

УДК 66.011

## ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В УДАРНЫХ МЕЛЬНИЦАХ

<sup>1</sup>Лебедев А.Е., <sup>1</sup>Суид С.Т., <sup>2</sup>Бадоев В.А., <sup>1</sup>Зайцев А.И.

<sup>1</sup>Ярославский государственный технический университет,  
Ярославль, e-mail: lae4444@mail.ru, souid@bk.ru, zaicevai07@mail.ru;

<sup>2</sup>Ярославский государственный медицинский университет,  
Ярославль, e-mail: bbbvvvaa@gmail.com

Предложена новая конструкция мельницы центробежно-ударного типа для переработки неоднородных материалов, частицы которых могут содержать как твердую, так и пластичную фазы, кроме того, частицы твердой составляющей могут иметь полидисперсный состав. Выполнены экспериментальные исследования по движению неоднородных частиц в рабочем объеме аппарата и опыты по разрушению частиц при ударе. Для оценки основных характеристик дисперсности измельченного материала разработана математическая модель измельчения неоднородных материалов, базирующаяся на вероятностном подходе. Составлено выражение для дифференциальной функции распределения числа частиц по размерам, которое может быть использовано при расчете измельчительных аппаратов центробежно-ударного типа, перерабатывающих материалы, частицы которых имеют неоднородную структуру, например старый асфальтобетон.

**Ключевые слова:** мельница, измельчение, движение, износ, неоднородные частицы, impact

## THE STUDY OF THE PROCES, OF IMPACT GRINDING HETEROGENEOUS MATERIALS

<sup>1</sup>Lebedev A.E., <sup>1</sup>Souid S.T., <sup>2</sup>Badoev V.A., <sup>1</sup>Zaytsev A.I.

<sup>1</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl,  
e-mail: lae4444@mail.ru, souid@bk.ru, zaicevai07@mail.ru;

<sup>2</sup>Yaroslavl State Medical University, Yaroslavl, , e-mail: bbbvvvaa@gmail.com

The new design of the mill centrifugal impact type for processing heterogeneous materials, particles of which may contain both solid and plastic phases, in addition, the particles of the solid component can have a polydisperse composition. Experimental research on the motion of heterogeneous particles in the working volume of the apparatus and experiments on the destruction of the particles at impact. To assess the basic characteristics of dispersion of the crushed material, a mathematical model of comminution of heterogeneous materials, based on the probabilistic approach. Expression for the differential distribution function of the number of particles that can be used in the calculation of the grinding of the centrifugal impact type, processing materials, particles which have a heterogeneous structure, such as old asphalt.

**Keywords:** mill, grinding, movement, wear, inhomogeneous particles

Процесс измельчения сыпучих материалов является одной из наиболее востребованных технологических операций во многих отраслях промышленности, в том числе химической [2, 6, 7]. Это связано с растущим спросом на порошкообразные материалы. Однако ввиду чрезвычайной сложности физических процессов при разрушения частиц измельчение является недостаточно исследованным процессом.

В дорожно-строительной отрасли измельчение используется при производстве минерального порошка, при помоле щебня и других материалов, например асфальтового гранулята [3]. Для этих целей наибольшее распространение получили мельницы центробежно-ударного действия. Несмотря на высокую эффективность этого типа мельниц, при измельчении твердых абразивных материалов, особенно в процессе тонкого измельчения наблюдается интенсивный износ рабочих органов мельниц, что при-

водит к снижению степени измельчения, и длительным дорогостоящим ремонтам [1]. В центробежных мельницах ударного типа наиболее интенсивно разрушаются лопасти ускорителей и отбойные плиты. Следует отметить, что разрушаются лишь отдельные зоны рабочих органов, а остальная поверхность остается неизношенной. Такое неэффективное применение дорогостоящих деталей приводит к росту цен на конечный продукт.

Замена изношенных лопастей ускорителя и отбойных плит приводит к разборке всего агрегата, то есть его остановке и продолжительным простоям.

При анализе изношенных отбойных плит и деталей ускорителя мельницы Титан М-125 [4] было установлено, что разрушению подвержена только центральная зона отбойников, при этом остальная поверхность остается нетронутой. Столкновение потоков частиц измельчаемого материала

с изношенной поверхностью отбойников происходит почти по касательной, что существенно снижает вероятность разрушения [8].

