

АННА КАПРАНОВА, АНАТОЛИЙ ЗАЙЦЕВ, АНТОН ЛЕБЕДЕВ¹

МЕТОД ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ СЛОЯ СЫПУЧЕГО МАТЕРИАЛА ПРИ ЕГО «СРЫВЕ» С КРИВОЛИНЕЙНОЙ ЛОПАСТИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ

ESTIMATION OF THE LAYER THICKNESS OF THE BULK MATERIAL BY ITS «FALLING DOWN» THE CURVILINEAR BLADE OF THE CENTRIFUGAL BREAKER

Аннотация

Предложен метод оценки толщины слоя сыпучего материала при его срыве с криволинейной лопасти типа пропеллер в центробежном измельчителе. Моделирование выполнено на основе модели движения сыпучего материала в рабочей камере устройства при использовании методов гетерогенных сред. Получено удовлетворительное согласие с опытными данными для движения гравийного щебня в ячейке аппарата.

Ключевые слова: сыпучая среда, центробежный измельчитель, криволинейная лопасть, равномерный поток, скорость выхода, толщина слоя, линии тока, параметры устройства

Abstract

The estimation method of the layer thickness of the bulk material by its falling down the curvilinear blade (type «propeller») of the centrifugal breaker. The modeling fulfilled on basis of model of the bulk material's motion in the set-up's work chamber by means of the method of the mechanics of the heterogeneous environment. The satisfactory fit with the experiment data for the gravel ballast's motion in the equipment's cell received.

Keywords: bulk material, centrifugal breaker, curvilinear blade, uniform stream, velocity of coming out, layer thickness, current streamlets, set-up's parameters

¹ Д.физ.-мат.н., профессор Анна Борисовна Капранова; д.т.н., профессор Анатолий Иванович Зайцев; к.т.н., доцент Антон Евгеньевич Лебедев, Ярославский государственный технический университет.

1. Введение

В целях повышения износостойкости жестких элементов центробежного лопатного измельчителя необходима реализация условий равномерного выхода сыпучего материала из рабочей камеры аппарата по высоте лопасти. Как показали опытные исследования изгиб криволинейной лопасти типа «пропеллер» позволяет получить равномерный поток частиц сыпучей среды, распространяющийся при ее «срыве» с описанной лопасти. Определение интегральных характеристик движения сыпучего материала в рабочей ячейке центробежного аппарата зависит от результатов расчета толщины слоя твердых частиц, предназначенных для измельчения, при выходе из камеры измельчителя. На основе методов механики гетерогенных сред [1] в приближении постоянства порозности (с осредненным значением при двух видах – кубического и тетраэдрического – возможного расположения решетки дисперсной фазы для центров твердых частиц) ранее была выполнена оценка скорости «срыва» указанного потока с криволинейной лопасти измельчителя [2]. Полученные авторами в работе [2] результаты могут быть использованы при расчете искомой толщины слоя, вылетающего из рабочей камеры устройства.

2. Описание рабочей камеры лопатного центробежного измельчителя

Рабочий объем центробежного измельчителя определяется границами криволинейных лопастей высотой h , которые расположены между двумя дисками радиуса R_0 и радиально закреплены на нижнем диске на расстоянии, равном радиусу r_0 для загрузочного окна. В каждой ячейке устройства вследствие инерционных эффектов происходит значительное прижатие сыпучего материала (при виде сверху – поток

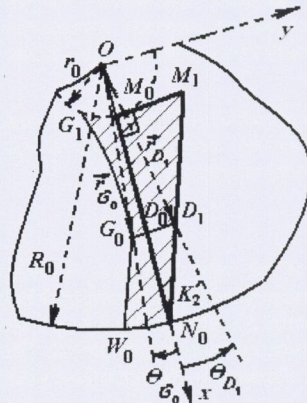


Рис. 1. Расчетная схема для движения сыпучей среды вдоль криволинейной лопасти $M_0M_1N_0$ центробежного устройства

Fig. 1. The loading diagram for the bulk material motion along the curvilinear blade $M_0M_1N_0$ of the centrifugal set-up

$G_1M_1N_0W_0$ со свободной границей $G_1G_0W_0$) к одной из криволинейных лопастей $M_0M_1N_0$ (рис. 1). Профиль лопастей напоминает пропеллерный, когда на ободе диска основания лопасть перпендикулярна его поверхности, а вблизи загрузочного окна – наклонена под углом γ .

