

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСЛОВИЙ САМОФУТЕРОВКИ ЛОПАСТЕЙ
УДАРНО-ЦЕНТРОБЕЖНЫХ МЕЛЬНИЦ**

Проведен анализ конструктивных и технологических параметров ударно-центробежной мельницы. Указано, что наряду с высокой эффективностью измельчения они обладают существенным недостатком, заключающимся в интенсивном абразивном износе. Отмечено, что одним из эффективных способов защиты лопастей ротора-ускорителя является самофутеровка. Она обеспечивается при залегании части измельчаемого материала на поверхности лопастей, которые при этом должны быть выполнены криволинейными. На основе уравнения относительно движения частиц по поверхности ротора получена зависимость для расчета их скорости вдоль лопастей. Установлено, что на ее величину существенное влияние оказывают инерционные силы. Они же создают давление на лопасть и, как следствие, увеличивают силу трения при движении измельчаемых частиц вдоль лопасти. Из условия равенства тангенциальной сдвигающей силы и силы трения получено выражение для расчета толщины слоя залегания материала на поверхности криволинейных лопастей. Проведен анализ его изменения в зависимости от угловой скорости, коэффициента трения и кривизны лопасти. Показано, что при определенной кривизне залегания материала на лопасти вообще не будет наблюдаться. Предложен алгоритм расчета толщины слоя самофутеровки, позволяющий определить его оптимальную величину.

Ключевые слова: ударно-центробежная мельница, лопасть, абразивный износ, самофутеровка, высота слоя, уравнение движения, инерционные силы, условия залегания материала.

P. Ye. Vaytekovich

Belarusian State Technological University

**THE DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF SELF-LINING
OF THE BLADES OF THE CENTRIFUGAL MILLS**

The analysis of design and technological parameters of the impact centrifugal mill. It is indicated that, along with high grinding efficiency, they have a significant disadvantage, which consists in intensive abrasive wear. It is noted that one of the effective ways to protect the rotor-accelerator blades is self-balancing. It is provided by the occurrence of pieces of crushed material on the surface of the blades, which in this case needs to be made curved. On the basis of the equation of the relative motion of particles along the rotor surface, the dependence for calculating their velocity along the blades is obtained. It is found that its value is significantly influenced by inertial forces. They also create pressure on the blade, and as a result, increase the friction force when moving the crushed particles along the blade. Under the condition of equality of tangential shear force and friction force, an expression is obtained to calculate the thickness of the layer of occurrence of the material on the surface of curved blades. The analysis of its change depending on the angular velocity, coefficient of friction and curvature of the blade. It is shown that with a certain curvature of the occurrence of the material on the blades will not be observed at all. An algorithm for calculating the thickness of the self-balancing layer is proposed, which allows determining its optimal value.

Key words: impact centrifugal mill, blade, abrasive wear, self-drilling, layer height, the equation of motion, inertial forces, the conditions of occurrence of the material.

Введение. Ударно-центробежные измельчающие агрегаты в последнее время находят довольно широкое использование в различных технологических процессах, в том числе и в процессах химической технологии. Их основное преимущество – это простота конструкции и высокая эффективность измельчения. В нашей стране образовалось два центра по исследованию таких агрегатов: Белорусский государственный технологический университет и ОАО «НПО Центр». Некоторое время они развива-

лись параллельно. Университет в большей степени занимался моделированием процесса движения материала в зоне разрушения и разработкой и промышленным внедрением малогабаритных измельчителей, преимущественно для нужд сельского хозяйства [1; 2]. Деятельность ОАО «НПО Центр» имеет более практическую направленность. Его сотрудники проводят полупромышленные испытания на натуральных образцах, изготавливают и поставляют на производство крупногабаритные образцы дробилок

