

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМА КАЧАНИЯ ЩЕК ДВУХКАМЕРНОЙ ЩЕКОВОЙ ДРОБИЛКИ

Никитин А.Г.¹, Баженов И.А.², Лубин В.А.¹

¹Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк;

²Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург

Ключевые слова: дробление, двухкамерная щековая дробилка, механизм качания щек, кинематический анализ, размер дробимого куска, степень дробления.

Аннотация. В статье приведен анализ работы различных видов дробильных машин, предназначенных для разрушения минерального сырья. На промышленных предприятиях для измельчения хрупких материалов применяются различные типы дробилок: одни реализуют разрушение за счёт сжатия (щековые, валковые, конусные), другие – посредством ударного воздействия (молотковые, зубчатые). Соответственно, показатели дробимости и их количественная оценка изучаются с учётом этих двух механизмов разрушения. Одним из основных показателей работы дробилок является их производительность, напрямую зависящая от степени дробления, определяемой как отношение размера исходного куска к величине готового продукта. Анализ показал, что наибольшей производительностью обладают двухкамерные щековые дробилки за счет того, что в процессе их работы отсутствует холостой ход. Особенностью разработанной в Сибирском государственном индустриальном университете является подвижная средняя щека, выполненная в виде двуплечего рычага. Выведена взаимосвязь степени дробления с геометрическими и кинематическими параметрами дробилки. Установлено, что предлагаемая конструктивная схема снижает расход энергии. Представленные в работе результаты могут быть полезны для инженеров и специалистов, работающих в машиностроении, а также в смежных отраслях промышленности, включая горную, металлургическую, химическую и строительную.

KINEMATIC ANALYSIS OF THE SWINGING JAW MECHANISM OF A TWO-CHAMBER JAW CRUSHER

Nikitin A.G.¹, Bazhenov I.A.², Lubin V.A.¹

¹Siberian State Industrial University, Novokuznetsk;

²Urals Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg

Keywords: crushing, dual jaw crusher, jaw rocker, kinematic analysis, size of piece to be crushed, degree of crushing.

Abstract. The article presents an analysis of the operation of various types of crushing machines designed to destroy mineral raw materials. At industrial enterprises, various types of crushers are used to grind brittle materials: some realize destruction due to compression (jaw, roll, cone), others – by impact (hammer, gear). Accordingly, crushability indicators and their quantification are studied taking into account these two mechanisms of destruction. One of the main indicators of the operation of crushers is their performance, directly dependent on the degree of crushing, defined as the ratio of the size of the initial piece to the size of the finished product. The analysis showed that two-chamber jaw crushers have the highest productivity due to the fact that there is no idle stroke during their operation. A feature developed at the Siberian State Industrial University is a movable middle cheek made in the form of a double-armed lever. The relationship of the degree of crushing with the geometric and kinematic parameters of the crusher is derived. It has been found that the proposed design reduces energy consumption. The results presented in this paper can be useful for engineers and specialists working in mechanical engineering, as well as in related industries, including mining, metallurgy, chemical and construction.

Введение

Мировая потребность в различных видах раздробленного материала растет на 3-8% в год [1]. Важным показателем, по которому оценивается процесс дробления, является его производительность [2].

На промышленных предприятиях для измельчения хрупких материалов применяются различные типы дробилок: одни реализуют разрушение за счёт сжатия (щековые, валковые, конусные), другие – посредством ударного воздействия (молотковые, зубчатые).

Соответственно, показатели дробимости и их количественная оценка изучаются с учётом этих двух механизмов разрушения [3].

Состояние вопроса

Дробильные машины, работающие на принципе сжатия материала, получили широкое распространение в промышленной практике и подразделяются на несколько основных типов: щековые, в которых разрушение обеспечивается встречным перемещением рабочих плит [4]; валковые, где материал затягивается в зазор между вращающимися навстречу друг другу валками [5]; а также конусные, в которых измельчение осуществляется за счёт сжатия материала между конусами, расположенными эксцентрично один внутри другого [6]. Эти дробилки, работающие на сжатие разрушаемого материала, имеют примерно одинаковую производительность, однако разрушение сжатием самый энергоёмкий из известных способов дробления [7].

