

К ИССЛЕДОВАНИЮ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦЫ В ПСЕВДООЖИЖЕННОМ СЛОЕ

Поперечный А.Н., д.т.н., проф., Жданов И.В.

(Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского)

В статье приведена математическая модель движения частицы в центробежном псевдоожигенном слое за счёт поля центробежных сил вращающегося барабана и силы давления кольцевого потока воздуха.

Постановка проблемы:

Псевдоожигенный слой может быть образован в поле действия различных сил.

Рассмотрим режим движения частиц, в котором псевдоожигенный слой формируется главным образом за счёт поля центробежных сил вращающегося барабана, а поток воздуха выполняет функцию влагосъёма и теплоподвода.

Направление вращения кольцевого потока может совпадать с направлением вращения барабана, как показано на рисунке 1, а, или быть встречным, как показано на рисунке 1, б.

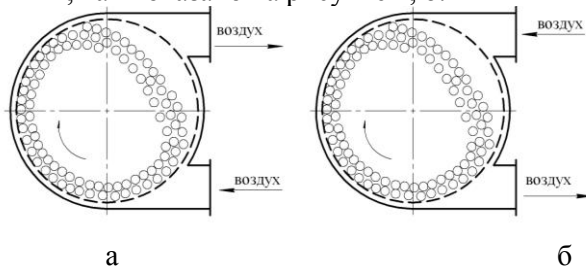


Рис. 1 – Образование центробежного псевдоожигенного слоя с помощью кольцевого потока воздуха

Целью работы является исследование процесса образования центробежного псевдоожигенного слоя за счёт совместного воздействия центробежных сил вращающегося барабана и силы давления потока кольцевого потока воздуха

Критериями выбора направления вращения кольцевого потока

является стабильность режима движения и скорость скольжения частиц.

Расчётные схемы для обоих случаев представлены на рисунке 2.

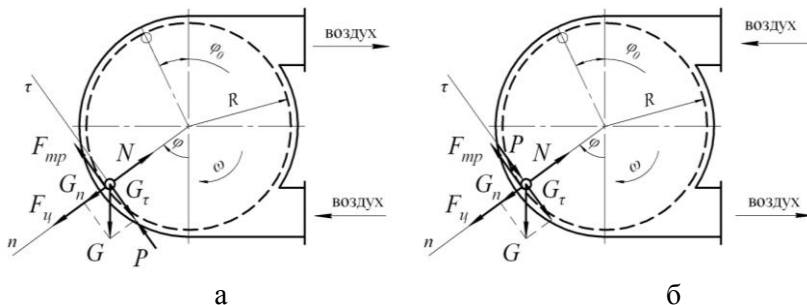


Рис. 2 – Расчётные схемы для двух вариантов направления кольцевого потока воздуха

В первом случае (рисунок 2, а) сила давления воздуха P препятствует сдвигу частицы вниз на первой стадии движения, а во втором (рисунок 2, б) – содействует.

Для первого случая на можно подобрать скорость воздуха таким образом, чтобы устранить скольжение частицы вниз на первой стадии движения.

Минимальная скорость воздуха, обеспечивающая отсутствие скольжения вниз, определяется из следующего условия:

$$P = (G_{\tau} - F_{\mu})_{\max},$$

где G_{τ} - проекция силы тяжести частицы на касательную τ ;

F_{μ} - сила трения.

Подставив значения сил, получим:

$$P = (mg \sin \varphi - fmR\omega^2 - fmg \cos \varphi)_{\max}. \quad (1)$$

Максимум функции $(G_{\tau} - F_{\mu})$ определяется из условия равенства её производной нулю:

$$\frac{d(G_{\tau} - F_{\mu})}{d\varphi} = 0; \quad mg \cos \varphi + fmg \sin \varphi = 0;$$

$$\varphi_{\max} = \arctg\left(-\frac{1}{f}\right) + \pi n, \quad n \in Z. \quad (2)$$

Для параметров $R=0,07$ м, $f=0,84$, $m=0,004$ кг, $\omega=11$

рад/с график функции $(G_\tau - F_{mp})$ представлен на рисунке на рисунке 3.

