

УДК 621.926

Нелинейная модель процесса самоизмельчения твердого топлива

В.П. Жуков¹, А.Н. Беляков¹, С.Ф. Смирнов², D. Urbaniak³

¹ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

²ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
г. Иваново, Российская Федерация

³ Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В мельницах самоизмельчения и барабанных грохот-дробилках измельчаемый материал является одновременно и мелющей загрузкой. Интенсивность самоизмельчения во многом определяется содержанием в загрузке крупных частиц, которые играют роль мелющей среды. В связи с этим для построения описания процесса самоизмельчения необходимо использовать нелинейные кинетические модели, которые позволяют учитывать влияние крупности измельчаемого материала на интенсивность измельчения. Разработка таких моделей и является актуальной задачей.

Методы и материалы: Моделирование процесса самоизмельчения выполнено в рамках популяционно-балансовой модели измельчения, численные эксперименты проведены применительно к барабанным грохот-дробилкам для смеси угля и серного колчедана.

Результаты: Предложена нелинейная модель процесса самоизмельчения, в которой функция разрушения представлена в виде произведения вероятности нагружения частиц на вероятность разрушения нагруженных частиц. Выполнена идентификация и проверка адекватности модели.

Выводы: Предложенный подход позволяет рассчитывать кинетику самоизмельчения, а также ставить и решать задачи эффективного управления измельчением и обогащением смеси разнопрочностных компонентов.

Ключевые слова: самоизмельчение, функции разрушения, нелинейные модели, поверхность энергообмена, вероятность нагружения, вероятность разрушения, энергия разрушения.

A non-linear model of solid fuel autogenous grinding

V.P. Zhukov¹, A.N. Belyakov¹, S.F. Smirnov², D. Urbaniak³

¹ Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

² Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

³ Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland
E-mail: zhukov-home@yandex.ru

Abstract

Background: In autogenous mills and drum screen-crushers, the material to be ground also plays the role of a grinding medium. The intensity of autogenous grinding is mainly determined by the content of large particles in the feed that act as a grinding medium. Consequently, non-linear models must be used to describe the process and take into account the influence of the particle size of the material to be ground on the grinding intensity. The objective of the study is to develop one of such models.

Materials and methods: The autogenous grinding simulation is carried out according to the population balance model, the numerical experiments are conducted for a mixture of coal and pyrite as applied to drum screen-crushers.

Results: A non-linear model of autogenous grinding is proposed, in which the function of grinding is represented as a product of particle loading probability and load particle breakage probability. The developed model has been checked for adequacy.

Conclusions: The proposed approach allows calculating the process of autogenous grinding, as well as formulating and solving problems of effective control of the grinding process and the process of enrichment of the mixture containing different strength materials.

Key words: autogenous grinding, functions of grinding, non-linear models, energy exchange surface, loading probability, breakage probability, breakage energy.

Сложность математического описания и расчета процесса измельчения частиц определяется, главным образом, тем, что процесс носит исключительно случайный характер. В мельницах самоизмельчения [1–3] описание процесса усложняется еще и в силу того, что мелющая загрузка одновременно является и измельчаемым материалом. Разрушение ма-

териала происходит в данном случае при взаимодействии крупных кусков с более мелкими частицами материальной загрузки. Крупные куски при этом могут разрушаться сами и измельчать более мелкие куски материала, а мелкие частицы разрушаются только за счет их нагружения крупными кусками. Интенсивность разрушения зависит от содержания

крупных частиц в мелющей загрузке, что обуславливает целесообразность использования нелинейных кинетических моделей для описания процесса самоизмельчения. В рамках популяционно-балансовой модели измельчения [2, 4, 5] указанная нелинейность учитывается зависимостью функций измельчения от гранулометрического состава измельчаемого материала.

Популяционно-балансовая модель при периодическом измельчении в матричном виде записывается следующим образом [2]:

$$\mathbf{F}^{k+1} = \mathbf{P}\mathbf{F}^k, \quad (1)$$

где $\mathbf{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}^T$ – вектор гранулометрического состава материала; $\mathbf{P} = \mathbf{P}(\mathbf{F})$ – матрица измельчения размера $n \times n$, зависящая от гранулометрического состава загрузки; n – число наблюдаемых фракций.

