

УДК 621.926

П. Е. Вайтехович

Белорусский государственный технологический университет

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИЛЫ ДАВЛЕНИЯ АБРАЗИВНЫХ ЧАСТИЦ
НА ЛОПАСТИ РОТОРА-УСКОРИТЕЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ МЕЛЬНИЦЫ**

Проведен анализ силового воздействия на частицы измельчаемого материала при их движении вдоль лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. Отмечено, что нормальное давление, а, соответственно, и трение о лопасть создается инерционными силами. Составлены уравнения движения частиц вдоль лопасти, по которым установлены изменения относительной скорости по их длине. Предложена методика расчета ее усредненных значений. По величине этой скорости рассчитаны инерционные силы для роторов с разной схемой установки лопастей. Установлено влияние конструктивных особенностей ротора и его скоростных характеристик на величину силы давления, которая оказывает решающее влияние на абразивный износ, обусловленный истирающим воздействием. Опробированный метод определения силы давления абразивных частиц на лопасти может стать важной составляющей комплексной модели расчета их износа.

Ключевые слова: мельница, ротор, лопасть, относительная скорость, инерционные силы, сила давления, абразивные частицы, износ.

P. Ye. Vaytekhovich

Belarusian State Technological University

**DETERMINATION OF PRESSURE FORCES ABRASIVE PARTICLES
TO THE BLADES OF THE ROTOR – ACCELERATOR CENTRIFUGAL MILL**

The analysis of the force action on the particles of comminuted material during their movement along the rotor blades of the centrifugal accelerator of the centrifugal mill. Noted that the normal pressure and, respectively, and the friction of the blade creates inertial forces. The equations of motion of a particle along the blade, which the changes of the relative velocity along their length. The methods of calculating the average values. The magnitude of this velocity is calculated inertial forces for rotors with different scheme of installation of the blades. The influence of design features of the rotor and its speed characteristics on the magnitude of the pressure force which has a decisive influence on the abrasive wear due to the abrasive impact. The tested method of determining the pressure forces abrasive particles to the blades may become an important component of a comprehensive model for the calculation of wear and tear.

Key words: mill, rotor, blade, the relative velocity, inertia force, pressure force, abrasive particles, wear.

Введение. Центробежные мельницы относятся к классу измельчителей ударного действия. Принцип их работы заключается в разгоне измельчаемого материала с помощью ротора-ускорителя до высокой скорости с последующим ударом об отбойную поверхность. Отечественным производителем таких мельниц является «НПО Центр» [1]. Это предприятие выпускает широкую гамму типоразмеров ударно-центробежных измельчителей разной производительности.

Научное и конструкторское подразделения «НПО Центр» постоянно занимаются совершенствованием помольных агрегатов и их основных узлов с целью повышения эффективности измельчения, снижения энергозатрат и абразивного износа элементов конструкции.

Одним из новшеств в последнее время стала замена изогнутых лопастей ротора-ускорителя на прямые. Они проще в изготовлении и обес-

печивают снижение удельного энергопотребления [2]. Но вместе с тем появляется дополнительная и весьма существенная проблема, связанная с повышением абразивного износа, особенно лопастей ускорителя. В связи с этим данная работа посвящена разработке одного из фрагментов методики расчета и прогнозирования абразивного износа в роторе-ускорителе с прямыми лопастями.

Основная часть. В зависимости от технологических потребностей в ударно-центробежных мельницах могут использоваться роторы с разными схемами установки таких лопастей (рис. 1).

В отличие от изогнутых лопастей, здесь не образуются слои самофутеровки. Весь материал, равномерно подаваемый в центральную часть ротора, под воздействием больших инерционных сил прижимается к лопастям и движется с увеличивающейся скоростью вдоль их

поверхности. Естественно, что на поверхности контакта возникают значительные силы трения и, как следствие этого, абразивный износ лопастей.

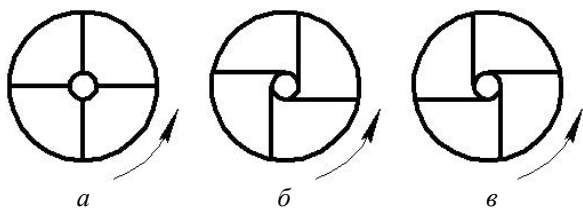


Рис. 1. Схема установки лопасти:
а – радиальные; б – повернутые по ходу вращения;
в – повернутые против вращения

По своей сути износ под воздействием истирания очень близок к процессу шлифования [3]. Из всех моделей шлифования наибольший интерес представляет модель Ходакова [4, 5]. Она основана на предположении, что одиночное зерно абразива, заглубившись в обрабатываемую поверхность под действием нормальной силы давления, снимает с металла стружку, поперечное сечение которой равно площади сегмента заглубления. Абсолютно аналогичное явление наблюдается и при движении прижатых к лопасти частиц измельчаемого материала в ударно-центробежной мельнице. Очевидно, что величина сегмента заглубления зависит от размера зерна и глубины его внедрения в обрабатываемую поверхность. Анализ зависимостей для определения заглубления [4] показал, что в качестве основного параметра в них фигурирует сила нормального давления.

