© Р.Н. Максимов, 2007

УДК 622.765

Р.Н. Максимов ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ СЛОЯ КОНЦЕНТРАТА В РАБОЧЕЙ ЗОНЕ ЦЕНТРОБЕЖНО-ВИБРАЦИОННОГО СЕПАРАТОРА

Семинар № 20

О сновной отличительной особенностью центробежных сепараторов современных конструкций является способ концентрации тяжелых минералов на рабочей поверхности. Известны конструкции сепараторов в которых вода подается под давлением через перфорированный отверстиями ротор для разрыхления слоя тяжелых частиц, в ряде других конструкций применяют вибрацию или колебания ротора.

Создание пульсирующего слоя в пристенной области ротора за счет действия вибраций и подачи воды реализовано в конструкции центробежновибрационного сепаратора [1].

Основными задачами расчетнотеоретического исследования движения частиц в жидкой среде в условиях вибрации в соответствии с принятой исходной схемой центробежно-вибрационного сепаратора являются:

 возможности и условия при которых происходит перемещение более плотных (тяжелых) частиц по вращающейся и перфорированной отверстиями вибрирующей поверхности ротора;

2. особенности виброперемещения и возможный уровень скоростей.

 влияние противодавления жидкой среды (воды) и окружной скорости ротора на процесс осаждения более плотных (тяжелых) частиц на вибрирующие поверхности ротора; Эти задачи рассматриваются с точки зрения законов механики на базе силовых взаимодействий, обусловленных гравитационным полем, центробежной силой, инерцией, трением и противоточным давлением промывочной воды. Силовые явления характеризующиеся конкретными поверхностями и физикохимическими свойствами частиц твердой фазы и жидкой среды исключаются в порядке допущения.

Возможность виброперемещения тяжелых частиц и образующегося слоя осадка по плоской рабочей поверхности ротора наклоненной к горизонту под углом α и совершающий прямолинейные гармонические колебания в направлении, образующим угол β с указанной поверхностью (рис. 1) рассматриваются в общем случае при следующих допущениях [4]:

 рабочая поверхность ротора является жесткой и все ее точки перемещаются при колебаниях синхронно;

 условно выделенный для рассмотрения элемент слоя из твердых частиц приравнивается к материальной точке;

• углы α и β в общем случае лежат в пределах

$$0 < \alpha < \frac{\pi}{2} \quad \text{i} \quad 0 < \beta < \frac{\pi}{2} \tag{1}$$



Введем неподвижную систему координат XOY, жестко связанную с колеблющейся рабочей поверхностью ротора (ось X параллельна этой поверхности), и неподвижную систему (ξ O₁ η), с осями, параллельными осям неподвижной системы.

К выделенной для рассмотрения твердой частицы оказавшейся на рабочей поверхности ротора (размером 1 x 1 x h) приложены:

 G_a – вес частицы (элемента слоя) с учетом выталкивающей силы; P – сила, обусловленная противоточным давлением промывочной воды; J – сила инерции; N – нормальная реакция; Q – нормальная составляющая динамического напора колеблющейся жидкости (воды); R – центробежная сила; F_{тр} – сила трения на рабочей по-верхности сепаратора; F_{вн} – сила вязкого трения наружной поверхности слоя частиц о пульпу; Кнормальная сила обусловленная сцеплением слоя частиц с рабочей поверхностью ("сила прилипания").

За приложенные направления сил приняты направления указанные стрелками на схеме (рис. 1.).

