

DOI: 10.12737/article_5c506253855313.91225812

^{1,*} **Остановский А.А.**¹ ООО «Оптимастрой»

Россия, 141130, г. Руза, Московской области, ул. Школьная, д. 28

*E-mail: ostanovskiy51@mail.ru

АНАЛИЗ И ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ ДВУХКАСКАДНОЙ МЕЛЬНИЦЫ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Аннотация. В статье обосновывается важность усовершенствования процесса измельчения минеральных материалов на основе использования передового измельчительного оборудования, позволяющего повысить производительность и снизить энергозатраты. Одним из путей для достижения этой цели является применения двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения, обладающих рядом технических преимуществ в сравнении с известными на текущий период мельницами системы «МАЯ», в которых для разрушения частиц измельчаемого материала кроме кинетической энергии вращающегося ротора используется так называемая «циркулирующая» энергия замкнутого контура, образующаяся в результате выполнения ветвей замкнутых контуров с кинематическим несоответствием. Это приводит к дополнительному силовому взаимодействию циркулирующих частиц и снижению энергопотребления. Обосновывается необходимость построения их структурных схем с использованием индифферентных групп, которые придают мельницам этой системы особые свойства. Представлены аналитическое исследование структурных схем двухкаскадных мельниц разных систем, показывающих, их наличие в структурных схемах мельницы этой системы приводит в возникновении явления «циркуляции» энергии» и показывает природу её образования. Представлены результаты измерения энергозатрат при измельчении мергеля в мельницах с индифферентной структурной группой, подтверждающие возможность полезного использования по сути «даровой» энергии для повышения энергоэффективности измельчения материала.

Ключевые слова: мельница, энергозатраты, самоизмельчение, кинетическая энергия, потенциальная энергия, циркулирующая энергия, структурная схема, индифферентная группа, звено, стойка, замкнутый контур, кинематическое несоответствие, ротор, барабан.

Введение. Процессы дробления и измельчения занимают важное место в различных отраслях производственной деятельности уже длительный период времени, а в связи с тенденцией уменьшения минеральной базы для выпуска необходимых продуктов на основе его переработки задача по эффективному используемого для этих целей машин усовершенствования технологических процессов будет постоянно возрастать. Применяемые измельчительные машины, среди которых наибольшее распространение получили барабанные мельницы, имеют низкий коэффициент полезного действия, громоздки, характеризуются низкой удельной производительностью и расходом значительного количества стали на мелющие тела и футеровку, а поэтому они не могут удовлетворить современные требования.

Существенным недостатком существующих технологий дробления и измельчения материала является многостадийность, необходимая для получения готового продукта требуемого фракционного состава, что приводит к существенному росту экономических и капитальных затрат [1].

Одним из перспективных направлений совершенствования и развития вертикальных мельниц динамического самоизмельчения в последнее десятилетие являются запатентованные кон-

структивные схемы мельниц динамического самоизмельчения системы «МКАД» [2–4]. Техническим преимуществом мельниц этой системы в сравнении с мельницами системы «МАЯ» является более низкие энергозатраты [5, 6].

Дальнейшим развитием принципа самоизмельчения, способствующими повышению производительности и снижению энергозатрат являются разработанные схемные решения вертикальных двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения [7–9]. Заложенный в них принцип концентрации измельчительных операций в одной машине позволит не использовать, как это сейчас происходит, наличие в технологические цепочки дополнительных измельчительные устройств и транспортных линий для перемещения измельчаемого материала от одной машины к другой.

Вместе с тем, анализ разработанных схем двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения показывает на имеющиеся резервы по снижению энергопотребления при их применении.

Эти резервы заключаются в использовании в конструктивных схемах двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения индифферентных структурных групп, которые предполагают построение их с замкнутыми кинематическими

контурами [10, 11]. Это позволит при передаче мощности от приводного двигателя мельницы к столбу измельчаемого материала по его верхней и нижней ветвям, выполненным с кинематическим несоответствием относительно друг друга, создать условия для возникновения так называемой «циркулирующей» энергии [12, 13]. Её возникновение ведёт к возникновению дополнительного силового поля, в котором каждая циркулирующая частица будет испытывать дополнительное силовое воздействие и интенсивно разрушаться без увеличения мощности приводного двигателя [14].

Это обстоятельство выдвигает задачу выяснения причин, приводящих к снижению энергозатрат, которая должна осуществляться на основе анализа их конструктивных схем мельниц этой системы. Необходимость такой процедуры вызвана

тем, структурные схемы являются основой конструкции любой машины. Обоснованная структурная схема позволит придать вновь создаваемым машинам новые технологические свойства, так как, изменяя закономерности движения звеньев механизма, можно изменять величину, направление скоростей и моментов в этих звеньях, что будет определять силовые характеристики при их взаимодействии и энергозатраты [15].

Поэтому с целью установления причин, устанавливающих влияние структурных схем вертикальных двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения разных схем на энергозатраты, произведём анализ их конструктивных схем и структурных схем, представленных на рис. 1 и 2.