Процесс рассматривается через последовательные малые промежутки времени Δt – времена перехода. Тогда текущие моменты времени будут рассчитываться как $t_k = (k-1)\Delta t$, где целое число $k = 1, 2, \dots$ (номер перехода) становится целочисленным аналогом текущего времени. Предлагаемый подход справедлив также и при непрерывном измельчении, если режим движения материала соответствует идеальному вытеснению. В данном случае параметр k показывает номер ячейки, для которой определяется гранулометрический состав материала.

Матрица измельчения строится с учетом вида распределительной и селективной функций разрушения [2]:

$$\mathbf{P} = [(\mathbf{I} - \mathbf{S}) + \mathbf{SB}],$$

где \mathbf{S} , \mathbf{B} – селективная и распределительная функции (матрицы) измельчения; \mathbf{I} – единичная матрица.

Для учета влияния гранулометрического состава загрузки мельницы на функции разрушения предлагается следующий подход. Считается, что разрушение частицы определяется двумя последовательными событиями: нагружением частицы и разрушением нагруженной частицы. Вероятность нагружения частицы или вероятность подвода к ней энергии учитывается селективной функцией. Распределение осколков разрушения после подвода энергии традиционно описывается распределительной функцией разрушения. Элементы матрицы разрушения $\mathbf{P} = \{p_{ij}\}$ определяются при этом комбинацией указанных функций: вероятности нагружения частицы $\mathbf{S} = \{s_j\}$ и вероятности распределения продуктов разрушения i -й частицы по мелким j -м классам крупности $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}$:

$$p_{ij} = \begin{cases} 1 - s_j + s_j b_{ij}, & i = j, \\ s_j b_{ij}, & i < j, \\ 0, & i > j. \end{cases} \quad (2)$$

Для определения функции разрушения при самоизмельчении материальная загрузка условно разбивается по крупности частиц на два класса: крупный класс ($\delta_0; \delta_{\max}$), частицы которого могут измельчаться сами и разрушать более мелкие частицы; и мелкий класс ($0; \delta_0$), частицы которого могут только измельчаться при взаимодействии с более крупными частицами.

При построении модели считается, что поток энергии от частиц крупного класса подводится к измельчаемым частицам загрузки через некоторую поверхность энергообмена A^k , которая определяется суммой поверхностей энергообмена частиц крупного класса:

$$A^k = V \sum_{i=i_0}^n f_i^k Y_i \alpha_i, \quad (3)$$

где f_i^k – содержание (доля) i -й фракции материала в загрузке мельницы в k -й момент времени; V – объем материальной загрузки; Y_i – удельная поверхность фракции; α_i – доля поверхности частицы, по которой происходит энергообмен; i_0 – номер фракции граничной крупности.

Полагаем, что доля площади энергообмена, через которую фракция получает энергию, пропорциональна массовой доле этой фракции в загрузке мельницы. Тогда число частиц i -й фракции, участвующих в энергообмене (n_i), можно определить из выражения

$$n_i = \frac{A^k \cdot f_i^k}{\alpha_i \cdot a_{0i}},$$

где a_{0i} – поверхность одной частицы материала.

Число же всех частиц i -й фракции в загрузке мельницы будет равно

$$N_i = \frac{V \cdot f_i^k}{v_{0i}},$$

где v_{0i} – объем одной частицы.

Вероятность нагружения частиц фракции определяется как отношение числа нагруженных частиц к общему числу частиц этой фракции в загрузке:

$$s_i^k = \frac{n_i}{N_i} = \frac{v_{0i}}{\alpha_i \cdot a_{0i}} \sum_{i=i_0}^n f_i^k Y_i \alpha_i. \quad (4)$$

Полная энергия, идущая на разрушение, находится суммированием энергий разрушения всех частиц крупных фракций:

$$E^k = V \sum_{i=i_0}^n \frac{e_{2i} f_i^k}{v_{0i}}, \quad (5)$$

где e_{2i} – энергия, подводимая на разрушение от одной частицы i -й фракции.

