорация определила этап подготовки уранового сырья одно из важнейших мест в цепочке ядерно-топливного цикла, что позволяет удовлетворить собственные потребности в высококачественном топливе для АЭС.

Обладая мощной научной базой, «Росатом» поддерживает широкий спектр исследований фундаментального и прикладного характера для нужд энергетики. Научный интерес к этапам технологии ядерного топливного цикла никогда не угасал. Каждый этап переработки уранового сырья всё время находился под пристальным вниманием исследователей и непрерывно совершенствовался как с целью улучшения качества продукции, экономии ресурсов (сырья, энергии и реагентов), так и в научно-познавательных целях.

Проблема и объект исследования

Исследования начальных этапов переработки урановой руды показывают влияние типа уранового сырья на эффективность его переработки. Начальная цепочка, состоящая из переделов: «механическая обработка руды → обогащение руды → выщелачивание → подготовка растворов к аффинажу» чувствительна к химическому составу сырья и к размеру зерна породы.

После механического измельчения и классификации дробленая руда имеет тонкозернистую дисперсную структуру (размер зерна от 0,6 до 0,015 мм) и является исходным сырьём для процес-

са выщелачивания — извлечение урана из руды с помощью минеральных кислот. Химический состав сырья определяет тип процесса (серноокислый, азотнокислый или содовое выщелачивание), а размер зерна непосредственно влияет на скорость процесса. При подготовке руды делают высокую тонину помола, т. к. уменьшение размера частиц приводит к увеличению скорости выщелачивания [1]. В результате кислотного извлечения урана образуется пульпа, состоящая из раствора солей металла и нерастворенных промышленных отходов, к которым можно отнести пески и различные шламы. Пески представляют собой породу, содержащую SiO_2 (более 70 %), а также соединения Ti, Al, Fe, Ca, Mn, Mg и др. [2].

Перед проведением экстракции раствора урановых концентратов пульпу, содержащую раствор, предварительно очищают от нерастворённых примесей. Обычно для этого сырьё подвергают фильтрованию на тканевых фильтрах [1]. Очистка раствора на фильтрах имеет свои преимущества вследствие простоты процесса и аппаратного оформления, но не лишена недостатков:

- мелкодисперсные составляющие суспензии и шламов, наличие которых обусловлено минеральным составом руды и механическим помолом, в первые моменты процесса фильтрования делают раствор мутным, т. к. проходят сквозь поры фильтрующего элемента. Лишь спустя некоторое время, когда накопленные крупные частицы образуют дополнительный слой, фильтрование становится эффективным;
- по мере накопления слоя осадка снижается производительность фильтра, поэтому требуется провести механическую очистку фильтрующего элемента, на время которой технологический процесс очистки прекращается;
- осадок на фильтре остается слишком влажным и требует промывки вытесняющим раствором или повторной переработки;

- под воздействием агрессивных реагентов (кислоты) фильтрующий элемент постепенно изнашивается и подлежит замене.

Всех этих недостатков можно избежать, если очистку растворов урана проводить центрифугированием, применяя для этого осадительные центрифуги непрерывного действия со шнековой выгрузкой осадка. Сравнительно редкое применение осадительных центрифуг в технологии очистки урана обусловлено непригодностью их для переработки сырья с полидисперсным составом или сырья различного природного происхождения, т. к. это требует гибкого управления режимами работы центрифуги, что на прежнем невысоком уровне развития автоматизации и автоматизированных исполнительных электроприводов было довольно затруднительным.

Современное состояние средств контроля, автоматизации и управления [3] позволяет решать задачи эффективного управления технологическим режимом центрифуги, чтобы добиться максимальной степени очистки растворов. Поскольку основными приводами ротора и шнека осадительных центрифуг являются асинхронные электроприводы, а в современной приводной технике управление частотой вращения асинхронных двигателей осуществляют с помощью частотных преобразователей, то на их основе авторами разработан, изготовлен, смонтирован и настроен местный пульт автоматизированного управления центрифугой ОГШ-353К-09 [3]. Структурная схема управления центрифугой с использованием преобразователей фирмы «Danfoss» представлена на рис. 1.

Постановка задачи

Основной задачей при управлении осадительной шнековой центрифугой является задание и поддержание угловых скоростей ротора и шнека,

определённых математической моделью, что позволяет управлять рабочими режимами разделения суспензии.