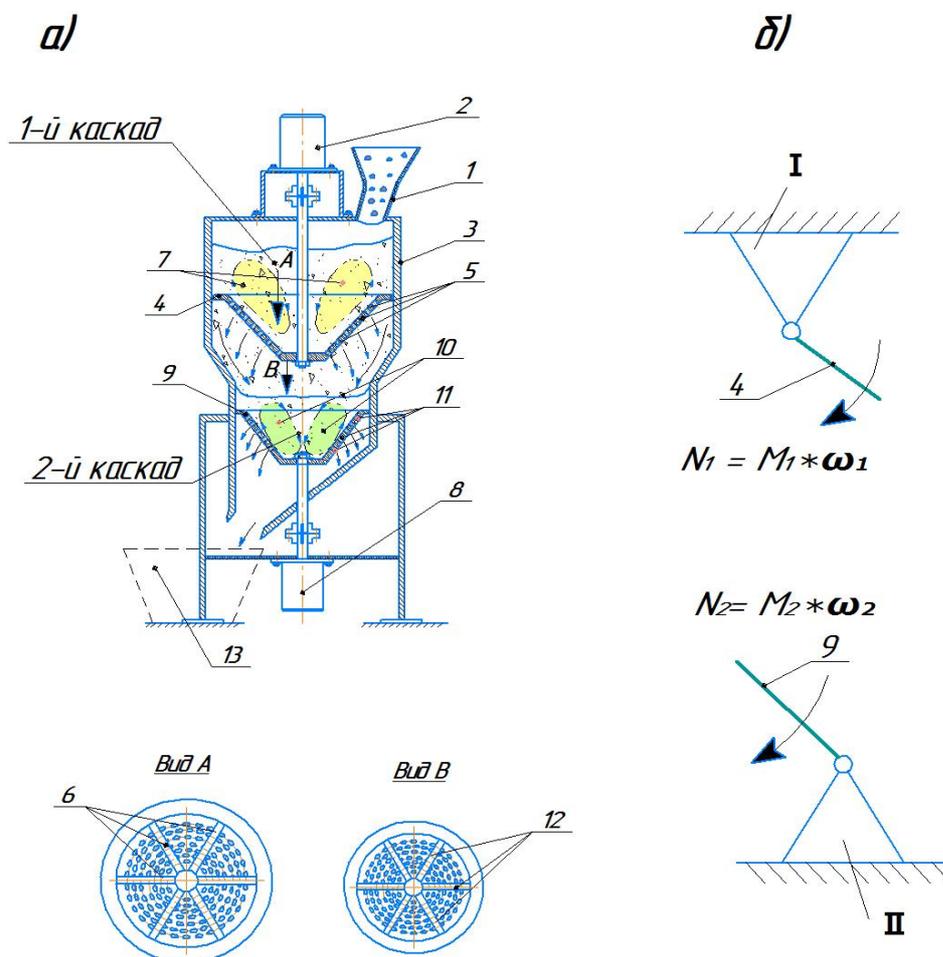


Рис. 1. Конструктивная и структурная схема двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения без индифферентной структурной группы:

- а) конструктивная схема: 1 – загрузочный патрубкок; 2 – электродвигатель первого каскада; 3 – корпус; 4 – ротор первого каскада; 5 – выпускные отверстия первого каскада; 6 – рёбра первого каскада; 7 – зона активного измельчения первого каскада; 8 – электродвигатель второго каскада; 9 – ротор второго каскада; 10 – зона активного измельчения второго каскада; 11 – выпускные отверстия второго каскада; 12 – рёбра второго каскада; 13 – приёмная ёмкость;
- б) структурная схема: I – стойка электродвигателя первого каскада; II – стойка электродвигателя второго каскада; 4 – ведущее звено первого каскада (ротор); 9 – ведущее звено второго каскада (ротор)

Сущность работы двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения простого исполнения заключается в следующем.

Первоначально через загрузочный патрубок *1* в корпус *3* порционно или непрерывно подается исходный материал. Далее последовательно производится включение электродвигателей *2* и *8* 1-го и 2-го каскадов, что позволяет привести во вращение роторы *4* и *9*. В начальный период вращения верхнего ротора *9* куски материала, находящиеся в корпусе *3*, начинают перемещаться к его периферии под действием центробежной силы, одновременно прижимаясь к радиальным рёбрам *6*. Попав в активную зону *7* 1-го каскада, эти куски измельчаются за счёт ударов, скалывания и истирания их между собой. Частицы материала крупнее размера выходных отверстий в роторе *4*, совершают движение в рабочей зоне верхнего корпуса *1* по восходящей тороидальной линии и далее вместе с исходным материалом опускаются в её (активную) рабочую полость.

Одна часть частиц материала, соразмерная с размерами боковых отверстий *11*, выполненных в боковой плоскости ротора *4* 1-го каскада, выводится за счет центробежной силы через эти отверстия, и под действием силы тяжести эти предварительно измельченные частицы перетекают нижнюю часть корпуса *3*. Попав в нижнюю часть корпуса *2* и располагаясь над ротором *9* второго каскада, эти частицы подвергаются воздействию нижних рёбер *12* вращающегося ротора *9* второго каскада.

Во втором каскаде уже предварительно измельченные частицы материала в первом каскаде начинают перемещаться к периферии нижней части корпуса *3* под действием центробежных сил, одновременно прижимаясь к нижним рёбрам *12*. Попав в активную зону *10* второго каскада, продолжают они измельчаться за счет ударов, скалывания и истирания. Частицы материала крупнее размера выходных отверстий *11* в боковой поверхности нижнего ротора *9*, совершают движение по восходящей тороидальной линии. При этом частицы материала, имеющие размеры меньше, чем в боковых отверстиях *11* в роторе *9*, выводятся из корпуса *3* и аккумулируются в ёмкости *13* готового продукта.

Структурная схема мельницы двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения (рис. 1, б) включает ведущее звено *4* (вал приводного двигателя с ротором 1-го каскада, шарнирно связанного со стойкой I приводного двигателя *2*). Степень подвижности мельницы этой системы при одном подвижном звене *2* и одной неподвижной пары *A*, определится по формуле П.Л. Чебышева, как

$$W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = +1$$

где $n = 1$ – число подвижных звеньев; $p_5 = 1$ – количество неподвижных пар в механизме.

Мощность на ведущем звене *4* (роторе), определится из выражения

$$N_{\text{рот1}} = M_{\text{рот1}} \cdot \omega_{\text{рот1}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{рот1}}$ – крутящий момент на ведущем звене *4*; $\omega_{\text{рот1}}$ – угловая скорость ведущего звена *4* – 1-го каскада.

Интенсификацию процесса взаимодействия частиц материала при установленной мощности $N_{\text{дв}}$ приводного двигателя *2* можно осуществлять только путём увеличения угловой скорости $\omega_{\text{рот1}}$ ведущего звена *4*, которое задаётся исходя из характеристик самого двигателя.

Ввиду того, что режим самоизмельчения может оптимально протекать только при определенных значениях угловой скорости ротора *4*, $\omega_{\text{крит}}$, а её превышение выше этого значения приводит к переизмельчению материала и росту энергозатрат [16].

Аналогично мощность во втором каскаде определится как

$$N_{\text{рот2}} = M_{\text{рот2}} \cdot \omega_{\text{рот2}}, \quad (2)$$

Ограничения на угловые скорости роторов первого и второго каскадов не позволяют для двухкаскадной мельницы рассматриваемой конструкции повысить интенсификацию взаимодействия частиц измельчаемого материала и добиться снижения энергопотребления. Конструктивная и структурная схема двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения с индифферентной структурной группой представлена на рис. 2. Мельница этой системы включает раму *1*, на которой установлен электродвигатель *2*, на валу которого с помощью шпоночного соединения смонтировано коническое зубчатое колесо *3* (рис. 2, а). На раме *1* также с помощью подшипниковых узлов смонтированы верхний *4* и нижний *5* вал, на которых смонтированы конические шестерни *6* и *7*, находящиеся в зацеплении с зубчатым колесом *3*.

На верхнем *4* и нижнем *5* вале с помощью шпоночных соединений смонтированы ведущие шкивы *8* и *9* привода верхнего *10* и нижнего *15* барабана первого и второго каскада, а также ведущие шкивы *12* и *13* приводов верхнего *14* и нижнего *15* ротора. В нижней части верхнего *10* и нижнего *15* барабана выполнены выпускные отверстия *16* и *17*, служащие для эвакуации достигших определённых размеров частиц измельчаемого материала за внешние пределы этих барабанов и их перегрузку по транспортной цепочке перемещения измельчаемого материала под действием силы тяжести внутри мельницы.

