

ТРАНСПОРТ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.869

ПРИМЕНЕНИЕ ЦИКЛОИДАЛЬНЫХ КРИВЫХ И ТЕЛ ПОСТОЯННОЙ ШИРИНЫ В РАБОЧИХ ОРГАНАХ ДРОБИЛЬНЫХ МАШИН

Рабат Ондабек Жанахметулы, д.т.н., профессор, зав. кафедрой Казахской автомобильно-дорожной академии им. Л. Гончарова, Казахстан, 050068, г. Алматы, ул. Еспаева 44. Тел: 8 (701) 9122747, e-mail: rabat747@mail.ru

Исаков Куттубек, к.т.н., и.о. профессора, зав. кафедрой «ОПиБД» Кыргызского Государственного Университета строительства, транспорта и архитектуры, Кыргызстан, г. Бишкек, с.Кок-Жар, ул.КонурОсмон, 105, Тел: моб.: (0772) 740031, служ.: (0312) 542118, 541696, e-mail: kuttubek.isakov.59@mail.ru

Салманова Алина Нуртаевна - старший преподаватель Екибастузского инженерно-технического института им. академика К.Сатпаева, Казахстан, 141208, г. Экибастуз, ул. Баянаульская, 22, Тел: 8 (747) 974 3539; 8 (705) 916 4455, e-mail: alinak096@mail.ru

Аннотация. В работе приведена дробильная машина с циклоидальными формами рабочих органов, в которой использован принцип циклоидального движения. Такая машина превышает показатели других базовых машин по производительности, удельным энергозатратам на рабочий процесс и имеет значительно меньшие габариты и массу, в силу циклоидального движения рабочих органов. В статье приведены основы расчета основных параметров дробилки с циклоидальным движением валков, в которых использован принцип циклоидального движения. Используя свойства циклоидальных кривых и тел постоянной ширины, а также циклоидальное движение рабочих органов, разработаны новые инновационные конструкции рабочих органов с циклоидальной формой. Такие машины превышают показатели других базовых машин по производительности, удельной энергоёмкости и имеют значительно меньшие габариты и массу в силу циклоидального движения рабочих органов. Вследствие периодического изменения скорости движения рабочих органов возникает вибрационное воздействие на разрабатываемый материал, что приводит к снижению энергоёмкости рабочего процесса. Использование свойств циклоидальных кривых и тел постоянной ширины в машинах с циклоидальным движением рабочих органов значительно расширяют технологические возможности машин.

Ключевые слова: валковая дробилка, рабочий орган, кубообразный щебень, зерновой состав, циклоида, сложное (циклоидальное) движение, ротор, сателлит, гипотрохоида, удельная энергоёмкость, металлоёмкость, производительность.

APPLICATION OF CYCLEIDAL CURVES AND BODIES OF CONSTANT WIDTH IN WORKING BODIES OF CRUSHING MACHINES

Rabat Ongdabek Zh. - doctor of Technical Sciences, professor, Kazakh Automobile and Highway Academy named after L.B. Goncharova, c. Almaty, Kazakhstan, 050068, Phone 8 (701) 9122747, e.mail: rabat747@mail.ru.

Isakov Kuttubek – PhD (Engineering), professor, Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, Bishkek, Kyrgyzstan, Phone (0772) 740031, (0312) 542118, 541696, e.mail: kuttubek.isakov.59@mail.ru.

Salmanova Alina N. - senior lecturer, Ekibastuz Engineering and Technical Institute named after K. Satpayev, Ekibastuz, Kazakhstan Republic. Phone 8 (747) 974 3539; 8 (705) 916 4455, e-mail: alinak096@mail.ru.

Abstract. In work presents a crushing machine with cycloidal form operative parts using the principle of cycloidal motion. This machine exceed indexes of other basic machines for performance, the specific energy consumption in the work flow and have a much smaller sizes and weight, by virtue of cycloidal motion of working bodies. The article presents the basis for calculating the main parameters of a crusher with cycloidal movement of rolls, in which the principle of cycloidal motion is used. Using the properties of cycloidal curves and bodies of constant width, as well as cycloidal movement of working organs, new innovative designs of working bodies with a cycloidal shape have been developed. Such machines exceed the performance of other basic machines in terms of productivity, specific energy intensity and have significantly smaller overall dimensions and weight due to cycloidal movement of the working bodies. Due to the periodic change in the speed of the working bodies, a vibrating effect on the material being developed occurs, which leads to a decrease in the energy intensity of the working process. The use of the properties of cycloidal curves and bodies of constant width in machines with cycloidal movement of working organs greatly expand the technological capabilities of machines.