Основываясь на анализе исследований гидродинамики центрифуг, представленных в источниках [4, 5], можно выделить три основные регулируемые величины, влияющие на качество очистки растворов: угловые частоты вращения ротора центрифуги и шнека выгрузки, а также расход суспензии, определяемый положением задвижки вентиля питающего трубопровода.

Математическая модель

Модель, на основе которой авторы работ [4, 5] делают заключения о характере поведения продукта внутри ротора центрифуги, построена на теориях слойного течения, поверхностного течения и линий тока. Две последние теории не получили заметного распространения из-за упрощенного представления гидродинамических процессов. Если поток жидкости в роторе имеет ярко выраженный подвижный слой $\delta_{пл}$ [5], то предполагается, что наглядное представление о геометрии потока жидкости внутри ротора и распределении скоростей, принятых в этой модели, иллюстрируется схемой на рис. 2.

В математической модели приняты следующие допущения:

- радиальной составляющей скорости v_r пренебрегают;
- жидкость является идеальной;
- окружная скорость v_ϕ и давление жидкости зависят только от текущего радиуса r ;
- граничными условиями являются $v_\phi(r_0) = v_{\phi 0}$ и $v_\phi(r_{01}) = v_{\phi 1}$;
- поток по всей глубине является ламинарным, тогда $v_\phi(r_{пл}) = v_{\phi 1} = 0$, где v_ϕ – окружная скорость потока; $v_{\phi 0}$ – окружная скорость потока на сво-

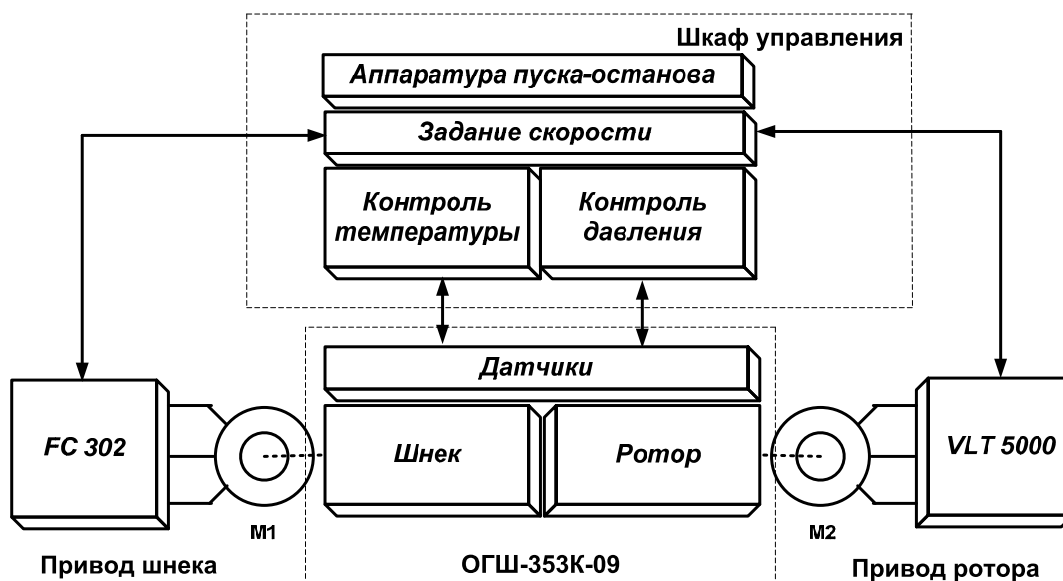


Рис. 1. Модернизированная установка центрифугирования на базе ОГШ-353К-09. FC302 и VLT5000 – преобразователи частоты «Danfoss». M1 и M2 – электродвигатели

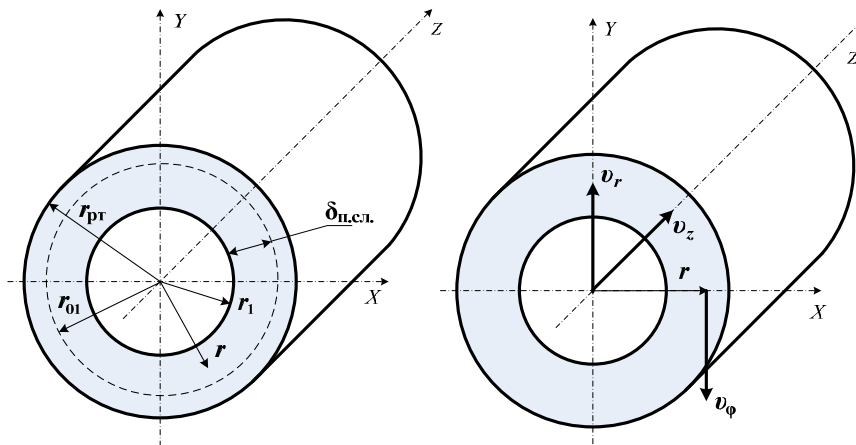


Рис. 2. Геометрия потока жидкости внутри ротора и распределение скоростей в цилиндрической системе координат