На верхнем 10 и нижнем 11 барабанах смонтированы ведомые шкивы 18 и 19 привода верхнего 14 и нижнего 15 барабана, а на нижней части

верхнего 14 и нижнего 15 ротора – ведомые шкивы 20 верхнего и нижнего 21 ротора.

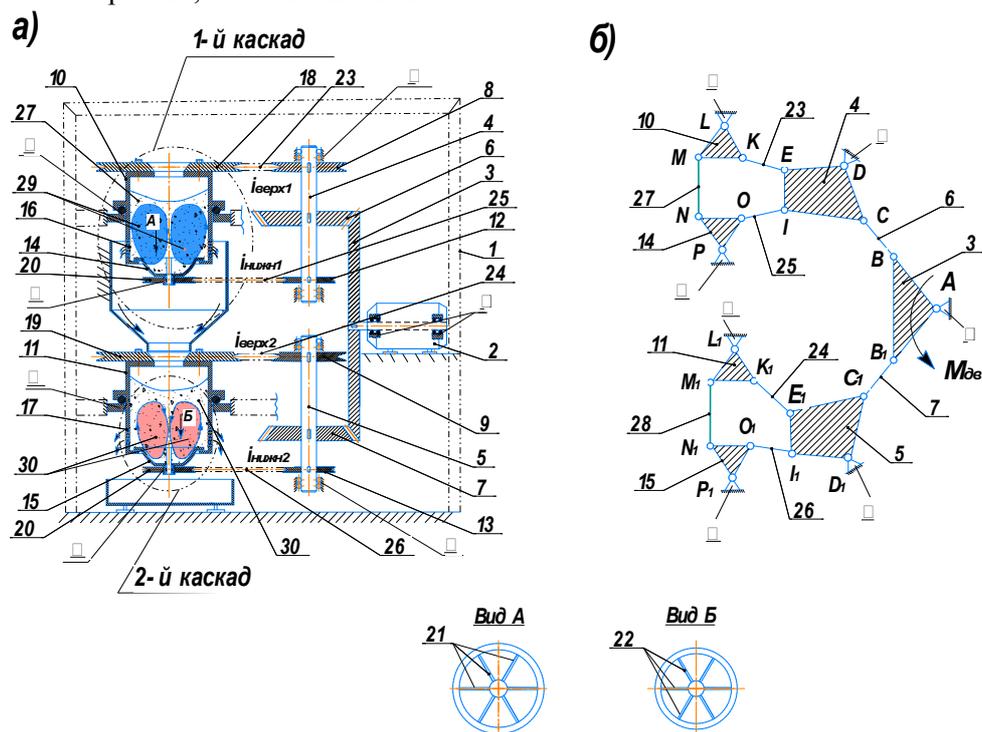


Рис. 2 Конструктивная и структурная схема двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения:
 а) конструктивная схема; б) структурная схема

Верхний 14 и нижний 15 ротор с помощью радиальных рёбер 21 и 22 равномерно разделены на шесть секторов. Кинематические передачи в верхних 23 и 24, а также в нижней 22 и 26 ветвях выполнены с кинематическим несоответствием относительно друг друга, т. е. $I_{\text{верх1}} \neq I_{\text{нижн1}}$, а $I_{\text{верх2}} \neq I_{\text{нижн2}}$.

Измельчаемый материал, находящийся в барабанах 10 и 11 и связывающий между собой его с верхним 14 и нижним 15 ротором, формирует столбы 29 и 30, являются звеньями кинематических цепей 1-го и 2-го каскада мельницы исследуемой системы.

Принцип работы мельницы с индифферентной структурной группой заключается в следующем.

Первоначально в верхний барабан 4 загружается исходный материал, формируя определённый столб над верхним ротором 14. После засыпки производится включение электродвигателя 2, в результате чего через ведущее коническое колесо 3, конические шестерни 6 и 7 приводятся во вращение верхний 4 и нижний 5 вал. Через верхний 4 и нижний 5 вал с помощью ведущих шкивов 8 и 9, 12 и 13 ведомые шкивы 18 и 19, 20 и 21 приводятся во вращение верхний 10 и нижний 11 барабан, а также и верхний 14 и нижний 15 ротор соответственно 1-го и 2-го каскада.

В начальный период вращения верхнего ротора 14 куски материала, начинают перемещаться к его периферии под действием центробежной силы, одновременно прижимаясь к радиальным рёбрам 21.

Попав в активную зону 29 1-го каскада, эти куски измельчаются за счёт ударов, скалывания и истирания их между собой. Частицы материала крупнее размера выпускных отверстий 16 в верхнем барабана 10, совершают движение в рабочей зоне 29 верхнего барабана 10 по восходящей тороидальной линии и далее вместе с исходным материалом опускаются в её (активную) рабочую зону. При передаче разных по величине крутящих моментов по верхней 22 и нижней 25 ветви замкнутого контура из-за их кинематического несоответствия происходит деформация (скручивание) верхнего вала 4, в результате чего в нём возникает потенциальная энергия, степени его деформации, которая определяется разностью углов скручивания между верхним нижним концами верхнего и нижнего вала, его упругими характеристиками, а также его длиной и диаметром. Возникновение даровой потенциальной энергии в замкнутом контуре приводит к дополнительному силовому воздействию на измельчаемые частицы материала, интенсивному их разрушению и снижению энергозатрат [11].

Одна часть частиц материала, соразмерная с размерами боковых отверстий, выполненных в боковой верхнего барабана 4, выводится за счёт центробежной силы через эти отверстия и далее под действием сил тяжести уже предварительно измельчённые частицы перетекают в нижний барабан 11. Попав в этот барабан и располагаясь над верхним ротором 15, эти частицы подвергаются воздействию нижних рёбер 22, которые сообщают им кинетическую энергию.

В нижнем барабане 11 2-го каскада предварительно измельчённые частицы материала, перемещённые из 1-го каскада аналогично, как в верхнем барабане 10 начинают перемещаться к его периферии под действием центробежных сил, одновременно прижимаясь к нижним рёбрам 23. В нижнем барабане 14 предварительно измельчённый материал, попав в активную зону 30 2-го каскада, продолжают измельчаться за счёт ударов, скалывания и истирания. Частицы материала крупнее размера выходных отверстий в боковой поверхности нижнего барабана 11, совершают движение в его рабочей зоне по восходящей тороидальной траектории. При передаче разных по величине крутящих моментов по верхней 24 и нижней 25 ветви замкнутого контура из-за их кинематического несоответствия происходит деформация (скручивание) нижнего вала 5 и возникает потенциальная энергия, приводящая к дополнительному силовому воздействию на измельчаемые частицы материала, интенсивному их разрушению и снижению энергозатрат.