Энергия, подводимая к измельчаемой частице от частиц крупного класса, определяется произведением поверхностной плотности потока энергии на площадь энергообмена частицы:

$$e_{ij}^k = \frac{E^k}{A^k} \alpha_i a_{oj} \quad (6)$$

Если измельчаемые частицы имеют форму шара диаметром δ_i , для которых $Y_i = \frac{6}{\delta_i}$, $v_{0i} = \frac{\pi \delta_i^3}{6}$, то выражение (6) принимает вид

$$e_{ij}^k = \delta_i^2 \alpha_i \frac{\sum_{i=i_0}^n e_{2i} f_i^k \delta_i^{-3}}{\sum_{i=i_0}^n f_i^k \delta_i^{-1} \alpha_i} \quad (7)$$

Известное значение подводимой к частицам энергии позволяет в рамках энтропийной модели измельчения по известной методике [2] прогнозировать вероятность распределения осколков по крупности, т. е. вид распределительной функции:

$$b_{ji}^k = \frac{\exp(\mu_i \tilde{e}_{ij})}{\sum \exp(\mu_i \tilde{e}_{ij})} \quad (8)$$

$$e_{ij}^k = \sum_j \tilde{e}_{ij} b_{ji}^k \quad (9)$$

где μ_i – коэффициент, значение которого находится из уравнения баланса энергий (9); \tilde{e}_{ij} – энергия, необходимая для разрушения частиц класса j до размера частиц класса i , определяемая в соответствии с энергетическими законами измельчения [1, 6, 7, 8].

Модель нелинейной кинетики измельчения (1)–(9) позволяет определять гранулометрический состав продуктов разрушения в мельницах самоизмельчения в произвольный момент времени. Результаты тестового примера расчетного анализа процесса самоизмельчения представлены на рис. 1. Измельчению подвергался материал, гранулометрический состав которого представлен кривой 1 на рис. 1. Результаты расчета согласно модели (1)–(9) показаны на рис. 1 в виде гранулометрического состава мельничной загрузки в разные моменты времени. Интенсивность разрушения существенным образом зависит от доли крупного класса, содержание которого убывает по мере его измельчения. Убыль частиц крупного класса приводит к снижению интенсивности разрушения, гранулометрический состав материала стабилизируется и практически перестает изменяться после 20 нагружений, что качественно подтверждает предложенный модельный механизм влияния крупности загрузки на интенсивность процесса.

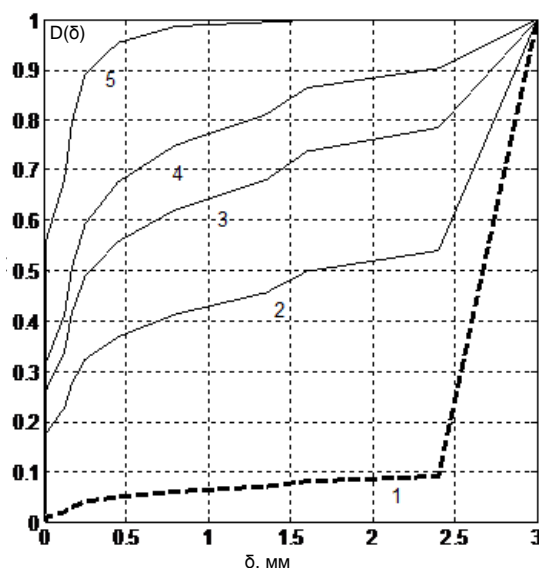


Рис. 1. Кривые распределения продуктов разрушения по крупности при разном времени измельчения: 1 – $k = 0$; 2 – $k = 1$; 3 – $k = 2$; 4 – $k = 3$; 5 – $k = 20$ ($D(\delta)$ – проход материала через контрольное сито размера δ)