Так по Герцу для случая внедрения абсолютно твердого шара в упругое полупространство

$$h = \sqrt[3]{\left[\frac{3F(1-\mu^2)}{4E}\right]^2} \frac{1}{\sqrt[3]{r_0}}, \quad (1)$$

где F – сила давления; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; r_0 – радиус зерна.

Хейфец для пластической деформации предложил формулу вида

$$h = \sqrt{\frac{F}{2\sigma_T}}, \quad (2)$$

где σ_T – предел текучести.

Приведенные формулы подтверждают, что при различных стадиях деформации решающее значение имеет величина силы давления. Отсюда возникает необходимость ее определения для конкретного случая движения абразивных частиц вдоль лопастей ротора-ускорителя центробежной мельницы. Сила давления появляется из-за воздействия инерционных сил в высокочастотном роторе. Определить ее можно

по анализу силовой схемы (рис. 2). Здесь рассмотрен случай, когда прямые лопасти установлены тангенциально и направлены по ходу вращения ротора.

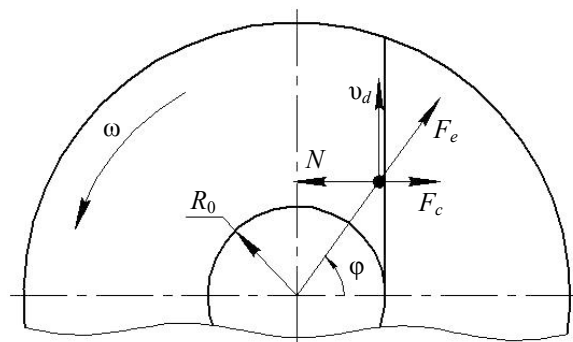


Рис. 2. Силовая схема

Сила давления частицы на лопасть F равна по модулю нормальной реакции N и противоположна ей по направлению. Согласно схеме

$$F = F_c + F_e \cos \varphi, \quad (3)$$

где F_c – кориолисова сила; F_e – переносная инерционная сила.

С учетом выражений для определения инерционных сил для лопастей, повернутых по ходу вращения (рис. 1, б):

$$F = 2m\omega v_d + m\omega^2 r \cos \varphi, \quad (4)$$

где m – масса частицы, кг; ω – угловая скорость ротора, рад/с; v_d – относительная скорость, м/с; r – текущий радиус, м.

Если движение рассматривается в полярной системе координат, то $\cos \varphi = R_0 / r$, где R_0 – начальный радиус установки лопастей, а относительная скорость

$$v_d = \sqrt{v_r^2 + v_\varphi^2} = \sqrt{\dot{r}^2 + r\dot{\varphi}^2}. \quad (5)$$

Для ротора с лопастями, повернутыми против хода (рис. 1, в), сила давления

$$F = 2m\omega v_d - m\omega^2 r \sin \varphi, \quad (6)$$

где $\sin \varphi = R_0 / r$.

В случае радиальных лопастей (рис. 1, а) инерционная переносная сила F_e направлена вдоль лопасти, и тогда $F = F_c$ или

$$F = 2m\omega v_d. \quad (7)$$

Причем здесь отсутствует угловое перемещение в относительном движении, и скорость $v_d = \dot{r}$.

Массу частицы измельчаемого материала, присутствующую во всех формулах для расчета силы давления, можно выразить через ее размер и плотность:

$$m = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho, \quad (8)$$

где r_0 – радиус частицы, м; ρ – плотность материала частицы, кг/м³.

Тогда окончательно эти формулы примут вид:

1) радиальные лопасти:

$$F = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho (2\omega v_d); \quad (9)$$

2) повернутые по ходу вращения:

$$F = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho (2\omega v_d + \omega^2 R_0); \quad (10)$$

3) повернутые против хода вращения:

$$F = \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho (2\omega v_d - \omega^2 R_0). \quad (11)$$

Остается открытым вопрос об определении относительной скорости v_d . Метод ее расчета разработан ранее [6, 7] для решения задачи о скорости частиц на выходе из ротора. Она решалась на основе уравнений относительного движения, записанных в полярной системе координат с учетом трения по диску и лопасти. Движение, ограниченное соответствующей формой лопасти, сводилось к одному дифференцированному уравнению по радиальной координате.