При этом частицы материала, имеющие размеры меньше, чем в боковых отверстиях 17 нижнего барабана 11, выводятся из него и аккумулируются в приёмной ёмкости готового продукта.

На рис. 3 представлена схема передачи крутящего момента от приводного двигателя по верхним и нижним ветвям в мельнице рассматриваемой конструкции, приводящих к деформации (скручиванию) концов верхнего и нижнего вала и возникновению потенциальной энергии, способствующей дополнительному силовому воздействию на частицы измельчаемого материала.

Величина возникающей потенциальной энергии $E_{\text{пот}}$ в замкнутом контуре при известных значениях диаметра вала приводного двигателя $d_{\text{ср}}$, его длины l и упругих свойств материала вала $[\sigma]$ будет зависеть от величины угла скручивания вала, которая может быть определён как разность между значениями деформации нижнего и верхнего конца относительно исходного состояния до приложения к нему крутящего момента, подводимого по ветвям замкнутого контура к столбу измельчаемого материала:

$$\Delta\varphi_{\text{скри}} = \varphi_{\text{нижни}} - \varphi_{\text{верхи}}, \text{ рад} \quad (2)$$

где $\varphi_{\text{нижни}}$ и $\varphi_{\text{верхи}}$ – величины скручивания нижнего и верхнего конца верхнего и нижнего вала в поперечном сечении в i -й момент времени относительно первоначального (исходного) состояния до передачи крутящего момента, рад.

Мощность, возникающая при скручивании верхнего и нижнего вала $N_{\text{скри}}$, можно определить как

$$N_{\text{скри}} = \int_0^t M_{\text{скри}} \cdot d(t_i) \cdot \omega_i, \text{ Вт} \quad (3)$$

где $M_{\text{скри}}$ – момент, необходимый для скручивания верхнего 4 и нижнего 5 вала на некоторый угол $\varphi_{\text{скри}}$; t_i – период измельчения, с; ω_i – угловая скорость каждого вала в i -й момент времени, рад/с.

При увеличении разности углов скручивания концов каждого из валов 4 и 5 их потенциальная энергия будет возрастать. Это объясняется сдвигом молекул в молекулярной структуре кристаллической решётки материала, из которых изготовлен вал [18].

Момент, возникающий при скручивании концов вала 4 и 5, определится из соотношения

$$M_i = \frac{\Delta\varphi_{\text{скри}} \cdot [\varepsilon] \cdot J_p}{l_i}, \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (4)$$

где l_i – длина верхнего 4 и нижнего 5 вала, м; $[\varepsilon]_i$ – модуль сдвига для материала верхнего и нижнего вала, МПа/м; J_p – полярный момент инерции верхнего и нижнего вала, м⁴.

$$J_p = \frac{\Delta\varphi_{\text{скри}} \cdot d_{\text{ср}}^2}{32}, \text{ м}^4 \quad (5)$$

где $d_{\text{ср}}$ – средний диаметр верхнего 4 и нижнего 5 вала, м.

Таким образом, мощность замкнутого контура $N_{\text{зк}}$ будет равна сумме мощностей, подводимой к ротору $N_{\text{рот}}$ и барабану $N_{\text{бар}}$ и уравновешенной мощностью, возникающей при скручивании валов на некоторую величину, определяемую их разностью концов их скручивания $\Delta\varphi_i$:

$$N_{\text{рот}} + N_{\text{бар}} - N_{\text{скри}} = 0, \quad (6)$$

где $N_{\text{рот}}$ – мощность на роторе 1-го 2-го каскада, $N_{\text{бар}}$ – мощность на барабане 1-го 2-го каскада.

Мощность в каждом из контуров замкнутом двухкаскадной мельницы с индифферентной структурной группой будет определяться, как

$$N_{\text{зк}} = N_{\text{бар}} + N_{\text{рот}} \quad (7)$$

В результате такого способа подведения мощности к верхней и нижней его части столба измельчаемого материала в каждом каскаде приведёт к разным линейным скоростям слоёв частиц столба в его продольном сечении увеличению доли касательных напряжений между ними и возникновению дополнительного силового поля, в котором каждая движущаяся

частица будет подвержена дополнительному силовому воздействию (рис. 4).

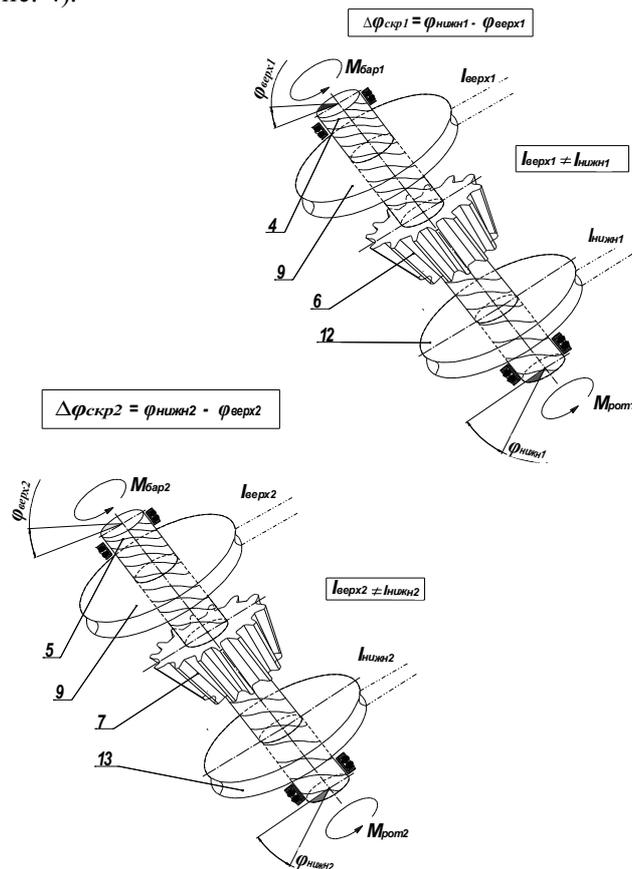


Рис. 3. Скручивание концов верхнего и нижнего вала в двухкаскадной мельнице динамического самоизмельчения при передаче разных по величине крутящих моментов по верхней и нижней ветви замкнутого контура: 4 – верхний вал; 5 – нижний вал; 6 – верхняя коническая шестерня; 7 – нижняя коническая шестерня; 8 – ведущий шкив привода верхнего барабана; 9 – ведущий шкив привода нижнего барабана; 12 – ведущий шкив привода верхнего ротора; 13 – ведущий шкив привода нижнего ротора

