

Горлов А.С., канд. техн. наук, доц.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИСТИРАНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ В КАМЕРЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ВИХРЕ-АКУСТИЧЕСКОГО ДИСПЕРГАТОРА

belgoras@mail.ru

Проведенные исследования показали, что визуализация процессов, происходящих в камере измельчения вихре-акустического диспергатора, позволяет наблюдать характер движения крупных частиц, процесс истирания, а так же явления, которые никакими методами нельзя изучить, описать, познать. Управляя аэродинамическими параметрами в камере измельчения можно влиять на процесс истирания частиц в ней. Процесс движения и истирания крупных частиц зависит от формы частиц, их плотности, от физико-механических характеристик измельчаемого материала.

Ключевые слова: вихре-акустический диспергатор, вихревые потоки, истирание, измельчение.

Характерной особенностью аэродинамики вихре-акустических диспергаторов является сочетание аэродинамического режима, характеризующегося высокой относительной скоростью взаимодействующих фаз, с длительным по отношению к устройствам с вихревыми потоками и пневмотранспортом временем пребывания измельчаемого материала в аппарате [1]. Сочетание этих двух факторов позволяет осуществлять измельчение дисперсных материалов.

Основная камера измельчения вихре-акустического диспергатора (WAD) имеет форму короткого вертикального цилиндра с центральным отверстием для выхода газозвеси. Подача газообразного энергоносителя в вихревую камеру осуществляется через один или несколько тангенциальных каналов, расположенных по внешней окружности камеры. Твердый дисперсный материал может подаваться непосредственно в камеру или поступает вместе с потоком газа.

Важной характеристикой вихре-акустических диспергаторов является их удерживающая способность, определяющая среднее время пребывания материала в камере измельчения, в течение которого достигается необходимая его дисперсность. Время пребывания измельчаемого материала в камере измельчения зависит от нескольких факторов: от физико-механических характеристик частиц материала и от аэродинамических показателей энергоносителя в камере измельчения [2]. В основной камере измельчения WAD частицы твердой фазы проходят несколько этапов разрушения, прежде чем покинуть камеру через центральный сток. Механизм разрушения зависит от размеров частиц исходного материала. Крупные частицы, под действием центробежной силы, будут вращаться на периферии камеры измельчения и основным механизмом разрушения таких частиц является процесс истирания.

Ниже рассматривается математическая модель процесса истирания частиц, позволяющая оценить характеристики частиц в этом процессе. На твердую частицу, находящуюся на боковой стенке камеры измельчения, в радиальном направлении действуют две силы: центробежная F_u , направленная от центра камеры к периферии, и центростремительная сила F_{uc} направленная к центру. Условие равновесия этих сил можно выразить уравнением:

$$F_u = F_{uc} \quad (1)$$

или

$$\rho_u \frac{\pi d_p^3 W_\phi^2}{3D} = \xi \rho_g \frac{\pi d_p^2 V_\phi^2}{8}, \quad (2)$$

где D – диаметр камеры измельчения; ρ_u и ρ_g – соответственно, плотности твердого материала и газа; W_ϕ , V_ϕ – скорость твердых частиц и скорость газового потока у стенки камеры; ξ – коэффициент лобового сопротивления частицы; d_p – диаметр частиц материала.

Коэффициент лобового сопротивления частицы можно вычислить по формуле:

$$\xi = \frac{24\mu_g}{\rho_g (V_\phi - W_\phi) d_p},$$

где μ_g – вязкость газа.

Движение энергоносителя в камере измельчения WAD имеет осесимметричный характер, и скорость газового потока, в периферийной зоне камеры может определена из уравнения

$$V_\phi = \frac{V}{\pi DH}, \quad (3)$$

где V – объемный расход энергоносителя, H – высота камеры измельчения.