Key words: roller crusher, working organ, cubed crushed stone, grain composition, cycloid, complex (cycloidal) motion, rotor, satellite, hypotrochoid, specific energy, metal capacity, productivity.

Анализ исследований по совершенствованию проектирования строительно-дорожных машин (СДМ), позволил установить, что существующие (традиционные) машины «исчерпали» резервы дальнейшего повышения производительности.

Для решения этой проблемы необходимо разрабатывать принципиально новые машины с циклоидальным движением рабочих органов (РО) или совершенствовать существующие СДМ с применением в них принципиально новых РО [1,2].

В математическом мире давно известны кривые и тела постоянной ширины, однако, в технике замечательные свойства кривых и тел постоянной ширины использовались крайне редко.

Это инструмент для сверления квадратных отверстий, имеющих в сечении форму треугольника Рело (кривая постоянной ширины) и роторно-поршневой двигатель Ванкеля, где используется циклоидальная форма (тело постоянной ширины) ротора и рабочей полости.

Используя свойства циклоидальных кривых и тел постоянной ширины, а также циклоидальное движение рабочих органов, в КазАДИ разрабатываются новые инновационные конструкции РО с циклоидальной формой [2].

В этих машинах применяются РО с планетарным (циклоидальным) движением для получения которого использованы свойства гипоциклоид.

Обычно такие кривые получают при движении точки, лежащей вне окружности 2 (точка М), которая катится без скольжения по внутренней стороне неподвижной окружности 3 (рисунок 1) [1].

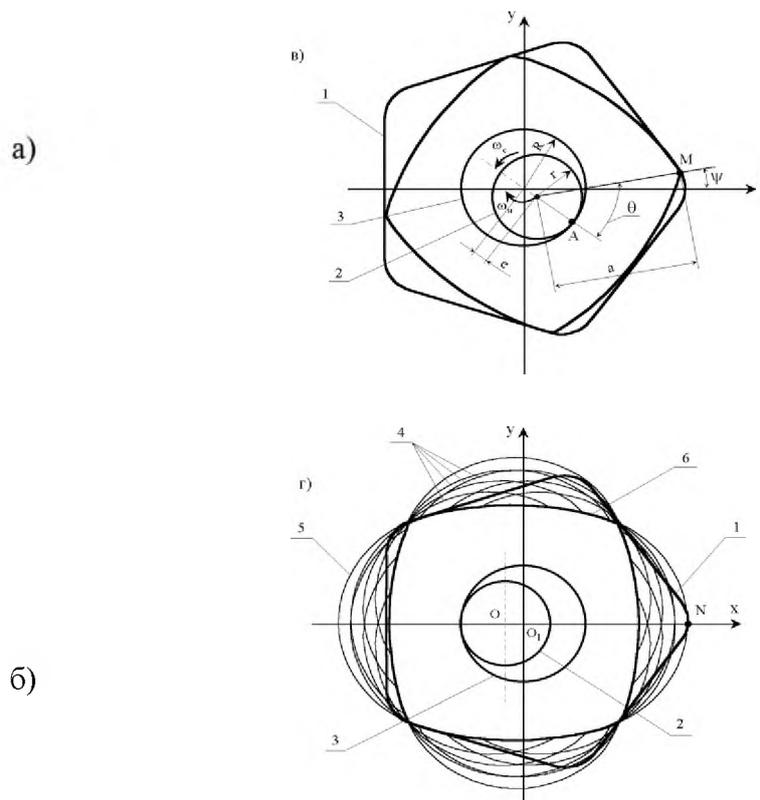


Рисунок 1 – Образование гипоциклоид

а) гипоциклоида при $z = 4$; б) внешняя и внутренняя огибающие при $z = 4$.

Если качение шестерни по неподвижному зубчатому колесу будет сопровождаться скольжением, то мы получим удлинённые и укороченные гипоциклоиды. Мы используем в своих РО укороченные гипоциклоиды, так как удлинённые циклоиды не могут быть использованы в СДМ в связи с тем, что они представляют собой кривые с петлями (рисунок 2). В наше время за укороченными и удлинёнными циклоидами сохранилось имя «трохоиды»[3].