бодной поверхности; r – текущий радиус; r_0 – радиус свободной поверхности жидкости внутри ротора; r_{01} и r_{pt} – радиусы границы подвижного слоя и ротора.

Зависимости скоростей потока в цилиндрической системе координат находят интегрированием уравнений Навье–Стокса:

$$v_\varphi = v_{\varphi 0}[(r_{pt} - r)/(r_{pt} - r_0)]; \quad (1)$$

$$v_z = v_{z0}[t_{шн} / (r_{pt} - r_0)2\pi] \left[\frac{r_{pt}}{r_0} - 1 \right]. \quad (2)$$

где v_z – осевая скорость потока; $t_{шн}$ – длина захода шнека.

Толщину подвижного слоя (учитывая экспериментально подобранную величину $k=0,5...1,0$) определяют формулой

$$\delta_{ncl} = k(Q / \omega_{от} \sqrt{F_r'})^{1/3}, \quad (3)$$

где δ_{ncl} – толщина подвижного слоя; Q – расход суспензии; $\omega_{от}$ – угловая частота отставания вращения шнека от вращения ротора; F_r' – фактор разделения.

Даже при таких допущениях упрощенные уравнения (1) и (2) трудны для практических расчётов, а формула (3) содержит коэффициент, подбираемый опытным путём. Всё это даёт повод сомневаться в корректности применения уравнений Навье–Стокса для описания модели поведения потоков суспензии в центрифуге со шнековой выгрузкой осадка. Несмотря на многочисленные исследования поведения потоков в центрифуге, в работе [5] утверждается, что не имеется единого мнения о характере течения жидкости в роторе осадительных центрифуг со встроенным шнеком.

На основании вышесказанного авторы статьи предлагают вместо моделей с применением уравнений Навье–Стокса построить модель с использованием уравнений гидравлики дисперсных систем для описания поведения твердых частиц суспензии внутри ротора и движения компонентов системы.

В основу альтернативной математической модели положена идея о том, что, управляя угловой ско-

ростью ротора и шнека, выбирают такой режим работы осадительной центрифуги, когда частица твёрдой фазы суспензии успевает осесть на стенку ротора, прежде чем будет выгружена шнеком. На рис. 3 представлено схематичное движение частицы в растворе из точки A_1 , размещённой на границе свободной поверхности жидкости радиусом r_0 , до границы обечайки ротора r_{pt} (точка A_2). Допустим, что частице придана угловая скорость ω , равная скорости ротора. В этом случае движение частицы проходит по спирали, но с точки зрения технологии разделения суспензии, определяющим считают время, затраченное на перемещение частицы вдоль радиальной составляющей пути, равной

$$l_R = r_{pt} - r_0.$$

Исследования, представленные в работе [6], позволяют применить для решения задачи эффективной очистки суспензии уравнение для определения времени осаждения $\tau_{ц}$ частицы твёрдой фазы в барабане центрифуги:

$$\tau_{ц} = 18 \frac{\nu \rho}{\omega^2 d^2 (\rho_t - \rho) \varepsilon^{4,75}} \ln \frac{r_{pt}}{r_0} + 1,18 \sqrt{\frac{r_{pt} \rho}{\omega^2 d (\rho_t - \rho) \varepsilon^{4,75}}} \left(1 - \sqrt{\frac{r_0}{r_{pt}}} \right),$$

где ρ_t , ρ – плотность твёрдого материала и жидкости, ν – вязкость жидкости, ε – порозность, d – диаметр частиц твердого материала.