и мельниц [3; 4]. На определенной стадии интересы этих двух разработчиков пересеклись и начался этап совместного сотрудничества. Его результатом стало несколько публикаций по изучению движения измельчаемого материала в межлопастном пространстве ротора-ускорителя при его разных конструктивных исполнениях [5; 6]. Значения скоростей, полученных при этом, явились основным фактором для оценки как эффективности ударного измельчения, так и абразивного износа элементов конструкции, в первую очередь лопастей ротора. Высокие скорости на выходе из ротора, простота конструкции и ее защита износостойкими накладками на некоторое время дали преимущества образцам с прямыми лопастями. Но проблемы абразивного износа так до конца не были решены. В связи с этим пришлось обратиться к более ранним исследованиям [7], в которых указывалось на возможность залегания измельчаемого материала на лопастях ротора-ускорителя и обеспечения таким образом их самофутеровки. Самым главным условием для этого считалось выполнение лопастей криволинейными, например в виде участка логарифмической спирали. Авторами работы [7] был предложен метод определения толщины слоя самофутеровки, основанный на угле естественного откоса. Вот это можно считать основным недостатком работы, поскольку указанный угол применим для решения статических задач. В случае с ударно-центробежной мельницей задача в полной мере динамическая, скорости движения материала вдоль лопасти превышают 100 м/с [8]. Здесь основное влияние будут оказывать инерционные силы, которые в работе [7] не учитывались. Поэтому цель данной работы заключается в определении условий самофутеровки с учетом указанных сил.

Основная часть. При определении скорости движения материала вдоль криволинейных лопастей (рис. 1) нами [6] использовалось уравнение относительного движения:

$$ma_d = \vec{F}_{1T} + \vec{F}_{2T} + \vec{F}_e + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где \vec{F}_{1T} и \vec{F}_{2T} – силы трения частиц по диску ротора и лопасти; \vec{F}_e и \vec{F}_c – переносная и кориолисова силы инерции.

В общем случае в полярной системе координат относительное движение частиц вдоль лопасти описывается системой из двух уравнений по координатам r и φ . Но поскольку эти координаты жестко связаны профилем лопасти, то достаточно составить одно уравнение, например для r .

С учетом того, что профиль лопасти в виде логарифмической спирали описывается уравнением $r = a^{\varphi}$, где a – параметр кривизны,

в работе [6] получили окончательное уравнение для расчета параметров движения твердых частиц вдоль такой лопасти:

$$\ddot{r} - \frac{\dot{r}^2}{r(\ln a)^2} = f_1 g \frac{r}{\sqrt{\dot{r}^2 + \left(\frac{\dot{r}}{\ln a}\right)^2}} - 2f_2 \omega \dot{r} + \omega^2 r + 2\omega \frac{\dot{r}}{\ln a}. \quad (2)$$

Условия залегания частиц существенно отличаются от описанных уравнением (2). Они характеризуется остановкой частиц в каком-то определенном месте с дальнейшим накоплением их в виде слоя. А это может произойти тогда, когда суммарная сила трения превысит движущую силу.

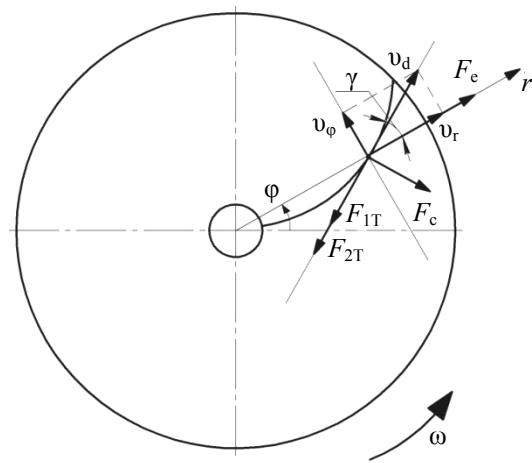


Рис. 1. Расчетная схема движения частицы материала вдоль лопасти

Исходя из уравнения (1), условие залегания запишется в виде:

