

УДК 66.084.2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ В РАЗРЕЖЕННОМ ПОТОКЕ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ

Суханов А.С., Лебедев А.Е., Зайцев А.И., Лупанов А.П.

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, e-mail: xe666@mail.ru

С использованием вероятностного подхода составлено математическое описание процесса движения частиц в разреженном потоке, создаваемом центробежным ускорителем. Получено аналитическое выражение дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания, позволяющее оценить структуру потока, что может быть использовано в расчетах конкретных устройств применительно, например, к задачам измельчения. Практическая значимость результатов исследования состоит в выявлении причин быстрого износа ударных элементов при измельчении материалов, и позволяет проектировщикам оборудования вносить соответствующие изменения в известные устройства. Полученное выражение дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания может быть также использовано при расчете устройств, работающих на принципе ударного взаимодействия потоков частиц с рабочими органами аппаратов, таких как смесители сыпучих материалов и устройства для получения суспензий.

Ключевые слова: поток, удар, изнашивание, частица, материал, измельчитель

MATHEMATICAL FORMULATION OF PARTICLE'S MOVEMENT IN RAREFIED FLOW OF PERCUSSION CENTRIFUGAL CRUSHING MACHINE

Sukhanov A.S., Lebedev A.E., Zaitsev A.I., Lupanov A.P.

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, e-mail: xe666@mail.ru

In accordance with probabilistic approach mathematical formulation of particle movements in rarefied flow generated by centrifugal accelerator is compiled. Analytic form of differential distribution function of numbers of particles depending on angle of dispersion which enables the estimation of the flow structure for device calculation suitable for example for crushing tasks is obtained. The substance of investigation is the reason's detection of quick attrition of elements for percussion during material's crushing. Due to these results product design people can change something in construction of existing devices. The obtained expression of the differential distribution functions of the number of particles in the corners of dispersion can also be used when calculating devices operating on the principle of shock interaction of particle flows with working bodies of machines such as mixers of bulk materials and devices for reception of suspensions.

Keywords: flow, impact, destruction, particle, material, mill

Измельчение материалов при помощи ударного взаимодействия потоков частиц с неподвижными отбойными поверхностями является одним из наиболее эффективных способов измельчения. Согласно работам [1, 2] энергозатраты при использовании данного способа на 20–25 % ниже, чем при измельчении истиранием или сжатием при одинаковой степени измельчения. Это объясняется тем, что процесс измельчения происходит в разреженном состоянии, при котором практически исключается трение между частицами измельчаемого материала, а затраты энергии на перевод материала в дисперсное состояние существенно ниже, чем на проведение процессов в плотных слоях.

Несмотря на высокую эффективность, простоту конструкций и невысокое потребление энергии измельчителей ударного действия, их главным недостатком является быстрый и неравномерный износ дорогостоящих рабочих органов, таких как лопасти ускорителей и отбойные элементы. Особенно изнашивание проявляется при измельчении материалов средней и повышенной абразивности [3–4]. К таким мате-

риалам относятся щебень и асфальтовый гранулят, получаемый при грубом измельчении старого асфальтобетонного скола или непосредственно после фрезы при ремонте автомобильных дорог. Основной особенностью асфальтового гранулята является его неоднородность. Так, в состав частиц гранулята могут входить в различных соотношениях щебень, битум, минеральный порошок и песок.

На рис. 1 представлены фотографии, на которых показан износ отбойных элементов мельницы «Титан», полученный при измельчении щебня и асфальтового гранулята на асфальтобетонном заводе «Капотня» г. Москва. Необходимо также отметить, что такой износ отбойных элементов был получен при измельчении щебня в течение одной недели, а при измельчении более абразивных и неоднородных материалов, таких, как асфальтовый гранулят – за 2–3 дня.

Из представленной фотографии видно, что в процессе работы мельницы изнашивается лишь центральная зона отбойных элементов, а остальная поверхность (около 50 %) остается неизношенной. Однако в данном агрегате такой отбойный элемент в даль-

нейшем использоваться не может, так как рабочая зона отбойных элементов изношена и приняла форму кольцевого канала. Ударное взаимодействие частиц измельчаемого

материала с такой поверхностью происходит при больших углах падения (практически по касательной), что отрицательно сказывается на эффективности измельчения [5].

