



Трибуна молодых ученых

УДК 664.70

А.А. Костылев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В РОТОРНО-ВИХРЕВОЙ МЕЛЬНИЦЕ ТОНКОГО ПОМОЛА

В статье рассмотрены физические основы измельчения. Проведены исследования силовых взаимодействий в зонах измельчения роторно-вихревой мельницы тонкого помола.

Ключевые слова: измельчение, частицы материала, силовые взаимодействия, вихревая камера.

А.А. Kostylev

THE RESEARCH OF THE CRUSHING PROCESS IN THE ROTOR AND VORTEX MILL WITH HIGH MILLING

The physical fundamentals of the crushing are considered in the article. The power interaction research in the crushing zones of the rotor and vortex mill with high milling is conducted.

Key words: crushing, material particles, power interactions, vortex camera.

Введение. В основе большинства современных технологий переработки органического и минерального сырья лежат процессы измельчения. Например, при изготовлении муки, крупы, комбикормов. А в последнее время процессы измельчения используются для измельчения полимерных отходов.

Крупные предприятия используют узкоспециализированное оборудование для измельчения сырья с определенными свойствами. Средние и малые предприятия, как правило, отдают предпочтение универсальным измельчителям. Универсальность измельчителей сырья предполагает реализацию в одном устройстве различных способов измельчения.

Физические основы измельчения. Измельчение материалов производится раздавливанием (рис. 1, 1), ударом (рис. 1, 2), истиранием (рис. 1, 3) и раскалыванием (рис. 1, 4).

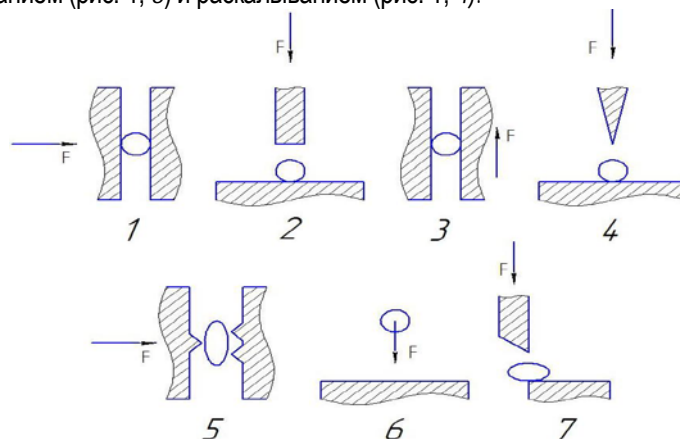


Рис. 1. Способы измельчения материалов [1]

При измельчении в различных мельницах, как правило, используется комплекс видов измельчения. К примеру, раздавливания с истиранием, удар с раздавливанием и истиранием; иногда к главным усилиям присоединяются побочные-изгибающие (рис. 1, 5), разрезающие (рис. 1, 7) и свободный удар (рис. 1, 6).

Выбор метода измельчения зависит от крупности и прочности кусков измельчаемого материала.

Прочные и хрупкие материалы измельчаются раздавливанием и ударом, прочные и вязкие – раздавливанием, вязкие материалы средней прочности – истиранием, ударом и раскалыванием [2].

Задачи исследования. Исследовать основные возможные силовые взаимодействия, влияющие на измельчение материала в роторно-вихревой мельнице тонкого помола (далее РВМТП) [3].

Силовые взаимодействия в зонах измельчения РВМТП. Рассмотрим частицы материала, участвующие в вихревом движении, происходящем в помольной камере РВМТП. Крупные частицы материала, попадающие в камеру, вращаются на периферии у боковой стенки. Непрерывные соударения их между собой и со стенками камеры (футеровкой) ведут к разрушению частиц. Интенсивность процесса разрушения зависит от физико-механических свойств, геометрических размеров и времени пребывания частиц в потоке. Поток несущей среды вместе с измельчаемым материалом подается через патрубок ввода в полый ротор (внутренний ротор). В общем случае изменение окружной скорости несущей среды в помольной камере описывается нелинейным законом, но исходя из малой величины частицы материала на участке, равном $2R$ (R – радиус частицы), можно принять закон изменения линейным [4]

$$V_{\varphi} = (V_2 - V_1)/(2R), \quad (1)$$

где V_1, V_2 – окружные скорости по обе стороны частицы вдоль радиуса помольной камеры.