$$\vec{F}_{1T} + \vec{F}_{2T} \geq \vec{F}_e + \vec{F}_c. \quad (3)$$

В проекции на направление движения и с учетом того, что $\vec{F}_c \perp \vec{v}_d$, где \vec{v}_d – относительная скорость, условие (3) трансформируется в следующее:

$$F_{1T} + F_{2T} \geq F_e \cos \alpha. \quad (4)$$

Примем самый неблагоприятный вариант для залегания частиц, когда они соприкасаются только с лопастью и не контактируют с диском. При этом $F_{1T} = 0$. Тогда уравнение еще более упростится и примет вид:

$$F_{2T} \geq F_e \cos \gamma. \quad (5)$$

Сила трения:

$$F_{2T} = f_2 N_2, \quad (6)$$

где f_2 – коэффициент трения частицы о лопасть.

Нормальная реакция:

$$N_2 = F_c + F_e \sin \gamma. \quad (7)$$

Выразив силы и тригонометричные функции через дифференциалы при $v_\phi = r\dot{\phi}$ и $v_r = \dot{r}$, получим

$$N_2 = 2m\omega\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2} + m\omega^2 r \frac{r\dot{\phi}}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2}}. \quad (8)$$

Тогда с учетом того, что все силы массовые, условие залегания (5) запишется в виде:

$$f_2 \left[2\omega\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2} + \omega^2 r \frac{r\dot{\phi}}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2}} \right] \geq \omega^2 r \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + (r\dot{\phi})^2}}. \quad (9)$$

В этом неравенстве две переменные координаты r и ϕ . Причем во всех членах уравнения (9) они представлены в виде произведения $r\dot{\phi}$. В данном случае, как и при составлении уравнения движения (2), необходимо учитывать жесткую связь этих координат с профилем лопасти. Тогда

$$r\dot{\phi} = \frac{\dot{r}}{\ln a}. \quad (10)$$

Подставим выражение (10) в условие (9):

$$f_2 \left[2\omega\sqrt{\dot{r}^2 + \left(\frac{\dot{r}}{\ln a}\right)^2} + \omega^2 r \frac{\dot{r}}{\ln a \sqrt{\dot{r}^2 + \left(\frac{\dot{r}}{\ln a}\right)^2}} \right] \geq \omega^2 r \frac{\dot{r}}{\sqrt{\dot{r}^2 + \left(\frac{\dot{r}}{\ln a}\right)^2}}. \quad (11)$$

Проведя преобразования и упрощения, в результате получим условие залегания частиц на лопасти:

$$\dot{r} \geq \frac{\omega r \ln a (\ln a + f_2)}{2f_2 (\ln^2 a + 1)}, \quad (12)$$

где $\dot{r} = dr/dt = v_r$ – радиальная составляющая скорости движения частицы, рассчитываемая по уравнению (2) движения вдоль лопасти.

Алгоритм определения границ залегания материала на криволинейной лопасти заключался в следующем. Сначала при заданной угловой скорости ω определялась минимальная кривизна $a = a_{\min}$, при которой начинается прилипание к лопасти. Для этого задавались коэффициентом трения $f = 0,3$ (частиц по металлу) и в

двух крайних точках $r = r_0$ и $r = r_d$ проверяли условие (12). После этого уже при коэффициенте трения $f_2 = 0,7$ (частиц по слою материала) для каждого значения радиуса в диапазоне $r_0 < r < r_d$ увеличивали кривизну a и рассчитывали выполнение условия (12). Выполнение этого условия и являлось границей залегания слоя самофутеровки.

