

Лозовая С. Ю., д-р техн. наук, проф.,
Лымарь И. А., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛ ДЕЙСТВУЮЩИХ НА МАТЕРИАЛЬНУЮ ТОЧКУ ЗАГРУЗКИ В ПОМОЛЬНО-СМЕСИТЕЛЬНОМ УСТРОЙСТВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ

lymil_84@mail.ru

Предложена модель описывающая кинематику и динамику загрузки по сложной траектории, представляющей собой движение по эллипсу в наклонной плоскости, которая со временем перемещается на некоторый угол по периметру камеры, в помольно-смесительном устройстве с вертикальным ротором.

Ключевые слова: помольно-смесительное устройство, траектория, теория сплошной среды, силы.

В нашей стране помольное оборудование используется не в полной мере. Тогда как перед отечественными предприятиями, в первую очередь строительной отрасли, как никогда остро стоят проблемы технического перевооружения, расширения ассортимента выпускаемой продукции при повышении качества изделий.

Особый интерес представляют агрегаты, обеспечивающие тонкий помол. Тонкий помол материалов ведет к существенному улучшению качества новообразованных поверхностей, увеличению показателей удельной поверхности, разрушению структурно нестабильных и ослабленных частиц. Без широкого использования оборудования для измельчения немыслимо современное производство строительных материалов и смесей.

Ввиду развития малого бизнеса, в последнее время, повышается потребность в мельницах

малой производительности, к таким относятся: струйные, вибрационные, вихревые, бисерные, аттриторы и т.п.

Разработано помольно-смесительное устройство периодического действия, помол материалов в котором осуществляется в цилиндрической емкости мелющими телами, которые перемещаются ротором, состоящем из П-образных скоб разной длины, закрепленных по окружности с эксцентриситетом относительно оси вращения (рис. 1, а)[1].

Результат натурного эксперимента для определения характера перемещения частиц от взаимодействия мешалки [2], показал, что загрузка движется по сложной траектории, представляющей собой движение по эллипсу в наклонной плоскости, которая со временем перемещается на некоторый угол по периметру камеры (рис. 1, б).

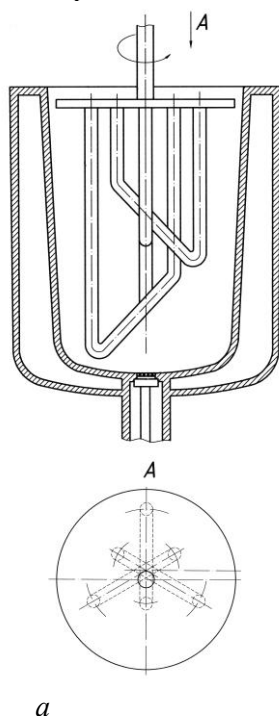


Рис. 1. Схема (а) и модель с прозрачной стенкой (б) помольного устройства

Для определения силовых характеристик действующих на загрузку, рассмотрим кинематику движения материальной точки M вокруг оси OY неподвижной камеры (рис. 2, a). Движение материальной точки M можно разложить на переносное движение в плоскости XOY по окружности с радиусом r_1 и относительное в плоскости $X_1O_1Y_1$, расположенной под углом ψ к вертикали, по эллиптической траектории с расстоянием от центра O_1 до любой точки траектории $r(\varphi)$, причем $(0 \leq r(\varphi) \leq a)$, где a – большая полуось эллиптической траектории. В относительном перемещении точка движется с ускорением a^r , которое раскладывается на нормальное a_n^r , направленное к центру O_1 и касательное

a_τ^r , направленное по касательной к эллиптической траектории (рис. 2, a). В переносном движении материальная точка M движется по окружности с радиусом r_1 , с ускорением a^e , которое также можно разложить на нормальное a_n^e , направленное к оси OY и касательное a_τ^e , направленное по касательной к окружности. Так как точка движется по сложной траектории, то присутствует Кориолисово ускорение a_c .

Данные ускорения обуславливают силы F^r , F^e и F^c (рис. 2, b). Данные силы были условно разложены на касательные и нормальные составляющие.

