

УДК 664.73.05

к.т.н. Бревнов А. А.,
Бревнова О. В.,
к.т.н. Левченко Э. П.

(ДонГТИ, г. Алчевск, ЛНР, abrevnov@list.ru)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПОДАЧИ МАТЕРИАЛА В РАЗГОННО-УДАРНУЮ ДРОБИЛКУ

Работа посвящена анализу условий подачи исходного сырья в рабочее пространство дробильно-измельчительной машины разгонно-ударного типа, предназначенной для ударного разрушения материалов, под действием кинетической энергии вращающегося ротора. Предложена методика, позволяющая выполнить сравнительную оценку движения частицы по поверхности распределительного устройства, имеющего форму конуса и профиль в виде брахистохроны.

Ключевые слова: разгонно-ударная дробилка, сравнительный анализ, брахистохрона, вектор скорости частицы.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. В металлургической отрасли необходимость в дроблении и измельчении различных материалов, в том числе рудных компонентов с достаточно высоким содержанием железа, а также иных шихтовых материалов, является актуальной проблемой, которой уделяется всестороннее внимание. На основе реализации ударного воздействия в настоящее время наиболее распространенными являются машины, использующие как кинетическую энергию ударника, так и запасенную при разгоне самим материалом, подлежащим диспергированию [1].

В настоящее время все большее внимание уделяется центробежно-ударным машинам разгонного типа, в которых сырье после подачи в ротор выбрасывается из него центробежной силой на отбойные элементы и там разрушается. Преимуществом такого метода является непосредственное подведение энергии к материалу, что выгодно отличается от передачи энергии материалу посредством свободно подвешенных рабочих элементов в молотковой дробилке. Это обусловлено тем, что сокращение кинематических пар и возникающих при этом сил трения и восстановления молотков в радиальное положение повышает общий коэффициент полезного

действия дробильно-измельчительной машины в целом.

В связи с тем, что эффективность разрушения материалов в данных машинах напрямую зависит от скорости их вылета из ротора, главным направлением исследований остается выявление условий увеличения скорости, аналитически определяемой решением дифференциального уравнения вылета частицы из ротора. При этом начальным условием выступают параметры подачи сырья в дробилку.

Объектом исследования является технологический процесс обеспечения подачи исходного материала в дробильно-измельчительную машину разгонно-ударного типа.

Предмет исследования — закономерности влияния параметров геометрии профиля распределительного устройства для подачи материала под действие центробежных сил вращающегося ротора.

Задачи исследования — определение параметров геометрии профиля распределительного устройства для подачи сырья под действие центробежных сил вращающегося ротора, при которых достигаются более эффективные условия взаимодействия материала с разгонными лопастями ротора.

Методика исследований. Расчетные аналитические методы изучения движения

материальной точки по профилю, имеющему форму конуса и брахистохроны, на основе основного уравнения динамики и численное решение дифференциальных уравнений движения материальной точки.

Изложение материала и его результаты. Типовая кинематическая схема центробежно-ударной дробильно-измельчительной машины, реализующей выброс материала из ротора, приведена на рисунке 1.

Известные ранее исследования условий работы подобных устройств [2] выявили, что разные вариации возможности движения исходного сырья могут приводить к понижению скорости его выброса из ротора, тем самым не обеспечивая способность его эффективного разрушения. Таким образом, для повышения эффективности функционирования разгонно-ударной дробильно-измельчительной машины требуется обеспечить ей необходимую предударную скорость. Однако с возрастанием угловой частоты вращения ротора по квадратичной зависимости увеличиваются и затраты энергии, что крайне нежелательно.