В данном уравнении учтены влияние массогабаритных параметров частицы (плотность и диаметр) и характеристики жидкости. Квадратичная зависимость времени осаждения от угловой скорости позволяет в широких пределах изменять время осаждения, варьируя скоростью вращения ротора. Скорость вращения барабана выбирается из соотношений получения максимального фактора разделения. Следует учитывать, что мелкодисперсная твёрдая взвесь склонна к образованию агрегированных частиц в суспензии. Причиной соединения частиц в агрегаты принято считать притяжение частиц за счёт Ван-дер-Ваальсовых сил, характерных

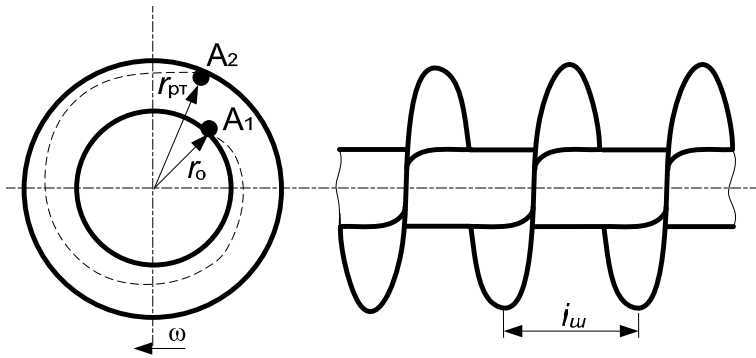


Рис. 3. Схема движения частицы внутри ротора и схема геометрии шнека

для кристаллов неправильной формы с развитой удельной поверхностью и наличием анизотропных свойств. Кроме естественной агрегации частицы ряда дисперсных суспензий подвергаются искусственному укрупнению для придания высокой пористости осадку и улучшению разделительных свойств обрабатываемого сырья [4]. Связи в таких частицах довольно слабые, и эти агрегаты могут разрушаться. Для сохранения агрегированных частиц в поле действия центробежных сил необходимо значительно снижать скорость ротора.

Продольное движение частицы в роторе осуществляется транспортировочным шнеком, который предназначен для выгрузки осажённого материала. Корректная выгрузка осадка осуществляется за счёт подбора скорости отставания шнека от ротора, которая должна соответствовать скорости ротора. Скорость транспортировки выбирают таким образом, чтобы время выгрузки шнеком τ_v было не менее времени осаждения частицы, т. е. выполнялось условие:

$$\tau_{\text{ц}} \leq \tau_v.$$

Как правило, транспортировка осажённых частиц происходит не по всей длине захода шнека, а осуществляется лишь частью витков. Количество этих витков n зависит от конструкции центрифуги. Поэтому время транспортировки можно рассчитать по формуле:

$$\tau_v = \frac{i_{\text{ш}} n}{v_{\text{тр}}},$$

где $i_{\text{ш}}$ — длина шага шнека; $v_{\text{тр}}$ — скорость транспортировки осадка.

Скорость осаждения частиц и скорость транспортировки осадка для полидисперсных суспензий необходимо рассчитывать для частиц с наименьшим диаметром зерна. Для растворов содержащих частицы, искусственно объединённые в агрегаты, необходимо экспериментально определять оптимальную частоту вращения ротора, при которой не будет происходить их разрушение.

Эксперимент

На участке подготовки растворов урана к экстракционному аффинажу проведены опытные ис-

пытания установки очистки растворов от механических примесей на центрифуге ОГШ-353-09к. Полученные данные позволили получить зависимость коэффициента очистки $K_{\text{оч}}$ раствора обработанного флокулянтот от расхода подаваемого в центрифугу сырья, рис. 4. Коэффициент очистки есть отношение массы твёрдого материала в единице объёма жидкой фракции до и после процесса осаждения.

Для повышения скорости осаждения твердой фазы в осадительных центрифугах со шнековой выгрузкой в суспензию вводили синтетические полиэлектролиты, вызывающие флокуляцию частиц или их естественное агрегирование [4]. Особенностью применения флокулянтов являются процессы образования и разрушения флокул при движении внутрироторных потоков центрифуги. Дело в том, что эффективное разделение происходит только при сохранении флокул.

За критерий оценки эффективности разделения твёрдой и жидкой фракции суспензии принят $K_{\text{оч}}$. Из полученных зависимостей видно, что разрушение флокул зависит от объёмной нагрузки на центрифугу. При увеличении объема суспензии, подаваемой в ротор, увеличивается скорость входного её потока при постоянном диаметре питающего трубопровода. Именно этим объясняется снижение коэффициента очистки раствора (рис. 4), а при объёмной производительности $2,0 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более применение флокулянтов не даёт положительного эффекта.