Для количественной проверки предложенной модели были проведены специальные экспериментальные испытания дробления угля посредством его многократного сбрасывания на решетку с заданной высоты. Контроль крупности продуктов дробления осуществлялся по остатку на контрольном сите 25 мм. Результаты экспериментальных исследований в виде зависимости остатка на контрольном сите от числа сбрасываний материала показаны на рис. 2 точками. В ходе расчетных исследований согласно модели (1)–(9) по минимальному рассогласованию расчетных и экспериментальных данных было найдено значение параметра идентификации модели – нижняя граница крупного класса загрузки, соответствующая минимальному размеру частицы, которая может сама разрушаться при сбрасывании с заданной высоты. Найденное значение параметра идентификации, при котором достигнуто минимальное рассогласование расчетных и экспериментальных данных, составило для исследованных условий разрушения $\delta_0 = 25$ мм. Результаты проведенных расчетных исследований после идентификации модели показаны на рис. 2 линией. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных показало, что максимальное отклонение расчетных и экспериментальных значений составило 2,1 %, что свидетельствует об удовлетворительном описании моделью реального процесса.

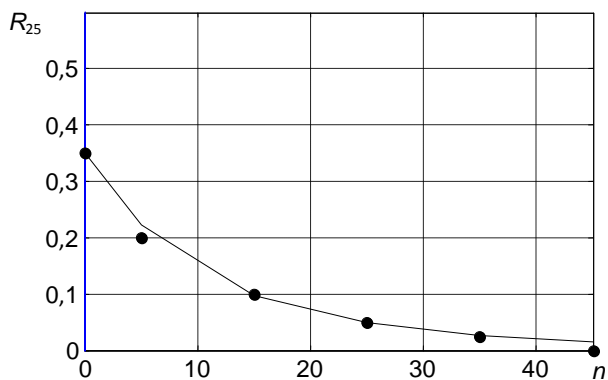


Рис. 2. Экспериментальные (точки) и расчетные (линия) зависимости остатка R на контрольном сите 25 мм в продуктах дробления от числа сбрасываний n ($h = 4$ м)

Полученное описание процесса позволило сформулировать и решить практическую задачу по совместному дроблению и разделению смеси разнопрочностных компонентов в барабанной грохот-дробилке. Рассматривается задача выделения серного колчедана из каменного угля путем их совместного дробления с последующим грохочением. На разрушение частиц серного колчедана требуется больше удельной энергии, по сравнению с энергией, необходимой для разрушения частиц угля. Для избирательного дробления смеси необходимо организовать процесс дробления таким образом, чтобы подведенной энергии было достаточно для дробления угля и недостаточно для дробления колчедана. В качестве технологического оборудования для реализации разделения продуктов наиболее подходит барабанная грохот-дробилка, эскиз которой с указанием массопотоков приведен на рис. 3.

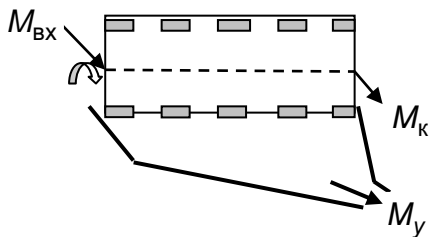


Рис. 3. Эскиз барабанной грохот-дробилки

Исходный материал загружается в перфорированный вращающийся барабан, захватывается лифтерами и поднимается вверх барабана. Разрушение материала происходит при ударе падающего материала на перфорированную стенку барабана. Образовавшаяся при этом мелочь проваливается через перфорацию барабана, а крупные куски подвергаются повторному нагружению.

Высокая скорость дробления угля приводит к его преимущественному переходу в мелкие классы, которые выводятся в подрешетный продукт. Содержание колчедана в материальной загрузке барабана возрастает, а

обогащенный колчеданом продукт покидает барабан через разгрузочное устройство.

Для количественной оценки эффективности разделения используется степень разделения колчедана, значение которой при полном выделении колчедана равно единице, а при отсутствии разделения – нулю:

$$\varepsilon = \frac{M_k}{M_{k0}} - \frac{M_y}{M_{y0}}, \quad (10)$$

где M_k , M_y – массопотоки серного колчедана и угля соответственно на выходе из дробилки; M_{k0} , M_{y0} – аналогичные величины на входе в дробилку. Значения M_k , M_y определялись по предложенной модели кинетики самоизмельчения независимо для обоих компонентов смеси.

Результаты расчетного анализа, приведенные на рис. 4, показывают, что степень разделения колчедана имеет максимальное значение при времени процесса $t \approx 50$ с.

