

УДК 621.926.9

Власенко Д. А.,
к.т.н. Левченко Э. П.
(ДонГТУ, г. Алчевск, ЛНР)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МОЛОТКОВ С МАТЕРИАЛОМ В ЗОНЕ КОЛОСНИКОВОЙ РЕШЁТКИ МОЛОТКОВОЙ ДРОБИЛКИ

На основании второго закона Ньютона разработана математическая модель движения молотка и частицы материала в процессе их взаимного контакта с колосниковой решёткой в молотковой дробилке. В результате аналитических исследований определены зависимости угла отклонения ударного органа относительно его радиального положения и величины колосникового зазора при контактном взаимодействии с рабочей поверхностью колосниковой решётки в процессе дробления материалов различного фракционного состава в условиях подготовки агломерационной шихты.

Ключевые слова: молотковая дробилка, молоток, колосниковая решётка, кусок материала, угол отклонения молотка, колосниковый зазор.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Фракционная подготовка материалов широко распространена и используется в различных отраслях промышленности, в частности в металлургии. На металлургических предприятиях процессы дробления и измельчения применяются для подготовки шихтовых материалов, а именно агломерационных флюсов и твёрдого топлива, путём диспергирования исходного сырья до необходимых размеров.

Пока ещё эти процессы являются весьма энергоёмкими и сопряжены со значительным износом рабочих органов дробильных машин [1].

Поэтому изучение и повышение эффективности данных процессов с целью увеличения срока службы рабочих органов и узлов дробилок, а также повышения технико-экономических показателей самого процесса дробления является весьма актуальным и существенно влияет на процесс агломерации шихтовых материалов в металлургии [2].

Постановка задачи. Задачей данного исследования является математическое обоснование основных параметров процесса взаимодействия молотка с материалом при установившемся движении в зоне

колосниковой решётки молотковой дробилки на основании второго закона Ньютона — дифференциального закона механического движения.

Изложение материала и его результаты. Для математического моделирования взаимного контакта молотка, материала и колосниковой решётки в процессе дробления при работе молотковой дробилки необходимо принять следующие допущения:

- отдельный кусок материала представляется в виде шара;
- кусок материала при скольжении по колосниковой решётке не вращается относительно своей оси;
- силами трения в оси подвеса молотка пренебрегаем;
- инерцией частицы пренебрегаем.

В процессе определения основных параметров движения рабочих органов и куска в зоне колосников необходимо исследовать условия контакта молотков с материалом при их движении относительно рабочей поверхности колосниковой решётки, для чего разрабатывается математическая модель на основе второго закона Ньютона (дифференциального закона механического движения) [3]. Расчётная схема данного процесса представлена на рисунке 1.