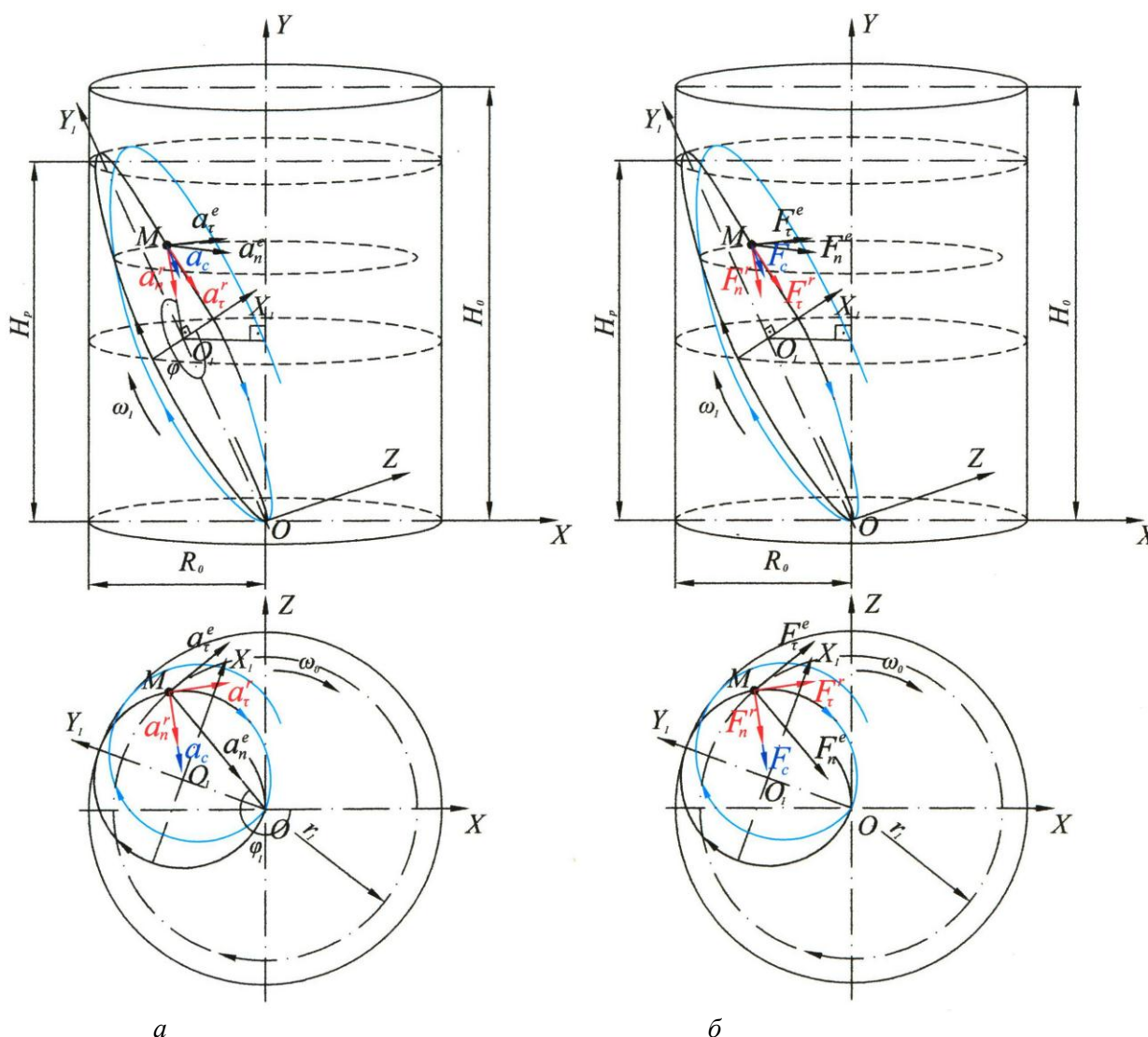


Рис. 2. Схемы: a – кинематика загрузки; b – схема основных сил действующих на материальную точку

В механике дисперсных сред установлено, что действующая в элементарном слое величина центробежной силы инерции F^u связана с величинами распорных усилий следующей зависимостью:

$$dF_n^u = dF_\tau^u = \frac{1}{2} f dF^u, \quad (1)$$

где f – коэффициент трения.

Расстояние от центра эллипса до любой точки траектории:

$$r = \frac{R_0}{2\sqrt{1-(1-k^2)\cos^2\varphi}}, \quad (2)$$

где k – коэффициент эллиптичности; φ – полярный угол; R_0 – радиус рабочей камеры.

Полярный угол задается линейной функцией:

$$\varphi = \omega_1 t, \quad (3)$$

где t – время вращения ротора; ω_1 – угловая скорость вращения точки в плоскости $X_1O_1Y_1$ в относительном движении.

Коэффициент эллиптичности равен:

$$k = \frac{R_0 \cdot 2}{2 \cdot H_p \sqrt{\left(\frac{R_0}{H_p}\right)^2 + 1}} \approx \frac{R_0}{H_p} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{R_0}{H_p}\right)^2\right) \approx \frac{R_0}{H_p}. \quad (4)$$

Выделим в рабочей камере элементарный объем dV , тогда его масса равна:

$$dm = \rho r dr d\varphi dy, \quad (5)$$

где ρ – объемная плотность загрузки [3].

