

DOI: 10.12737/article_59a93b0b0d37b4.87668076

*Остановский А.А., канд. техн. наук, доц.
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)
Донского государственного технического университета*

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ В МЕЛЬНИЦЕ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СИСТЕМЫ «МКАД»

ostanovskiy51@mail. ru

Приведён баланс энергозатрат при измельчении материалов и актуальность решения задачи по снижению энергопотребления. Для решения этой задачи предложено использовать мельницу динамического самоизмельчения, структура которой имеет замкнутый контур, в которой для разрушения частиц кроме кинетической энергии используется так называемая «циркулирующая» мощность. Приведены полученные экспериментальным путём диаграммы замера мощности в замкнутом контуре и потреблённой из сети, показывающие энергоэффективность мельниц системы «МКАД»

Ключевые слова: энергопотребление, мельница, самоизмельчение, структура механизма, конструктивная схема, замкнутый контур, кинематическое несоответствие, крутящий момент, мощность.

Поиск новых направлений в области создания измельчительного оборудования, отвечающим современным требованиям производства является актуальной задачей развития передовых развитых стран на ближайшую перспективу.

Это задача в полной мере относится к производству строительных материалов. Здесь с целью повышения конкурентоспособности выпускаемой продукции в ближайшее время необходимо провести переоснащение производств измельчительным оборудованием с улучшенными техническими характеристиками, созданных на основе передовых научных исследований в области теории измельчения [1].

В последнее время достигнуты определенные успехи в понимании теории измельчения. Исследования показывают, что расход энергии в дробильно-размольных машинах на фракционирование колеблется в пределах 1–17 % от общего расхода [2, 3]. Остальная, т. е. большая часть энергии тратится на деформацию приводных и рабочих элементов машин, трение между движущимися кусками и частицами, а также на отделение частичек металла от поверхности рабочих элементов измельчительного оборудования (рис. 1).

Несмотря на сложности при создании принципиально нового измельчительного оборудования в настоящее время многими научными школами ведутся исследования по снижению на них энергопотребления.

Важнейшая роль в достижении этой задачи принадлежит широко известной Северо-Кавказской научной школе, где были разработаны новые способы измельчения и созданные на его основе целая серия вертикальных мельниц динамиче-

ского самоизмельчения системы «МАЯ». Как известно, в них реализуется способ самоизмельчения, заключающийся в том, что нижнюю столба, находящегося в неподвижном цилиндрическом барабане, вращают с окружной скоростью 10–70 м/с, а давление материала на нижнюю часть столба со стороны верхних слоёв поддерживают равным $0,05 \div 0,15$ МПа [4–6].

Сущность работы мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ» заключается в следующем. В неподвижном цилиндрическом корпусе K формируется слой измельчаемого материала над чашеобразным полым ротором P , внутреннее пространство которого разделено на секции радиальными ребрами R (рис. 2, а).



Рис. 1. Диаграмма баланса энергозатрат при измельчении материала

Ребра предназначены для разгона измельчаемых кусков и частиц материала и сообщения им кинетической энергии, достаточной для преодоления сопротивления вышележащих слоев. Куски материала вытесняются из ротора в зону активного измельчения *ЗАИ*, расположенную непосредственно над рабочим органом. В зоне активного измельчения *ЗАИ* происходит разрушение частиц материала за счет скалывания и истирания в стесненных условиях при непрерывной

