УДК 553.97 518

Санюкевич Ф.М.

ПРОЦЕСС СЕПАРАЦИИ В НАПОРНОМ МИКРОЦИКЛОНЕ

Микроциклонные аппараты с размером цилиндрической части $D \leq 50$ мм являются весьма эффективными инерционно сепарирующими устройствами. В машиностроении их используют для осветления различных топлив и рабочих жидкостей гидросистем станков, очистки смазочно-охлаждающих жидкостей при металлообработке и т.п. С целью обработки больших объёмов жидкостей микроциклоны компонуют в мультициклонные блоки с общими камерами питания, слива и шлама [1].

При расчётах процесса сепарации различных материалов в криволинейном потоке микроциклона возникает много трудностей в случае учёта всех сложных явлений, проявляющихся при движении контактной среды, которая состоит из твёрдых частиц, находящихся во взвешенном состоянии и образующих вместе с разделяющей их жидкостью гетерофазную систему. С целью упрощения расчётов теория сепарации обычно абстрагируется от наличия системы и рассматривает движение изолированных частиц, представляющих собой идеальные сферы, диаметры которых определяются как среднее между наибольшим и наименьшим размерами частиц. При этом исключаются электрические силы, тепловые и силы трения частиц о стенки аппарата. Весьма незначительное влияние на характер движения частиц в условиях высокотурбулентного закрученного потока оказывают гравитационные силы. По сравнению с силами инерции они столь малы, что действием их обычно пренебрегают.

В качестве основных сил, действующих на взвешенную частицу, принимаем центробежную силу, направленную к оси микроциклона и силу сопротивления жидкости. Если известны скорости движения частицы $\bar{U}$ в принятой системе координат и движения жидкости $\bar{V}$ в точке, где находится частица, то скорость сепарации $\bar{U}_c = \bar{U} - \bar{V}$. При этом число Рейнольдса по частице:

$$Re = \frac{|U_C| d_ч \rho_ж}{\mu}, \qquad (1)$$

где $d_ч$ - диаметр частицы; $\rho_ж$ - плотность жидкости; μ - динамическая вязкость жидкости.

Движение частицы в криволинейном канале микроциклона наиболее удобно рассматривать в цилиндрической системе координат r, φ, z, где положение её будет определяться функциями $r(t)$, $\varphi(t)$, $z(t)$ (здесь t – время). Ось z в данном случае совпадает с осью симметрии микроциклона, и за положительное её направление принимаем направление движения от сливного патрубка к нижней шламовой насадке (при установке аппарата шламовым отверстием внз).

Радиус-вектор частицы относительно точки пересечения оси микроциклона с плоскостью, проходящей через ось питающего патрубка:

$$\bar{p} = r\left(\bar{i}\cos\varphi + \bar{j}\sin\varphi\right) + z\bar{k}, \qquad (2)$$

где $\bar{i}$, $\bar{j}$, $\bar{k}$ - орты; r – текущий радиус.

Для определения скорости движения частицы в принятой системе координат дифференцируем выражение *(2)* по t:

$$\begin{aligned}\bar{U} &= r\left(\bar{i}\cos\varphi + \bar{j}\sin\varphi\right)\frac{dr}{dt} + \\ &+\left(-\bar{i}\sin\varphi + \bar{j}\cos\varphi\right)r\frac{d\varphi}{dt} + \frac{dz}{dt}\bar{k}.\end{aligned} \qquad (3)$$

Радиальная, тангенциальная и аксиальная составляющие скорости движения частицы соответственно равны:

$$U_r = \frac{dr}{dt}, \quad U_\varphi = \frac{d\varphi}{dt}, \quad U_z = \frac{dz}{dt}. \qquad (4)$$

Ускорение частицы:

$$\begin{aligned}\bar{a} &= \left(\bar{i}\cos\varphi + \bar{j}\sin\varphi\right)\left[\frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right] + \\ &+\left(-\bar{i}\sin\varphi + \bar{j}\cos\varphi\right)\left(r\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{dr}{dt}\frac{d\varphi}{dt}\right) + \frac{d^2z}{dt^2}\bar{k}.\end{aligned} \qquad (5)$$