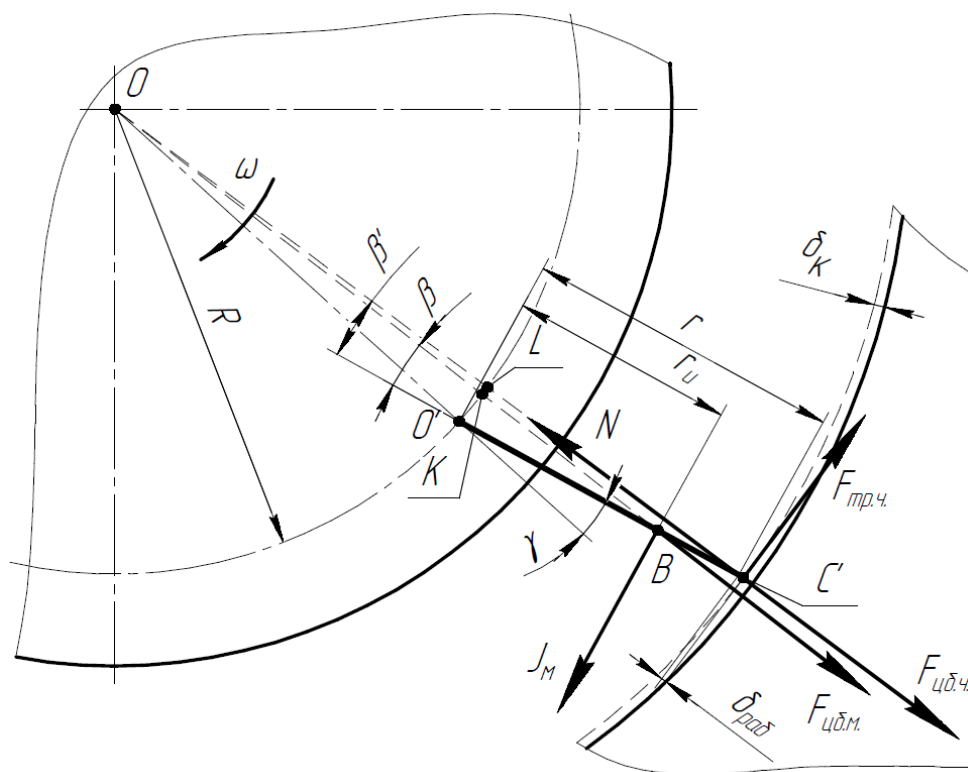


Рисунок 1 Расчётная схема для определения параметров движения молотка и материала при взаимодействии с колосниковой решёткой в молотковой дробилке

Представим массив материала, располагающийся на колосниковой решётке, в виде условно сосредоточенной частицы массой m_c , вступающей в контактное взаимодействие с молотками, а молотки — в виде условного плоского тела массой m_m . В этом случае центр взаимодействия ударных элементов с частицей материала на колосниках при его вращательном движении будет расположен в условной точке C' (рис. 1).

Движение системы молоток-частица характеризуется следующими параметрами: углом отклонения молотка γ , скоростью движения частицы относительно колосниковой решётки v_c и расстоянием между молотком и колосниковой решёткой (колосниковым зазором) δ_k . Для определения угла отклонения ударного органа γ рассмотрим движение в неинерциальной системе отсчёта при скольжении куска по рабочей поверхности колосниковой

решётки под воздействием вращательного движения молотка относительно центра ротора. В ней действуют следующие силы:

– центробежная сила при вращательном движении молотков $\bar{F}_{цб.м.}$, которую с достаточной точностью можно определить по формуле

$$F_{цб.м.} = m_m \omega^2 (R + r_u), \quad (1)$$

где ω — угловая скорость вращения ротора; R — радиус осей подвеса молотков относительно оси ротора; r_u — радиус инерции молотка;

– момент инерции молотков находим по зависимости

$$M_u = m_m r_u^2 \ddot{\gamma}, \quad (2)$$

где $\ddot{\gamma}$ — угловое ускорение молотка;

– центробежная сила куска материала при вращательном движении определяется как

$$F_{цб.ч.} = m'_u \omega^2 (R+r), \quad (3)$$

где m'_u — масса частиц в слое, взаимодействующем с молотком;

– сила нормальной реакции N от действия центробежной силы куска;

– сила трения, возникающая при скольжении частицы по поверхности колосниковой решётки:

$$F_{мп.ч.} = Nf, \quad (4)$$

где f — динамический коэффициент трения скольжения дробимого материала по материалу колосниковой решётки.

Сила нормальной реакции N будет численно равна центробежной силе куска при его вращательном движении $F_{цб.ч.}$.

Учитывая вышесказанное и основываясь на принципе Даламбера [4], рассмотрим молоток как тело, находящееся в равновесии относительно оси его подвеса (точка O' , рис. 1):

$$\sum M_{O'} = 0; \quad (5)$$

$$M_u + F_{цб.м.} O'K - F_{мп.ч.} r \cos \gamma = 0.$$

Тогда угол отклонения молотков γ может быть определён исходя из дифференциального уравнения движения в процессе взаимодействия частицы материала с колосниковой решёткой:

$$m_m r_u^2 \ddot{\gamma} + m_m \omega^2 R'_u r_u \sin \beta = m'_u \omega^2 (R+r) r f. \quad (6)$$

С учётом того, что угол отклонения молотков γ предполагается в достаточной степени малым, можно предположить, что $\sin \gamma \approx \gamma$, $R'_u \approx R + r_u$, а $\beta = \frac{R}{R+r} \gamma$. В этом случае зависимость (6) принимает следующий вид:

$$\ddot{\gamma} + \frac{\omega^2 (R+r_u) R}{r_u (R+r)} \gamma = \frac{\omega^2 (R+r) r f}{k_m r_u^2}, \quad (7)$$