В связи с этим одним из методов повышения срока службы деталей мельниц является организация таких условий движения и взаимодействия частиц материалов с поверхностями рабочих органов, при которых нагружена будет вся рабочая поверхность, что приведет к равномерному износу повышенной интенсивности. Это можно обеспечить размещением в карманы для самофутеровки направляющих пластин, которые позволят обеспечить плавное поднятие материала с нижней части лопасти и его равномерное распределение по высоте лопасти на конечном участке, как и в случае выполнения лопастей криволинейной формы [5]. В этом случае можно достичь равномерного распределения количества частиц в образующемся разреженном потоке перед отбойным элементом [2].

На рис. 1 представлена схема мельницы центробежно-ударного типа с направляющими пластинами.

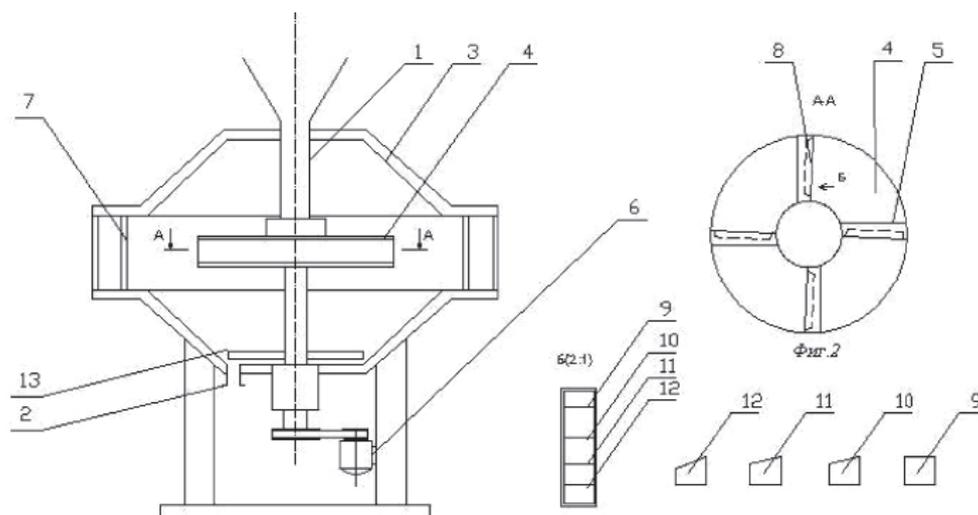


Рис. 1. Схема мельницы с карманами для самофутеровки:  
1 – устройство загрузки; 2 – устройство выгрузки; 3 – корпус; 4 – ротор;  
5 – лопасти; 6 – электродвигатель; 7 – отбойные элементы;  
8 – самофутеровочные карманы; 9–12 – направляющие пластины; 13 – лопасти

При наполнении карманов частицами измельчаемого материала направляющие пластины образуют слой переменной толщины. При захвате частиц в начале лопасти размещены направляющие пластины 12 с углом наклона верхней части (по отношению к поверхности лопасти)  $20^\circ$ . Такая форма позволяет организовать наклонный неподвижный слой по отношению к поверхности лопасти, при движении по которому материал под действием прижимающих сил начинает подниматься по поверхности

лопасти (в поперечном направлении). Угол наклона последующих направляющих пластин 11 и 10 равен  $10^\circ$  и  $5^\circ$  соответственно, а последняя направляющая пластина 9 имеет прямоугольную форму. Такое расположение направляющих пластин позволяет получить слой самофутеровки переменной толщины, при движении по которому движущийся материал постепенно распределяется по всей высоте лопасти равномерным слоем. Образованный дисперсный поток также имеет равномерную концентрацию частиц по высоте. Таким образом, с отбойными элементами взаимодействует равномерный по высоте поток материала.

Для опытного подтверждения возможности получения на выходе с лопасти потока, равномерного по высоте, была создана установка. Структура сформированного ротором потока определялась по характеру разрушения хрупких вставок на отбойном элементе (рис. 2).