Ударные дробилки роторного и молоткового типа предназначены для разрушения хрупких материалов посредством ударного воздействия бил, закреплённых на роторе, вращающемся вокруг горизонтальной оси [8].

Процессы разрушения хрупких материалов при ударном воздействии и при сжатии существенно различаются по энергетическим затратам: при сжатии расход энергии примерно в 1,5 раза выше, чем при ударном дроблении. В то же время эти дробилки имеют недостаток, заключающийся в том, что только 25-30% получаемого продукта соответствует требуемому фракционному составу.

Известны конструкции одновалковых дробильных машин, в которых перерабатываемый материал подаётся в зазор между вращающимся валком и неподвижной плитой. В процессе дробления внутри куска формируется сложное напряжённое состояние, возникающее вследствие совместного действия сжимающих нагрузок и касательных напряжений, обусловленных крутящим моментом. При расчётах подобного состояния применяется эквивалентное напряжение, значение которого ниже предела прочности при чистом сжатии [9]. Вместе с тем такие дробилки отличаются относительно невысокой производительностью.

Повышение эффективности щековых дробилок во многом связано с совершенствованием кинематических схем рабочих органов. Несмотря на значительное число исследований, посвящённых конструктивным вариантам щековых дробилок, вопросы кинематического анализа двухкамерных механизмов и определения степени дробления остаются недостаточно изученными и требуют дальнейшей проработки.

Объект исследования

Специалистами Сибирского государственного индустриального университета создана конструкция двухкамерной щековой дробилки, позволяющая осуществлять непрерывное дробление исходного материала [10]. Отличительной особенностью данной схемы является то, что разрушение материала осуществляется при каждом цикле качания подвижной щеки.

Цель работы заключается в проведении кинематического анализа механизма качания щек двухкамерной дробилки и в установлении зависимости степени дробления от геометрических и кинематических параметров.

Схема двухкамерной щековой дробилки представлена на рисунке 1.

Дробилка включает в себя корпус 1, на котором установлен кривошип 2, приводимый в движение червячным мотор-редуктором (на схеме не показан). Кривошип шарнирно соединён с шатуном 3, который, в свою очередь, соединён с подвижной щекой 4. Последняя выполнена в виде двуплечего рычага, опирающегося нижней частью на промежуточный шарнир 5, закреплённый на корпусе, что обеспечивает возможность поворота рычага относительно данного шарнира. Нижнее плечо рычага посредством промежуточных шатунов 6 соединено с боковыми подвижными щеками 7 и 8, верхние части которых шарнирно закреплены на корпусе.

Корпус оборудован загрузочным окном 9 в верхней части и разгрузочным окном 10 в нижней.