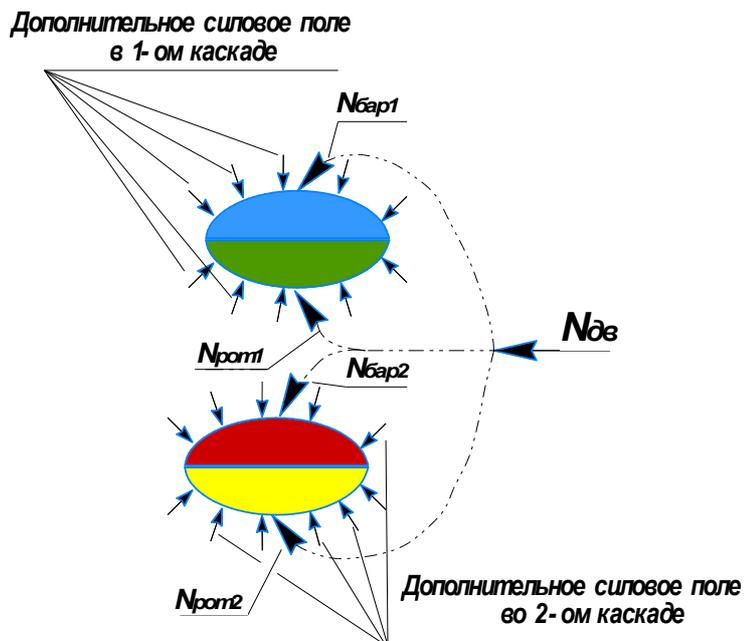


Рис. 4 Передача потоков мощности от приводного двигателя к измельчаемому материалу по верхней и нижней ветви замкнутого контура и образование дополнительных силовых полей в замкнутых контурах 1-го и 2-го каскада: $N_{дв}$ – мощность на валу приводного двигателя; $N_{бар1}$ – мощность, подводимая к верхней части столба верхнего барабана; $N_{рот1}$ – мощность подводимая к нижней части столба верхнего ротора; $N_{бар2}$ – мощность, подводимая к верхней части столба материала нижнего барабана; $N_{рот2}$ – мощность, подводимая к нижней части столба нижнего ротора

Для выяснения причин, приводящих к снижению энергозатрат, произведём анализ структурной схемы двухкаскадной мельницы динамического произведём её разбивку на группы Асура, что позволит произвести оценку роли каждого элемента структурной схемы на энергетические показатели процесса измельчения в двухкаскадной мельнице динамического самоизмельчения [19].

Для ведущего звена 3 (вала приводного двигателя с закреплённой на нём ведущим коническим колесом) имеющего один поводок и одну одноподвижную пару 5-го класса *A*, его подвижность составит по формуле П.Л. Чебышева

$$W_3 = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = +1$$

Для группы звеньев 1-го каскада *B-C-D*, имеющих два подвижных звена 4 и 6, а также три одноподвижные пары 5-го класса *B*, *C* и *D*, их подвижность составит

$$W_{BCD} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$$

Для группы звеньев *E-K-L*, имеющих два подвижных звена 10 и 23 и три одноподвижные

пары 5-го класса *E*, *K* и *L*, их подвижность составит

$$W_{EKL} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0.$$

Для группы звеньев *M-N*, имеющих одно подвижное звено 27, материал, находящийся в верхнем барабане 10 и соединяющий его с верхним ротором 14, которым является столб материала, находящийся в верхнем барабане 10 и две одноподвижные пары 5-го класса *M* и *N*, подвижность составит

$$W_{MN} = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 2 = -1.$$

Для группы звеньев 2-го каскада *B₁-C₁-D₁*, включающих два подвижных звена 5, 7 и три одноподвижные пары *B₁*, *C₁* и *D₁* 5-го класса, подвижность составит

$$W_{B_1C_1D_1} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0.$$

Для группы звеньев *L₁-K₁-E₁*, имеющих два подвижных звена 14 и 24, и три одноподвижные пары 5-го класса *L₁*, *K₁* и *E₁*,

$$W_{L_1K_1E_1} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0$$

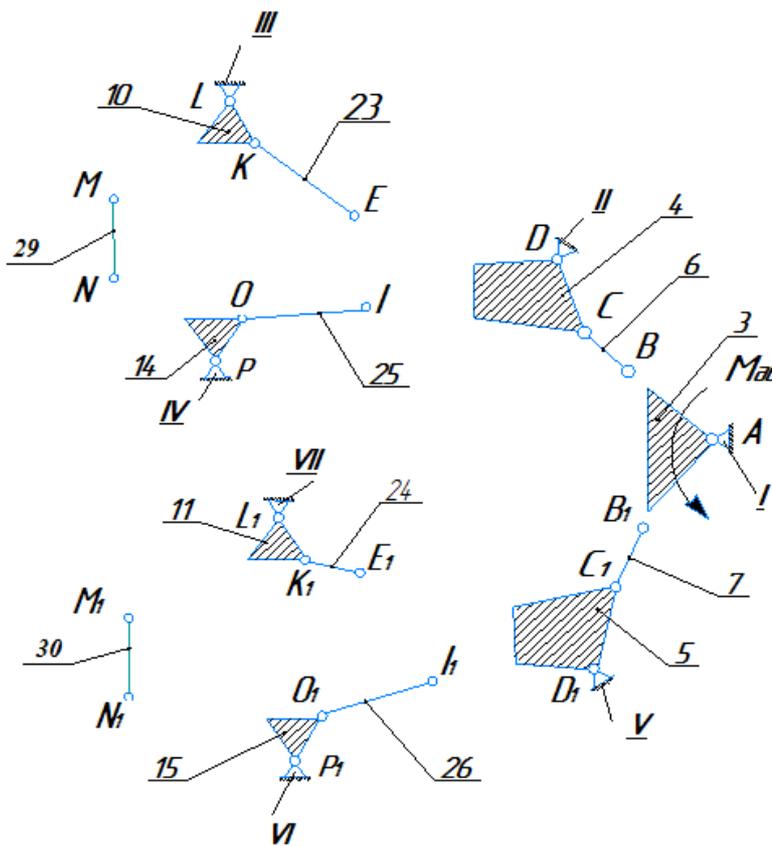


Рис. 5. Разбивка структурной схемы двухкаскадной динамического самоизмельчения мельницы на группы Асура: 3 – зубчатое коническое колесо (вал электродвигателя); 4 – верхний вал; 5 – нижний вал; 6 – зубчатая передача 1-го каскада; 7 – зубчатая передача 2-го каскада; 10 – верхний барабан; 11 – нижний барабан; 14 – верхний ротор; 15 – нижний ротор; 23 - верхнее гибкое звено 1-го каскада; 24 – верхнее гибкое звено 2-го каскада; 25 – нижнее гибкое звено 1-го каскада; 26 - нижнее гибкое звено 2-го каскада; 29 – столб материала в верхнем барабане; 30 – столб материала в нижнем барабане; I – VII – стойки подвижных звеньев 3, 4, 5 10 и 11