Будем полагать, что при амплитуде A и частоте ω фиксированная точка (ξ_0 , η_0) рабочей поверхности перемещается при колебаниях по закону:



а) – слой осадка твердых частиц; б) – перфорированная отверстиями стенка ротора; (с-с) – направление гармонических прямолинейных колебаний (в общем виде)

$$\overline{\xi} = \xi_0 + A \cdot \cos \beta \cdot \sin \omega t$$

$$\overline{\eta} = \eta_0 + A \cdot \sin \beta \cdot \sin \omega t$$
(2)

или (поскольку начало системы $\xi O_1 \eta$ может быть выбрано, принимаем $\xi_0=0$ и $\eta_0=0$) тогда

$$\overline{\xi} = A \cdot \cos\beta \cdot \sin\omega t$$

$$\overline{\eta} = A \cdot \sin\beta \cdot \sin\omega t$$
(3)

Дифференциальные уравнения относительного движения выделенного элемента (материальной точки) составленные с учетом всех действующих на него сил, имеют вид:

$$-m \overset{\text{\tiny def}}{\longrightarrow} -m \overset{\text{\tiny def}}{\searrow} + G_{a} \sin \alpha - F_{\tau p} - F_{\text{\tiny BH}} = 0$$

$$-m \overset{\text{\tiny def}}{\longrightarrow} m \overset{\text{\tiny def}}{\longrightarrow} + G_{a} \cos \alpha + k - P + R - Q - N = 0$$
(4)

вычислив –*т*∉и -т≇ преобразуем уравнение (3) к виду:

$$m \mathcal{K} = -mA\omega^{2} \cos\beta \sin\omega t + +G_{a} \sin\alpha - F_{TP} - F_{BH} m \mathcal{K} = -mA\omega^{2} \sin\beta \sin\omega t + +G_{a} \cos\alpha + k - P + R - Q - N$$
(5)

где m – масса выделенного элемента слоя частиц.

В общем случае возможны следующие три варианта движения элемента слоя твердых частиц относительно рабочей поверхности:

 относительное скольжение без отрыва от рабочей поверхности;

 движение без непосредственного контакта с рабочей поверхностью; совместное движение с рабочей поверхностью без отрыва и проскальзывания.

При движении слоя по рабочей поверхности без отрыва y = 0 = Const. Силаприграничного трения $F_{\tau p} = fN$ при $\aleph > 0$ и $F_{\tau p} = -f \cdot N$ при $\aleph < 0$, где f коэффициент приграничного трения о стенки ротора.

Нормальная реакция N=N(t) может быть определена из второго уравнения (4) при = 0 (поскольку Y = 0= =Const).

$$N = -mA\omega^{2}\sin\beta\cdot\sin\omega t + G_{a}\cos\alpha - (6)$$
$$-k - P + R - Q > 0.$$

С учетом этого первое уравнение из (5) примет вид:

$$m\mathcal{K} = -mA\omega^{2}\cos\beta\sin\omega t + G_{a}\sin\alpha - F_{BH} \pm f\left(-mA\omega^{2}\sin\beta\cdot\sin\omega t + G_{a}\cos\alpha + k - P + R - Q\right)$$
(7)

Знак плюс перед f соответствует $\cancel{K} < 0$, знак минус случаю $\cancel{K} > 0$. Условия определяющие эти возможности рассматриваются ниже.

Дифференциальные уравнения движения слоя с отрывом от рабочей поверхности (для периода полета) определяются условиями N=0; F_{тр}=0; k=0 и имеют вид:

$$\mathcal{H} = \frac{1}{m} \left(-mA\omega^2 \cos\beta \sin\omega t + G_a \sin\alpha - F_{\text{\tiny BH}} \right),$$
$$\mathcal{H} = \frac{1}{m} \left(-mA\omega^2 \sin\beta \sin\omega t + G_a \cos\alpha - P + R - Q \right)$$
(8)

Эти уравнения характерны для легких частиц и будут анализиро-ваться ниже.

При относительном покое слоя на вибрирующей рабочей поверхности X=0, Y=0. Это может иметь место при

 $F_{\rm Tp} = f_0 N(t) \ge \left| G_{\rm a} \sin \alpha + mA\omega^2 \cos \beta \sin \omega t - F_{\rm BH} \right|.$ (9)

где $f_0 - коэффициент трения покоя.$

Как видно из (7), (8), и (9), возможность или невозможность перемещения слоя относительно рабочей поверхности определяется соотношением P, K, R, Q, N, f, f₀ a также значениями α и β. Поскольку при работе центробежновибрационного сепаратора определяющими усилиями будут центробежная сила и противоточное давление промывочной воды, рассматривается в порядке допущения режим с проскальзыванием без отрыва от поверхности или относительный покой. Для легких частиц оказавшихся на этой поверхности необходимо создать условия, когда за счет противоточного давления воды они будут отброшены от рабочей поверхности, что будет являться граничным условием начала сепарации у рабочей поверхности, поэтому в дальнейшем для тяжелых частиц будет анализироваться только возможность перемещения слоя в режиме его скольжения относительно рабочей поверхности, а для легких с отрывом от нее.