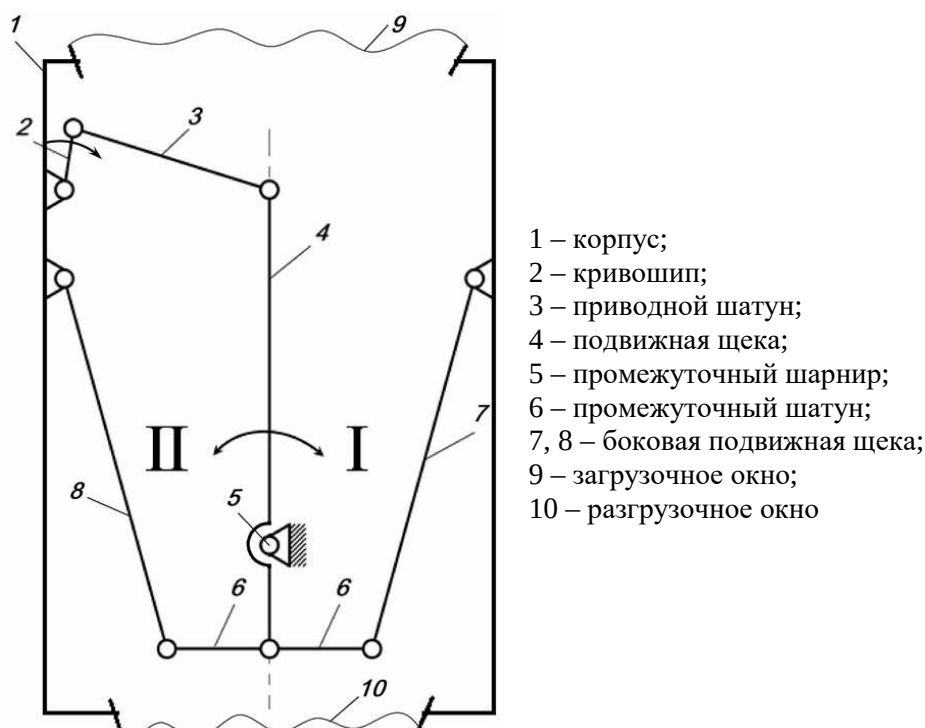


Рис. 1. Схема двухкамерной щековой дробилки:

Принцип действия двухкамерной щековой дробилки представлен следующим образом. Исходный материал поступает через загрузочное окно 9 в одну из камер дробления (например, камеру I) и попадает в зону разрушения. При вращении кривошипа 2 его движение передаётся через шатун 3 на рычаг 4. Верхнее плечо рычага совершает качательное движение в сторону боковой щеки 7, обеспечивая дробление материала. Одновременно нижнее плечо рычага перемещается в противоположном направлении и через шатун 6 воздействует на щеку 7, дополнительно сжимая и разрушая материал в нижней части камеры. При этом горизонтальный зазор на уровне опорного шарнира 5 уменьшается.

В процессе движения верхнего плеча рычага в сторону щеки 7 камера II одновременно раскрывается, что позволяет осуществлять подачу следующей порции материала.

В процессе обратного хода шатуна 3 нижнее плечо рычага посредством шатуна 6 смещает щеку 7 от шарнира 5, вследствие чего горизонтальный зазор возрастает и происходит удаление дроблёного материала через окно 10. При этом верхнее плечо рычага совершает качание в сторону боковой щеки 8 и обеспечивает дробление в другой камере. Далее цикл повторяется.

Таким образом, при каждом качательном движении рычага осуществляется процесс дробления без холостого хода, что способствует повышению производительности щековой дробилки.

Методика исследований

С точки зрения кинематического анализа исходными данными при проектировании щековых дробилок являются максимальный размер исходного куска, подлежащего разрушению, и размер готового продукта.

Одним из показателей, напрямую влияющих на производительность щековой дробилки, является степень дробления [3], определяемая как отношение размера исходного куска к величине готового продукта.

Размер готового продукта задается техническим заданием на проектирование дробилки, а размер исходного куска S определяется из кинематической схемы дробилки (рис. 2):

$$S = \frac{r}{2} + \delta_{III} + \delta_{r1} + \delta_{r2}, \quad (1)$$

где r – радиус кривошипа; $\delta_{ГП}$ – размер готового продукта; $\delta_{Г1}$ – горизонтальное отклонение боковой щеки в исходном положении по линии, проходящей через опорный шарнир; $\delta_{Г2}$ – горизонтальное отклонение боковой щеки от исходного положения по линии, проходящей через опорный шарнира, до крайнего положения.