Отсюда проекции $\bar{a}$ на оси координат:

$$a_r = \frac{d^2r}{dt^2} - r\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2, \; a_\varphi = r\frac{d^2\varphi}{dt^2} + 2\frac{dr}{dt}\frac{d\varphi}{dt},$$

$$a_z = \frac{d^2z}{dt^2}. \qquad (6)$$

Приняв $\frac{dr}{dt} = \lambda$, $\frac{d\varphi}{dt} = \psi$, $\frac{dz}{dt} = \gamma$ и с учётом движения частицы в криволинейном канале микроциклона согласно закону Ньютона получаем систему дифференциальных уравнений первого порядка: *(7)*,

где $\rho_ч$ - плотность частицы; c - коэффициент сопротивления, являющийся функцией числа Рейнольдса по частице; a – показатель степени, зависящий от характера движения частицы и изменяющийся в пределах от 1 до 2 [2]: при $R_e < 1$ $c=3$, $a=1$ (сопротивление по Стоксу), при $1 \leq R_e \leq 400$ $c = \sqrt{3}$, $a=1{,}5$ (сопротивление в переходной области кривой Релея), при $R_e > 400$ $c = 1/8$, $a=2$ (сопротивление по Ньютону).

Значения радиальной V_r, тангенциальной V_φ и аксиальной V_z составляющих скорости потока жидкости, а также скорость взаимного перемещения взвешенных частиц $V_{в.п.}$, фигурирующие в системе уравнений *(7)*, рекомендуется определять по формулам:

$$V_r = \frac{Qtg\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{2400r\pi\left[3tg\left(\frac{\alpha}{2}\right)\left(H_Ц - h_{СЛ}\right) + D - d_{ШЛ}\right]}; \qquad (8)$$

Санюкевич Федор Михайлович, *к.т.н., профессор каф. «Техническая эксплуатация автомобилей» Брестского государственного технического университета.*
Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

$$\left.\begin{aligned}
&\frac{d\lambda}{dt}=r\psi^2+\frac{2\rho_{Ч}-\rho_{Ж}}{2\rho_{Ч}+\rho_{Ж}}\frac{V_\varphi^2}{r}-\frac{12c\rho_{Ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{Ч}^{a}}{\pi d_{Ч}^{3}\left(2\rho_{Ч}+\rho_{Ж}\right)}\times\\
&\times\left[\sqrt{\left(\lambda-V_r-V_{В.П.}\right)^2+\left(r\psi-V_\varphi\right)^2+\left(\gamma-V_Z\right)^2}\right]^{a-1}\left(\lambda-V_r-V_{В.П.}\right)\quad;\\
&\frac{d\psi}{dt}=-\frac{1}{r}\left\{\frac{12c\rho_{Ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{Ч}^{a}}{\pi d_{Ч}^{3}\left(2\rho_{Ч}+\rho_{Ж}\right)}\left[\sqrt{\left(\lambda-V_r-V_{В.П.}\right)^2+\left(r\psi-V_\varphi\right)^2+\left(\gamma-V_Z\right)^2}\right]^{a-1}\times\right.\\
&\left.\times\left(r\varphi-V_\varphi\right)+2\lambda\psi\right\}\quad;\\
&\frac{d\gamma}{dt}=-\frac{12c\rho_{Ж}^{a-1}\mu^{2-a}d_{Ч}^{a}}{\pi d_{Ч}^{3}\left(2\rho_{Ч}+\rho_{Ж}\right)}\left[\sqrt{\left(\lambda-V_r-V_{В.П.}\right)^2+\left(r\psi-V_\varphi\right)^2+\left(\gamma-V_Z\right)^2}\right]^{a-1}\left(\gamma-V_Z\right)
\end{aligned}\right\}\qquad(7)$$

на участке $0{,}8\,r_{сл}\le r\le D/2$

$$V_\varphi=\frac{Q\left(0{,}5D\right)^n}{957{,}45\pi d_{СЛ}^{0{,}5}d_{ПИТ}^{1{,}5}r^n}\,;\qquad(9)$$