Для группы звеньев M_I-N_I , имеющих одно подвижное звено 28, материал, находящийся в нижнем барабане 11 и соединяющий его с нижним ротором 15, и две одноподвижные пары 5-го класса M_I и N_I , подвижность будет равна

$$W_{M_I N_I} = 2 \cdot 1 - 2 \cdot 2 = -1$$

Для группы звеньев $O_I-P_I-I_I$, имеющих два подвижных звена 15 и 24, и три одноподвижные пары 5-го класса O_I , P_I и I_I , степень подвижности будет равна

$$W_{O_I P_I I_I} = 3 \cdot 2 - 2 \cdot 3 = 0.$$

Общая степень подвижности мельницы двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения, имеющую индифферентную группу, будет определяться суммой степеней подвижности ведущего звена и группы звеньев, образующих группы Ассура, присоединённых к ведущему звену 3. Поэтому при условии двойного учёта ведущего звена 3, общая подвижность двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения составит

$$W_{\text{ов. каск}} = W_3 + W_{BCD} + W_{EKL} + W_{MN} + W_{B1C1D1} + W_{L1K1E1} + W_{M1N1} + W_{O1P1I1} = +1 + 0 + 0 + (-1) + 0 + 1 + 0 + 0 + (-1) + 0 = 0.$$

В этом случае мельница рассматриваемой системы будет иметь нулевую подвижность. Наличие в структурной схеме группы звеньев, имеющих отрицательную степень подвижности, которыми являются столбы измельчаемого материала 27 и 28, относит их к индифферентным механизмам, свойства которых отличаются от свойств механизмов, не имеющих в своей структуре таких групп и несмотря на нулевую степень

подвижности, эти механизмы не будут испытывать затруднений в движении его звеньев [20].

Энергоэффективность двухкаскадной мельницы с индифферентной структурной группой подтверждается экспериментальными исследованиями, проведёнными на опытном образце созданного образца вертикальной мельницы динамического самоизмельчения, структурная схема которой имеет индифферентную группу.

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости мощности в замкнутом контуре $N_{зк}$ и мощности, потреблённой из сети $N_{сети}$, при измельчении мергеля с исходной крупностью кусков $D_{ср}=30$ мм при проведении полнофакторного эксперимента на опытном образце мельницы системы «МКАД-1» при разных значениях конструктивных и режимных параметрах: кинематическом несоответствии ветвей замкнутого контура $I_{кн}$, высоты засыпки материалом над ротором $H_{сл}$ и диаметре выпускных отверстий в барабане $d_{вып}$ за период измельчения t_i , равным 180 с (0,05 ч), полученные в результате проведения полно факторного эксперимента [20].

Измерение мощности, потребляемой из сети $N_{сети}$, и мощности в замкнутом контуре $N_{зк}$, производилось на измерительном комплексе [21] на основе разработанной специальной программы [22].

Один из результатов опыта №17, полученного при измерении этих показателей процесса измельчения представлен на рис. 6.

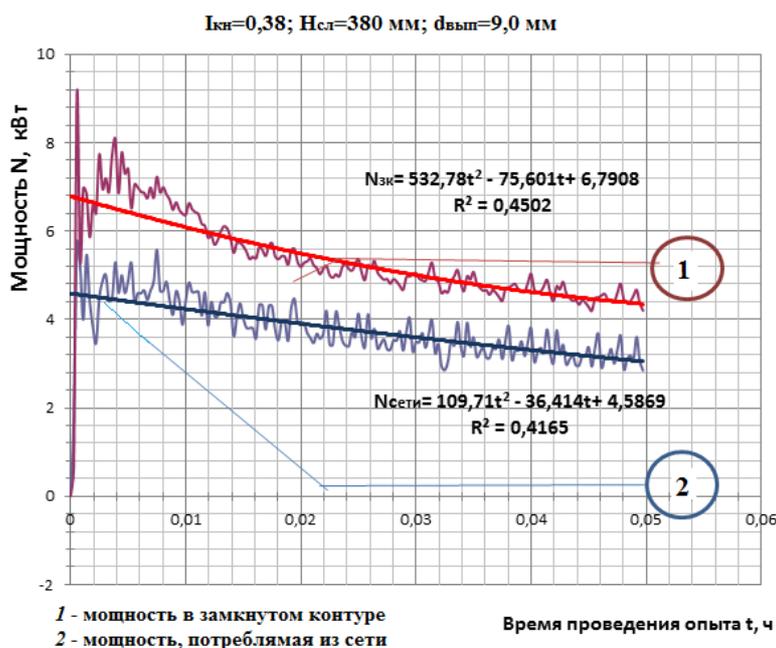


Рис. 6. Диаграмма измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения с индифферентной структурной группой:

$N_{зк}$ и мощности, потребляемой из сети $N_{сети}$ для опыта №18 при $i_{кн}=0,38, H_{сл}=380$ мм, $d_{вып}=9,0$ мм;

1 – мощность в замкнутом контуре; 2 – мощность, потребляемая из сети

Энергозатраты, потреблённой из сети энергии $E_{\text{сети}}$ и энергия замкнутого контура $E_{\text{зк}}$ материала в i -ом опыте за период измельчения t_i , вычислялась как

$$E_i = \int_0^{t_i} F(N_i) d(t), \text{ кДж} \quad (11)$$

Энергозатраты в замкнутом контуре вычисляются как

$$E_{\text{зк}i} = \int_0^{t_i} (N_{\text{зк}i} \cdot t_i) dt, \text{ кДж} \quad (12)$$

Относительная энергоэффективность двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» в сравнении с мельницами системы «МАЯ» в i -ом опыте определялась, как

$$\Delta E \% = \frac{E_{\text{зк}} - E_{\text{сети}}}{E_{\text{зк}}}, \% \quad (12)$$

Вычисление зависимостей энергии в замкнутом контуре $E_{\text{зк}}$ и энергии, потреблённой из сети $E_{\text{сети}}$ за период измельчения t , равным 180 с, производилось с помощью программы *MATCAD-14* и показало, что энергопотребление замкнутого контура двухкаскадной мельнице динамического самоизмельчения превышают мощность, потребляемую из сети, в приведённом опыте на 36,4 % в одном каскаде.

Полученные результаты эксперимента подтверждают, что наличие в структурной схеме вертикальной мельницы динамического самоизмельчения индифферентных групп позволяет использовать так называемую «циркулирующую» энергию для дополнительного силового воздействия на измельчаемый материал. Это приводит не только к росту производительности за счёт концентрации измельчительных операций в одной машине, но и к снижению энергопотребления на весьма значительную величину, что подтверждает их перспективу использования при создании машин нового поколения.