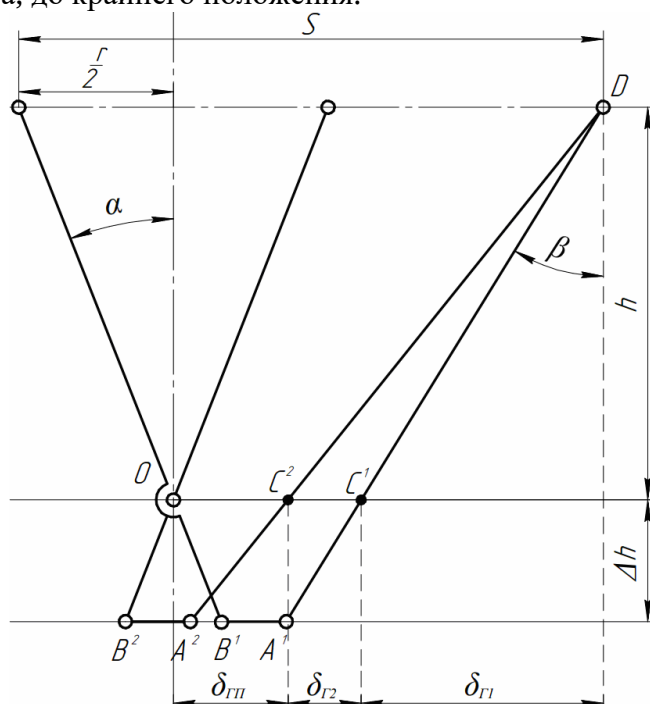


Рис. 2. Расчетная схема двухкамерной щековой дробилки

Расчет ведется из условия, что заданы следующие величины: Δh – длина нижнего плеча средней щеки; r – радиус кривошипа; $\delta_{ГП}$ – размер готового продукта; $\varphi = \alpha + \beta$ – полный угол захвата, где α – угол захвата средней щеки; β – угол захвата боковой щеки.

Из условия работоспособности щековой дробилки [4] максимальное значение $\varphi = 21^\circ$.

Тогда, так как $\alpha = \arctg \frac{r}{2 \cdot h}$, а $\beta = \varphi - \alpha$, то $\delta_{Г1} = h \cdot \tg \beta$.

Отсюда следует, что

$$S = \frac{r}{2} + \delta_{ГП} + h \cdot \tg \beta + \delta_{Г2}. \quad (2)$$

В процессе работы дробилки при переходе кривошипа из крайнего левого в крайнее правое положение правая боковая щека 7 поворачивается относительно шарнира D из точки A^1 в точку A^2 .

В это время промежуточный шарнир 6 A^1B^1 переместится и займет положение A^2B^2 , при этом уменьшится зазор между нейтральным положением оси и крайним положением щеки до размера $\delta_{ГП}$.

Так как длина промежуточного шатуна есть величина постоянная, то перемещение нижней точки боковой щеки A^1A^2 равно перемещению нижней точки средней щеки B^1B^2 из одного крайнего положения в другое.

Из треугольника OB^1B^2 следует, что $B^1B^2 = 2 \cdot \Delta h \cdot \tg \alpha = A^1A^2$, где Δh – длина нижнего плеча средней щеки.

Треугольники DA^1A^2 и DC^1C^2 являются подобными, следовательно $\frac{C^1C^2}{h} = \frac{A^1A^2}{h + \Delta h}$.

Отсюда $C^1C^2 = \frac{A^1A^2 \cdot h}{h + \Delta h} = \frac{2 \cdot h \cdot \Delta h \cdot \tg \alpha}{h + \Delta h} = \delta_{Г2}$.