Представленная на рис. 2 (слева) поврежденная поверхность хрупкой вставки получена на ускорителе с лопастями без

направляющих пластин. Здесь имеет место резко выраженная зона глубокого интенсивного износа, при этом остальная поверхность остается практически не затронутой (имеются незначительные выбоины и сколы). Наибольшая глубина зоны разрушения – 6 мм. При использовании лопастей с направляющими пластинами получена выбоина почти одинаковой глубины 2–3 мм, что свидетельствует о практически равномерной структуре набегающего на отбойник потока (рис. 2 справа).



Рис. 2. Фотографии изношенных имитаторов

Следующим этапом исследований является математическое описание ударного разрушения неоднородных частиц в данном аппарате. Использование известных методов расчета, относящихся к однородным частицам, приводит к существенным погрешностям ввиду наличия в таких частицах вязкого связующего.

В связи с этим было разработано математическое описание, базирующееся на вероятностном подходе [6], позволяющее определить средний размер измельченных неоднородных частиц. Фазовое пространство определяется совокупностью скорости частицы и ее диаметра. Тогда распределение числа частиц отраженного потока  $dN$  в элементе фазового объема  $d\Gamma = dv dD$  пропорционально энергии частицы  $E$ :

$$dN = A \exp(-E \cdot E_0^{(-1)}) d\Gamma. \quad (1)$$

Здесь  $v$  – скорость;  $D$  – диаметр частицы.

Энергия  $E$  представляет собой совокупность кинетической энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности.

При вычислении поверхностной энергии, в отличие от однородных частиц, учитываются затраты на преодоление сил вязкости и слипания:

$$E_{\text{пов}} = \frac{\zeta}{\pi D^2}, \quad (2)$$

где  $\zeta$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от физико-механических свойств частиц измельчаемого материала. Производя переход от параметров  $v, D$  к безразмерным величинам:

$$W = \frac{v}{v_k}; \quad D = \frac{D}{D_k}, \quad (3)$$

получим

$$E = \frac{\pi D^2 \rho D_k^2 W^2 v_k^2}{2} + \zeta (\pi D^2 D_k^2)^{-1}, \quad (4)$$

где  $v_k$  и  $D_k$  – средние значения скорости и диаметра соответственно;  $\rho$  – плотность.

Тогда дифференциальная функция распределения числа частиц отраженного потока по их диаметрам имеет вид

$$f(D) = - \frac{A \sqrt{2\pi} [ \operatorname{erf}(\theta_1 W_{\min}) - \operatorname{erf}(\theta_1 W_{\max}) ] \exp(\theta_2)}{2ND\theta_3}. \quad (5)$$

Здесь  $W_{\min}$  и  $W_{\max}$  – наибольшее и наименьшее значения величины  $W$ . Величины  $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ , входящие в формулу (5), определяются из выражений

$$\theta_1 = D D_k v_k \sqrt{\frac{2\pi \rho D_k}{E_0}}; \quad (6)$$

$$\theta_2 = - \frac{\zeta}{D^2 D_k^2 \pi E_0}; \quad \theta_3 = \sqrt{\frac{\pi \rho D_k}{E_0}}. \quad (7)$$

Неизвестная константа  $A$  в выражении (1) находится из условия нормировки:

$$N = \int_{\Gamma} dN. \quad (8)$$

Здесь  $N$  – число частиц, находящихся в отраженном потоке.

Для нахождения неизвестного параметра  $E_0$  составим уравнение энергетического баланса для момента удара налетающего потока о наклонную поверхность отбойника:

$$E_{p1} = E_{p2}. \quad (9)$$

Здесь  $E_{p1}$  – энергия потока твердых частиц, налетающих на отбойную поверхность,  $E_{p2}$  – энергия частиц отраженного потока, которая может быть вычислена интегрированием стохастической энергии по всему фазовому объему:

$$E_{p2} = \int_{\Gamma} EdN. \quad (10)$$

С целью проверки адекватности полученных зависимостей опытным данным были проведены опытные исследования на промышленной мельнице Титан М-125 [4] по измельчению асфальтового гранулята. Зависимость среднего диаметра образованных частиц от частоты вращения ускорителя приведена на рис. 3.