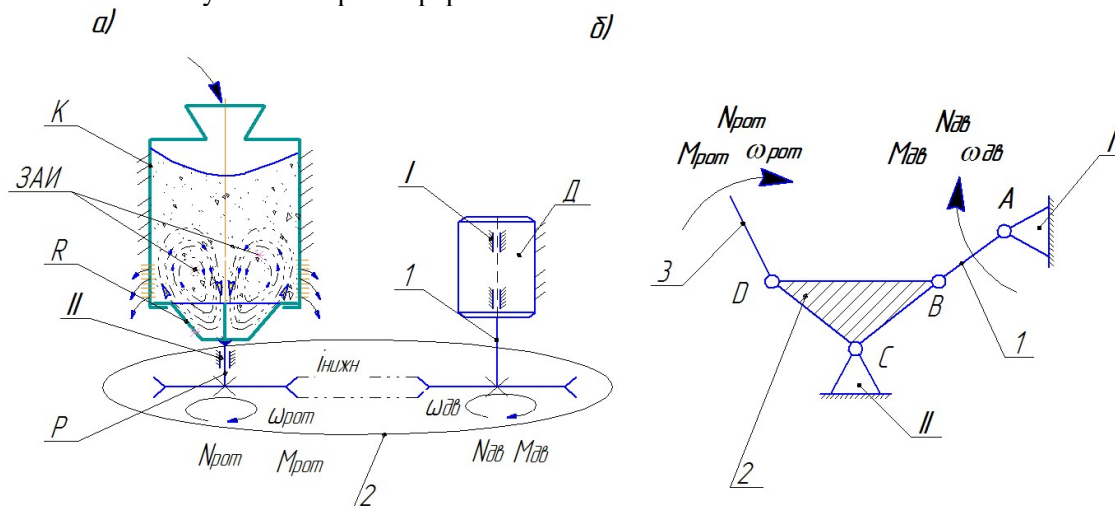


Рис. 2. Конструктивная и структурная схема мельницы системы «МАЯ»:

- а) конструктивная схема: *Д* – электродвигатель; *К* – корпус; *Р* – ротор; *Р* – ребро; *ЗАИ* – зона активного измельчения; *1* – вал электродвигателя; *2* – кинематическая передача; *3* – вал ротора;
 б) структурная схема: *I* – стойка двигателя; *II* – стойка ротора; *1* – ведущее звено (вал электродвигателя); *2* – трехзубное ведомое звено (кинематическая передача); *3* – ведомое звено (ротор)

Вместе с тем, опыт эксплуатации мельниц системы «МАЯ» показал, что они достигли предельных значений по производительности и энергопотреблению. Это объясняется тем, что в основе их конструкций используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от её угловой скорости, которая не может превышать некоторого критического значения [7].

Поэтому в настоящее время исследования мельниц системы «МАЯ» проводятся в направлении повышения их надёжности, работоспособности и ремонтпригодности [8, 9].

Одним из альтернативных технических решений, позволяющих снизить энергопотребление при измельчении материала, могут стать мельницы системы «МКАД», кинематическая цепь которых имеет замкнутый контур [10–13].

Построение на этой основе структурной схемы мельниц позволяет за счёт выполнения верхней и нижней ветви замкнутого с кинематическим несоответствием, возникновению так называемой «циркулирующей» энергии [14]. Это позволяет для разрушения кусков и частиц, циркулирующих внутри цилиндрического барабана, использовать не только кинетическую энергию

циркуляции материала в вертикальном направлении, что обеспечивает постоянное его обновление в зоне *ЗАИ*. Продукты размола могут разгружаться либо через кольцевой зазор, либо через колосниковые решетки, которые могут быть смонтированы либо в стенки боковой поверхности ротора *Р*, либо в стенки неподвижного корпуса *К*.

вращающегося ротора, но и мощность замкнутого контура.

Эта особенность выдвигает задачу в анализе причин, приводящих к снижению энергозатрат при одной и той же установленной мощности приводного двигателя и её отличие от аналогичного процесса измельчения в мельницах системы «МАЯ».

Проведём анализ и структурных схем мельниц системы «МАЯ» и «МКАД» (рис. 2, 3).

Структурная схема мельницы системы «МАЯ» (рис. рис. 2.1,б) включает ведущее звено *1*, связанное с помощью гибкой кинематической передачи *2* (поводком) с ведомым исполнительным звеном *3* – ротором, приводящем в движение по тороидальной траектории измельчаемый материал.

Передача крутящего момента $M_{дв}$ от ведущего звена (вала) электродвигателя *Д* производится по нижней ветви кинематической передачи *2* на ведомое (исполнительное) звено *3*, которым является ротор *Р*.