Объемная плотность загрузки рассчитывается по формуле [3]:

$$\rho = \nu \rho_{ш} + (1 - \nu) \rho_m, \quad (6)$$

где ν – отношение объема мелющих тел к объему загрузки; $\rho_{ш}$ – плотность мелющих тел; ρ_m – плотность материала.

$$a_r^r = \omega_1 R_0 \cdot \frac{1}{4} (1 - (1 - k^2) \cos^2 \varphi)^{-\frac{3}{2}} \cdot ((1 - k^2) \cdot 2 \cos \varphi \cdot \sin \varphi) \frac{d\varphi}{dt}. \quad (11)$$

Касательная сила F_r^r , действующая на материальную точку в относительном движении, во всем объеме камеры определяется:

$$F_r^r = \frac{f_r \rho (1 - k^2) H_p \omega_1^2 R_0^3}{16} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\sin 2\varphi}{(1 - (1 - k^2) \cos^2 \varphi)^{\frac{5}{2}}} d\varphi, \quad (12)$$

где H_p – высота загрузки в установившемся рабочем режиме:

$$H_p = H + \Delta H, \quad (13)$$

где H – высота загрузки; ΔH – величина изменения высоты загрузки в рабочем режиме, зависящая от частоты вращения мешалки.

Элементарная нормальная сила dF_n^e , действующая на элементарный объем в переносном движении равна:

$$dF_n^e = \frac{f_n}{2} (1 - f_n) \rho \omega_0^2 d\varphi r_1^2 dr_1 dy. \quad (14)$$

Тогда, нормальная сила F_n^e , действующая на материальную точку в переносном движении, во всем объеме камеры определяется:

Элементарная нормальная сила dF_n^r , действующая на элементарный объем в относительном движении равна:

$$dF_n^r = \frac{f_n}{2} (1 - f_n) \rho \omega_1^2 d\varphi r^2 dr dz, \quad (7)$$

где f_n – коэффициент трения скольжения материала мелющих тел по измельчаемому материалу, $f_n = 0,015$.

Нормальная сила F_n^r , действующая на материальную точку в относительном движении, во всем объеме камеры определяется:

$$F_n^r = \frac{\pi}{24} \cdot f_n (1 - f_n) \rho \omega_1^2 R_0^4 \int_0^{2\pi} \frac{1}{(1 - (1 - k^2) \cos^2 \varphi)^{\frac{3}{2}}} d\varphi. \quad (8)$$

Элементарная касательная сила dF_r^r , действующая на элементарный объем в относительном движении равна:

$$dF_r^r = f_r a_r^r dm, \quad (9)$$

где f_r – коэффициент трения скольжения материала мелющих тел по материалу помольной камеры, $f_r = 0,033$.

Окружная скорость относительного движения определяется:

$$v_r^r = \frac{dr}{dt} = \omega_1 r. \quad (10)$$

Касательное ускорение точки в относительном движении:

$$F_n^e = \frac{f_n}{3} (1 - f_n) \pi \rho \omega_0^2 R_0^3 H_p. \quad (15)$$

Элементарная касательная сила dF_r^e , действующая на элементарный объем в переносном движении равна:

$$dF_r^e = f_r \rho \omega_0^2 r_1 dS_K dy, \quad (16)$$

где S_K – площадь кольца из шаров, расположенных вдоль корпуса.

При определении F_r^e можно считать, что расстояние от центра траектории до точки М шарового слоя равно:

$$r_1 = \left(R_0 - \frac{d_{ш}}{2} \right), \quad (17)$$

где $d_{ш}$ – диаметр мелющих шаров.

Площадь кольца из шаров, расположенных вдоль корпуса рассчитывается по формуле:

$$S_K \approx \frac{\pi d_{ш}^2}{4} I_K, \quad (18)$$

где I_K – количество шаров в кольце:

$$I_K = \frac{\pi(2R_0 - d_{ш})}{d_{ш}}, \quad (19)$$

Масса мелющих тел равна массе шарового слоя прилегающего к стенке камеры. Поэтому сила F_τ^e может быть определена по формуле:

$$F_\tau^e = f_\tau \rho \omega_0^2 \left(R_0 - \frac{d_{ш}}{2} \right) S_K \int_0^{\left[\frac{H_p}{d_{ш}} \right] d_{ш}} dy, \quad (20)$$

где $\left[\frac{H_p}{d_{ш}} \right]$ - целое число равное количеству шаров;

Тогда окончательно сила F_τ^e во всем объеме камеры определяется:

$$F_\tau^e = \frac{\pi}{8} f_\tau \rho \omega_0^2 (2R_0 - d_{ш}) d_{ш}^3 \left[\frac{\pi(2R_0 - d_{ш})}{d_{ш}} \right] \left[\frac{H_p}{d_{ш}} \right]. \quad (21)$$