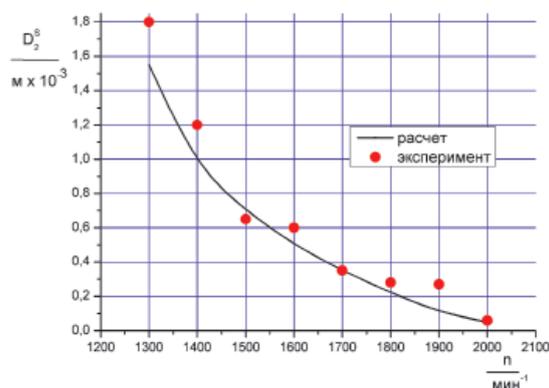


Рис. 3. Зависимости среднего размера частиц при измельчении асфальтового гранулята

Из представленных зависимостей следует, что с увеличением частоты вращения средний размер измельченного продукта уменьшается, что объясняется ростом скоростей столкновения. Незначительное расхождение опытных и расчетных данных во всем диапазоне изменения частоты вращения можно объяснить наличием тонкодисперсной составляющей в подаваемом на помол материале.

Таким образом, использование новой конструкции мельницы при измельчении абразивных неоднородных материалов позволит повысить степень измельчения и замедлить износ рабочих органов.

### Список литературы

1. Ладыгина Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона. – Минск: Наука и техника, 1972. – 288 с.
2. Лебедев А.Е. Математическое описание процесса образования дисперсных потоков // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 10. – С. 3338–3341.
3. Лупанов А.П. Переработка старого асфальтобетона с применением технологии электромагнитного измельчения // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. – 2008. – Т. 51, Вып. 2. – С. 108–110.
4. Мельница Титан М-125. – URL: <http://www.metalweb.ru>. (Дата обращения 14.07.2014).
5. Пат. 2514716 Р МПК В02С7/08 Центробежно-ударная мельница / А.Е. Лебедев и др. – Оpubл. 10.05.2014.
6. Суханов А.С. Математическое описание движения частиц в разреженном потоке центробежного измельчителя ударного действия // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 3. – С. 133–137.
7. Суханов А.С. Механика движения сыпучих сред по криволинейным лопаткам центробежных измельчителей // *Изв. вузов. Химия и химическая технология*. – 2012. – Т. 55, Вып. 2. – С. 108–111.
8. Ходаков Г.С. Физика измельчения. – М.: Наука, 1972. – 307 с.

### References

1. Ladygina B.I. Prochnost i dolgovechnost asfaltobetona. Minsk: Nauka i tehnika, 1972, 288 p.
2. Lebedev A.E. Matematicheskoe opisanie processa obrazovaniya dispersnykh potokov // *Fundamentalnye issledovaniya*, 2013 no. 10 pp. 3338–3341.
3. Lupanov A.P. Pererabotka starogo asfaltobetona s primeneniem tehnologii elektromagnitnogo izmelcheniya // *Izv vuzov Khimiya i khimicheskaya tehnologiya*. 2008. tom 51. vyp. 2. pp. 108–110.
4. Melnica Titan M125. URL: <http://www.metalweb.ru>. (Data obrascheniya 14.07.2014).
5. Pat. 2514716 RF Mpk B02C7/08 Tcentrobezno udarnaya melnica / A.E. Lebedev i dr. Opubl. 10.05.2014.
6. Sukhanov A.S. Matematicheskoe opisanie dvizeniya chastic v razrezennom potoke // *Fundamentalnye issledovaniya*. 2012. no. 3. pp. 133–137.
7. Sukhanov A.S. Mekhanika dvizeniya syuchih sred po krivolineynym lopatkam Tcentrobeznykh izmelchiteley // *Izv vuzov Khimiya i khimicheskaya tehnologiya*. 2012. tom 55. vyp.2. pp. 108–111.
8. Khodakov G.S. Fizika izmelcheniya. M., 1972. 307 s.

### Рецензенты:

Мурашов А.А., д.т.н., доцент, профессор кафедры математики, Ярославское высшее военное училище противовоздушной обороны, г. Ярославль;

Бачурин В.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры высшей и прикладной математики, Ярославский филиал, Московский государственный университет путей сообщения, г. Ярославль.