Сила, действующая со стороны несущей среды на частицу, или сила аэродинамического сопротивления [4]

$$F = C_x \frac{\rho_2 V^2}{2} S, \quad (2)$$

где S – площадь поперечного сечения частицы; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления частицы; ρ_2 – плотность несущей среды; V^2 – скорость движения тела относительно несущей среды. Коэффициент сопротивления C_x может быть представлен в виде суммы $C_x = C_a + C_r$ [5], где C_a – коэффициент лобового сопротивления.

Общее уравнение для коэффициента лобового сопротивления различной формы при относительном движении в безграничной среде было получено И.А. Вахрушевым [6]. При $Re = 0 \div 2 \times 10^4$ коэффициент аэродинамического сопротивления можно рассчитать по формуле

$$C_x = \left(\frac{28,47}{Re \times 10^{-15,38}} + \frac{4,565f}{Re^{\frac{1}{3}}} - \frac{0,491f}{Re^{\frac{1}{2}}} \right) \times \{1 - th[0,01282 Re (f - 0,9805)]\} + 2,86(f - 0,8531) \times th[0,01282 Re (f - 0,9805)] + \left(7,76 - 2,86f - \frac{4,88}{f} \right) th[0,00104 Re (f - 0,9038)], \quad (3)$$

где коэффициент несферичности $f = \frac{V_p}{V_s}$; V_p – объем частицы; V_s – объем шара. Например, для шара $f = 1$, для кубооктаэдра – 1,104, для октаэдра – 1,182, для куба – 1,24, для тетраэдра – 1,5.

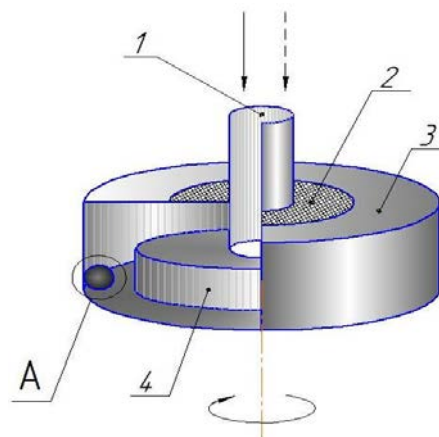


Рис. 2. Схема РВМТП: 1 – патрубок ввода материала и несущей среды; 2 – классификатор; 3 – помольная камера; 4 – наружный ротор

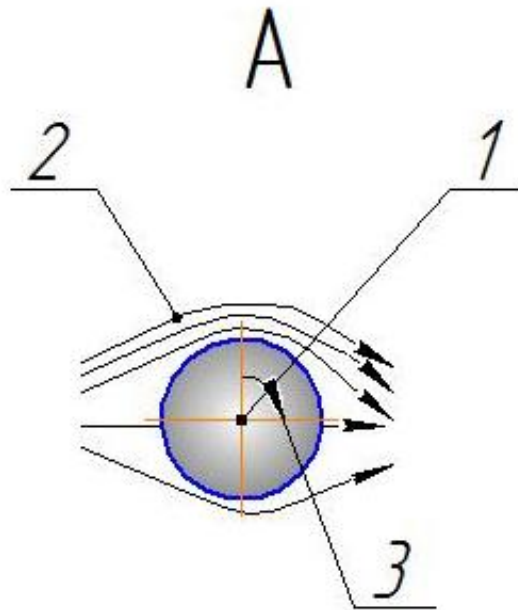


Рис. 3. Схема вращательного движения материала в вихревом потоке: 1 – частица материала; 2 – потоки несущей среды; 3 – направление вращения частицы

Следует учесть, что $V^2 = V_\phi^2 + V_r^2$ и V_ϕ для частиц, вращающихся у боковой стенки камеры измельчения, на порядок больше V_r . Это обеспечивает преобладание центробежных сил над силами, увлекающими частицу материала совместно с несущей средой к центру камеры измельчения. Поэтому V_ϕ^2 будет превышать величину V_r^2 , и можно записать $V^2 \approx V_\phi^2$.