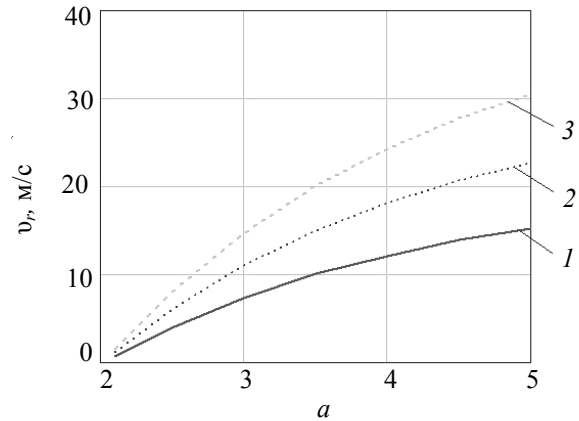


Рис. 2. Зависимость радиальной составляющей скорости $v_r = \dot{r}$ от кривизны лопасти a при $f_2 = 0,3$:
1 – $\omega = 200$ рад/с; 2 – $\omega = 300$ рад/с;
3 – $\omega = 400$ рад/с

Для реализации указанного алгоритма предварительно по уравнению (2) были рассчитаны и построены зависимости радиальной составляющей скорости $v_r = \dot{r}$ от кривизны лопасти a при различных угловых скоростях ω и коэффициенте трения $f_2 = 0,3$ (рис. 2) и $f_2 = 0,7$ (рис. 3).

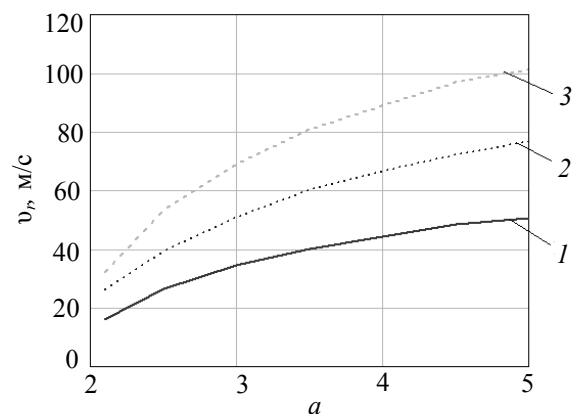


Рис. 3. Зависимость радиальной составляющей скорости $v_r = \dot{r}$ от кривизны лопасти a при $f_2 = 0,7$:
1 – $\omega = 200$ рад/с; 2 – $\omega = 300$ рад/с;
3 – $\omega = 400$ рад/с

Данные из этих графиков использовались для подстановки в левую часть неравенства (12). Результаты расчетов по определению границ залегания слоя материала на криволинейных лопастях представлены на рис. 4.