На основании выше изложенного, можно сделать следующий вывод – именно наличие в структурной схеме мельницы этой системы избыточного звена, которым являются столбы материала в барабанах, и имеющиеся отрицательную степень подвижности придают ей особое свойство, позволяющее снизить энергозатраты при измельчении, что подтверждается экспериментом.

Выводы.

1. Конструктивная схема двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения и технологический процесс измельчения, который может быть реализован при её использовании, является более прогрессивным в сравнении с применяемыми технологиями на современных

предприятиях по производству строительных материалов, что позволяет повысить производительность, снизить капитальные и эксплуатационные затраты.

2. Построение структурных схем двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения позволяет полезно использовать так называемую «циркулирующую» энергию в обоих каскадах для дополнительного силового воздействия на разрушаемые частицы, что способствует снижению энергозатрат.

3. Конструктивные схемы двухкаскадных мельниц динамического самоизмельчения являются перспективным направлением в совершенствовании технологии измельчения материалов, так как в них реализован принцип концентрации измельчительных операций в одной машине, и позволяет получить готовый продукт за один проход материала от точки загрузки до точки, определяемой уровнем заполнения приёмной ёмкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Приказ Минрегиона РФ от 30.05.2011 № 262 «Об утверждении Стратегии развития промышленности строительных материалов и индустриального домостроения на период до 2020 года».
2. Пат. на изобретение №2465960 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения/ Дровников А. Н., Остановский А.А., Никитин Е.В., Павлов И.А, Осипенко Л.А., Агафонов Н.А.; Заявка: 2011106231/13, заявл.17.02.2011; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)", опубл. 10.11 2012 г. Бюл. №31. 5 с.
3. Пат. на изобретение № 2496581 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Мельница/ Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Бурков Н.В., Романенко Г.Н.; Заявка: 2012124864/13, заявл. 14.06.2012; Патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный технический университет. (Новочеркасский политехнический институт)" (RU), Опубл. 10.11 2012 г., Бюл. №31. 5 с.
4. Пат. на изобретение №2520008 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Измельчитель динамического самоизмельчения материала/ Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Рыбальченко А.Н.; 2013105689/13; заявл. 11.02.

2013; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"), опублик. 20.06.2014 г., Бюл. №17. 4 с.

5. Дровников А. Н., Остановский А. А. Создание измельчителя динамического самоизмельчения. // Инженерный вестник Дона. Номер 3. 2012. С. 5–6.

6. Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы вертикальной мельницы динамического самоизмельчения // Известия Высших учебных заведений Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2018. № 1. С.66-73

7. Пат. на полезную модель №122912 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Двухдвигательный двухкаскадный измельчитель динамического самоизмельчения. Дровников А.Н., Остановский А.А., Никитин Е.В., Маслов Е.В., Бурков Н.В., Агафонов И.Н. Туркеничева Л.А. Заявка: 2012124859/13, заявл. 14.06.2012. Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"), опублик. 20.12.2012, Бюл. № 3. 4 с.

8. Пат. на полезную модель №139718 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Двухдвигательный двухкаскадный измельчитель материала /Дровников А.Н., Остановский А.А., Маслов Е.В., Маторин А.С. Заявка: 2013112411/13, заявл. 19.03.2013; Патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса" (ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС"), опублик. 20.04.2014, Бюл. № 11 - 4 с.

9. Пат. на изобретение №2577631 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Двухкаскадный измельчитель материала/ Остановский А.А., Дровников А.Н., Маслов Е.В., Диброва Г.Д., Мицик М.Ф., Осипенко Л. А., Лозовой А. В.; заявка 2014144581/13, заявл 05.11.2014; Патентообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Донской государственный технический университет" (ДГТУ), опублик.20.03.2016, Бюл. № 8 – 5 с.

10. Дровников А.Н. Индифферентные структуры механизмов и машин. – Ростов-на-Дону: Изд-во «Пегас», 1999. -136 с.

11. Остановский А. А. Особенности рабочего процесса измельчения в мельнице динамического самоизмельчения системы «МКАД» // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. №9. 2017. С. 137–146.

12. Крайнев А. Ф. Словарь-справочник по механизмам. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1987. С.-560.

13. Каменев С.И., Болотовский И.А. О циркулирующей мощности в замкнутых дифференциальных механизмах. В кн. Теория механизмов и детали машин, Уфа, 1974. вып. 1. с. 114 – 117.

14. Системы мельниц динамического самоизмельчения контурного типа: монография. Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М. И. Платова. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2018. 183 с.

15. Тайнов А.И. Основы теории структуры механизмов. Минск: Изд-во Белорус. политех. ин-та, 1959. 200 с.

16. Гегелашвили М.В., Хетагуров В.Н. К определению скорости слоёв измельчаемого материала в мельнице МАЯ / Сев.- Осет. гос. ун-т. Сев.-Кавк. горно-металлург. ин-т. Орджоникидзе. 1989. 11с Деп. в ЦНИИЭИцветмет. 9.10.89. № 1878-89 Деп.

18. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Изд-во «Наука», главная редакция физико-математической литературы, Москва, 1971. 929 с.

19. Ассур Л.В. Исследование плоских стержневых механизмов с низшими парами с точки зрения их структуры и классификации. М., 1952. 529 с.

20. Дровников А.Н. Неассуровы структуры механизмов и машин. Ростов-на-Дону: Изд-во «Пегас», 2000. 108 с.

21. Остановский А. А., Маслов Е. В. К определению производительности и удельных энергозатрат в вертикальной мельнице динамического самоизмельчения с силовым замкнутым контуром // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. 2015. №3. С. 59–67 .

22. Пат. на полезную модель №175743 РФ, МПК GOIL 3/24. Стенд для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения. Остановский А. А., Дровников А.Н., Рыбальченко Н.Г., Рыбальченко А.Н., Черкесова Э.Ю; заявл. 13.12.2016, заявитель и патентообладатель Остановский А.А., опублик. 23.05.2018, Бюл. №15.

23. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018661841 «Программа расчёта угла скручивания вала электромеханической системы стенда для измерения

мощности в замкнутом контуре мельницы динамического самоизмельчения». Остановский А.А., Алехин А.С., Козырев П.П., Шейрих В.С.; заявл. 14.06.2018, заявитель и патентообладатель

«Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ); зарегистрировано 19.09.2018 года.

Информация об авторах

Остановский Александр Аркадьевич, кандидат технических наук, доцент, главный инженер. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. ООО «Оптимастрой», Россия, 141130 г. Руза, Московской области, улица Школьная, дом 28.

Поступила в ноябре 2018 г.