Процесс истирания частиц происходит при контакте их с поверхностями роторов и помольной камеры (футеровкой), а также при взаимном соударении между собой. Он сопровождается уменьшением массы и объема частицы, а также изменением ее формы.

Проведем исследование особенностей движения частиц твердой фазы во вращающемся потоке с центральным стоком газодисперсной смеси. Дифференциальное уравнение движения частицы с переменной массой твердой фазы во вращающемся потоке под действием центробежной силы и сил сопротивления имеет вид [7]

$$W_\phi \frac{dm_p}{d\tau} + m_p \frac{dW_\phi}{d\tau} = \xi_1 \frac{\pi d_p^2 p (V_\phi - W_\phi)^2}{4} - k_m N, \quad (4)$$

где $\frac{dm_p}{d\tau} = k_m \beta(N, d_p, m_0) FN$ – уравнение, описывающее изменение масс частицы; m_p – переменная масса частицы; d_p – диаметр частицы; W_ϕ – тангенциальная составляющая скорости частицы; ξ_1 – коэффициент гидродинамического сопротивления; p – плотность газовой среды; k_m – коэффициент трения частицы о футеровку.

Второе выражение, в правой части уравнения (4), представляет силу трения скольжения. Она прямо пропорциональна силе N – нормального давления между поверхностями трущихся тел. Коэффициент трения k_m зависит от физико-механических характеристик измельчаемых частиц и материала, из которого сделана футеровка помольной камеры РВМТП, от качества обработки поверхностей камеры, от формы частиц.

При горизонтальном расположении вихревой камеры отсутствует влияние силы тяжести на частицу в радиальном направлении. Тогда в зоне измельчения частица твердой фазы будет двигаться под действием центробежной силы F_C , стремящейся удержать ее на боковой стенке помольной камеры РВМТП (рис. 4) или на внутренней поверхности ротора (рис 3, а), силы сопротивления газа F_W , силы трения F_T и центростремительной силы F_n (когда частица находится в помольной вихревой камере), стремящейся вынести ее в центральный сток (рис. 4).

