



Математическое описание измельчения дисперсных материалов ударным способом

А.Е. Лебедев, С. Суид, А.А. Ватагин

Ярославский государственный технический университет, Ярославль

Аннотация: Измельчение дисперсных материалов при помощи удара является одним из наиболее эффективных методов, особенно когда требуется получение тонкого и сверхтонкого помола. Однако не смотря на многочисленные достоинства данного вида измельчения имеются и существенные недостатки, наиболее значимым из которых является быстрый и неравномерный износ лопастей и отбойных органов. Особенно это проявляется при измельчении твердых и неоднородных частиц, обладающих повышенными абразивными свойствами. Для решения данной проблемы было предложено организовать ударное взаимодействие таким образом, чтобы вся рабочая поверхность была нагружена одинаково. Это позволит обеспечить одинаковые условия взаимодействия и исключить образование участков с повышенной интенсивностью износа и продлить срок службы мельниц. Однако реализация данного способа требует создания методов расчета параметров потоков, как набегающего на отбойник, так и отраженного от него. В работе приводится математическое описание структуры данных дисперсных потоков.

Ключевые слова: измельчение, удар, столкновение, диаметр, мельница, материал, частица, отбойник, поток, взаимодействие, износ.

Ударное измельчение дисперсных материалов относится к одним из наиболее эффективных методов измельчения, особенно когда требуется получение тонкого помола. Это объясняется тем, что в процессе столкновения частиц с отбойными органами удается при невысоких энергозатратах получить качественный помол. Дело в том, что при ударе на частицы измельчаемого материала действуют кратковременные силы огромной величины, часто в несколько раз превышающие силовые воздействия в измельчителях других типов.

Однако, несмотря на многочисленные преимущества данного вида измельчителей, рабочие органы аппаратов ударного типа подвержены

интенсивному износу по причине нерациональной организации условий взаимодействия потоков измельчаемых материалов.

В частности, на асфальтобетонном заводе АБЗ 4 КАПОТНЯ при производстве минерального порошка путем помола щебня и асфальтового гранулята лопасти ускорителей и отбойные плиты подвержены интенсивному износу. При этом разрушаются лишь некоторые области рабочих органов, а остальная поверхность остается работоспособной. Такое неэффективное применение дорогих деталей приводит к повышению цен на готовый продукт.

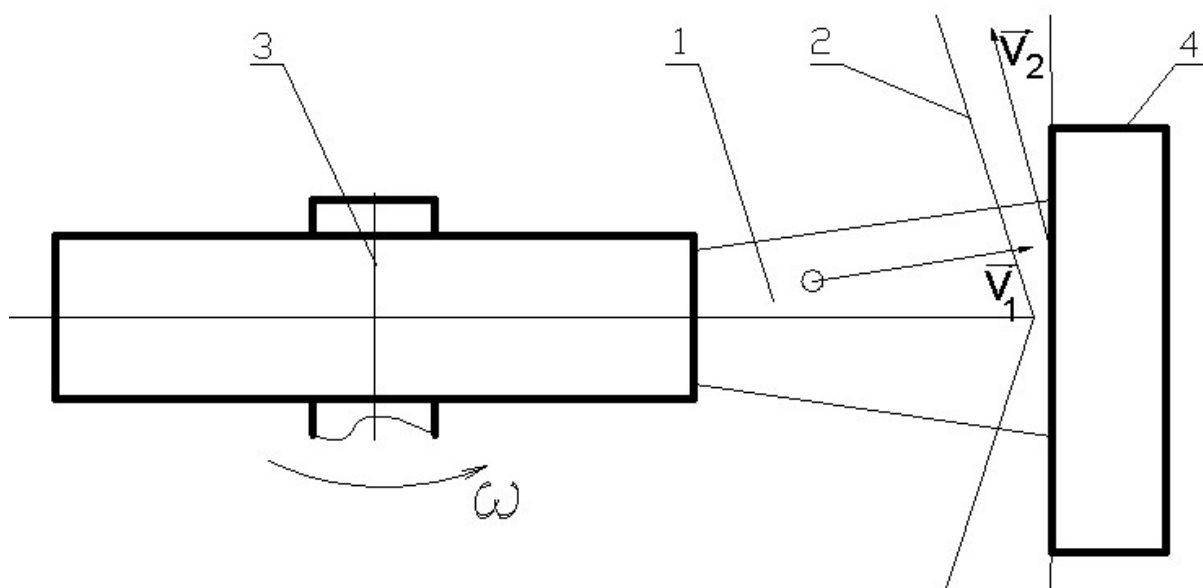
Для решения данной проблемы было предложено организовать условия взаимодействия частиц потока с поверхностями отбойных плит, при которых будет нагружена вся их рабочая поверхность, что приведет к одинаковому износу меньшей интенсивности.