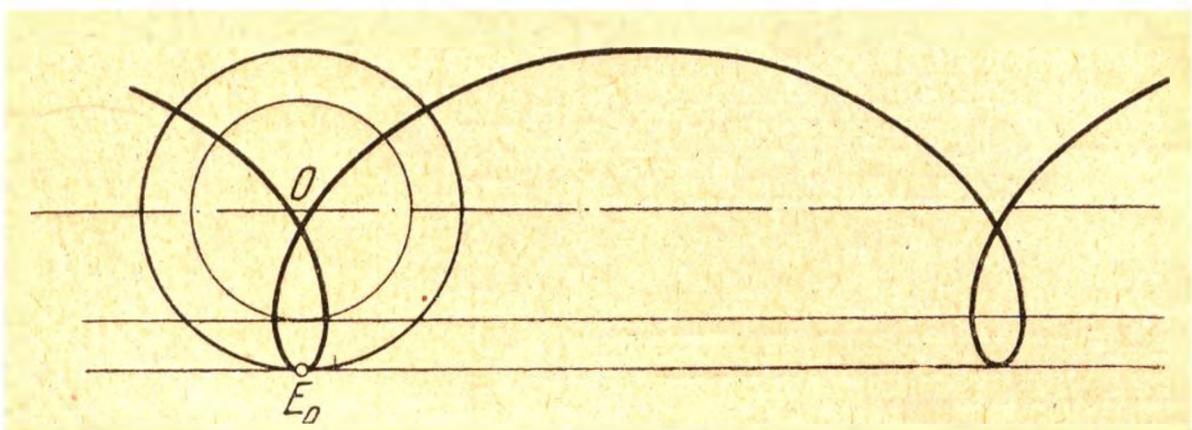


Рисунок 2 – Удлинённая циклоида

Если зубчатое колесо неподвижно, а шестерня будет катиться, касаясь его изнутри (рисунок 1), то любая точка окружности этой шестерни опишет кривую, называемую «гипоциклоидой» (подциклоидой). Если радиус « r » подвижного круга будет в два, три и вообще в « n » раз меньше радиуса « R » неподвижного, то получится гипоциклоида с двумя, тремя и вообще с « n » заострениями. На рисунке 3 *а*, *б* и *в* изображены гипоциклоиды с тремя, четырьмя и шестью заострениями. Если качение шестерни по внешнему будет сопровождаться скольжением, то будут получаться удлинненные и укороченные гипоциклоиды, изображенные на рисунках 4 и 5.

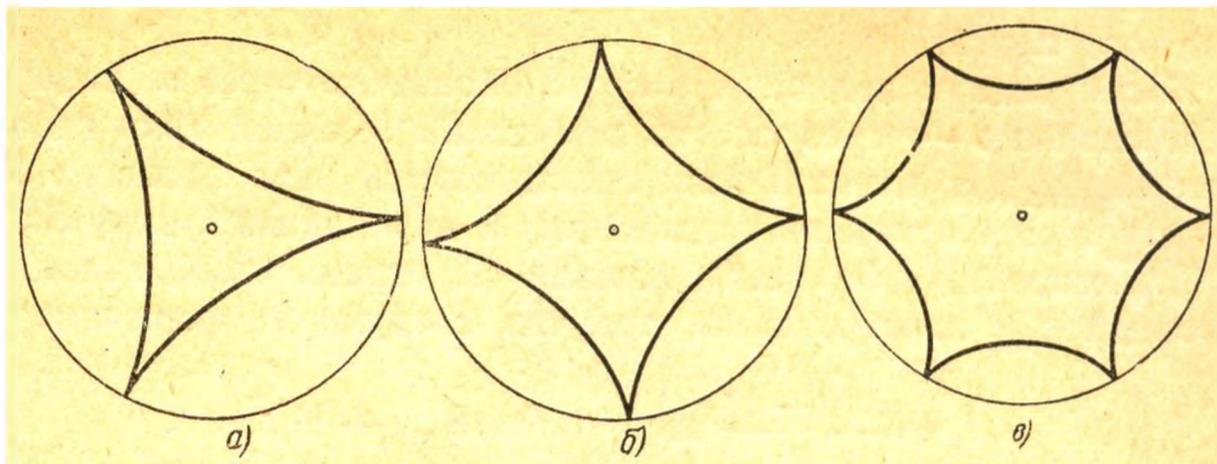


Рисунок 3 – Различные гипоциклоиды

Нормаль к любой гипоциклоиде в любой её точке проходит через точку соприкосновения подвижного и неподвижного кругов; касательная к гипоциклоиде в любой её точке проходит через диаметрально-противоположную точку подвижного круга. Мы знаем, что всякая кривая линия есть «огibaющая» своих касательных. В случае циклоиды «огibaющая» нормаль циклоиды служит точно такая же циклоида, только сдвинутая на $2r$ вниз и на $\pi \cdot r$ вправо.