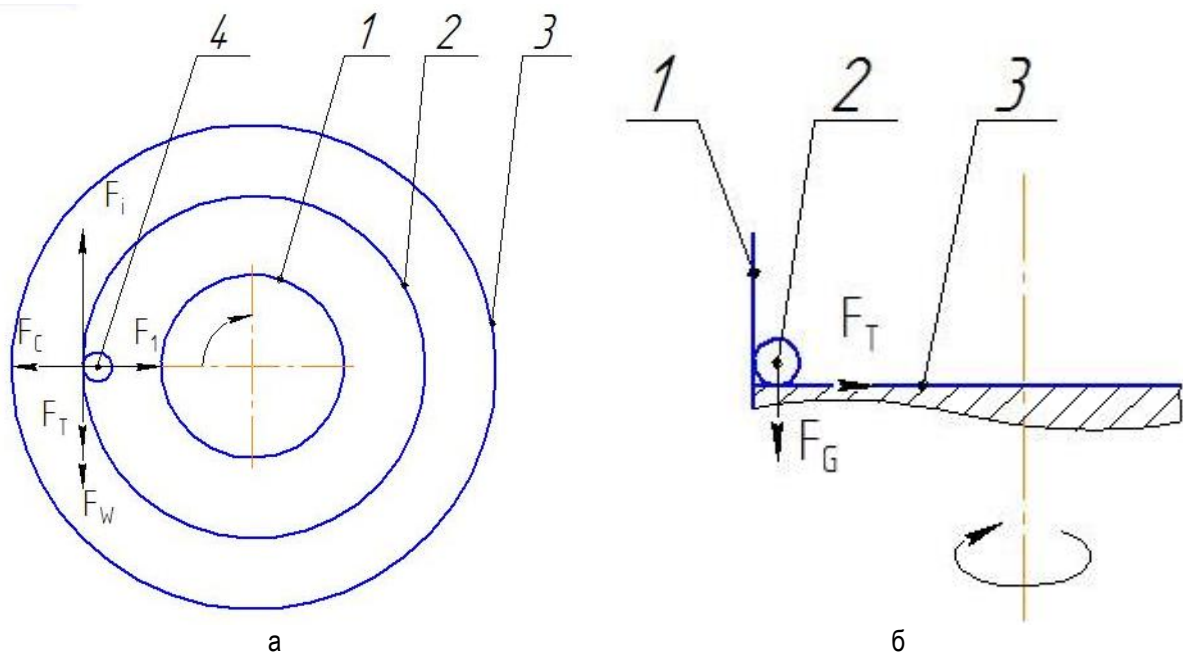


Рис. 4. Схема действия сил на частицу материала, находящуюся у внутренней стенки внешнего ротора: а: 1 – частица измельчаемого материала; 2 – внутренний ротор; 3 – внешний ротор; 4 – поверхность помольной камеры; F_c – центробежная сила; F_T – сила трения; F_i – инерционная сила; F_1 – реакция силы F_c ; F_W – лобовое сопротивление; б: 1 – поверхность внешнего ротора; 2 – частица измельчаемого материала; 3 – дно внешнего ротора; F_T – сила трения; F_G – сила тяжести

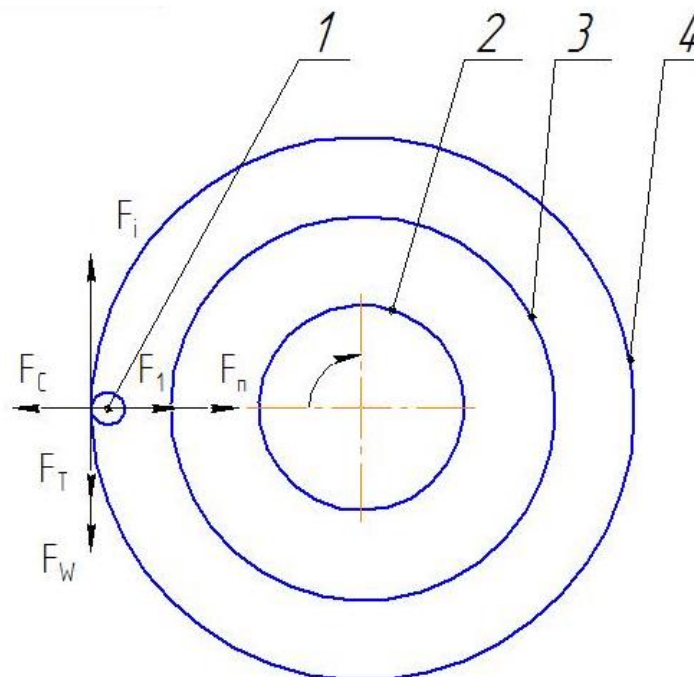


Рис. 5. Схема действия сил на частицу материала, находящуюся у стенки помольной камеры: 1 – частица измельчаемого материала; 2 – внутренний ротор; 3 – внешний ротор; 4 – поверхность помольной камеры; F_c – центробежная сила; F_T – сила трения; F_i – инерционная сила; F_1 – реакция силы F_c ; F_n – центростремительная сила; F_W – лобовое сопротивление