В пристеночном слое твердые частицы периодически ускоряются, проходя через струю газа, выходящую из тангенциального патрубка,

а затем тормозятся за счет силы трения о цилиндрическую стенку камеры. Величину силы трения о стенку камеры можно определить как:

$$F_{mp} = k_m F_{\phi} = k_m \frac{2W_{\phi}^2 m_p}{D} \quad (4)$$

Ускорение a можно определить как отношение изменения скорости частицы материала к среднему времени ее движения на участке движения по боковой стенке камеры, где происходит истирание:

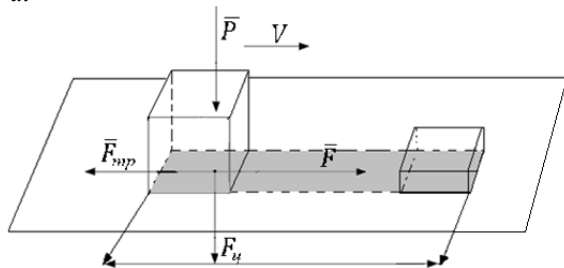
$$F_{mp} = -m_p \frac{W_{\phi} - W_{\phi 1}}{t} \quad (5)$$

где t – время движения твердой частицы на участке истирания.

По теореме об изменении количества движения системы, согласно Мещерскому, основной закон движения частицы переменной массы записывается в виде:

$$m_p(t) \frac{d\bar{W}_{\phi}}{dt} = \bar{F} - \bar{U} \frac{dm_p}{dt}, \quad (6)$$

где \bar{F} – сумма всех внешних сил, действующих на частицу в вихревом потоке камеры измельчения, $m_p(t)$ – зависящая от времени масса частицы, $\frac{dm_p}{dt}$ – скорость изменения этой массы, \bar{U} –



относительная скорость отсоединяемого вещества от частицы.

Для установления уравнения движения частицы переменной массы нужно проводить опыты. Путь является сложным, т.к. искомое уравнение должно зависеть от закона изменения массы (процесс истирания при движении по поверхности) частицы со временем.

Уравнение, описывающее изменение массы частицы в процессе истирания,

$$\frac{dm_p}{dt} = k_m \beta(N, m_0, F, N), \quad (7)$$

где β – функция зависящая от значения сил приложенных к частице под действием которых проходит процесс истирания, площади контакта частицы с поверхностью, m_p – переменная масса частицы и k_m – коэффициент трения частицы о стенку камеры зависит от физико-механических характеристик измельчаемых частиц и материала, из которого сделана камера измельчения, от качества обработки поверхностей камеры, от формы частиц.

Модель, определяющая изменение массы частиц в процессе истирания, представлена на рис. 1.

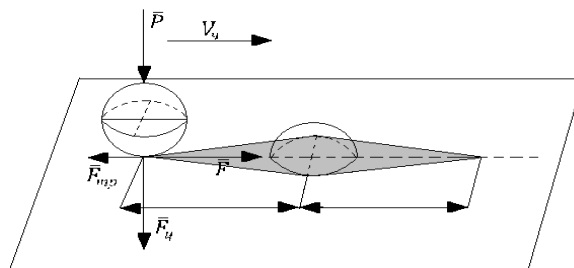


Рис. 1. Модель, определяющая изменение массы частицы в процессе истирания

Частица движется поступательно по поверхности под действием сил с некоторой скоростью V_{ϕ} . В результате силы трения, которая превосходит силы взаимодействия между слоями материала, происходит истирание (уменьшение массы) частицы. За частицей остается след из материала, который может иметь различную форму. Форма следа зависит от формы истираемой частицы (рис.1). Объем материала, распределенного в следе $V_p = Sh$, где S – площадь следа, h – толщина следа, которая зависит от физико-механических характеристик материала; от сил, приложенных к частице; от свойств поверхности контакта, а так же от скорости движения частицы. При больших скоростях необходимо учитывать температурный режим в области контакта, который влияет на процесс истирания. Время, в течение которого истирается частица (кубик с основанием a) можно опре-

делить по формуле $t = m_p \rho_p / (a V_{\phi} h)$, где ρ_p, V_{ϕ} – плотность, скорость движения частицы.

Изменение массы прямо пропорционально силе P нормального давления между поверхностями трущихся тел. Отношение величины истирания (износа) частицы к интервалу времени, в течение которого оно возникло, или к пути, на котором происходило истирание, представляет собой соответственно скорость истирания и интенсивность истирания. Износостойкость материалов оценивают величиной, обратной скорости и интенсивности истирания.

Проводились эксперименты на прозрачной лабораторной установке (рис. 2) по визуализации и изучению процессов движения, измельчения, истирания частиц различной формы. Визуализация процессов, происходящих в камере измельчения, позволяет наблюдать явления, которые никакими методами нельзя изучить, познать. Материал загружается в камеру, энер-

гоносите́ль (воздух) от компрессора подается через тангенциальный патрубок.