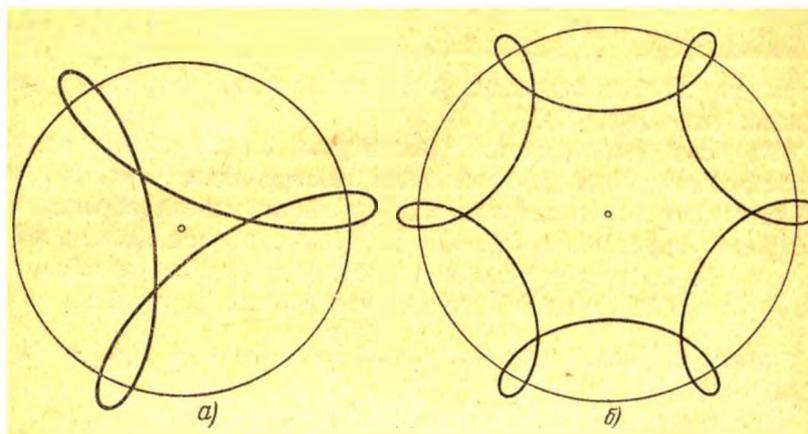


Рисунок 4 – Удлинненные гипоциклоиды

Если построенную гипоциклоиду 1 жестко связать с направляющей окружностью 3 и последнюю обкатывать вокруг производящего круга 2, то точки гипоциклоиды опишут семейство кривых гипоциклоид 4, имеющих внешнюю 5 и внутреннюю 6 огibaющие (см. рисунок 1). Контуры внешней и внутренней огibaющих имеют по z ветвей и по z вершин, т.е. на единицу меньше, чем у самой гипоциклоиды.

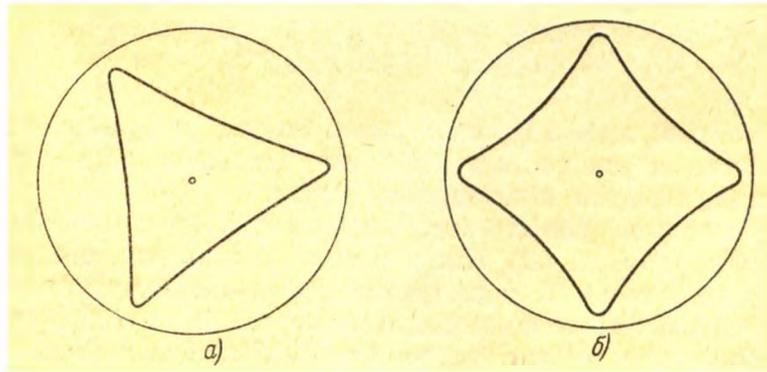


Рисунок 5 – Укороченные гипоциклоиды

Контур внутренней огибающей является вписанным в контур гипоциклоиды, а контур гипоциклоиды является вписанным в контур внешней огибающей. Центром внутренней и внешней огибающей является центр производящего круга. При обкатывании производящего круга вместе со связанной с ним внутренней огибающей по направляющей окружности вершины контура внутренней огибающей описывают ту же самую исходную гипоциклоиду. Ветви внутренней огибающей при этом перекатываются с некоторым скольжением по контуру гипоциклоиды. Среди множества вариантов отношений радиусов R/r наиболее целесообразными с точки зрения их использования в кинематических схемах СДМ являются варианты отношений: $R/r = 3/2$; $4/3$; $5/4$ и т.д. [4].

Линии гипоциклоид, описываемые вершинами внутренних огибающих, близки по форме к правильному треугольнику (при $R/r = 3/2$); квадрату ($R/r = 4/3$); пятиугольнику ($R/r = 5/4$) и т.д.

В контур гипоциклоиды, состоящей из пяти ветвей (правильный пятиугольник) при $z = 4$ и $c = 4$ вписывается квадрат с выпуклыми сторонами (внутренняя огибающая) (см. рисунок 1) и т.д.