Тогда размер исходного куска S равен:

$$S = \frac{r}{2} + \delta_{\text{гп}} + h \cdot \text{tg}\beta + \frac{2 \cdot h \cdot \Delta h \cdot \text{tg}\alpha}{h + \Delta h}. \quad (3)$$

Таким образом, степень дробления равна:

$$\Phi = \frac{\frac{r}{2} + \delta_{\text{гп}} + h \cdot \text{tg}\beta + \frac{2 \cdot h \cdot \Delta h \cdot \text{tg}\alpha}{h + \Delta h}}{\delta_{\text{гп}}}. \quad (4)$$

Результаты и их обсуждение

При проектировании двухкамерной щековой дробилки основным исходным показателем является размер готового продукта. В рассматриваемом случае принимается $\delta_{\text{гп}} = 10$ мм. Необходимые для расчета степени дробления показатели следующие: радиус кривошипа $r = 15$ мм; длина нижнего плеча средней щеки $\Delta h = 20$ мм; угол захвата средней щеки $\alpha = 4^\circ$, тогда, так как полный угол захвата по условия работоспособности $\varphi = 21^\circ$, угол захвата боковой щеки $\beta = 17^\circ$.

Из геометрических характеристик дробилки следует, что длина средней щеки в нейтральном положении оси до опорного шарнира равна:

$$h = \frac{r}{2 \cdot \text{tg}\alpha} = \frac{15}{2 \cdot \text{tg}\alpha} = 107 \text{ мм.}$$

а горизонтальное отклонение боковой щеки в исходном положении по линии, проходящей через опорный шарнир:

$$\delta_{\text{г1}} = h \cdot \text{tg}\beta = 20 \cdot \text{tg}\beta = 32 \text{ мм.}$$

Перемещение точки А равно:

$$A^1A^2 = 2 \cdot \Delta h \cdot \text{tg}\alpha = 2 \cdot 20 \cdot \text{tg}\alpha = 2,8 \text{ мм,}$$

а точки С:

$$C^1C^2 = \delta_{\text{г2}} = \frac{2 \cdot h \cdot \Delta h \cdot \text{tg}\alpha}{h + \Delta h} = \frac{2 \cdot 107 \cdot 20 \cdot \text{tg}\alpha}{107 + 20} = 2,34 \text{ мм.}$$

На основании полученных геометрических характеристик определим степень дробления, подставив численные значения в расчетную формулу.

$$\Phi = \frac{\frac{r}{2} + \delta_{\text{гп}} + h \cdot \text{tg}\beta + \frac{2 \cdot h \cdot \Delta h \cdot \text{tg}\alpha}{h + \Delta h}}{\delta_{\text{гп}}} = \frac{\frac{15}{2} + 10 + 107 \cdot \text{tg}\beta + \frac{2 \cdot 107 \cdot 20 \cdot \text{tg}\alpha}{107 + 20}}{10} = 5,2.$$

Особенностью кинематической схемы двухкамерной щековой дробилки является тесная взаимосвязь всех параметров, то есть изменение величины одного из них приводит к изменению всех остальных, поэтому характеристики дробилки следует устанавливать в каждом конкретном случае, в зависимости от требований к размеру получаемого продукта.

Выводы. Рассмотрена конструкция двухкамерной щековой дробилки, обеспечивающая непрерывный процесс дробления за счет исключения холостого хода. Выполнен кинематический анализ механизма качания щек, на основе которого получены расчетные зависимости для определения максимального размера исходного куска и степени дробления. Геометрические и кинематические параметры дробильного устройства определяют величину степени дробления. Проведенная численная оценка показала, что при заданном размере готового продукта 10 мм степень дробления составляет 5,2, что подтверждает работоспособность и эффективность предлагаемой кинематической схемы.

Финансирование

Исследование выполнено за счёт средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор №117/2025/УНИ от 01.04.2025 г.

Список литературы

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.