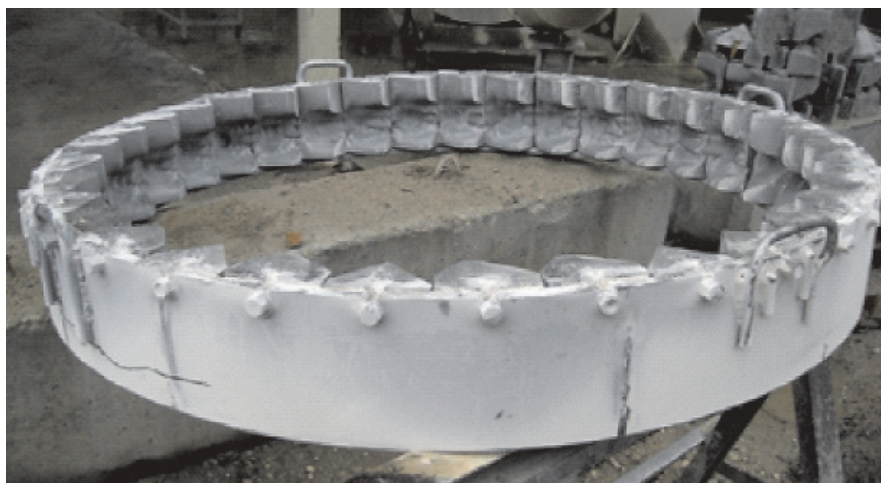


Рис. 1. Изношенные отбойные элементы центробежно-ударной мельницы

Несмотря на большое количество существующих работ по исследованию устройств такого типа, их основная масса посвящена исследованию разрушения частиц и основана на одночастичном подходе. Сведения о структуре набегающего и отраженного потоков, об их форме и фракционном составе практически отсутствуют, а исследования по движению потоков частиц во внутренних объемах аппаратов встречаются весьма редко и носят экспериментальный характер.

Рассмотрим процесс формирования разреженного потока частиц измельчаемого материала, создаваемого центробежным ускорительным устройством лопастного типа. Наличие случайных факторов в процессе описанного ударного взаимодействия частиц с отбойником, таких как неупорядоченность движения твердых частиц, неравномерность распределения их объемной плотности, взаимные и вторичные их столкновения, требуют вероятностного подхода к решению задачи. При этом основной целью является установление явного вида функции распределения частиц по углам рассеивания для энергетически замкнутой макросистемы решением соответствующего кинетического уравнения [6]. Статистическое описание макрофизических систем в их равновесном состоянии, когда выполняется условие энергетической замкнутости [7], практически эквивалентно описанию стохастического поведения соответствующих им динамических систем [8]. При этом возможен переход от динамических уравнений с учетом ланжевеновских источников к кинематическим уравнениям

типа Фоккера-Планка со стационарными решениями в виде функции распределения по набору обобщенных координат макросистемы.

Согласно работам [6, 7] распределение числа частиц образованного дисперсного потока dN_1 в элементе фазового объема $d\Gamma_1 = dv_{x1} dv_{y1} dD$ экспоненциально убывает в зависимости от стохастической энергии частицы E_1 в соответствии с выражением

$$dN_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{E_{01}}\right) d\Gamma_1. \quad (1)$$

Здесь энергия E_1 представляет собой сумму кинетической энергии поступательного и вращательного движения частиц и энергии, вызванной расширением потока за счет взаимодействия частиц с воздушной средой

$$E_1 = \frac{mv_{x1}^2}{2} + \frac{I\omega^2}{2} + \frac{m(v_{x1} \operatorname{tg} \varphi_1)^2}{2}. \quad (2)$$

Момент инерции частицы и ее угловая скорость вычисляются по следующим формулам:

$$I = \frac{8}{5mD^2}, \quad \omega = \frac{2v_{x1}}{D}. \quad (3)$$

Угол φ_1 – угол отклонения частицы от горизонтального направления (угол рассеивания).

Ввиду достаточно больших скоростей движения (в современных мельницах ударного типа порядка 50–100 м/с) и крупных размеров измельчаемых частиц, влияние воздушных потоков, создаваемых классификатором, не учитываем. Так же в данном

математическом описании не учитывается взаимодействие частиц в потоке, что основывается на многочисленных исследованиях по механике потоков [9].

Расчетная схема движения частиц в расширяющемся потоке, создаваемом центробежным лопастным ускорителем, показана на рис. 2.

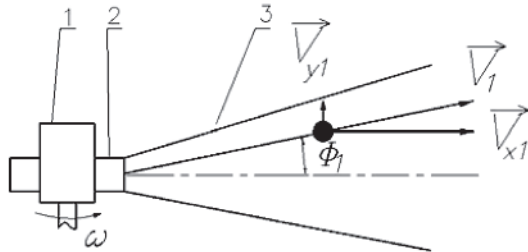


Рис. 2. Расчетная схема процесса образования разрезанного потока:

- 1 – распылитель; 2 – сопловой канал;
3 – образованный дисперсный поток

При вращении ускорителя частицы измельчаемого материала под действием центробежных сил инерции движутся по поверхностям его внутренних рабочих органов (лопастей) от оси вращения к периферии и разбрасываются. Образованный таким образом дисперсный поток представляет собой расширяющийся в поперечном сечении факел с постоянным углом раскрытия. Движение частиц в потоке происходит до столкновения с отбойными элементами,

расположенными на внутренней поверхности корпуса измельчителя.