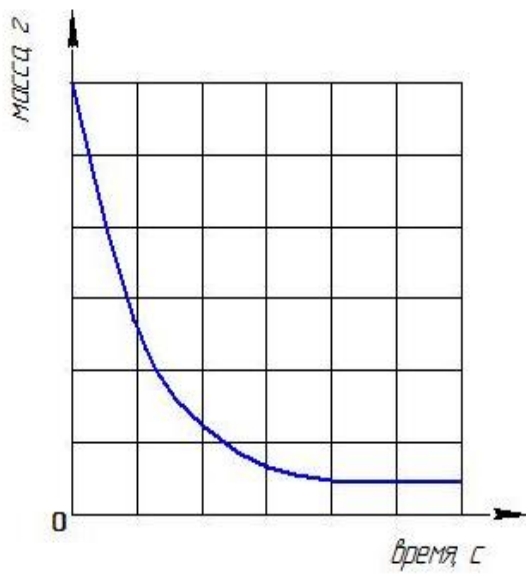


Рис. 6. Зависимость изменения массы отдельной частицы при измельчении в РВМТП

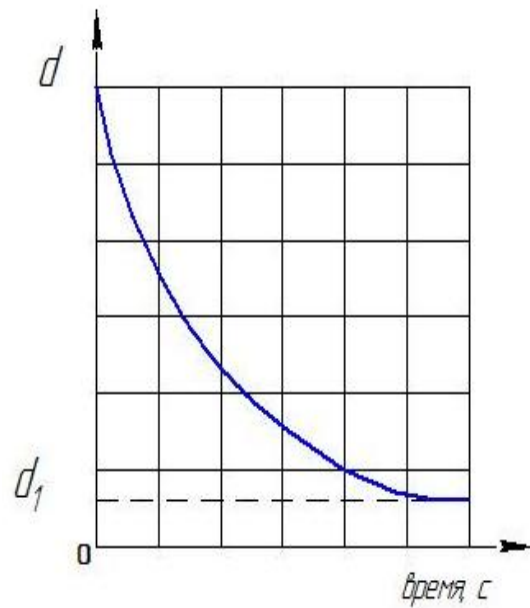


Рис. 7. Зависимость изменения диаметра частицы с течением времени при измельчении в РВМТП

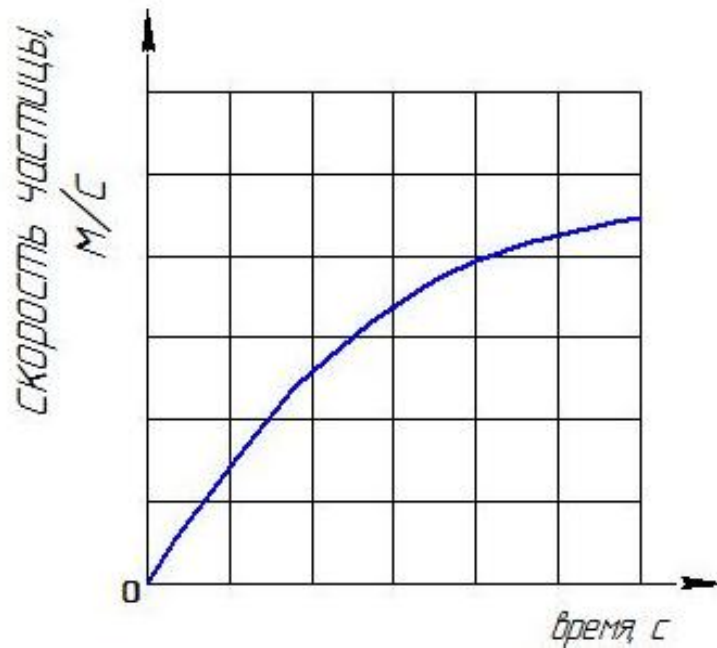


Рис. 8. Зависимость изменения скорости частицы от времени при измельчении в РВМТП

Выводы

Проведенные исследования показали:

1. Траектория движения и время нахождения частицы во вращающемся потоке зависят от разных факторов: скорости ввода частиц в поток, формы частиц, степени закрутки потока, радиуса равновесной траектории, режима обтекания частицы потоком несущей среды, плотности измельчаемого материала и др.
2. Обозначены основные силовые воздействия, возникающие в РВМТП в процессе её работы.

Литература

1. *Сиденко П.М.* Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – С. 25.
2. *Кавецкий Г.Д., Королев А.В.* Процессы и аппараты пищевых технологий. – М.: Агропромиздат, 1991. – 432 с.
3. Заявка 2012147619 Российская Федерация. Роторно-вихревая мельница тонкого помола / *А.А. Костылев, В.Н. Невзоров, Т.В. Ступко.* – Заявитель ФГБОУ ВПО «Красноярский государственный аграрный университет». – № 2012147619; заявл. 08.11.2012.
4. *Аржаников Н.С., Мальцев В.Н.* Аэродинамика. – М., 1956. – 485 с.
5. *Берд Р., Стюарт В., Лайтфут Е.* Явления переноса. – М.: Химия, 1974. – 688 с.
6. *Вахрушев И.А.* Общее уравнение для коэффициента лобового сопротивления частиц различной изометрической формы при относительном движении в безграничной среде // *Химическая промышленность.* – 1965. – № 8. – С. 614–617.
7. *Горлов А.С.* Вихре-акустический диспергатор комплексного воздействия на частицы измельчаемого материала: дис. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2006.