Для описания движения сыпучей среды в рабочем объеме центробежного измельчителя используем полярную систему координат (r, θ) с началом в точке O . Применяя модель [2], считаем, что относительную скорость движения фаз v_{12} – равной начальной скорости движения материала v_0 . Принимается, что для всех показателей дисперсной составляющей сыпучей среды присутствует индекс «2», а средний размер ее сферических частиц определяется величиной $a = \sum_{i=1}^n \bar{a}_i$, где \bar{a}_i – радиус зерен, усредненный по n фракциям смеси. Осреднение напряжений твердого скелета среды с истинной плотностью вещества ρ_r выполняются с учетом: хаотического поступательного движения частиц и наличия параметра псевдовязкости $\mu_p = 2^{-1}[1 - (\alpha_2 / \bar{\alpha}_2)^{1/3} \cdot \alpha_2^{2/3} \cdot \rho_r \cdot a \cdot K_2^{1/2}]$. Оценка K_2 производится в соответствии со средним значением порозности $\bar{\alpha}_2 = 0,63$, учетом работы сил Магнуса, возникающих за счет эффекта вращения частиц, а также коэффициентом восстановления η_2 при соударениях двух частиц с усредненными размерами a , тогда при $\eta_p = (1 - \eta_2^2)/8$ и $v_0 = [(\omega \cdot r_0)^2 + v_{r0}^2]^{1/2}$

$$K_2 = \left(\frac{5}{2}\right) \cdot \left[1 - \left(\frac{\alpha_2}{\bar{\alpha}_2}\right)^{1/3}\right]^2 \cdot \left(\frac{\bar{\alpha}_2}{\alpha_2}\right)^{2/3} \cdot \eta_p \cdot v_0^2 \quad (1)$$

Кроме того, анализ опытных данных показал, что при движении крупнозернистого материала в рабочей ячейке на криволинейной лопасти $M_0M_1N_0$ (рис. 1) наблюдается некоторый поверхностный участок, для точек которого радиальные скорости дисперсной фазы можно считать равномерными. Описание движения сыпучего потока в ячейке измельчителя выполняется согласно системе уравнений непрерывности твердого скелета; движения дисперсной фазы в проекциях на радиальное и окружное направления с учетом инерционных эффектов; реологических соотношений и т.д. [2]

3. Метод определения толщины слоя сыпучего материала при выходе из рабочей камеры

При вращении рабочей камеры аппарата с угловой скоростью ω искомая толщина слоя сыпучей среды $L \equiv \overline{N_0W_0}$ равна длине хорды между точками, лежащими на ободе нижнего диска радиуса R_0 для центробежного устройства (рис. 1). Точка W_0 лежит в нижней области свободной граничной поверхности $G_1G_0W_0$ для потока сыпучей среды при указанном «срыве». Угловая координата точки N_0 равна нулю ($\theta_{N_0} = 0$), а угол между описанными точками N_0 и W_0 совпадает с модулем угловой координаты точки W_0 . Тогда вследствие равномерности потока зернистого материала на участке $D_0D_1N_0$ для лопасти $M_0M_1N_0$ справедливо

$$L = R_0 \cdot \left[2 \cdot (1 - \cos \theta_{W_0}) \right]^{1/2}, \quad \theta_{W_0} = \theta_{G_0} - \theta_{D_1} \quad (2)$$

где угловая координата θ_{G_0} точки G_0 , принадлежащей свободной граничной поверхности $G_1G_0W_0$ для потока сыпучей среды рассчитывается с помощью уравнения линий тока $r_u(\theta)$. Вид данной зависимости $r_u(\theta)$ для области $G_1M_1N_0W_0$ при $v_{2\theta u}(r_u(\theta), \theta) = -2 \cdot \omega \cdot B^{-1} \cdot r_u(\theta)^2 \cdot v_{2ru}(r_u(\theta), \theta)$ определяется уравнением

$$\frac{dr_u(\theta)}{d\theta} = \frac{(v_{2ru}^2 + v_{2\theta u}^2)^{1/2}}{\omega} \quad (3)$$

где с учетом (1) для равномерного потока материала на участке $D_0D_1N_0$ при $T = B \cdot R_0^{-2} \cdot (1 - 4 \cdot \omega^2 \cdot B^2 \cdot R_0^{-4})$ и $B = 8 \cdot \sqrt{5} \cdot \bar{\alpha}_2^{4/3} \cdot \alpha_2^{1/2} \cdot a \cdot (1 - \eta_2^2)^{1/4} \cdot v_0$ выполняется соотношение для составляющей скорости твердого скелета

$$v_{2ru}(r_u(\theta), \theta) = \frac{TB^2 + 4r_u(\theta)^2 \omega^2 + \sqrt{B^2 [T^2 B^2 + 8r_u(\theta)^4 \omega^2 (T^2 + 4\omega^2)] + 16r_u(\theta)^8 \omega^4 (T^2 + 8\omega^2)}}{16 \cdot r_u(\theta)^3 \cdot \omega^2} \quad (4)$$

Оценочные расчеты показали, что в (4) наибольшим слагаемым из стоящих под знаком квадратного корня является последнее $16 \cdot r_u(\theta)^8 \cdot \omega^4 \cdot (T^2 + 8 \cdot \omega^2)$, тогда

$$v_{2ru}(r_u(\theta), \theta) = \frac{T \cdot \left[\frac{B^2}{r_u(\theta)^3} + 8 \cdot \omega^2 \cdot r_u(\theta) \right]}{16 \cdot \omega^2} \quad (5)$$