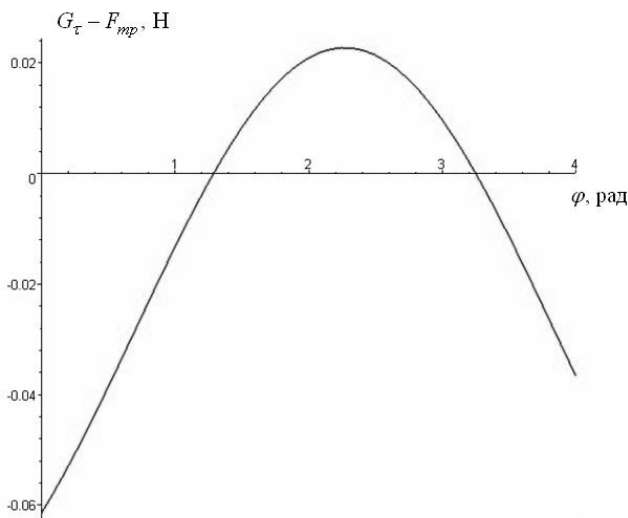


Рис. 3 – График функции $(G_\tau - F_{mp})$

Решив уравнение (2), получим $\varphi_{\max} = 2,27 = 130,1^\circ$.

Из уравнения (1) с учётом найденного значения угла $\varphi_{\max} = 2,27$ получим необходимое минимальное значение силы давления воздуха $P = 0,023$ Н.

Скорость воздуха, обеспечивающую требуемую силу $P = 0,023$ Н, определим из уравнения [1]

$$P = \xi \cdot S \frac{\rho_g (\nu_g - \nu)^2}{2}, \quad (3)$$

где ξ - коэффициент гидродинамического сопротивления;

ρ_g - плотность воздуха;

ν_g - скорость воздуха;

S - миделево сечения частицы.

Подставив числовые значения в уравнения (3) для рассматриваемого случая, получим $\nu_g = 38,7$ м/с.

Анализ уравнения (2) показывает, что угол, при котором функции $(G_\tau - F_{mp})$ имеет максимум, определяется только

коэффициентом трения f и не зависит от угловой скорости вращения барабана и, следовательно, от угла отрыва частицы.

Отсутствие скольжения позволяет значительно упростить формулы для определения угла отрыва и необходимой угловой скорости уравнения.

Для второй схемы действие силы давления воздуха смещает вниз точку начала скольжения частицы, тем самым увеличивая угол отрыва частицы. Момент начала сдвига определяется следующим равенством:

$$F_{mp} = G_{\tau} + P. \quad (4)$$

С учётом значений сил получим:

$$fmR\omega^2 + fmg\cos\varphi - mg\sin\varphi - P = 0. \quad (5)$$

Для параметров $R = 0,07$ м, $f = 0,84$, $m = 0,004$ кг, $\omega = 9,95$ рад/с, $P = 0,005$ Н (соответствует $v_e = 17$ м/с) условие (5) представлено на рисунке 4.

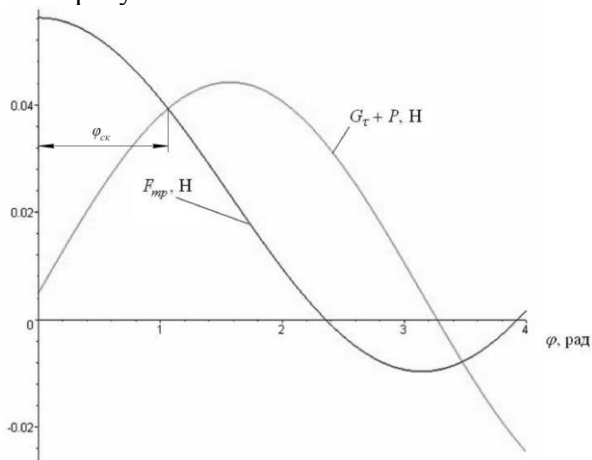


Рис. 4 – Графики функций F_{mp} и $(G_{\tau} + P)$

Решая трансцендентное уравнение (5) в пакете Maple, получим угол начала скольжения $\varphi_{ск} = 1,06$ рад = $60,8^{\circ}$, т.е. действие силы $P = 0,005$ Н смещает угол начала скольжения на $6,2^{\circ}$ вниз.

Система дифференциальных уравнений относительного движения частицы в естественной подвижной системе координат примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\varphi_r}{dt} &= \omega_r; \\ \frac{d\omega_r}{dt} &= 2f\omega_e\omega_r - f\omega_r^2 - f\omega_e^2 - \frac{fg}{R}\cos(\omega_e t + \varphi_{ск} - \varphi_r) + \\ &+ \frac{g}{R}\sin(\omega_e t + \varphi_{ск} - \varphi_r) + \frac{P}{mR}; \\ N &= mR\omega_e^2 - 2mR\omega_e\omega_r + mR\omega_r^2 + mg\cos(\omega_e t + \varphi_{ск} - \varphi_r). \end{aligned} \right\} (6)$$

Здесь и далее индексами e и r обозначены параметры, соответствующие переносному (вращение барабана) и относительному (скольжение вдоль стенки барабана) движению частицы.

Решение системы уравнений (6) в виде графиков $\varphi_r(t)$, $\omega_r(t)$ и $N(t)$ представлено на рисунке 5.