Поперечное сечение рабочего органа машины представляет собой плоскую многоугольную фигуру, точки которой при вращательном движении вокруг двух параллельных осей описывают кривые линии – гипоциклоиды. В зависимости от величины параметра формы «с» ветви циклоиды могут быть вогнутыми, выпуклыми или иметь прямолинейные участки.

При вращении рабочих органов вокруг двух параллельных осей вершины каждого из сечений будут описывать одинаковые циклоиды с прямолинейными ветвями, а боковые образующие сечений будут перекатываться с некоторым скольжением по этим ветвям, как по направляющим. Именно эту особенность движения рабочих органов (по взаимноогibaющим кривым) предлагается использовать в СДМ, что позволит получить минимальные удельные энергозатраты по рабочему процессу. Кроме того, планетарное (циклоидальное) движение РО СДМ позволяет не только значительно уменьшить вес и габариты машины, но и получить новые технологические возможности, которые получаются вследствие изменения скорости движения РО [5]. От скорости движения РО зависит производительность машины. Скорость точки, описывающей гипоциклоиду, равна [5]:

$$v = \omega_1 R \sqrt{1 + c^2 + 2 \cos 2\psi}, \quad (1)$$

где $\omega_1 = d\psi/dt$ – угловая скорость точки М (см. рисунок 1).

Анализ выражения (1) показывает, что скорость $v = f(\psi)$ периодически изменяется от минимального значения: $v_{\min} = \omega_1 r(c - 1)$ до максимального значения $v_{\max} = \omega_1 r(c + 1)$.

При $\psi = 45^\circ, 135^\circ, 225^\circ, 315^\circ$ т.е. когда производящая точка находится в середине ветви гипотрохи $\cos(z+1)\psi = -1$ и скорость производящей точки равна v_{\max} . При $\psi = 0^\circ; 90^\circ; 180^\circ; 270^\circ$; т.е. когда производящая точка находится в вершине гипотрохи $\cos(z+1)\psi = 1$, скорость в этой точке равна v_{\min} . При этом отношение $\frac{v_{\max}}{v_{\min}} = \frac{4}{z} = 2$, т.е. скорость точки в середине ветви гипотрохи в два раза больше, чем в вершине.

На рисунке 6 приведена зависимость безразмерной скорости вершин РО $\frac{v}{\omega_1 R(r)}$ от угла поворота.

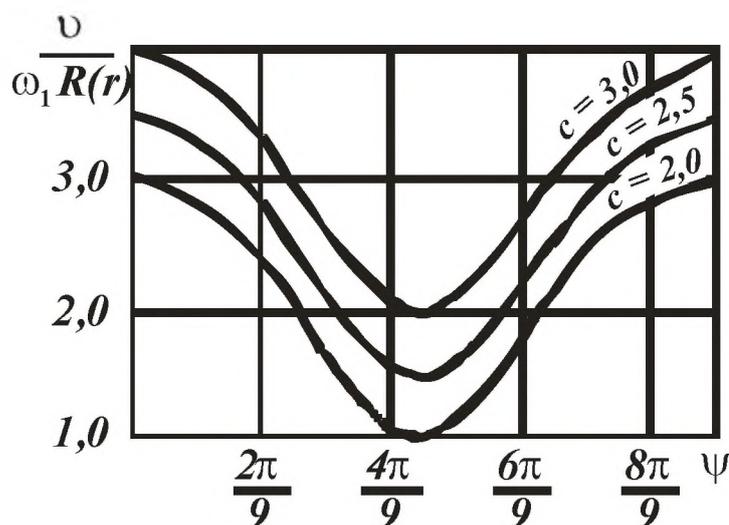


Рисунок 6 – Зависимость безразмерной скорости вершин РО $\frac{v}{\omega_1 R(r)}$ от угла поворота РО

Таким образом, при перемещении от вершины до середины ветви производящая точка движется с ускорением, а от середины ветви до следующей вершины точка движется с замедлением. Именно такая особенность движения рабочего органа обеспечивает вибрационное воздействие на разрабатываемый материал и повышает эффективность рабочего процесса за счёт снижения его энергоёмкости [6].

В результате исследований на кафедре «Транспортная техника и организация перевозок» КазАДИ благодаря системному подходу к возникшим проблемам в технике создан теоретический базис для проектирования РО с циклоидальным движением.