и уравнение (3) с учетом (5) принимает вид

$$\frac{dr_u(\theta)}{d\theta} = \frac{(R_0 - r_{D_1}) \cdot \left[\frac{B^2}{r_u(\theta)^3} + 8 \cdot \omega^2 \cdot r_u(\theta) \right] \sqrt{1 + \frac{4 \cdot \omega^2 \cdot r_u(\theta)^4}{B^2}}}{16^2 \cdot \omega^3 \cdot T \cdot R_0^4} \quad (6)$$

Разложение в ряд Маклорена с точностью до $O(r_u(\theta)^8)$ последнего множителя в правой части уравнения (6) позволяет при известном граничном условии на лопасти (рис. 1) $\theta_u(r_{D_1}) = \theta_{D_1} = r_{D_0}^{-1} \cdot (r_{D_1}^2 - r_{D_0}^2)^{1/2}$ после интегрирования (6) получить приближенное аналитическое решение для искомого уравнения линий тока

$$\theta_u(r) = -\theta_{D_1} + \frac{32 \cdot \omega \cdot R_0^4}{3 \cdot T \cdot (R_0 - r_{D_1})^4} \cdot \ln \left| \frac{(B^2 + 8 \cdot \omega^2 \cdot r^4) \cdot (B^2 + 2 \cdot \omega^2 \cdot r_{D_1}^4)}{(B^2 + 8 \cdot \omega^2 \cdot r_{D_1}^4) \cdot (B^2 + 2 \cdot \omega^2 \cdot r^4)} \right| \quad (7)$$

Сравнение формулы (3) и полученного выражения (7) при условии $\theta_u(r_{W_0}) = \theta_{W_0}$ приводит к расчету угловой координаты θ_{G_0} точки G_0 (рис. 1)

$$\theta_{\sigma_0} = \frac{32 \cdot \omega \cdot R_0^4}{3 \cdot T \cdot (R_0 - r_{D_1})^4} \cdot \ln \left(\frac{(B^2 + 8 \cdot \omega^2 \cdot R_0^4) \cdot (B^2 + 2 \cdot \omega^2 \cdot r_{D_1}^4)}{(B^2 + 8 \cdot \omega^2 \cdot r_{D_1}^4) \cdot (B^2 + 2 \cdot \omega^2 \cdot R_0^4)} \right) \quad (8)$$

Итак, искомая толщина слоя L (рис. 1) может быть оценена с помощью формулы (2) при подстановке необходимых значений $\theta_{\omega_0}, \theta_{D_1}, \theta_{\sigma_0}$ из выражений (7), (8) в зависимости от параметров устройства $L = f(\omega, r_0, R_0, h, \gamma)$.

4. Анализ полученных результатов для толщины слоя сыпучего материала

Оценка толщины слоя элементов гравийного щебня ГОСТ 31015-2002 при его «срыве» с лопатки согласно (2), (7), (8) показывает удовлетворительное согласие с опытными данными (рис. 2) при относительной ошибке $(8 \div 9)\%$.

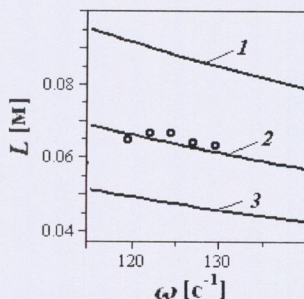


Рис. 2. Сопоставление $L(\omega, R_0)$ и опытных данных для зависимости:

1 – $R_0 = 0,45$ м, 2 – $R_0 = 0,5$ м, 3 – $R_0 = 0,55$ м; кривые – расчет; точки – эксперимент

Fig. 2. Comparison of $L(\omega, R_0)$ and experiment data for the correlation:

1 – $R_0 = 0,45$ м, 2 – $R_0 = 0,5$ м, 3 – $R_0 = 0,55$ м; curves – calculation; points – experiment

Семейство графиков зависимости $L(\omega, R_0)$ при $r_0 = 0,5$ м, $h = 0,04$ м, $\gamma = 85^\circ$ показывает, что величина L при его выходе из рабочей камеры убывает с возрастанием частоты ее вращения, а при $R_0 = 0,5$ м, $n = 1200$ об/мин значение $L \approx 2 \cdot a$ (рис. 2, кривая 2).

Обозначения

a	– усредненный размер частиц	[м]
L	– толщина слоя дисперсного материала	[м]
n	– частота вращения	[об/мин]
r	– радиальная координата в полярной системе	[м]
R_0, r_0	– радиусы диска и загрузочного окна	[м]
α_2	– порозность	[–]

γ	–	угол наклона лопасти	[град]
η	–	коэффициент восстановления	[–]
θ	–	угловая координата в полярной системе	[рад]
μ_p	–	псевдовязкость	[Па·с]
ρ_t	–	истинная плотность вещества	[кг/м ³]
ω	–	угловая скорость	[рад/с]

Литература

- [1] Нигматулин Ф. И.: *Основы механики гетерогенных сред*, Наука, Москва, 1978.
- [2] Суханов А. С., Капранова А. Б., Лупанов А. П., Лебедев А. Е.: Изв. ВУЗов. Химия и химическая технология, Иваново, 55, N 4, (2012), 108-111.