Для получения выражения дифференциальной функции распределения числа частиц по углам рассеивания необходимо определить неизвестные постоянные величины E_{01} и A_1 , входящие в выражение (1).

Составим нормировочное соотношение, отвечающее балансу массы, для определения неизвестной константы A_1 в выражении (1)

$$N_1 = \int_{\Gamma_1} dN_1. \quad (4)$$

Здесь N_1 – число частиц, находящихся в потоке в единицу времени.

Уравнение энергетического баланса, составленное для момента образования потока, позволяет вычислить неизвестный энергетический параметр E_0

$$E_u = E_{p1}. \quad (5)$$

Здесь E_u – энергия потока частиц движущихся в ускорителе до отрыва от него; E_{p1} – энергия образованного потока частиц, определяемая интегрированием выражения (1) по фазовому объему

$$E_u = \sum_1^{N_1} \frac{mv_1}{2}, \quad E_{p1} = \int_{\Gamma_1} E_1 dN_1. \quad (6)$$

Тогда дифференциальная функция распределения числа твердых частиц набегающего потока, создаваемого центробежным ускорительным устройством, по углам рассеивания будет описываться следующим выражением:

$$f_1(\varphi_1) = \frac{1}{N_1} \frac{dN_1}{d\varphi_1} = \frac{1}{N_1} \int_{\Gamma_1} dN_1 = \frac{A_1}{N_1} \int_{v_{x1 \min}}^{v_{x1 \max}} \int_{D_{1 \min}}^{D_{1 \max}} \exp\left(-\frac{E_1}{E_{01}}\right) dv_{x1} dD_1. \quad (7)$$

Окончательно, с учетом (1), (5) и (6), получим:

$$f_1(\varphi_1) = \frac{1}{N_1} \frac{dN_1}{d\varphi_1} = \left(-12v_{1x \min} k_1 \sqrt{k_5} + k_3 + 12v_{1x \max} k_2 \sqrt{k_5} - 3k_6\right) \times \\ \times A_1 \left(D_{1 \max}^2 - D_{1 \min}^2\right) / \sqrt{k_5} + \left(k_4 + 12v_{1x \min} k_1 \sqrt{k_5} + 5k_6 - 12v_{1x \max} k_2 \sqrt{k_5}\right) \times \\ \times A_1 \left(D_{1 \max}^{\square} - D_{1 \min}^{\square}\right) / \left(\sqrt{k_5} N_1\right), \quad (8)$$

где функциями от φ_1 являются следующие величины:

$$k_1 = \exp\left(-2/15\pi\rho\left(7 + 5\operatorname{tg}(\varphi_1)\right)^2 v_{\min 1}^2 / E_{01}\right);$$

$$k_2 = \exp\left(-3/15\pi\rho\left(9 + 2\operatorname{tg}(\varphi_1)\right)^2 v_{\max 1}^2 / E_{01}\right);$$

$$k_3 = 4\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi\rho\left(7 + 5\operatorname{tg}(\varphi_1)\right)^2 / E_{01}} v_{\min 1}^{\square}\right);$$

$$k_4 = 4\operatorname{erf}\left(\sqrt{2\pi k_5} v_{\min 1}^{\square}\right);$$

$$k_5 = \rho\left(1 + \operatorname{tg}^2 \varphi_1 / E_{01}\right);$$

$$k_6 = 3\operatorname{erf}\left(\sqrt{\pi k_5} v_{\max 1}^{\square}\right). \quad (9)$$

В этих выражениях erf – функция ошибок

$$\operatorname{erf}(U) = 2\pi^{-1} \int_0^U \exp(-u^2) du. \quad (10)$$

На рис. 3 приведено сравнение расчетных и опытных данных для потока частиц щебня в измельчителе центробежно-ударного типа. Опытные данные получены с промышленной центробежно-ударной мельницы «Титан».