Поскольку значения величин K, F_{BH} и Q малы и не являются определяющими ими можно пренебречь ($F_{BH} = 0$, K = 0, Q = 0), тогда после преобразований уравнений уравнение (7) можно представить как:

$$\mathcal{K} = -A\omega^2 \sin \omega t + \frac{G_a}{m} \pm f \left(-P + R\right) \frac{S}{m} \quad (10)$$

где S = 1 – единичная площадь элемента слоя

или

$$\mathcal{H} = -A\omega^2 \cdot \sin \omega t + \frac{(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma_1} \cdot g \pm \pm \frac{f \cdot g}{h \cdot \gamma_1} (-P + R)$$
(11)

Условие относительного покоя элемента слоя на вибрирующей поверхности определяется выражением:

$$A\omega^{2} \cdot \sin \omega t + \frac{G_{a}}{m} \le f\left(-P + R\right)\frac{S}{m} \qquad (12)$$

которое можно преобразовать к виду

1

$$A\omega^{2} \cdot \sin \omega t + \frac{(\gamma_{1} - \gamma)}{\gamma_{1}} \cdot g \leq f_{0} \left(-P + R\right) \frac{g}{h \cdot \gamma_{1}}$$
(13)

где γ_1 – удельная масса элемента слоя; γ - плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести; h – толщина элемента слоя; S=1-площадь элемента слоя.

Таким образом в соответствии с основными положениями теории виброперемещения [2] дифференциальное уравнение движения твердой частицы в подвижной системе координат, для нашего случая, будет описано уравнением (11), обозначим

$$\frac{(\gamma_1 - \gamma)}{\gamma_1} \cdot \mathbf{g} = \mathbf{L} \quad \mathbf{и} \quad \frac{\mathbf{f} \cdot \mathbf{q}}{\mathbf{h} \cdot \gamma_1} \cdot (-\mathbf{P} + \mathbf{R}) = \mathbf{M}$$

тогда уравнение (11) примет вид:

 $\mathbf{A}^{2} - A \omega^{2} \cdot \sin \omega t + L \pm M$ (14) Знак перед M определяется относительной скоростью элемента слоя тяжелых частиц при $\mathbf{A}^{2} > 0$ плюс, при $\mathbf{A}^{2} < 0$ - минус.

$$-\sin \delta_{\pm} \left(\varphi_{\pm} - \delta^{*}_{\pm} \right) - \cos \varphi_{\pm} + \cos \delta^{*}_{\pm} = 0$$
(15)

или

$$\cos\varphi_{\pm} = \cos\delta_{\pm}^{*} - \left(\varphi_{\pm} - \delta_{\pm}^{*}\right) \cdot \sin\delta_{\pm}. \quad (16)$$

Введем вместо переменных δ^*_{\pm} и ϕ_{\pm} новые переменные

$$\begin{aligned} u_{\pm} &= \frac{1}{2} \left(\varphi_{\pm} + \delta^{*}_{\pm} \right), \\ v_{\pm} &= \frac{1}{2} \left(\varphi_{\pm} - \delta^{*}_{\pm} \right). \end{aligned}$$
(17)

Тогда уравнение (15) примет вид:

$$\sin u_{\pm} = \sin \delta_{\pm} \frac{v_{\pm}}{\sin v_{\pm}}.$$
 (18)