Это можно обеспечить за счет модернизации существующего оборудования, например размещением в карманы для самофутеровки направляющих пластин, которые обеспечат плавное перераспределение материала с нижней части лопатки и его одинаковое распределение по высоте рабочего органа в конечной зоне, что позволит обеспечить равномерное распределение количества частиц в образующемся дисперсном потоке перед отбойным органом. Такие условия столкновения обеспечат уменьшение интенсивности разрушения основных рабочих органов ударного измельчителя.

Для реализации вышеописанных технических решений необходимо произвести расчет параметров движения частиц в набегающем и отраженном потоках.

Расчетная схема ударного взаимодействия разряженного потока с отбойным элементом представлена на рис.1.

В процессе моделирования будем использовать вероятностный подход.



1- набегающий поток частиц измельчаемого материала, 2- отраженный поток, 3-ускоритель, 4- отбойный элемент

Рис. 1-Расчетная схема процесса образования отраженного дисперсного потока твердых частиц

При образовании отраженного потока фазовое пространство представляет собой совокупность скорости частицы и ее диаметра. Распределение числа частиц отраженного потока dN_2 в элементе фазового объема $d\Gamma_2 = dv_2 dD_2$ зависит от энергии частицы E_2 :

$$dN_2 = A_2 \cdot \exp(-E_2 / E_{02}) d\Gamma_2 \quad (1)$$

Энергия E_2 в (1) представлена в виде двух составляющих - кинетической и энергии, расходуемой на формирование новой поверхности. Согласно исследованиям [1-10], поверхностная составляющая энергии при измельчении однородных частиц пропорциональна их диаметру:

$$E_{нов} = \zeta_1 / (\pi \cdot D_2) \quad (2)$$

Однако, в случае дробления неоднородных материалов (состоящих из крупно- и тонкодисперсной составляющей, связующего) при вычислении

поверхностной энергии (2) необходимо принимать во внимание и дополнительные расходы на преодоление сил вязкости и слипания. Предложено поверхностную энергию считать обратно пропорциональной квадрату диаметра:

$$E_{нов} = \zeta_2 / (\pi \cdot D_2^2), \quad (3)$$

где ζ_1, ζ_2 — коэффициенты пропорциональности, зависящие от физико-механических свойств частиц измельчаемого материала.

Произведем переход от параметров v_2, D_2 к безразмерным величинам:

$$W_2 = \frac{v_2}{v_k}, D_2 = \frac{D_2}{D_k} \quad (4)$$

Здесь v_k и D_k средняя скорость, и размер частиц.

Тогда с учетом (2) – (4) выражение энергии для твердых хрупких материалов:

$$E_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2 \cdot \rho \cdot D_k^2 \cdot W_2^2 \cdot v_k^2}{2} + \frac{\zeta_1}{\pi \cdot D_2 \cdot D_k}; \quad (5)$$

для неоднородных частиц:

$$E_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2 \cdot \rho \cdot D_k^2 \cdot W_2^2 \cdot v_k^2}{2} + \frac{\zeta_2}{\pi \cdot D_2^2 \cdot D_k^2} \quad (6)$$

Нормировочная константа A_2 в выражении (1) с учетом (4)-(6) вычисляется выражением:

$$N_2 = \int_{\Gamma_2} dN_2 = \int_{W_{2min}}^{W_{2max}} \int_{D_{2min}}^{D_{2max}} A_2 \cdot v_k \cdot D_k \cdot \exp(-E_2 / E_{02}) dD_2 dW_2, \quad (7)$$

где N_2 - число частиц, находящихся в отраженном потоке и определяемое из экспериментальных данных:

$$N_2 = \sum_{\delta=1}^w \left(\frac{V_{\delta}}{V'_{\delta}} \right) = 6 \cdot \frac{\rho}{\pi} \sum_{\delta=1}^w \left(\frac{M_{\delta}}{(D'_{2\delta})^3} \right), \quad (8)$$

$$D'_{2\delta} = (D_{2\delta}^{max} - D_{2\delta}^{min}) / 2. \quad (9)$$

Здесь W — число фракций, $N_{2\delta}$ и V_{δ} — количество и объем частиц δ -й фракции, соответственно, V'_{δ} — объем частицы диаметра $D'_{2\delta}$ в δ -й фракции, M_{δ} — масса частиц в δ -й фракции, v_{2max} и v_{2min} наибольшее и наименьшее значение скорости частиц, D_{2max} и D_{2min} максимальный и минимальный размеры осколков.