© Остановский А.А., 2019

^{1,}Ostanovsky A.A.*

¹LLC "Optimastroy"

Russia, 141130, Ruza, Moscow Region, Shkolnaya St. 28

**E-mail: ostanovskiy51@mail.ru*

ANALYSIS AND SELECTION OF RATIONAL STRUCTURAL SCHEME OF TWO-STAGE DYNAMIC SELF-GRINDING MILLS

Abstract. *The article substantiates the importance of improving the grinding process of mineral materials based on the use of advanced grinding equipment, which allows to increase productivity and to reduce energy consumption. The use of two-stage dynamic self-grinding mills is one of the ways to achieve this goal. They have a number of technical advantages in comparison with currently known mills of "MAYA" system. In addition to the kinetic energy of rotating rotor, they use the so-called "circulating" energy of the closed loop, resulting from the implementation of closed loop branches with kinematic discrepancy. As a result, an additional force interaction of circulating particles and a decrease in energy consumption arises. The need to build their structural schemes using indifferent groups that provide mills with special properties is justified. The article presents an analytical study of the structural schemes of two-stage mills in different systems. Their presence in the structural schemes of the mill leads to the emergence of "circulation" of energy and shows the nature of its formation. The results of energy consumption measurement during the crushing of marl in mills with indifferent structural groups are presented, confirming the possibility of beneficial use of essentially free energy to increase the energy efficiency of grinding material.*

Keywords: *grinder, energy consumption, self-grinding, kinetic energy, potential energy, circulating energy, structural diagram, indifferent group, link, stand, closed loop, kinematic discrepancy, rotor, drum.*

REFERENCES

1. Order of the Ministry of Regional Development of the Russian Federation of 30.05.2011 № 262 "On approval of the Strategy for the development of the industry of building materials and industrial housing for the period up to 2020 year.
2. Drovnikov A.N, Ostanovsky A.A, Pavlov I.A, Osipenko L.A, Agafonov N.A Dynamic self-shredder. Pat. for invention of the Russian Federation, No. 2465960, 2012.
3. Drovnikov A.N, Ostanovsky A.A, Maslov E.V., Burkov N.V, Romanenko G.N. Mill. Pat. for invention of the Russian Federation, no 2496581, 2012.
4. Drovnikov A.N, Ostanovsky A.A, Maslov E.V, Rybalchenko A.N. Shredder for dynamic self-reduction of material. Pat. for invention of the Russian Federation, no 2520008, 2014.
5. Drovnikov A.N., Ostanovsky A.A. Creation of a grinder for dynamic self-reduction. The Journal of the Engineering Herald of the Don, 2012, no. 3, pp. 5–6.
6. Ostanovsky A.A. Analysis and selection of a rational structural scheme of the vertical mill of dynamic self-crushing. News of Higher Educational Establishments. North-Caucasian region. Technical science, 2018, no. 1, pp. 66–73.
7. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Nikitin E.V., Maslov E.V., Burkov N.V., Agafonov I.N. Turkenicheva L.A. Two-motor two-stage chopper for dynamic autogenous grinding. Pat for utility model of the Russian Federation, no. 22912, 2012.
8. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A., Maslov E.V., Matorin A.S. Twin-engine, two-stage material grinder. Pat for utility model of the Russian Federation, no. 139718, 2012.
9. Ostanovskiy A.A, Drovnikov A.N., Maslov E.V, Dibrova G.D. Mitsik M.F, Osipenko L.A.,

Lozovoi A.V. Two-stage grinder material. Pat. for invention of the Russian Federation, no 2577631, 2016.

10. Drovnikov A.N. Indifferent structures of mechanisms and machines. Rostov-on-Don: Pegas Publishing House. 1999, 136 p.

11. Ostanovskiy A.A. Features of the grinding process in the mill dynamic autogenous grinding system "MKAD". Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, no. 9, 2017, pp. 137–146.

12. Drovnikov A.N. Nonassouri structures of mechanisms and machines. Rostov-on-Don: Pegas Publishing House. 2000, 108 p.

13. Kraynev A.F. Dictionary-reference book on mechanisms. - 2nd ed. reclaiming and add. - M.: Mashinostroenie. 1987, P.560.

14. Systems of mills of dynamic self-grinding contour type: monograph/ Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI). Novocheerkassk: YuRSPU (NPI). 2018, 183 p.

15. Tynov A.I. Fundamentals of the theory of the structure of mechanisms. Minsk: Belarusian publishing house. Polytechnic. Inst.. 1959, 200 p.

16. Gegelashvili M. V. Determination of the limits of the speeds of movement of the material in the MAY dynamic self-grinding mill. Mechanisms and machines of percussion, periodic and vibration action. Mater. Int. simp (Eagle, 22-24 Nov. 2000) Eagle OPU. 2000, pp. 245–249.

18. Yavorsky B.M., Detlaf A.A. Handbook of physics for engineers and university students. Publishing house "Science", the main edition of the physical and mathematical literature, Moscow. 1971, 929 p.

Information about the authors

Ostanovsky, Alexander. A. PhD, Assistant professor, chief engineer. E-mail: ostanovskiy51@mail.ru. LLC "Optimastroy". Russia, 141130, Ruza, Moscow Region, st. Shkolnaya 28.

Received in December 2018

Для цитирования:

Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы двухкаскадной мельницы динамического самоизмельчения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2019. №1. С. 130–141. DOI: 10.12737/article_5c506253855313.91225812

For citation:

Ostanovsky A.A. Analysis and selection of rational structural scheme of two-stage dynamic self-grinding mills. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov, 2019, no. 1, pp. 130–141. DOI: 10.12737/article_5c506253855313.91225812

19. Assur L.V. Investigation of flat rod mechanisms with lower pairs in terms of their structure and classification. M.. 1952, 529 p.

20. Drovnikov A.N., Ostanovskiy A.A. Systems of mills of dynamic self-grinding of the contour type: monograph. South-Russian State Impact Polytechnic University (NPI) named after MI Platov. Novocheerkassk: SRSPU (NPI). 2017, 183 c.

21. Ostanovsky A.A., Maslov E.V. To the definition of productivity and specific energy consumption in a vertical mill of dynamic self-reduction with a power closed loop. Izvestiya higher educational institutions. North - Caucasian region ", no. 3, February, 2015, pp. 59–67.

22. Ostanovskiy A.A., Drovnikov A.N., Rybal'chenko N.G., Rybal'chenko A.N., Cherkesova E.U. Stand for measuring power in a closed loop of a dynamic autogenous grinding mill. Pat for utility model of the Russian Federation, no 175753, 2018, Bull, no. 15, 6 p.

23. Certificate of state registration of computer programs № 2018661841. "The program for calculating the angle of twist of the shaft of the electromechanical system of the stand for measuring power in a closed loop of a dynamic self-grinding mill." Ostanovskiy A.A., Alekhin A.S., Kozyrev P.P., Sheirich V.S. Application: 2018616246, claimed. 14.06.2018; Registered in the registry of computer programs 19.09 2018. The patentee: Federal State Budget Educational Institution of Higher Professional Education "Don State Technical University" (DSTU).