Степень подвижности мельницы системы «МАЯ», при трёх подвижных звеньях *1*, *2* и *3* и четырёх одноподвижных парах *А*, *В*, *С* и *Д* определится по формуле П. В. Чебышева, как

$$W = 3n - 2p_5 = 3 \cdot 3 - 2 \cdot 4 = +1 \quad (1)$$

где $n=3$ – число подвижных звеньев; $p_5=4$ – количество одноподвижных пар в механизме.

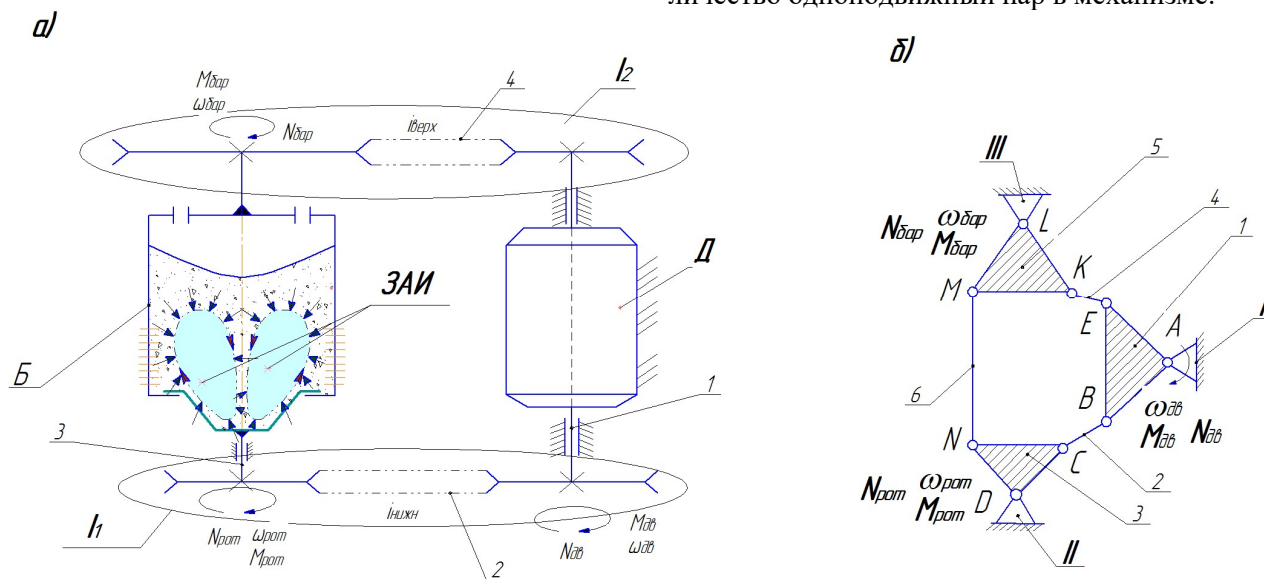


Рис. 3. Конструктивная и структурная схема мельницы системы «МКАД»:

- а) конструктивная схема: D – электродвигатель; P – ротор; B – барабан; HB – нижняя ветвь замкнутого контура; BB – верхняя ветвь замкнутого контура;
- б) структурная схема: 1 – ведущее звено (вал электродвигателя); 2 – нижнее гибкое звено; 3 – ведомое звено (ротор); 4 – верхнее гибкое звено; 5 – ведомое звено (барабан); 6 – ведомое звено (столб сыпучего материала в мельнице)

Мощность на ведомом звене 3 (роторе P), передаваемая от ведущего звена 1 (вала электродвигателя), определится из выражения

$$N_{рот} = M_{рот} \cdot \omega_{рот} \cdot i_{нижн}, \quad (2)$$

где $M_{рот}$ – крутящий момент на ведомом звене 1; $\omega_{рот}$ – угловая скорость ведомого звена 1 (ротора); $i_{нижн}$ – передаточное отношение кинематической передачи от ведущего звена 1 к ведомому звену 3.