на участке $0{,}6\,r_{сл}\le r<0{,}8\,r_{сл}$

$$V_\varphi=\frac{Q\left(0{,}5D\right)^n r}{957{,}45\left(0{,}4\right)^{n+1}\pi d_{ПИТ}^{1{,}5}d_{СЛ}^{n+1{,}5}}\,;\qquad(10)$$

$$V_Z=\frac{Q}{3000\pi d_{ПИТ}^{2}}\left[1-0{,}8\sqrt[3]{\left(\frac{0{,}5D}{r}\right)^2}\right];\qquad(11)$$

$$V_{В.П}=0{,}1\sqrt{\frac{glc_{ПИТ}\left(\rho_T-\rho_Ж\right)}{500\rho_T\rho_Ж}}\,.\qquad(12)$$

В формулах *(8)…(12)*:

V_r, V_φ, V_z – м/с; Q – производительность микроциклона по питанию, м^3/ч; D, $H_ц$ – диаметр и высота цилиндрической части, м; $d_{пит}$, $d_{сл}$, $d_{шл}$ – диаметры питающего, сливного и шламового отверстий соответствующих патрубков, м; $h_{сл}$ – высота заглубления сливного патрубка, м; α – угол конусности конической части микроциклона, град; $n=\frac{0{,}4d_{ПИТ}^2}{d_{СЛ}^2}+0{,}2$ – показатель степени; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; l – длина пути перемешивания с основным потоком некоторого объёма жидкости, движущейся в поперечном потоку направлении: l=1 м; $c_{пит}$ – концентрация взвешенных частиц в питании микроциклона, мг/л.

Решение системы уравнений *(7)* позволит определить координаты точек пространственной траектории движения частицы, а также время и составляющие скорости её выделения из вращающегося потока жидкости. Значения V_r, V_φ, V_z и $V_{в.п}$ учитываются в процессе интегрирования системы уравнений *(7)*. Наиболее распространенными методами численного интегрирования являются методы Эйлера, Адамса и Рунге-Кутта.

Учитывая, что основным недостатком метода Эйлера является невысокая точность, а метод Адамса требует знания приближённого решения в нескольких начальных точках сетки и не допускает изменения шага в процессе счёта, наиболее удобным для решения системы дифференциальных уравнений *(7)* является метод Рунге-Кутта четвёртого порядка точности. При использовании данного метода в качестве приращения следует использовать промежуток времени Δt, в течении которого частица из положения с координатами r_n, φ_n, z_n перемещается в положение с координатами r_{n+1}, φ_{n+1}, z_{n+1}.Так как скорость потока жидкости на интервале Δt предполагается постоянной, значения её составляющих V_r, V_φ и V_z принимаются для точки с координатами r_n, φ_n, z_n.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кислов Н.В., Санюкевич Ф.М. Гидроциклонное осветление воды / Под ред. М.А. Гатиха. – Мн.: Навука і тэхніка, 1990. – 128 с.
2. Поваров А.И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. – М.: Недра, 1978. – 232 с.

УДК 621.83.06

Лустенков М.Е.

РУЧНАЯ ЛЕБЕДКА И МОТОР-РЕДУКТОР С ПЛАНЕТАРНОЙ ШАРИКОВОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ

Комплекс вопросов, связанных с разработкой новых видов механизмов и машин с низким энергопотреблением, снижение их массогабаритных показателей, улучшение технических характеристик при одновременном снижении себестоимости изготовления и соответственно снижении цены готового изделия, является несомненно актуальным, стоящим перед разработчиками новой техники.

Эллипсная шариковая передача (ЭШП), разработанная в Белорусско-Российском университете [1], состоит из нескольких цилиндрических деталей, расположенных коаксиль-

Лустенков Михаил Евгеньевич*, к.т.н., доцент каф. «Основы проектирования машин», начальник сектора по работе с иностранными студентами Белорусско-Российского университета.*
Беларусь, Б-РУ, 212005, г. Могилев, пр. Мира, 43.