Энергетический параметр E_{02} в выражении (1) находится из уравнения энергетического баланса для момента столкновения дисперсного потока с отбойным элементом:

$$E_{p1} = E_{p2}, \quad (10)$$

где E_{p1} — энергия набегающего потока твердых частиц на отбойную поверхность, E_{p2} — энергия отраженного потока частиц.

Последняя может быть вычислена по формуле:

$$E_{p2} = \int_{\Gamma_2} E_2 dN_2 \quad (11)$$

Дифференциальная функция распределения числа частиц отраженного потока по размерам следует из выражения (1) :

$$f_2(D_2) = \frac{1}{N_2} \frac{dN_2}{dD_2} = \frac{1}{N_2} \int_{\Gamma_2'} dN_2 = \frac{A_2 \cdot v_k}{N_2} \int_{W_{2min}}^{W_{2max}} \exp(-E_2 / E_{02}) dW_2. \quad (12)$$

Здесь $d\Gamma_2'$ - сокращенный элемент фазового объема:

$$d\Gamma_2' = v_k dW_2 \quad (13)$$

Проинтегрировав, получим:

$$f_2(D_2) = -\frac{A_2 \cdot \sqrt{2\pi} \cdot [\operatorname{erf}(\theta_1 \cdot W_{2min}) - \operatorname{erf}(\theta_1 \cdot W_{2max})] \exp(\theta_2)}{2 \cdot N_2 \cdot D_2 \cdot \theta_3} \quad (14)$$

Величины $\theta_1 - \theta_3$ в формуле (14) находятся:

$$\theta_1 = D_2 \cdot D_k \cdot v_k \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho \cdot D_k / E_{02}}, \quad (15)$$

для твердых однородных частиц:

$$\theta_2 = -\frac{\zeta_1}{(D_2 \cdot D_k \cdot \pi \cdot E_{02})}, \quad (16)$$

для неоднородных частиц:

$$\theta_2 = -\frac{\zeta_2}{(D_2^2 \cdot D_k^2 \cdot \pi \cdot E_{02})}, \quad (17)$$

$$\theta_3 = \sqrt{\pi \cdot \rho \cdot D_k / E_{02}}. \quad (18)$$

Согласно работе [5], средний диаметр образующихся однородных частиц:

$$D_2^{CP} = -[\operatorname{erf}(\theta_4 \cdot W_{2min}) - \operatorname{erf}(\theta_4 \cdot W_{2max})] \exp(\theta_2 \cdot D_2) \cdot \theta_{3^{-1}}, \quad (19)$$

где:

$$\theta_4 = v_k \cdot D_k \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho / E_{02}} / 2, \theta_5 = A_2 \cdot \sqrt{2 \cdot \pi} (D_{2max}^2 - D_{2min}^2). \quad (20)$$

Для неоднородных частиц:

$$D_2^{CP} = \frac{[\operatorname{erf}(\theta_4 \cdot W_{2min}) - \operatorname{erf}(\theta_4 \cdot W_{2max})] \times \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \rho / E_{02}}}{\theta_3} \quad (21)$$

Зависимость между величинами D_2^{CP} и D_2^{CP} аналогична (4). Тогда выражение для дифференциальной функции распределения числа частиц отраженного потока по размерам следует из (12) и (14) с учетом (4), (10) – (21).

Предложенная методика описания структуры дисперсного потока позволит определить основные параметры лопасти криволинейной формы при проектировании центробежно-ударных измельчителей.