2. Зимин А.И., Говоров А.В., Канусик Ю.П. Производительность и оптимизация конструктивных параметров щековых дробилок // Известия вуз. Горный журнал. – 1998. – №5-6. – С. 80-84.
3. Клущанцев Б.В., Косарев А.И., Муйземнек Ю.А. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. – М.: Машиностроение, 1990. – 320 с.
4. Копосов П.В., Жуков И.А., Голиков Н.С. Щековые дробилки с криволинейным продольным профилем щек: классификация, тенденции развития и перспективы применения // Транспортное, горное и строительное машиностроение: наука и производство. – 2024. – №24. – С. 135-145. – doi.org/10.26160/2658-3305-2024-24-135-145.
5. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2017, vol. 103-104, pp. 60-66. doi. org/10.1016/j. mineng. 2016.08.009.
6. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model // IFAC-PapersOnLine. 2019, vol. 52, iss. 14, pp. 1-6. doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154.
7. Никитин А.Г., Люленков В.И., Витушкин А.В., Калюкина Н.Д. Сравнительный анализ работы щековых дробилок с различными кинематическими схемами // Известия вузов. Черная металлургия. – 2012. – №10. – С. 30-31. – doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-30-31.
8. Legendre D. Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor. – Åbo Akademi University: Turku, Finland, 2019. – 78 p.
9. Meriam J.L., Kraige L.G. Engineering Mechanics. – 111 River Street, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 550 p.
10. Патент №227063 РФ. Двухкамерная щековая дробилка / А.Г. Никитин, В.А. Лубин. – Заявка №2024113035 от 15.05.2024; опубли. 04.07.2023, Бюл. №19.

References

1. Jack de la Vergne. Hard Rock Miner's Handbook. – Edmonton. Alberta, Canada: Stantec Consulting, 2008. – 330 p.
2. Zimin A.I., Govorov A.V., Kanusik Yu.P. Jaw crushers performance and optimization // News of the Higher Institutions. Mining Journal. 1998, no. 5-6, pp. 80-84.
3. Klushantsev B.V., Kosarev A.I., Muizemnek Yu.A. Crushers. Design, calculation, features of operation. – M.: Mechanical Engineering, 1990. – 320 p.
4. Kuposov P.V., Zhukov I.A., Golikov N.S. Jaw crushers with curved longitudinal profile of cheeks: classification, development trends and application prospects // Transport, mining and construction engineering: science and production. 2024, no. 24, pp. 135-145. doi.org/10.26160/2658-3305-2024-24-135-145.
5. Holger Lieberwirth, Philipp Hillmann, Max Hesse. Dynamics in double roll crushers // Minerals Engineering. 2017, vol. 103-104, pp. 60-66. doi. org/10.1016/j. mineng. 2016.08.009.
6. Atta K.T., Euz'ebio T., Ibarra H., Silva Moreira V., Johansson A. Extension, Validation, and Simulation of a Cone Crusher Model // IFAC-PapersOnLine. 2019, vol. 52, iss. 14, pp. 1-6. doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.154.
7. Nikitin A.G., Lyulenkov V.I., Vitushkin A.V., Kalyukina N.D. Comparative analysis of the operation of jaw crushers with various kinematic schemes // Izvestiya. Ferrous metallurgy. 2012, no. 10, pp. 30-31. doi.org/10.17073/0368-0797-2012-10-30-31.
8. Legendre D. Numerical and Experimental Optimization Analysis of a Jaw Crusher and a Bubble Column Reactor. – Åbo Akademi University: Turku, Finland, 2019. – 78 p.
9. Meriam J.L., Kraige L.G. Engineering Mechanics. – 111 River Street, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2012. – 550 p.
10. Patent No. 227063. RU. Two-chamber jaw crusher / A.G. Nikitin, V.A. Lubin. – Appl. No. 2024113035 from 15.05.2024; publ. 04.07.2023, Bul. No. 19.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Никитин Александр Григорьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры механики и машиностроения	Nikitin Aleksandr Grigorievich – doctor of technical sciences, professor, professor at the department of mechanics and mechanical engineering
Баженов Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры менеджмента	Bazhenov Igor Alekseevich – candidate of technical sciences in engineering, associate professor, department of management
Лубин Владислав Александрович – аспирант nikitin1601@yandex.ru	Lubin Vladislav Aleksandrovich – postgraduate student

Получена 16.04.2026