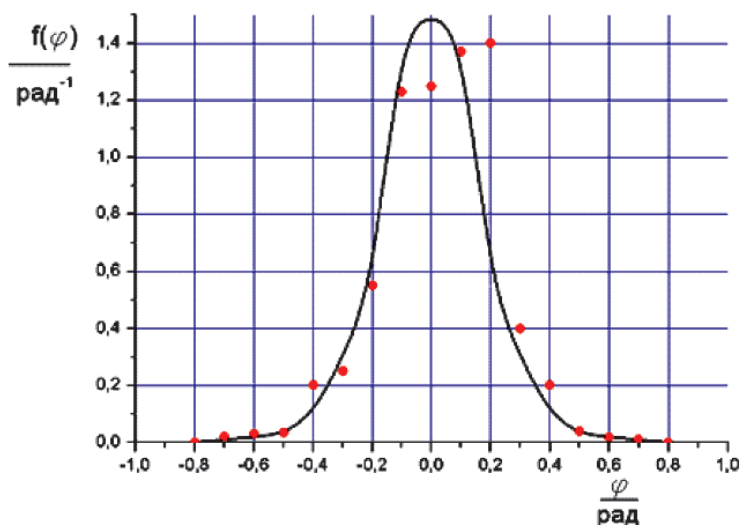


Рис. 3. Дифференциальная функция распределения числа частиц по углам рассеивания[^]
 $N_l = 1500$, $E_{ol} = 4,54$ Дж, $v_{maxl} = 50$ м/с, $v_{minl} = 30$ м/с, $\rho = 2000$ кг/м³.
 Точки – экспериментальные значения, сплошная линия – теоретическая кривая

Из полученной зависимости видно, что основная масса частиц сосредоточена в центральной части потока. По краям потока движется лишь небольшое количество частиц. По этой причине при работе мельницы в центре отбойника наблюдается максимальная интенсивность износа, снижающаяся к краям (см. рис. 3).

Несущественное расхождение теоретических значений с экспериментальными данными особенно в верхней части кривой

распределения, можно объяснить тем, что опытные данные получены на некотором удалении от оси распылителя, а выражение (8) составлено для момента образования потока, а также влиянием восходящих воздушных потоков, создаваемых при работе классификатора.

На рис. 4 показана фотография изношенной поверхности отбойного элемента мельницы центробежно-ударной «Титан» на асфальтобетонном заводе «Капотня» г. Москва.



а



б

Рис. 4. Фотографии изношенных отбойных элементов центробежно-ударной мельницы:
 а – при измельчении асфальтового гранулята; б – при измельчении щебня

Из данных фотографий видно, что при измельчении асфальтового гранулята изношенная поверхность имеет большую глубину, чем при переработке щебня. Это объясняется большей абразивностью данного материала и более узкой шириной потока.

Таким образом, предложенное математическое описание может быть использовано в дальнейшем для оценки формы изношенных поверхности отбойных элементов при проектировании центробежно-ударных мельниц.

С целью повышения срока службы подобных мельниц проведенные исследования подтверждают необходимость их конструктивного изменения.

Увеличение долговечности рабочих органов может осуществляться за счет создания таких условий движения и ударного взаимодействия частиц с рабочими органами, при которых лопасти и отбойные элементы будут подвергаться равномерному по всей поверхности взаимодействия износу. Благодаря чему повышается их срок службы, снижается частота ремонтов и вызванных им простоев агрегата.

Для получения равномерного износа отбойных органов необходимо создавать потоки с равномерным распределением количества частиц по высоте потока. Данный результат может быть получен заменой вертикальных лопастей ускорителей на наклонные лопасти или лопасти криволинейной формы. При такой конструкции ускорительного органа создаваемый им поток будет иметь большую ширину и равномер-

ное распределение частиц измельчаемого материала по высоте потока.

Список литературы

1. Акунов В.И. Струйные мельницы. – М.: Машиностроение, 1967. – 263 с.
2. Давыдов В.Н. Механические процессы и аппараты измельчения строительных материалов: учебное пособие. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 96 с.
3. Андреев С.Е. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. – М.: Недра, 1980. – 415 с.
4. Боловнев В.И. Интенсификация измельчения материалов на основе обобщающей гипотезы дробления // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 6. – С. 31–35.
5. Клушанцев Б.В. Пути повышения надежности дробилок ударного действия. – М.: ЦНИИТЭстроймаш, 1980. – 45 с.
6. Ландау Л.Д. Теоретическая физика: учеб. пособие. – Т. 5. Ч. 1. Статистическая физика – 4-е изд., испр. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. литературы, 1995. – 608 с.
7. Зайцев А.И. Ударные процессы в дисперсно-пленочных системах. – М.: Химия, 1994. – 176 с.
8. Капранова А.Б. Стохастическое описание движения осветленной фракции суспензии // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – Иваново, 2004. – Т. 47, Вып. 6. – С. 99–101.
9. Бабуха Г.Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках. – Киев: Наукова думка, 1972. – 175 с.

Рецензенты:

Штерн П.Г., д.ф.-м.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского», г. Ярославль;

Епархин О.М., д.т.н., профессор Ярославского филиала ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет путей сообщения», г. Ярославль.

Работа поступила в редакцию 05.11.2011.