На рисунке 7 представлена схема, разработанной авторами конструкции дробилки с циклоидальными рабочими органами. Поперечное сечение РО – циклоидальное тело постоянной ширины, описанное гипоциклоидой.

В общем случае разработанная нами дробилка содержит корпус 1 (рисунок 7), на котором установлены два многогранных валка 2, состоящих из бандажа 3 и ступицы 4 и привод, включающий электродвигатель 5 и клиноременную передачу 6. Валки 2 установлены с возможностью вращения на эксцентриках – водилах 7 приводных эксцентриковых валов 8. Валы 8 кинематически связаны между собой зубчатыми колесами

9, обеспечивающими их встречное синхронное вращение.

Кинематическая связь каждого из валков 2 с приводными двигателем содержит планетарный редуктор, коронное колесо 10 которого с внутренними зубьями жестко закреплено на корпусе 1, а сателлит 11 жестко и сносно связан с валками 2. Приводные валы 8 оснащены противовесами 12 для уравнивания центробежных сил [7,8].

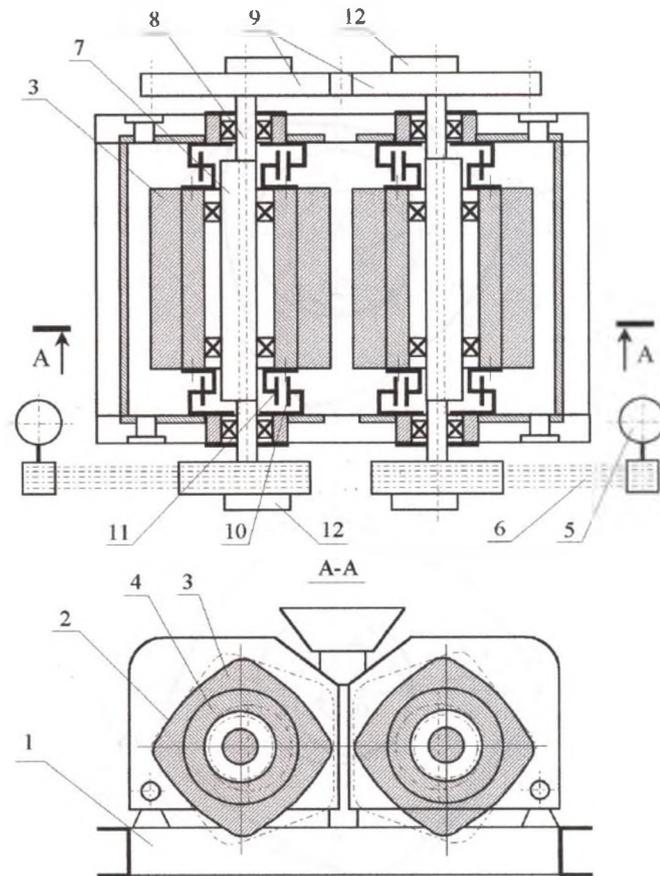


Рисунок 7 – Принципиальная схема конструкции дробилки

Внешний контур поперечного сечения каждого из валков представляет собой равносторонней многоугольник, совпадающий с внутренней огибающей семейства гипоциклоид.

Валки являются РО дробления четырехгранной формы. Внутри валка расположена планетарная передача с внутренним зацеплением. За счет планетарной передачи простое вращательное движение вала преобразует в сложное движение наружных поверхностей плит валка, обеспечивая постоянный зазор между поверхностями отдельных плит, число плит равно $z=4$.

Практически вся рабочая поверхность валка является активной, т.е. взаимодействует с дробимым материалом. Она в несколько, примерно раз больше, а, следовательно, интенсивность износа во столько же раз меньше, чем в щечковой при одинаковой производительности.

Это позволяет повысить срок службы дробящих плит, что в свою очередь приводит к сокращению затрат, связанных с их заменой и простоем оборудования и в конечном итоге к снижению себестоимости готовой продукции. Криволинейная форма дробящих плит и планетарное движение валков позволяет создать значительные удельные давления на куски материала в зоне дробления, что улучшает условия для их разрушения. Благодаря вращательному движению валков вокруг двух параллельных осей, динамические нагрузки,

обусловленные инерционными силами и напряжения в элементах конструкции предлагаемой дробилки, ниже при прочих равных условиях, чем в элементах конструкции щековой дробилки с возвратно касательным движением щеки, что позволяет снизить металлоемкость, и повысить надежность работы. При одинаковой кривизне рабочих поверхностей размеры поперечного сечения валков в предлагаемой конструкции дробилки примерно в два раза меньше, чем в обычных валковых дробилках [7,8].