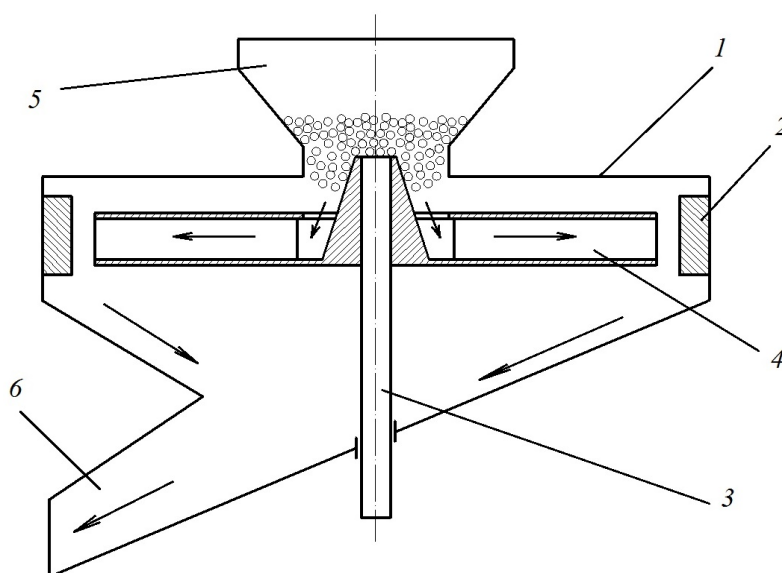
В. А. Елисеев [2] считал, что в первую очередь необходимо уточнить возмож-

ность повышения скорости вылета частицы материала с разгонной лопасти без увеличения числа его оборотов вращения центробежно-ударной дробилки, что может явиться основой экономии электроэнергии, расходуемой приводом машины.

Данную возможность на первоначальном этапе реально обеспечить путем улучшения условий захвата частицы лопастным ротором при всех иных неизменных параметрах геометрии и кинематики.

Увеличение скорости движения частицы, а также более корректное направление ее движения возможны за счет изменения формы входного конуса (рис. 2, а) к профилю, имеющему форму брахистохроны (рис. 2, б).

Известная типовая задача о брахистохроне (рис. 3) и методика ее первого решения принадлежат Иоганну Бернулли [3, 4]. Условием выступает то, что из некоторой точки *A* перемещается тело *M* (в виде материальной точки) при отсутствии начальной скорости. Необходимо определить траекторию его движения, обеспечивающую самую высокую скорость прибытия в точку *B* под влиянием силы тяжести.



1 — корпус, 2 — отбойная поверхность, 3 — вал, 4 — лопасти, 5 — загрузочный патрубок, 6 — выгрузочное приспособление