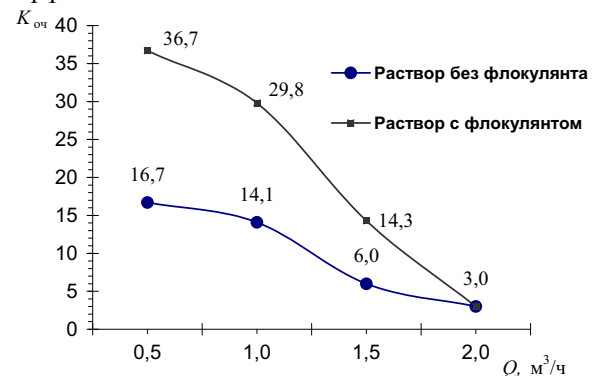


Рис. 4. Зависимость коэффициента очистки $K_{\text{оч}}$ от расхода раствора Q

Предположение о том, что флоккулы разрушаются из-за сил слишком мощного входного потока можно перенести и на действие центробежного поля. Понятно, что с ростом напряжённости поля силы, связывающие агрегат, не в состоянии будут удерживать частицы, образующие флоккулу. Поэтому для предотвращения процессов разрушения флоккул необходимо уменьшать частоту вращения ротора центрифуги с учетом ослабления действия центробежных сил.

Различие коэффициентов очистки для растворов с флокулянтами и без них, при одной и той же объёмной нагрузке, подтверждает версию о зависимости времени осаждения частицы от её диаметра. Данная модель применима для описания поведения процесса разделения суспензии и может быть использована для оптимизации режимов работы центрифуги.

Выводы

Создана установка для экспериментального исследования режимов работы горизонтальной центрифуги со шнековой выгрузкой осадка для апробации алгоритмов управления и получения максимальной степени очистки урансодержащих растворов, а также получения осадка требуемой влажности.

Экспериментально доказана применимость модели на основе уравнений гидравлики для описания процесса центрифугирования суспензии. Для шнековых центрифуг необходимо, чтобы время выгрузки шнеком было не менее времени осаждения частицы.

Достигнута эффективная очистка растворов от нерастворимых примесей за счёт регулирования частоты вращения ротора и шнека центрифуги.

Степень очистки растворов от примесей увеличивается при снижении подачи суспензии в центрифугу в пределах $2...0,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ в 5 раз без флокулянтов и в 12 раз с применением флокулянтов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Судариков Б.Н., Раков Э.Г. Процессы и аппараты урановых производств. — М.: Машиностроение, 1968. — 381 с.
2. Виноградов А.П. Аналитическая химия урана. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 433 с.
3. Колодников И.А., Кладиев С.Н. Применение частотных преобразователей в схеме управления электроприводами центрифуги // Современные техника и технологии: Сб. трудов XIV Междунар. практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых в 3-х томах. Т. 1. — Томск: Изд-во ТПУ, 2008. — С. 390–392.
4. Соколов В.И. Центрифугирование. — М.: Химия, 1976. — 408 с.
5. Шкоропад Д.Е., Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. — М.: Химия, 1987. — 256 с.
6. Айнштейн В.Г., Захаров М.К., Носов Г.А. и др. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии. — М.: Логос; Высшая школа, 2003. — 912 с.

Поступила 07.05.2010 г.

УДК 62-567.1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ И РАСЧЁТ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ АМОРТИЗАТОРОВ ОТ ДЕФОРМАЦИИ

Л.В. Поздеев, Г.П. Целищев, Г.С. Цехмestрюк

ОАО «Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск

E-mail: polus@online.tomsk.net

Приведены результаты испытаний резинометаллических амортизаторов типа АРМОО и АКСС при различной деформации. Показана зависимость их параметров от уровня механического воздействия. Предложена методика определения резонансной частоты оборудования на амортизаторах при заданной деформации.

Ключевые слова:

Параметры амортизаторов, деформация, амплитудно-частотная характеристика.

Key words:

Parameters of shock absorbers, deformation, amplitude-frequency characteristic.

Виброизоляция оборудования — одно из основных средств борьбы с распространением вибрации. Эффективность системы амортизации, а следовательно, и соответствие оборудования допустимым уровням вибрации и шума напрямую зависит от параметров амортизаторов.

В ряде случаев, когда основной целью амортизации является вибро- и звукоизоляция амортизируемого объекта от фундамента, амплитуда вибронагружения амортизаторов в номинальном режиме работы изделия настолько мала, что воспроизвести её без использования специальных испытательных