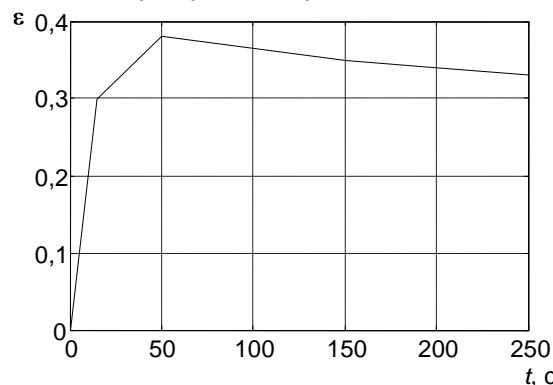


Рис. 4. Зависимость степени разделения серного колчедана от времени процесса

Таким образом, предложенное математическое описание адекватно описывает процесс самоизмельчения и позволяет решать задачи разделения компонентов и оптимального управления процессом в мельницах самоизмельчения.

Список литературы

1. **Справочник** по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова. – М.: Недра, 1982. – 365 с.
2. **Mizonov V., Zhukov V., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
3. **Сиденко П.М.** Измельчение в химической промышленности. – М.: Химия, 1977. – 368 с.
4. **Гарднер Р.П., Аустин Л.Г.** Исследование измельчения в мельницах периодического действия // Труды Европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 219–248.
5. **Жуков В.П., Смирнов С.Ф., Красильников А.Г.** Селективная функция измельчения в измельчителях с распределенной мелющей средой // Вестник ИГЭУ. – 2006. – Вып. 4. – С. 68–69.
6. **Ромадин В.П.** Пылеприготовление. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1953. – 519 с.
7. **Лебедев А.Н.** Подготовка и размол топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 520 с.
8. **Бонд С.Ф.** Зерновой состав материала и затраты энергии на измельчение // Труды Европейского совещания по измельчению. – М.: Стройиздат, 1966. – С. 195–205.

References

1. Bogdanova, O.S. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy* [Reference-book on ore processing. Preparatory processes]. Moscow, Nedra, 1982. 365 p.
2. Mizonov, V., Zhukov, V., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New Approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.
3. Sidenko, P.M. *Izmel'chenie v khimicheskoy promyshlennosti* [Grinding in chemical industry]. Moscow, Khimiya, 1977. 368 p.
4. Gardner, R.P., Austin, L.G. *Issledovanie izmel'cheniya v mel'nitsakh periodicheskogo deystviya* [A study of grinding in batch-type mills]. *Trudy Evropeyskogo soveshchaniya po izmel'cheniyu* [Collected works of the European meeting on grinding]. Moscow, Stroyizdat, 1966, pp. 219–248.
5. Zhukov, V.P., Smirnov, S.F., Krasil'nikov, A.G. *Selektivnaya funktsiya izmel'cheniya v izmel'chitel'yakh s raspredelennoy melyushchey sredoy* [Selective grinding function in distributed grinding media mills]. *Vestnik IGEU*, 2006, issue 4, pp. 68–69.
6. Romadin, V.P. *Pyleprigotovlenie* [Coal pulverization]. Moscow; Leningrad, Gosenergoizdat, 1953. 519 p.
7. Lebedev, A.N. *Podgotovka i razmol topliva na elektrostantsiyakh* [Fuel preparation and grinding at electric power plants]. Moscow, Energiya, 1969. 520 p.
8. Bond, S.F. *Zernovoy sostav materiala i zatraty energii na izmel'chenie* [Material particle size and grinding power input]. *Trudy Evropeyskogo soveshchaniya po izmel'cheniyu* [Collected works of the European meeting on grinding]. Moscow, Stroyizdat, 1966, pp. 195–205.

Жуков Владимир Павлович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Беляков Антон Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, докторант кафедры прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45.

Смирнов Станислав Федорович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный политехнический университет»,
доктор технических наук, профессор,
e-mail: smirnovst55@gmail.com

Urbaniak Darek,
Ченстоховский политехнический институт (Польша),
кандидат технических наук,
e-mail: otwinowski@kkt.pcz.czest.pl