Рисунок 1 Центробежно-ударная дробилка

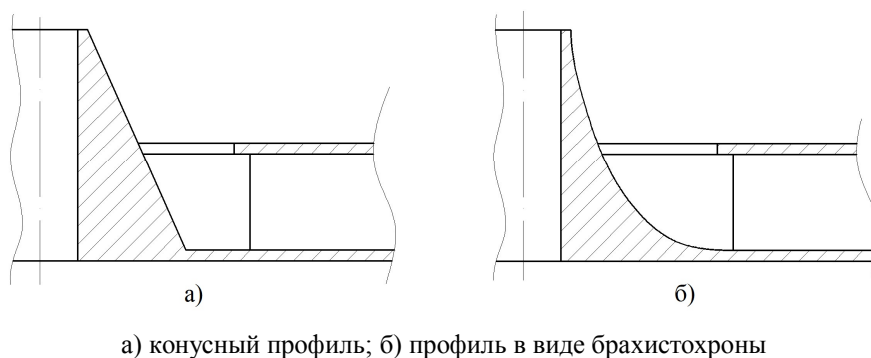


Рисунок 2 Форма профиля входной области

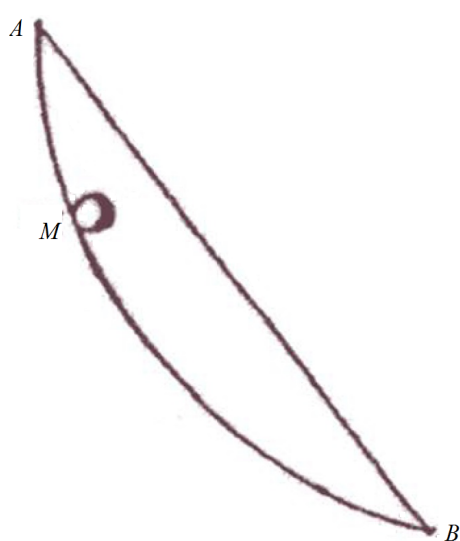
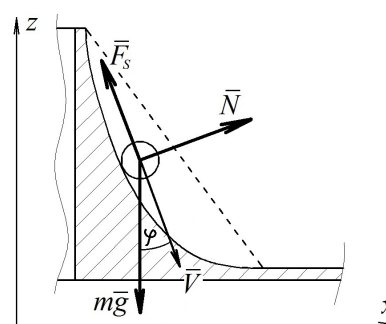


Рисунок 3 Оригинальный рисунок к постановке задачи о брахистохроне в журнале Acta Eruditorum 1696 г.

Рассмотрим скольжение материальной точки, имеющей постоянную массу и движущейся по криволинейной поверхности под действием поля силы тяжести. На данную точку оказывает воздействие сила сухого трения F_S и составляющая реакции опоры N в направлении, перпендикулярном вектору скорости V (рис. 4).

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cdot \sin \varphi, \\ \dot{z} = -V \cdot \cos \varphi, \\ \dot{V} = g \cdot \cos \varphi - k \cdot V \cdot u, \\ \dot{\varphi} = \frac{\sin \varphi}{V} \cdot \frac{g \cdot [1 + k^2 + k \cdot (\psi - k) \cos 2\varphi + k \cdot (1 + k \cdot \psi) \sin 2\varphi]}{[1 - k^2 + 2k \cdot \psi + k \cdot (k - \psi) \cos 2\varphi + k \cdot (1 + k \cdot \psi) \sin 2\varphi]}, \end{cases} \quad (2)$$

Рисунок 4 Схема сил, действующих на материальную точку массой m

Уравнения движения рассматриваемой материальной точки имеют вид

$$\begin{cases} m\ddot{x} = N \cdot \cos \varphi - F_S \cdot \sin \varphi, \\ m\ddot{z} = N \cdot \sin \varphi + F_S \cdot \cos \varphi - mg, \end{cases} \quad (1)$$

где φ — угол между вектором скорости и направлением силы тяжести.

Величина силы сухого трения определяется с помощью закона Кулона [5] $F_S = k \cdot |N|$, где k — постоянный коэффициент трения.

После необходимых преобразований система уравнений движения (1) будет выглядеть следующим образом [4]

где u — оптимальное управление, определяемое [4]

$$u = \frac{\frac{2g \cdot \sin \varphi}{V} (1 + k \cdot \psi)}{1 - k(-3\psi + 2\psi \cdot \cos^2 \varphi - 2 \sin \varphi \cdot \cos \varphi) - 2k^2 \cdot \sin \varphi (\sin \varphi - \psi \cdot \cos \varphi)}, \quad (3)$$

где ψ — параметр, определяемый выражением [4]

$$\psi = \frac{k \cdot \sin \varphi - \cos \varphi}{\sin \varphi + k \cdot \cos \varphi}. \quad (4)$$

Система дифференциальных уравнений (2) решается как задача Коши с начальными условиями

$$x(0) = 0; \quad z(0) = 0; \quad V(0) = 0; \quad \dots \quad \varphi(0) = 0. \quad (5)$$

Для расчетов примем коэффициент трения $k = 0,1$.

Для численного решения системы дифференциальных уравнений движения материальной точки использовался метод Рунге — Кутты 4-го порядка.

Полученная в результате вычислений траектория движения материальной точки представлена на рисунке 5. Изменение скорости точки с течением времени представлено на рисунке 6.