Графики $\varphi_r(t)$, $\omega_r(t)$ и $N(t)$ описываются следующими уравнениями, полученными с помощью аппроксимации данных численного решения:

$$\begin{aligned} \omega_r(t) &= -9,83\cos\left(\frac{2\pi}{0,509}t\right) + 9,83; \quad \varphi_r(t) = -\frac{5,003}{2\pi}\sin\left(\frac{2\pi}{0,509}t\right) + 9,83t, \\ N(t) &= -0,027 + 0,055\cos(12,338t) + 0,0002t - 9,83\cos(12,338t) + \\ &+ 9,83]^2 + 0,039\cos[0,117t + 1,17 + 0,797\sin(12,338t)]. \end{aligned}$$

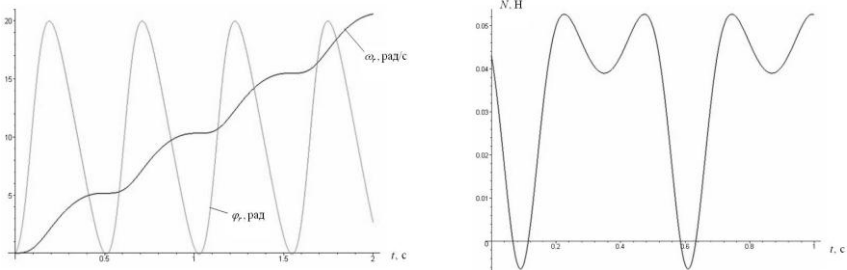


Рис. 5 – Пример численного решения системы уравнений (6) для следующих значений констант: $m=0,004$ г, $R=0,07$ м, $f=0,84$, $\omega_e=9,95$ рад/с, $P=0,005$ Н

Решением уравнения $N(t)=0$ является момент $t=0,065$ отрыва частицы после начала скольжения. За это время частица соскользнет относительно барабана вниз на $7,8^\circ$, как показывает

уравнение $\varphi_r(0,065)$. При этом барабан повернётся на 37° . В результате угол отрыва частицы составит приблизительно 90° вместо 75° в отсутствие давления воздуха. Полученный угол является нижней границей рабочего режима движения частицы. Дальнейшее повышение силы давления воздуха приведёт к нерабочему режиму движения частицы.

Найденное граничное значение силы давления воздуха соответствует начальной массе частицы. Однако масса частицы в процессе сушки существенно уменьшается. Поэтому граничное значение силы давления воздуха необходимо определять, решая уравнение (6) для конечного значения массы частицы. Рабочее значение силы давления воздуха, обеспечивающее стабильный режим движения на протяжении всего процесса сушки, следует принимать меньше полученного граничного значения.

Выводы:

Таким образом, использование второй схемы направления кольцевого потока воздуха возможно при небольших значениях скорости воздуха. При этом сила P не оказывает существенное влияние на режим движения частицы. Поэтому, её можно исключить из уравнений движения на обеих стадиях для этого случая.

Итак, анализ схем направления кольцевого потока, изображенных на рисунке 1, показал, что при обеих схемах может быть обеспечен стабильный режим движения. Однако для первой схемы при этом можно использовать значительно большие скорости воздуха. Как следствие, скорость скольжения частиц, определяющая интенсивность тепло- и массообмена процесса сушки, будет значительно выше для указанной схемы.

Проведенные теоретические исследования могут быть использованы не только для описания движения одной частицы, но и всего центробежного псевдооживленного слоя, поскольку частицы продукта в нём образуют кольцевой слой, в котором они практически не контактируют друг с другом.

Список литературы

1. Рабинович Е.З. Гидравлика. - М.: Недра, 1974. – 296 с.

УТВОРЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ПСЕВДООЖИЖЕННОГО

**ШАРУ ЗА РАХУНОК СУМІСНОЇ ДІЇ ЦЕНТР ОБІЖНИХ СИЛ
БАРАБАНУ, ЩО ОБЕРТАЄТЬСЯ І СИЛИ ТИСЧЕННЯ
ПОТОКУ КІЛЬЦЕВОГО ПОТОКУ ПОВІТРЯ**

У статті наведена математична модель руху частинки у відцентровому псевдозрідженному шарі за рахунок поля відцентрових сил обертового барабана і кільцевого потоку повітря.

**FORMATIONS CENTRIFUGAL THE LAYER FOR THE
ACCOUNT OF JOINT INFLUENCE OF CENTRIFUGAL FORCES
OF THE ROTATING DRUM AND FORCE OF PRESSURE OF
THE STREAM OF THE RING STREAM OF AIR**

In article is brought mathematical model of the moving the particle in centrifugal fluid layer for count of centrifugal power of the revolving drum and power of pressure of the recalculating air flow.