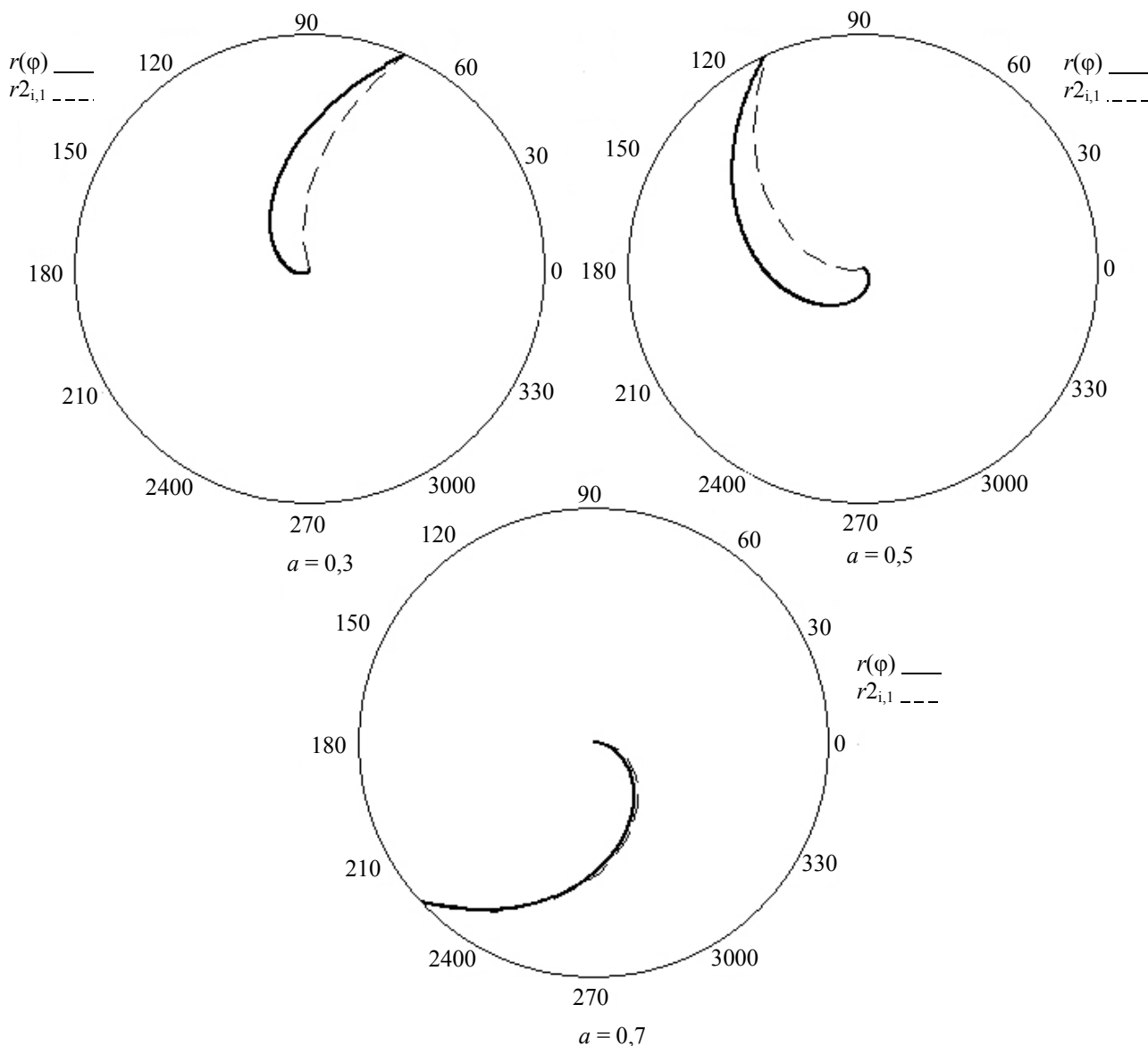


Рис. 4. Границы залегания слоя материала на криволинейных лопастях при точках $r = 250$ мм, $r_0 = 100$ мм и $\omega = 200$ рад/с

Здесь показан профиль изменения его толщины при постоянной угловой скорости ротора $\omega = 200$ с⁻¹ и разной кривизне лопастей.

Из рис. 4 видно, что при какой-то определенной кривизне наступает момент, когда частицы вообще не задерживаются на лопасти, а скользят по ней.

Заключение. В данной работе на основе анализа силовой схемы установлены условия залегания частиц измельчаемого материала на криволинейных лопастях ударно-центробежной мельницы. Эти условия определяются превышением суммарной силы трения над движущей силой.

Получена математическая зависимость для определения границ слоя самофутеровки при переменных угловой скорости, кривизне лопасти и коэффициенте трения частиц. Составлен и реализован алгоритм расчета толщины слоя. Установлено, что при определенной кривизне частицы вообще не будут задерживаться на лопасти, и слой на ней не будет образовываться. Данную работу можно считать начальным этапом в оптимизации конструктивных и скоростных параметров ротора с целью обеспечения гарантированного слоя самофутеровки.

Литература

1. Левданский Э. И., Левданский А. Э., Гребенчук П. С. Влияние конструктивных и технологических параметров роторно-центробежной мельницы на эффективность измельчения материалов // Труды БГТУ. Сер. III, Химия и технология неорг. в-в. 2006. Вып. XIV. С. 5–15.