Задаваясь различными значениями v_{\pm} , можно найти u_{\pm} (при заданном δ_{\pm}), после чего величины δ_{\pm}^* и ϕ_{\pm} определяется по формулам:

$$\varphi_{\pm} = \mathbf{2}\mathbf{v}_{\pm} + \boldsymbol{\delta}_{\pm}^{\star} \quad \mathbf{N} \quad \boldsymbol{\delta}_{\pm}^{\star} = \mathbf{u}_{\pm} - \boldsymbol{\delta}_{\pm}.$$
(19)

Данные о фазовых углах перехода к состояниям относительного покоя и скольжения позволяют рассчитывать относительные перемещения за время скольжения. В соответствии с предыдущими рассуждениями будем иметь:

$$S^{0}_{\pm} = A \left[-\sin \delta_{\pm} \frac{\left(\varphi_{\pm} - \delta^{*}_{\pm}\right)^{2}}{2} - (20) \right]$$
$$-\left(\sin \varphi_{\pm} - \sin \delta^{*}_{\pm}\right) + \left(\varphi_{\pm} - \delta^{*}_{\pm}\right) \cos \delta^{*}_{\pm} \right]$$

Последнее выражение можно представить в виде:

$$\mathbf{S}^{0}_{\pm} = \mathbf{2}\mathbf{A}\mathbf{F}\left(\delta_{\pm}, \ \delta^{*}_{\pm}\right). \tag{21}$$

где

$$F\left(\delta_{\pm}, \ \delta^{*}_{\pm}\right) = \frac{1}{4} \left\{ -\left[f\left(\delta_{\pm}, \ \delta^{*}_{\pm}\right) - \delta^{*}_{\pm}\right] \sin \delta_{\pm} - \right. \\ \left. -2\left[\sin f\left(\delta_{\pm}, \ \delta^{*}_{\pm}\right) - \sin \delta^{*}_{\pm}\right] + \left. +2\left[f\left(\delta_{\pm}, \ \delta^{*}_{\pm}\right) - \delta^{*}_{\pm}\right] \cos \delta^{*}_{\pm}\right\} \right\}$$

где F(δ , δ) – функция, конкретные значения которой для любых практически возможных δ_{\pm} и δ^*_{\pm} могут быть определены по опубликованным в [2] графикам.

Перемещение материальной точки за один этап определяется так:

$$\mathbf{S}^{0} = \left| \mathbf{S}^{0}_{+} \right| - \left| \mathbf{S}^{0}_{-} \right|, \tag{22}$$

а средняя скорость перемещения

$$u_{\rm cp} = \mathbf{S}^0 \, \frac{30\omega}{\pi}, \, \mathbf{M}' \, \mathbf{M} \mathbf{H}.$$
(23)

На графике (рис. 2) показаны полученные расчетным путем по уравнению



(24) кривые зависимости средней скорости виброперемещения материальной точки (золотоносный песок) от амплитуды колебаний при частоте $\omega = 314^{-1}$ и толщине слоя h = =0,001-0,003 м при различных коэффициентах трения f Рис. 2. Зависимости средней скорости вибротранспортирования от амплитуды колебаний при $\varpi=314^{-1}$, h=0,001-0,003 м.

(низкие значения f объясняются смачивающим Дей

ствием жидкости) и перепадах давления ($\Delta P = R-P$)

Анализ полученных результатов показывает:

- работа центробежно-вибрационного сепаратора может обеспечить отмывку пустой породы от рабочей поверхности за счет противодавления промывочной воды при избыточном давлении ΔP=0÷1 атм и выше;

- средняя скорость виброперемещения слоя осадка (при ω=const) увеличивается с увеличением амплитуды колебаний;

- средняя скорость виброперемещения слоя осадка зависит от коэффициента трения на поверхности скольжения. При увеличении коэффициента скольжения эта скорость снижается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Максимов Р.Н.* Центробежновибрационный сепаратор. Известия вузов. Горный журнал, № 5, 2002. 2 *Блехман И.И., Джанелидзе Г.Ю.* Вибрационное перемещение. "Наука", 1964.

Коротко об авторах

Максимов Р.Н. – Северо-Кавказский государственный металлургический институт ГТУ.