Анализ зависимости (2) показывает, что интенсификацию процесса измельчения при установившейся мощности электродвигателя можно обеспечить в мельнице системы «МАЯ» за счёт увеличения угловой скорости ведомого звена 3, которое является адаптивным по отношению к ведущему звену 1.

Как известно, процесс самоизмельчения оптимально может протекать только при установлении определенных режимных параметров мельницы этой системы – угловой скорости ротора 3 [4]. Её превышение, хотя и приведет к увеличению мощности на роторе 3, то на производительность мельницы это существенно не повлияет из-за неудовлетворительного протекания процесса самоизмельчения при превышении критического значения угловой скорости – $\omega_{крит}$.

Поэтому в структурной схеме вертикальной мельницы системы «МАЯ» не имеется источника дополнительной энергии для обеспечения интенсификации процесса.

Отличительной особенностью вертикальных мельниц динамического самоизмельчения системы «МКАД» является то, что её кинематическая цепь имеет замкнутый контур.

Конструктивная схема вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД», представленная на рис. 4,а, включает в себя электродвигатель D , имеющий два выходных конца вала, которые с помощью кинематических передач нижней I_1 и верхней I_2 ветви связаны с ротором P подвижным барабаном B . Его конструктивная схема выполнена таким образом, что передаточные отношения верхней и нижней ветви не равны между собой, т. е. $i_{нижн} \neq i_{верхн}$, а угловая скорость ротора P превышает угловую скорость барабана B , т. е. $\omega_{рот} > \omega_{бар}$.

Кинематическая цепь мельницы этой системы имеет замкнутый контур, образуемый нижним концом вала электродвигателя 1 (ведущее звено), гибкой связью 2 (клиноременной, цепной или другого типа передач), ведомым звеном 3 (ротором), ведомым звеном 6 (сыпучим материалом), ведомым звеном 5 (цилиндрическим барабаном), гибкой связью 4 (клиноременной, цепной или другого типа передач) и верхним концом вала ведущего звена 1 (приводного двигателя).

При этом ведомое звено 6 одновременно связано с ведомыми звеньями 3 и 5, т. е. с ротором и барабаном. Это приводит к тому, что при пере-

даче потока мощности от вала приводного двигателя 1 к ведомому звену 6 (столбу сыпучему материалу) по ветвям замкнутого контура будет происходить разъединение и вновь их соединение (замыкание) на столбе измельчаемого материала.

Таким образом, в нашем случае имеет место приложение к звену 6 определённых усилий, передаваемых к нему по верхней и нижней ветви замкнутого контура разных по величине крутящих моментов, создающих в этом звене деформацию (скручивание).

Следовательно, избыточное звено 6 позволяет образовывать замкнутый контур в мельнице этой системы.

Для анализа структурной схемы мельницы системы «МКАД» согласно [15] разобьём её на группы Ассура. Согласно Ассуру – Артоболевскому любой механизм можно образовать путём последовательного присоединения к ведущему звену (или ведущим звеньям) и к стойке кинематических цепей с нулевой степенью подвижности. На рис. 4 представлена структурная схема мельницы системы «МКАД», которая разбита на группы Ассура.

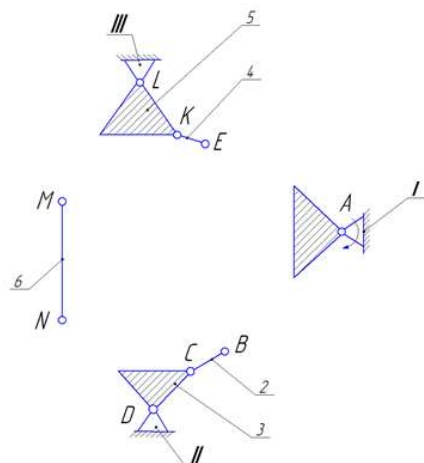


Рис. 4. Разбивка структурной схемы мельницы системы «МКАД» на группы Ассура

Для ведущего звена 1(A), имеющего один поводок и одну одноподвижную связь 5-го класса его подвижность определится по формуле П. В. Чебышева

$$W_{BCD} = 3 \cdot 1 - 2 \cdot 1 = +1$$

Для ассуровой группы звеньев В-С-D (группы ротора), имеющей два подвижных звена 1 и 2, а также три одноподвижные связи 5-го класса