На графике изменения скорости (рис. 6) экстремум наблюдается при $t = 0,268$ с. Расчеты показывают, что для этого момента времени скорость частицы составляет $V = 1,419$ м/с, угол наклона вектора скорости $\varphi = 75,23^\circ$, а координаты материальной точки $Z_{\max} = -0,148$ м, $x_{\max} = 0,185$ м.

Теперь сравним полученные результаты с движением той же материальной точки по прямой наклонной поверхности, что показано на рисунке 7.

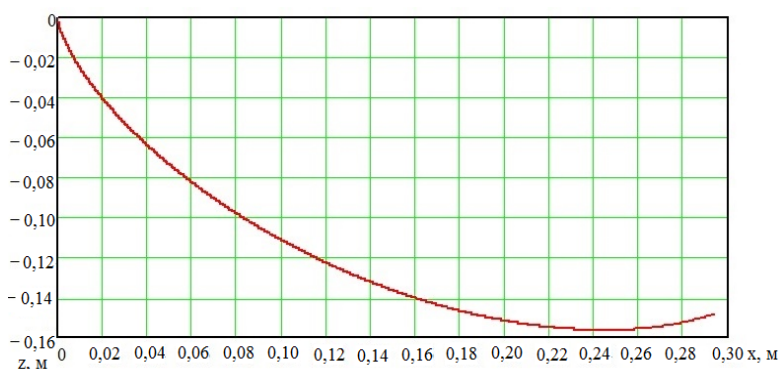


Рисунок 5 Траектория движения материальной точки при $k = 0,1$

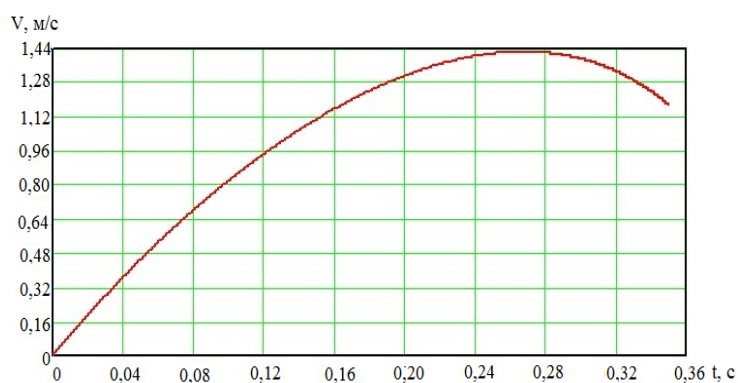


Рисунок 6 Изменение скорости материальной точки при $k = 0,1$

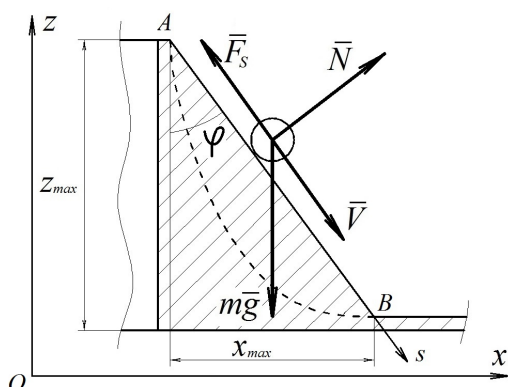


Рисунок 7 Движение частицы по прямой наклонной поверхности

Составим дифференциальное уравнение движения материальной точки по прямой наклонной поверхности с постоянным углом наклона $\varphi = \arctg \frac{x_{\max}}{z_{\max}}$ под действием

силы тяжести mg , силы сухого трения F_S и реакции опоры N в проекции на ось As , совпадающую с направлением движения по наклонной прямой.