где k_m — отношение (коэффициент) массы куска материала к массе ударного органа [5]:

$$k_m = \frac{m_m}{m_u}. \quad (8)$$

Общее решение уравнения (7) имеет вид

$$\gamma = A \sin \sqrt{qt} + B \cos \sqrt{qt} + \frac{w}{q}, \quad (9)$$

где

$$q = \frac{\omega^2 (R+r_u) R}{r_u (R+r)}, \quad (10)$$

$$w = \frac{\omega^2 (R+r) r f}{k_m r_u^2}. \quad (11)$$

Постоянные уравнения A и B определяются из начальных условий движения системы при $t = 0$:

$$\gamma = 0, \quad \dot{\gamma} = 0. \quad (12)$$

Исходя из начальных условий, формула (8) выглядит таким образом:

$$\gamma = -\frac{w}{q} \cos \sqrt{qt} + \frac{w}{q}. \quad (13)$$

Так как угол отклонения ударного элемента $\cos \gamma$ принимает максимальное значение при $\sqrt{qt} = \pi$, то

$$\gamma = 2 \frac{w}{q}. \quad (14)$$

Подставив значения q и w в формулу (14), получаем

$$\gamma_{max} = \frac{2(R+r)^2 r f}{k_m r_u (R+r_u) R}. \quad (15)$$

На рисунке 2 приведено графическое отображение теоретической зависимости угла отклонения рабочего органа от коэффициента масс молотка и материала (для геометрических и технических параметров реверсивной молотковой дробилки ДМРиЭ 14,5×13 [6]).

Масса материала, вступающего в контактное взаимодействие с молотками в рабочей зоне колосниковой решётки, определяется из условий, что весь ряд молот-

ков на роторе контактирует с тем количеством измельчаемого сырья, которое соударяется с этим рядом на этапе загрузки в рабочую зону питателем, и весь массив материала распределён между всеми рабочими органами равномерно [5]:

$$m_u = \frac{60M_{ч.с.}}{nz}, \quad (16)$$

где $M_{ч.с.}$ — масса материала, загружаемого питателем в рабочее пространство дробилки за одну секунду; n — количество оборотов ротора в минуту; z — количество ударных элементов на роторе.

Для проверки и сопоставления результатов, полученных с использованием аналитической зависимости (14), с помощью инженерного математического программного обеспечения MathCAD получено численное решение линейного неоднородного дифференциального уравнения второго порядка (6) при решении задачи Коши методом Рунге – Кутты с начальными условиями (12) (рис. 3) для коэффициентов масс ударного рабочего органа и измельчаемого материала k_m : для 18,7 — график $\gamma_1(t)$, для 13,1 — $\gamma_2(t)$, для 9,5 — $\gamma_3(t)$.

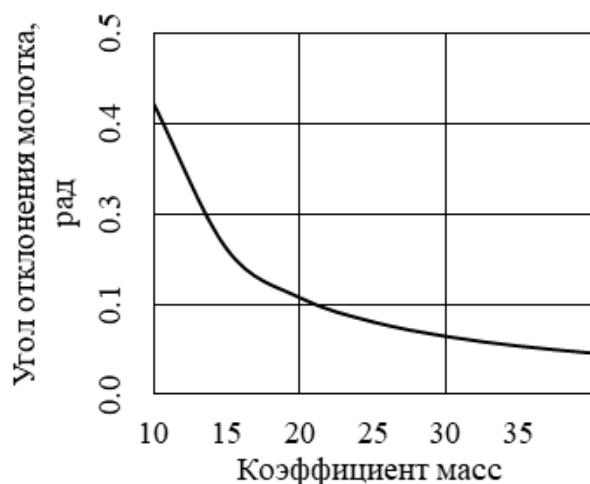


Рисунок 2 График зависимости угла отклонения рабочих органов дробилки в зоне колосниковой решётки от коэффициентов масс материала и молотков

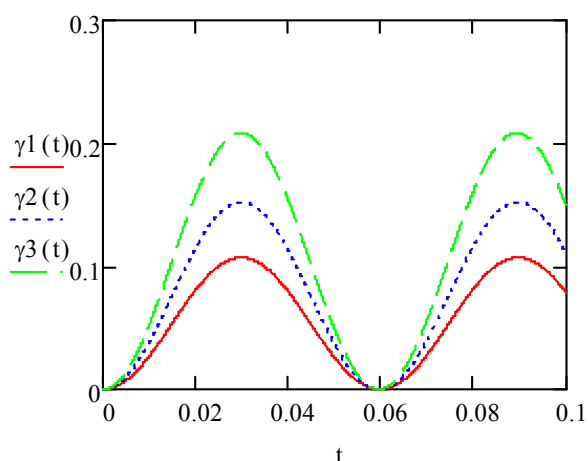


Рисунок 3 График зависимостей амплитуд колебаний молотка от времени при численном решении дифференциального уравнения движения в среде MathCAD

Как видно из сопоставительного анализа графических зависимостей на рисунках 2 и 3, результаты определения угла отклонения молотка по уравнению (15) соответствуют значениям максимальных амплитуд его колебаний (угла отклонения) относительно радиального положения при численном решении дифференциального уравнения движения ударного элемента относительно оси подвеса на роторе в среде MathCAD.