Отличие данной задачи заключается в том, что здесь не надо учитывать трение частиц по диску. Расчетные уравнения для относительной скорости v_d при этом несколько упрощаются и принимают вид:

1) радиальные лопасти:

$$\dot{r} = -2f\omega\dot{r} + \omega^2 r; \quad (12)$$

2) повернутые по ходу вращения:

$$\dot{r} = \frac{r}{1 - (R_0/r)^2} - 2f\omega\dot{r} + \omega^2 r - 2\omega \frac{r}{\sqrt{1 - (R_0/r)^2}}; \quad (13)$$

3) повернутые против хода вращения:

$$\dot{r} = \frac{r}{1 - (R_0/r)^2} - 2f\omega\dot{r} + \omega^2 r + 2\omega \frac{r}{\sqrt{1 - (R_0/r)^2}}, \quad (14)$$

где f – коэффициент трения частицы о лопасти.

С использованием пакета прикладных программ Mathcad по уравнениям (12)–(14) проведены расчеты относительной скорости частиц для всех

трех схем установленных лопастей. При этом начальный радиус установки лопастей ротора составляет 80 мм, его диаметр – 460 мм. Угловая скорость оставалась неизменной – 440 рад/с. Результаты представлены на рис. 3 в виде графических зависимостей изменения относительной скорости по радиусу ротора (длине лопасти).

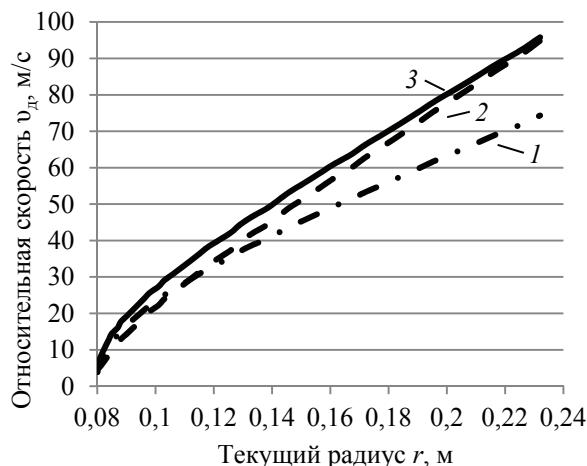


Рис. 3. Изменение относительной скорости по радиусу ротора:

1 – радиальные; 2 – повернутые по ходу; 3 – повернутые против хода

По зависимостям видно, что относительная скорость существенно изменяется по длине лопасти, увеличиваясь от начального значения почти до 100 м/с и более. Как показали расчеты для всех схем [6], изменение угловой скорости ротора в диапазоне 390–470 рад/с также не оказывает значимого влияния на нее. Относительная скорость при тангенциально установленных лопастях, повернутых как по ходу, так и против него, несколько выше чем радиальных. Имея все данные, можно вернуться к выполнению основной задачи – расчету силы давления по формулам (9)–(11). Результаты этой работы для угловой скорости 440 рад/с представлены на рис. 4.

Сила давления возрастает с увеличением радиуса ротора (длины лопасти). Ее значение для тангенциально установленных лопастей, повернутых вперед по направлению вращения выше, чем для двух других схем. При чем, на начальном участке сила давления для лопастей, повернутых против хода вращения, принимает отрицательное значение. Это свидетельствует о том, что на данном участке частицы вообще не соприкасаются с лопастью, они отрываются от лопасти инерционными силами.

При проведении инженерных расчетов вполне допустимо использовать усредненную по длине лопасти относительную скорость \bar{v}_d , по которой затем определяются такие же значения сил давления и трения.

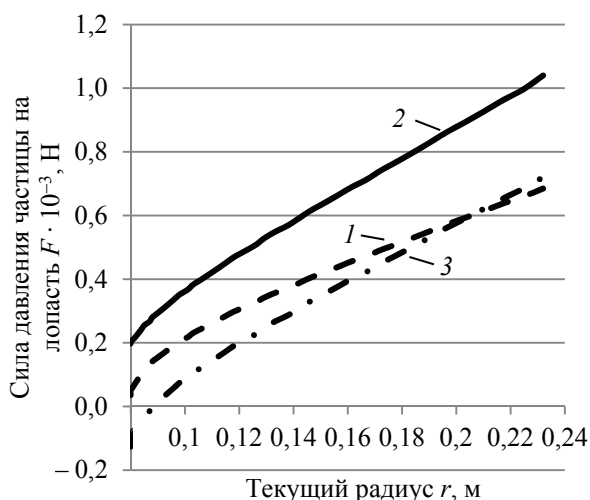


Рис. 4. Изменение силы давления по радиусу ротора:

1 – радиальные; 2 – повернутые по ходу;
3 – повернутые против хода

Эта скорость рассчитывается по формуле

$$\tilde{v}_d = \frac{\int_{R_n}^R v_d dr}{R - R_n}. \quad (15)$$

Функциональная связь $v_d = f(r)$ в виде эмпирической формулы устанавливается при математической обработке соответствующих расчетных зависимостей.