$$m\ddot{s} = mg \cdot \cos \varphi - F_S \cdot \sin \varphi. \quad (6)$$

В результате двойного интегрирования уравнения (6) при начальном положении частицы в точке A и начальной скорости частицы $V_A = 0$ скорость материальной точки определяется выражением

$$V = g \cdot (\cos \varphi - k \cdot \sin \varphi) \cdot t, \quad (7)$$

а закон ее движения

$$s = g \cdot (\cos \varphi - k \cdot \sin \varphi) \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (8)$$

Библиографический список

1. Диспергирование материалов в разгонно-ударных дробильно-измельчительных машинах [Текст] : монография / [Э. П. Левченко, О. А. Левченко, А. М. Зинченко и др.]. — Алчевск : ДонГТУ, 2016. — 235 с.
2. Елисейев, В. А. Исследование процесса измельчения зерна ударом : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.20.01 «Технология и средства механизации сельского хозяйства» / Елисейев Владимир Алексеевич ; Моск. технол. ин-т пищ. пром-ти. — М., 1962. — 11 с.
3. Зароднюк, А. В. Оптимизация управляемого спуска и обобщенные задачи о брахистохроне : дисс. ... канд. физ.-мат. наук / А. В. Зароднюк. — М. : Механико-математический факультет МГУ, 2018. — 124 с.

Отсюда следует, что время, за которое частица достигнет точки B , составит $t_{\max} = 0,297$ с. При достижении частицей точки B ее скорость составит $1,594$ м/с. Угол наклона поверхности $\varphi = 51,35^\circ$.

Для определения эффективности предложенного профиля сравним проекции скоростей частицы в точке B на ось Ox .

При профиле в виде брахистохроны $V_x^B = 1,372$ м/с, при конусном профиле $V_x^B = 1,245$ м/с. Разница составляет $9,26\%$.

Выводы и направление дальнейших исследований. Таким образом, в результате проведенных расчетов и сравнения двух профилей входного участка центробежно-ударной дробилки, выявлено, что применение профиля в виде брахистохроны увеличивает скорость движения частиц разрушаемого материала на $9,26\%$, что должно повысить эффективность дробления. Кроме того, в результате применения профиля в виде брахистохроны вектор скорости частицы на подходе в область вращающихся лопастей на $31,74\%$ становится ближе к естественной траектории движения частицы в радиальном направлении.

В качестве направления развития дальнейших исследований предполагается изучение действия других сил, которые могут оказывать влияние на поведение измельчаемого материала при работе разгонно-ударной машины, что позволит достичь более высоких показателей ее работы при измельчении материалов.

4. Вондрухов, А. С. Брахистохрона при действии разгоняющей силы, а также сухого и вязкого трения : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. — М. : Механико-математический факультет МГУ, 2016. — 58 с.

5. Никитин, Н. Н. Курс теоретической механики [Текст] : учебник для студ. машиностроит. и приборостроит. спец. вузов / Н. Н. Никитин. — [5-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Высшая школа, 1990. — 608 с. : ил. + прил.

© Бревнов А. А.
© Бревнова О. В.
© Левченко Э. П.

*Рекомендована к печати д.т.н., проф., зав. каф. АТ ЛГУ им. В. Даля Замотой Т. Н.,
к.т.н., доц., зав. каф. ММК ДонГТИ Вишневым Д. А.*

Статья поступила в редакцию 15.10.2020.

PhD in Engineering Brevnov A. A., Brevnova O. V., PhD in Engineering Levchenko E. P.
(DonSTI, Alchevsk, LPR, abrewnov@list.ru)

COMPARATIVE ANALYSIS OF MATERIAL SUPPLY CONDITIONS TO ACCELERATION-IMPACT CRUSHER

The article is devoted to analyzing the conditions of raw material supply into working space of crushing-grinding machine of acceleration-impact type, intended for impact material destruction, under kinetic energy of rotating rotor. The proposed method allows to perform comparative assessment of particle movement over the surface of distributing cone-shape device with a section of brachistochrone form.

Key words: *acceleration-impact crusher, comparative analysis, brachistochrone, particle rate vector.*