В зависимости от угла отклонения молотка увеличивается расстояние между его внешней гранью и рабочей поверхностью колосниковой решётки (рис. 1), которое находится из треугольников OLO' и $O'LC'$. На рисунке 4 отображена зависимость величины расстояния между внешней гранью молотка и поверхностью колосниковой решётки (колосникового зазора), определяемого по соотношению

$$\delta_k = \delta_{раб} + \frac{r}{\cos \gamma} - \frac{R+r}{\cos\left(\frac{r}{R+r}\gamma\right)}, \quad (17)$$

где $\delta_{раб}$ — предопределённый рабочий зазор между внешней рабочей гранью молотка и рабочей поверхностью колосниковой решётки, обеспечивающий устойчи-

вую работу дробилки без ударных контактов молотков о колосники в процессе дробления материала (на практике обычно принимается в пределах 3–5 мм).

Как видно из графических зависимостей, представленных на рисунках 3 и 4, отношение масс молотка и куска материала при дроблении на этапе истирания о колосниковую решётку в молотковой дробилке существенно влияет на такие параметры контактного взаимодействия ударных рабочих органов и материала в районе колосниковой решётки, как угол отклонения молотка и колосниковый зазор. В свою очередь, от этих показателей существенно зависит эффективность процесса дробления материала при истирании о решётку: чем больше зазор между молотками и колосниками, тем большее количество материала между ними будет проскальзывать и выгружаться из рабочей зоны только за счёт инерции, а не воздействия ударных элементов. При этом трение материала по поверхности молотка способствует повышению степени износа его боковой и внешней граней, что будет сказываться на сроке эксплуатации.

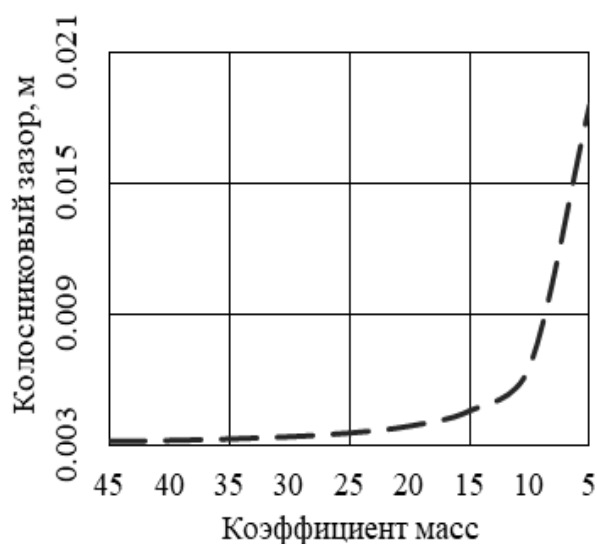


Рисунок 4 График зависимости колосникового зазора δ_k от коэффициента масс k_m

Таким образом, необходимо стремиться минимизировать колосниковый зазор и угол отклонения молотков при контактном взаимодействии с материалом на различных этапах дробления в молотковых дробилках за счёт повышения коэффициента масс ударного органа и сырья, как это может быть реализовано при комбинированном способе установки молотков на оси подвеса ротора [7, 8].

Выводы и направление дальнейших исследований. В ходе исследований были предложены закономерности для определения угла отклонения молотка при взаимодействии с материалом в зоне колосниковой решётки и рабочего зазора между внешней гранью молотка и рабочей поверхностью колосников в зависимости от конструктивных и массовых характеристик молотка и его коэффициента масс и материала.

Выявлено влияние данных параметров на величину рабочего зазора, что, в свою очередь, влияет на эффективность работы самой молотковой дробилки.