Исходный материал подается в рабочее пространство через загрузочную воронку и движется плоским потоком между валками. Грани валков накатываются симметрично с двух сторон на поток материала, сближаясь в области зоны дробления и расходясь в области зоны разгрузки.

При сближении грани валков воздействует на куски дробимого материала и измельчают их. Положение камеры дробления и разгрузочной щели циклически изменяется, перемещаясь по вертикали. При этом величина минимального зазора между валками остается постоянной в силу конструктивных особенностей РО (здесь нами использовано свойство кривых постоянной ширины-гипоциклоид). При сближении ребер валков в рабочем пространстве до величины минимального зазора цикл дробления прекращается. Далее ребра валков перемещаются вертикально вниз, а затем расходятся в противоположные стороны. В это время следующая пара рабочих граней валков сближается в зоне дробления и цикл повторяется. За один оборот валка происходит z циклов дробления.

Преимуществом дробилки с циклоидальным движением циклоидальных валков является более высокая производительность, низкая металлоемкость и энергоемкость, а также получение кубообразного щебня по сравнению с аналогичной валковой дробилки. Все эти преимущества достигаются тем, что рабочие органы дробильной машины, выполненные в виде циклоидальных тел постоянной ширины имеют неравномерную скорость при циклоидальном движении [9,10].

Выводы:

1. Современные строительно-дорожные машины имеют достаточную производительность, но ограничения сдерживают рост производительности. Дробильная машина с циклоидальными формами РО и их циклоидальным движением превышают показатели других базовых машин по производительности, удельным энергозатратам на рабочий процесс и имеют значительно меньшие габариты и массу, в силу циклоидального движения рабочих органов.

2. Вследствие периодического изменения скорости движения РО возникает вибрационное воздействие на разрабатываемый материал, что приводит к снижению энергоемкости рабочего процесса.

3. Использование свойств циклоидальных кривых и тел постоянной ширины в машинах с циклоидальным движением РО значительно расширяют технологические возможности машин.

Список литературы

1. Ли С.В. Проектирование и конструирование строительно-дорожных машин с планетарно-роторным движением рабочих органов. // Вестник Национальной инженерной академии Республики Казахстан №4. – Алматы, 2004. – С. 68-73.
2. Недорезов И.А., Кабашев Р.А. Машины строительного производства и их рабочие среды взаимодействия. Москва – Алматы, Бастау, 2013. – 444 с.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М., Наука, 1970. – 720 с.
4. Ли С.В., Шин Б.С., Таран М.В., Коньсыбай С.Б. Геометрия рабочего органа машин с планетарно-роторным движением. // Транспорт Евразии: Взгляд XXI век. Материалы Третьей Международной научно-практической конференции. Том 1. Алматы: КазАТК, 2004.

– С. 126-129.

5. Кабашев Р.А., Ли С.В. Новые рабочие органы строительных машин с планетарно-роторным приводом. //Новости науки Казахстана: науч.-техн. сб. №1 КазГосИНТИ. – Алматы, 2005. – С. 82-86.

6. Ли С.В., Таран М.В., Шин Б.С. Кинематика рабочих органов машин с планетарно-роторным движением. //Вестник КазАТК №5. – Алматы, 2004. – С.51-55.

7. Ли С.В., Рабат О.Ж., Салманова А.Н. Дробильная машина со сложным движением рабочих органов. Научный журнал «Znanstvenamisel» №13, Slovenskacesta 8, 1000 Ljubljana, Slovenia, 2017г. –С. 52-57.

8. Кабашев Р.А., Ли С.В., Рабат О.Ж., Кабашев А.Р. Патент РК № 29666 «Валковая дробилка». // Оpubл. в БИ №3, 2015.

9. J. Denavit, R. S. Hartenberg, R. Razi, and J. J. Uicker, “Velocity, acceleration, and static-force analyses of spatial linkages,” Journal of Applied Mechanics, vol. 32, no. 4, pp. 903–910, 1965. [View at Publisher](#) · [View at Google Scholar](#)

10. J. E. Holte and T. R. Chase, “A force transmission index for planar linkage mechanisms,” in Proceedings of the ASME Mechanisms Conference, pp. 377–386, 1994.