Рис. 2. Лабораторная установка для визуализации процессов в камере измельчения

Крупные частицы вращаются по боковой поверхности камеры измельчения. В начальной стадии процесса истирания сферических частиц, наблюдается характерное истирание частиц не по всей поверхности, а по цилиндрической, ориентированной вдоль мгновенной оси вращения частицы (рис. 3).



Рис. 3. Сферические частицы после обработки в камере измельчения

При круговом движении частицы, по боковой поверхности камеры измельчения, она одновременно вращается вокруг своей оси по принципу гироскопа. Мгновенная ось вращения проходит через диаметр меньшего сечения, проходящего через центр частицы. Со временем площадь соприкосновения частицы и стенки увеличивается, форма частицы изменяется и изменяется положение оси вращения.

Проводились опыты с частицами разной формы: со сферическими, с пластинчатыми. Результаты истирания частиц представлены на (рис. 4).



Рис. 4. Частицы после обработки в камере измельчения: *a* – сферические; *б* – пластинчатые

Сферические частицы в процессе истирания принимают сферическую форму (рис. 4, *a*). Пластинчатые частицы (рис. 4, *б*) в процессе обработки в камере измельчения так же принимают сферическую форму. По характеру истираемости частиц можно определить, как ориентированы частицы в потоке энергоносителя. Пластинчатые частицы ориентированы большим сечением в горизонтальной плоскости.

Некоторые параметры, входящие в уравнение описывающее изменение массы частицы в процессе истирания, необходимо определять экспериментальным путем. Закон изменения массы частиц в процессе истирания определяется физико-механическими характеристиками

материала, кристаллической структурой, от сил взаимодействия на микроуровне, а так же от сил, действующих на частицу.

Законы изменение массы частиц при истирании при установившемся режиме в камере измельчения WAD представлены на (рис. 5).

Закон изменения массы частицы может иметь вид: экспоненциальной $-m_p(t) = m_0 e^{-kt}$; линейной $-m_p(t) = m_0(1-kt)$; степенной $-m_p(t) = m_0(1-kt^\alpha)$ зависимости. Параметр k определяется экспериментальным путем, используя модель рис. 1.

При движении частиц материала в камере измельчения наблюдается жгутобразная структура газодисперсных потоков у стенки камеры. Вращающийся двухфазный поток набегаёт на входную струю энергоносителя (воздуха), происходит разделение потока на два жгута. При движении частиц в вихревом потоке возникают поля взаимодействия, где закручивание линий тока энергоносителя вокруг вращающейся частицы обуславливает силу взаимодействия, что показано на (рис. 6).