По результатам расчета несколькостораживает абсолютное значение силы давления, ее малая величина. Но следует учитывать, что эта сила определена для частиц диаметром $d_0 = 2 \cdot 10^{-4}$ м. Предварительные расчеты показали, что площадь ее контакта с лопастью будет иметь порядок 10^{-12} м². В результате получим давление на лопасть примерно 10^8 Па = 10^2 МПа. Это довольно существенная величина для трения и абразивного износа.

Заключение. В работе предложена методика и алгоритм расчета силы давления частиц измельчаемого материала на лопасти ротора центробежной мельницы. Эта сила является преобладающим фактором абразивного износа. Установлено влияние конструктивных особенностей ротора и его скоростных характеристик на величину силы давления. Опробированный метод может стать одной из основных составляющих комбинированной модели расчета и прогнозирования абразивного износа в ударно-центробежных мельницах.

Литература

1. Бароха Э. Л., Воробьев В. В., Горобец А. В. Центробежные дробилки и мельницы ударного типа // Центробежная техника – высокие технологии: материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 9–10 сентября 2008 г. Минск, 2008. С. 5–15.
2. Таболич А. В., Иванов Е. Н., Бондаренко С. Н. Способы повышения износостойкости конструкции ускорителя центробежно-ударных мельниц ОАО «НПО Центр» // Переработка минерального сырья. Инновационные технологии и оборудование: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск, 4–5 октября 2016 г. Минск, 2016. С. 9–14.
3. Байкалов А. Н. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
4. Ходаков Г. С. Механизм абразивного шлифования стекла // Оптико-механическая промышленность. 1985. № 5. С. 31–36.
5. Ходаков Г. С. Закономерности шлифования оптических материалов инструментом с монослойным распределением абразивных зерен // Оптико-механическая промышленность. 1985. № 8. С. 8–12.
6. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В. Модель движения материала в роторе-ускорителе центробежно-ударной дробилки // Труды БГТУ. 2014. № 3: Химия и технология неорганических веществ. С. 102–105.
7. Вайтехович П. Е., Гребенчук П. С., Таболич А. В., Верховодко А. А. Влияние конструктивных особенностей ротора на скорость измельчаемого материала в центробежно-ударных дробилках // Горная механика и машиностроение. 2017. № 2. С. 54–63.

References

1. Barokha E. L., Vorob'yev V. V., Gorobets. A. V. Centrifugal crushers and mills impact type. *Centrobezhnaya 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).
2. Tabolich A. V., Ivanov E. N., Bondarenko S. N. Ways of improving the durability of the design accelerator, centrifugal impactmills. *Mineral Processing. Innovatsionnye tekhnologii i oborudovanie: materialy 6-y Mezhdunarodnoy naychno-tekhnicheskoy konferentsii* [Innovative technologies and equipment: proceedings of the 6th International scientific-technical conference]. Minsk, 2016, pp. 31–36 (In Russian).

3. Baykalov A. N. *Vvedenie v teoriyu shlifovaniya materialov* [Introduction to the theory of grinding of materials]. Kiev, Navukova dumka Publ., 1978. 207 p.

4. Khodakov G. S. the Mechanism of abrasive grinding of glass. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* [Optical-mechanical industry], 1985, no. 5, pp. 31–36 (In Russian).

5. Khodakov G. S. Regularities of grinding of optical materials by tools with a monolayer distribution of the abrasive grains. *Optiko-mekhanicheskaya promyshlennost'* [Optical-mechanical industry], 1985, no. 5, pp. 8–12 (In Russian).

6. Vaytekhovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolich A. V. Model of the motion of material in the rotor – accelerator centrifugal impact crusher. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 3: Chemistry and technology of inorganic substances, pp. 102–105 (In Russian).

7. Vaytekhovich P. Ye., Grebenchuk P. S., Tabolich A. V., Verkhovodko A. A. Influence of design features of the rotor speed comminuted material in a centrifugal impact crusher. *Gornaya mekhanika i mashinostroenie* [Mining mechanics and engineering], 2017, no. 2, pp. 54–63 (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

Vaytekhovich 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