Литература

1. Зайцев А. И., Лебедев А. Е., Бадаева Н. В., Романова М. Н. Анализ методов разогрева агломератов «старого» асфальтобетона и описание струйного способа // Инженерный вестник Дона, 2015, №2 ч.2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3052.
 2. Лебедев, А. Е., Зайцев А. И., Петров А.А. Метод оценки коэффициента неоднородности смесей сыпучих сред // Инженерный вестник Дона, 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2556.
 3. Верлока, И.И., Капранова А.Б., Лебедев, А. Е. Современные гравитационные устройства непрерывного действия для смешивания сыпучих компонентов // Инженерный вестник Дона, 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599.
 4. Kapranova, A. B. The optimization problem of the curvilinear blades from in the powder densification set-up./ A.B. Kapranova, A.I. Zaitzev., A.V. Bushmelev., A.E. Lebedev// CHISA 2006 : The 17-th Int. Congr. of Chem. Eng., Chem Equip., Desing and Automation. - Praha, Czech. Repablic, 2006. –P 1080
 5. Rittinger, P. R. Lehrbuch der Aufbereitskunde / P. R. Rittinger - Berlin, 1867. - 595 s.
 6. Пат. 2274492 Российская Федерация, МПК В02 С13/20. Центробежная мельница встречного измельчения/ П. Ф. Корчагин. – Оpubл. 20.04. 2006.
 7. Лозовая, С. Ю. Создание методов расчета и конструкций устройств с деформируемыми рабочими камерами для тонкого и сверхтонкого помола материалов: дис.... докт. техн. наук. - Белгород, 2005, 396 с.
 8. Лупанов, А. П. Совершенствование, научное обоснование и промышленное освоение технологического процесса производства
-



асфальтобетонных смесей с использованием «старого» асфальтобетона: дис. ...докт. техн. наук: 05.17.08. - Ярославль, 2010. - 338 с.

9. Олевский, В. А. Конструкции, расчеты и эксплуатация дробилок - М.: Металлургиздат, 1958. -460 с.

10. Зайчик, Л. И., Алипченков В.М. Статистические модели движения частиц в турбулентной жидкости. – М.: Физматлит, 2007.- 312 с.

References

1. Zaytsev A. I., Lebedev A. E. , Badaeva N. V., Romanova M. N. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №2, p.2 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2p2y2015/3052.
2. Lebedev, A. E, Zaitsev A. I., Petrov A. A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №3 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2014/2556.
3. Verloka, I.I., Kapranova A. B., Lebedev A. E. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2014, №4 URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2014/2599.
4. Kapranova, A. B., Zaitsev A. I., Bushmelev A.V., Lebedev A.E. The optimization problem of the curvilinear blades from in the powder densification set-up. CHISA 2006: The 17-th Int. Congr. of Chem. Eng., Chem Equip., Desing and Automation. Praha, Czech. Repablic, 2006. P. 1080
5. Rittinger, P. R. Lehrbuch der Aufbereitskunde. P. R. Rittinger. Berlin, 1867. 595 p.
6. Pat. 2274492 Rossiyskaia Federatsia, MPK B02 C13/20. Centrobegnaia melnica vstrechnogo izmelchenia [Centrifugal mill of oncoming grinding]. P. F. Korchagin. Opubl. 20.04. 2006.
7. Lozovaia, S. U. Sozdanie metodov rascheta i konstrukciy ustroiystv s deformiryumimi rabochimi kamerami dlia tonkogo i sverhtonkogo pomola materialov [The development of methods of calculation and design of



- devices with deformable working chambers for fine and ultrafine grinding of materials]: dis.... dokt. tehn. nauk. Belgorod, 2005, 396 p.
8. Lupanov, A. P. Sovershenstvovanie, nauchnoe obosnovanie i promishlennoe osvoenie tehnologicheskogo processa proizvodstva asfaltobetonnih smeseiy s ispolzovaniem «starogo» asfaltobetona [Improvement, scientific study and industrial development of the technological process of production of asphalt mixtures using the "old" asphalt concrete]: dis.... dokt. tehn. nauk: 05.17.08. Yaroslavl, 2010. 338 p.
 9. Olevskiy, V. A. Konstrukcii, rascheti i ekspluatacia drobilok [Design, calculations and operation of crushers]. M.: Metallurgizdat, 1958. 460 p.
 10. Zaiychik, L. I., Alipchenkov V. M. Statisticheskie modeli dvigenia chastic v turbulentnoi gidkosti [The statistical model of particle motion in a turbulent fluid]. M.: Fizmatlit, 2007. 312 p.