2. Гребенчук П. С., Левданский Э. И. Описание движения частиц материала в рабочей зоне ударно-центробежной мельницы // Инженер-механик. 2013. № 4. С. 41–44.
3. Бароха Э. Л., Воробьев В. В., Горобец А. В. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Международной научно-технической конференции / ОАО «НПО Центр». Минск, 2008. С. 5–15.
4. Таболич А. В., Бондаренко С. Н. Конструкционные возможности повышения износостойкости ускорителей центробежно-ударных мельниц // Горная механика и машиностроение. 2016. № 2. С. 71–77.
5. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В., Верховодко А. А. Движения измельчаемого материала по поверхности ускорителя ударно-центробежной мельницы // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2015. № 7. С. 7–8.
6. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках // Горная механика и машиностроение. 2017. № 2. С. 54–63.
7. Товаров В. В., Оскаленко Г. Н. Исследование вылета частиц из лопастных роторов центробежных измельчающих машин // Труды ин-та Гипрацемент. 1962. Вып. XXIV. С. 64–91.
8. Левданский А. Э. Исследования и внедрение новых конструкций ударно-центробежных мельниц // Журнал прикладной химии. 2004. Т. 77. № 6. С. 956–960.

References

1. Levdansky E. I., Levdansky A. E., Grebenchuk P. S. Influence of design and technological parameters of a rotor-centrifugal mill on efficiency of crushing of materials. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU]. Ser. III, Chemistry and technology of inorganic. s-s, 2006, vol. XIV, pp. 5–15 (In Russian).
2. Grebenchuk P. S., Levdansky E. I. Description of the motion of material particles in the working area of the shock-impact centrifugal mill. *Inzhener-mekhanik* [Mechanical engineer], 2013, no. 4, pp. 41–44 (In Russian).
3. Barokha E. L., Vorob'yev V. V., Gorobets A. V. Centrifugal crushers and mills impact type. *Centrobeyhnaya tekhnika – vysokie tekhnologii: materialy 3-y Mezhdunarodnoy naychno-tekhnicheskoy konferentsii* [Centrifugal equipment – high technologies: materials of 3rd International scientific and technical conference]. Minsk, 2008, pp. 5–15 (In Russian).
4. Tabolich A. V., Bondarenko S. N. Structural opportunities to improve the wear resistance of accelerators, centrifugal impact mills. *Gornaya mekhanika i mashinostroeniye* [Mining mechanics and engineering], 2016, no. 2, pp. 71–77 (In Russian).
5. Vaitekovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolic A. V., Verkhovodko A. A. Movement of the comminuted material on the surface of the accelerator shock centrifugal mill. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroenie* [Chemical and petroleum engineering], 2015, no. 7, pp. 7–8 (In Russian).
6. Vaitekovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolich A. V. Influence of design features of the rotor speed comminuted material in a centrifugal impact crusher. *Gornaya mekhanika i mashinostroeniye* [Mining mechanics and engineering], 2017, no. 2, pp. 54–63 (In Russian).
7. Tovarov V. V., Moskalenko G. N. The study of departure of the particles from the rotor blade centrifugal grinding machines. *Trudy instituta Gipratsement* [Proceedings of the Institute of Giprocement], 1962, vol. XXIV, pp. 64–91 (In Russian).
8. Levdansky A. E. Research and implementation of new designs of impact-centrifugal mills. *Zhurnal prikladnoy khimii* [Journal of applied chemistry], 2004, vol. 77, no. 6, pp. 956–960 (In Russian).

Информация об авторе

Вайтехович Петр Евгеньевич – доктор технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических и силикатных производств. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: vpe51@mail.ru

Information about the author

Vaytekovich Petr Yevgen'yevich – DSc (Engineering), Assistant Professor, the Department of Machines and Apparatus for Chemical and Silicate Productions. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vpe51@mail.ru

Поступила 29.09.2017