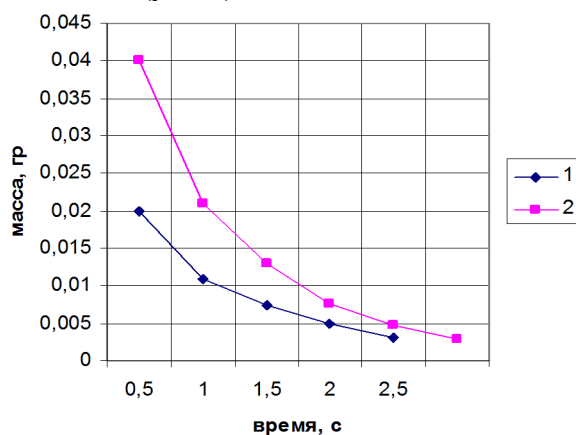


Рис. 5. Изменение массы отдельных частиц при истирании в камере измельчения

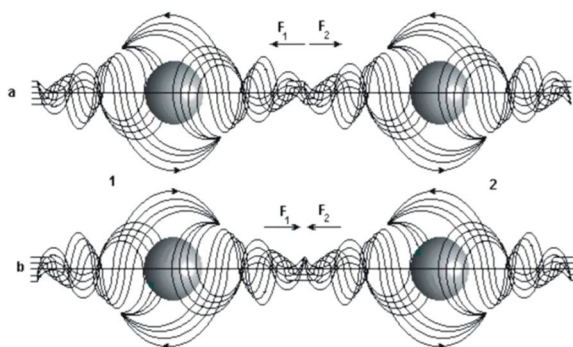


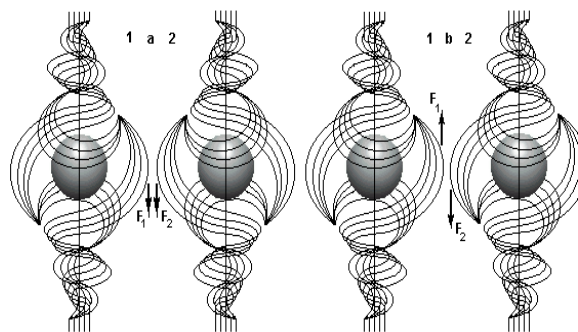
Рис. 6. Схемы поступательно-вращательного движения частиц материала в газовом потоке камеры измельчения

Если вращение потоков идет в разных направлениях (рис. 6), то спирали линий между частицами скручиваются и, укорачиваясь, притягивают их друг к другу. Так как все частицы вращаются с потоком в одном направлении, то основными силами, связывающими частицы в жгуты, является центростремительная и центробежная. Она скручивает в общий жгут линии тока, вращающихся параллельно в одном направлении частиц и стягивает их. Возмущения, генерируемые частицами, которые вращаются в одном направлении одного знака, расталкивают частицы и не дают возможности сблизиться им, удерживая частицы на расстоянии, которое устанавливается балансом центробежной силы и центростремительной силы, в зависимости от характеристик поля энергоносителя.

Проведенные исследования показали, что визуализация процессов, происходящих в каме-

ре измельчения вихре-акустического диспергатора

Это вращение создает дополнительную напряженность поля энергоносителя, которая в свою очередь создает силу F направленную в сторону противоположную вращению частиц материала (возвратную силу). На (рис. 6) изображены частицы, вращающиеся в одном направлении, возвратные силы их направлены навстречу друг другу, расталкивают частицы. Так образуются и проявляются силы взаимодействия, частицы притягиваясь, освобождают энергию линий тока энергоносителя. Модель позволяет объяснить возникновение жгутобразных структур, для чего обратимся к (рис. 6). При вращении частица материала не только обкручивает линии тока энергоносителя вокруг себя, но и накручивает их в спирали на ось вращения, что создает дополнительную напряженность поля энергоносителя. Если поле энергоносителя вращается в одном направлении, то образуемые спирали раскручивают друг друга и, удлиняясь, расталкивают частицы и освобождают энергию потока.



ре измельчения вихре-акустического диспергатора, позволяет наблюдать характер движения крупных частиц, процесс истирания, а так же явления, которые позволяют понять и создать физическую модель процессов в ней. На основе физической модели проще создать математическую модель описывающую процессы, происходящие в камере измельчения вихре-акустического диспергатора. Управляя аэродинамическими параметрами в камере измельчения можно влиять на процесс истирания частиц в ней. Процесс движения и истирания крупных частиц зависит от сил приложенных к частице, формы частиц, их плотности, от физико-механических характеристик измельчаемого материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ №2003123664/03, 25.07.2003. Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Лесовик В.С., Горлов А.С., Перельгин Д.Н., Федоренко Б.З. Вихре-акустический диспергатор // Патент России. № 2250138.2005. Бюл. №11.
2. Шаптала В.Г., Шопина Е.В., Стативко А.А. Исследование характера движения частиц в помольной камере вихревой мельницы // Энергосберегающие комплексы и оборудование для производства строительных материалов: межвуз. сб. науч. тр. Белгород: Изд-во БГТУ, 2003. С. 276-281.

Gorlov A.S.**STUDY OF SOLID PARTICLES ABRADING PROCESS IN THE GRINDING CHAMBER OF VORTEX-SONIC DISPERSER**

Studies have shown that viewing of the processes in the grinding chamber of vortex-sonic disperser makes it possible to observe the mode of large particles motion, the abrasion process as well as some phenomena which cannot otherwise be studied, described, known. The process of particle abrading can be influenced by adjusting aerodynamic conditions in the grinding chamber. Motion and large particle abrading process depends on the shape of particles, their density and on physical and mechanical properties of the grind material.

Key words: *vortex-sonic disperser, vortex flows, abrasion, grinding.*