Перспективным направлением исследования процесса дробления материалов в ударных дробилках с колосниковыми решётками является математическое описание процесса разрушения материалов под воздействием молотков в зоне колосниковой решётки с использованием полученных в данной работе результатов моделирования динамики рабочих органов и экспериментальное подтверждение выдвинутых предположений, а также изучение влияния коэффициента масс на технологические параметры молотковой дробилки в производственных условиях. В дальнейшем результаты исследования могут использоваться в качестве теоретической базы при разработке и обосновании математической модели, предназначенной для определения основных технико-эксплуатационных характеристик процесса дробления в молотковой дробилке, таких как степень дробления материала и интенсивность изнашивания молотков и колосниковой решётки.

Библиографический список

1. Власенко, Д. А. Математическое моделирование процесса изнашивания молотков при дроблении материала свободным ударом [Текст] / Д. А. Власенко, Э. П. Левченко, Г. А. Билан // Вестник ДонНТУ. — Донецк : ДонНТУ, 2019. — № 1 (15). — С. 9–15.
2. Жильцов, А. П. Исследование и обоснование конструктивно-технологических параметров процесса измельчения агломерационных флюсов в молотковой дробилке [Текст] / А. П. Жильцов, Д. А. Власенко, Э. П. Левченко // Чёрные металлы. — М. : Руда и металлы, 2019. — № 10 (1054). — С. 4–10.
3. Медведев, Б. В. Начала теоретической физики. Механика, теория поля, элементы квантовой механики [Текст] / Б. В. Медведев. — М. : Физматлит, 2007. — 38 с.
4. Курс теоретической механики [Текст]. Т. 1 / под ред. К. С. Колесникова. — М. : изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 735 с.
5. Власенко, Д. А. Обоснование конструктивно-технологических параметров процесса дробления материалов в молотковых дробилках [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.02.13 / Власенко Дмитрий Алексеевич. — Алчевск : ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2019. — 23 с.
6. ГОСТ 12376–71 Дробилки однороторные среднего и мелкого дробления. Технические условия [Текст]. — Введ. 01–01–1973. — Измен. 01–01–1990. — М. : Изд-во стандартов, 1990. — 22 с.
7. Пат. 179695 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/16 (2006.01). Ротор молотковой дробилки / Д. А. Власенко, А. В. Карпов; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018106733; заявл. 22.02.18 ; опубл. 22.05.18, Бюл. № 15. — 3 с. : ил.
8. Пат. 189059 Российская Федерация, МПК В 02 С 13/16 (2006.01). Ротор молотковой дробилки / Д. А. Власенко, А. П. Жильцов, Э. П. Левченко ; заявитель и патентообладатель Липецкий гос. техн. ун-т. — № 2018143765 ; заявл. 10.12.18 ; опубл. 07.05.19, Бюл. № 13. — 3 с. : ил.

© Власенко Д. А.

© Левченко Э. П.

Рекомендована к печати к.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Ульяницким В. Н.,
к.т.н., доц., зав. каф. МППЖ ЛНАУ Фесенко А. В.

Статья поступила в редакцию 25.11.19.

Власенко Д. О., к.т.н. Левченко Е. П. (ДонДТУ, м. Алчевськ, ЛНР)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ МОЛОТКА З МАТЕРІАЛОМ І КОЛОСНИКОВОЮ РЕШІТКОЮ МОЛОТКОВОЇ ДРОБАРКИ

На підставі другого закону Ньютона розроблено математичну модель руху молотка і частки матеріалу в процесі їх взаємного контакту з колосниковою решіткою молоткової дробарки. У результаті аналітичних досліджень визначено залежності кута відхилення ударного органу щодо його радіального положення і величини колосникового зазору при контактній взаємодії з робочою поверхнею колосникової решітки в процесі дроблення матеріалів різного фракційного складу в умовах підготовки агломераційної шихти.

Ключові слова: молоткова дробарка, молоток, колосникова решітка, шматок матеріалу, кут відхилення молотка, колосниковий зазор.

Vlasenko D. A., PhD in Engineering Levchenko E. P. (DonSTU, Alchevsk, LPR)

MATHEMATICAL MODELING OF INTERACTION OF HAMMERS WITH MATERIAL IN THE AREA OF FIRE GRATE OF HAMMER CRUSHER

On the basis of Newton's second law, a mathematical model of the motion of hammer and a material particle in the process of their mutual contact with the fire grate in a hammer crusher is developed. As a result of analytical studies the dependence of deflection angle of the impact body relating to its radial position and size of the grate gap in contact with the operating surface of the fire grate in the process of grinding materials of different fractional composition under the conditions of sintering mix preparation.

Key words: hammer crusher, hammer, fire grate, piece of material, angle of deflection of the hammer, grate gap.