Элементарная сила Кориолиса dF_c , действующая на элементарный объем равна:

$$dF_c = f_n (1 - f_n) \rho \omega_0^2 r^2 \sin \gamma \cdot d\varphi dr dz, \quad (22)$$

Сила Кориолиса F_c во всем объеме камеры определится:

$$F_c = \frac{f_n (1 - f_n) \pi \rho R_0^4 \omega_0^2}{12} \int_0^{2\pi} \frac{1}{(1 - (1 - k^2) \cos^2 \varphi)} d\varphi. \quad (23)$$

На рис. 4 представлены графики сил сопротивления перемещению загрузки в относительном и переносном перемещении загрузки.

Анализ графиков зависимости сил от частоты оборотов мешалки показал что:

-касательная сила в относительном движении F_τ^r меньше касательной силы в переносном движении F_τ^e , т.к в относительном движении частицы загрузки, при предложенной схеме перемещения, имеют кратковременный контакт со стенками камеры, а в переносном движении частицы загрузки имеют длительный контакт со стенками камеры в результате центробежной силы;

-величина силы Кориолиса F_c имеет большую величину ($\approx F_\tau^e$), это можно объяснить тем, что частицы загрузки совершают сложное вращательное движение относительно оси O_1Y_1 по эллипсу и вся система вращается относительно оси OY , что обуславливает подъем загрузки на величину $\Delta H = 3,7$ см при увеличении числа оборотов до 500 об/мин.

геометрических и технологических параметров устройства.

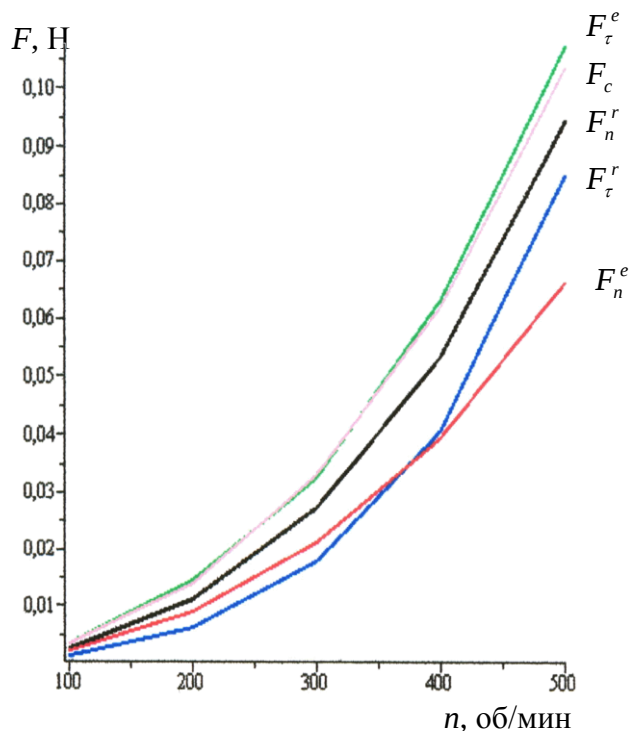


Рис. 4 График зависимости сил от частоты оборотов мешалки при $f_n=0,015$, $f_\tau=0,033$, $R_0=0,06$ м, $H=0,1125$ м, $\rho_1=7800$ кг/м³, $\rho_2=1400$ кг/м³, $\nu=0,536$, $d_{ш}=0,012$ м

Таким образом, в результате теоретических исследований установлено, что в помольно-смесительном устройстве периодического действия с вертикальным ротором, смесь компонентов перемещается по сложной траектории, что подтверждено экспериментом на натурной модели, а также определены силы, действующие на материальную точку загрузки в зависимости от

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лозовая С.Ю. Помольно-смесительное устройство периодического действия // заявка № 2010123585 от 09.06.2011 / С.Ю. Лозовая, И.А. Лымарь, В.В. Владимиров.
2. Лозовая С.Ю. Исследование влияния конструктивного исполнения мешалки на перемещение мелющей среды в помольном устройстве // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов: Междунар. научно-практ. конф., Белгород, 5-8 окт. 2010 г. / Белгор. Гос. Технол. Ун-т. / С.Ю. Лозовая, И.А. Лымарь, И.А. Лымарь – Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. – Ч.3. – 144-149 с.
3. Лозовая С.Ю. Обоснование коэффициента полезного заполнения в малогабаритных мельницах с деформируемыми рабочими камерами / С.Ю. Лозовая, В.П. Воронов – «Строительно-дорожные машины». - 2005.- № 6. - 46-50 с.