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

Для ассуровой группы звеньев В-С-D (группы барабана), имеющей также два подвижных звена 4, 5, а также три одноподвижные связи 5-го класса группы барабана

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

Для ассуровой группы - звена М-N (столб материала, связывающего подвижные звенья 3 и 5), имеющей одно подвижное звено 6, а также две одноподвижные связи 5-го класса М и N

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

Общая степень подвижности мельницы системы «МКАД», имеющей один замкнутый контур, будет определяться суммой степени подвижности ведущего звена и группы звеньев, образующих группы Ассура и составит

$$W_{MKAD} = +1 + 0 + 0 + (-1) = 0$$

Таким образом, мельница системы «МКАД» будет иметь нулевую подвижность.

Как отмечено ранее, передача потока мощности по ветвям замкнутого контура, которые позволяют производить разъединение и соединение разных по величине потоков мощности, что достигается за счёт выполнения этих ветвей с кинематическим несоответствием, т. е. когда передаточные отношения ветвей не равны между собой $I_{\text{верх}} \neq I_{\text{нижн}}$.

Отличие принципа разрушения материала частиц в мельнице системы «МКАД» от мельницы системы «МАЯ» состоит в том, что в ней помимо использования для разрушения их используется не только кинетическая энергия вращающегося ротора, который придаёт им движение по тороидальной траектории, но и потенциальная энергия скрученного на определённую величину вала приводного двигателя в поперечном сечении (рис. 5).

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

$$\Delta\varphi_{\text{скр}i} = \varphi_{\text{нижн}i} - \varphi_{\text{верх}i}, \text{ рад} \quad (3)$$

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

Мощность, возникающая при скручивании вала приводного двигателя $N_{скр}$, можно определить как

$$N_{скрi} = \int_0^t M_{скрi} \cdot d(t_i) \cdot \omega_i, Bm \quad (4)$$

где $M_{скрi}$ – момент, возникающий из-за скручивания вала в результате выполнения кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура; t_i – период измельчения, с; ω_i – угловая скорость вала в i -й момент времени, рад/с.

При увеличении величины скручивания концов вала будет возрастать его потенциальная энергия, вызванная деформацией кристаллической решётки материала вала (сталь 35ХГСА) и сдвига молекул в ней, приводящей к увеличению межмолекулярных сил, которые существуют в кристаллах. Без приложения внешних усилий, межмолекулярные силы находятся в равновесии, но за счёт скручивания вала, кристаллическая решётка начнёт деформироваться, равновесие сил нарушится, и эти силы начнут проявляться в зависимости от деформации вала [16], обеспечивая дополнительное силовое взаимодействие частиц, которое будет сопровождаться интенсивным их разрушением в единицу времени и снижением энергопотребления.

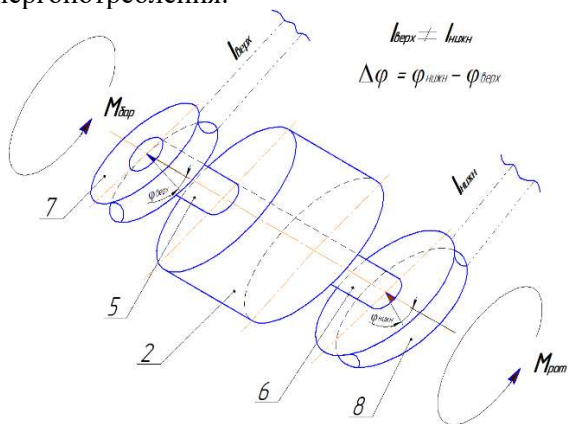


Рис. 5. Скручивание концов вала приводного двигателя в мельнице системы «МКАД» при передаче разных по величине потоков мощности (моментов) по верхней и нижней ветви замкнутого контура: 1 – вал приводного двигателя; 2 – барабан; 3 – верхний конец вала; 4 – нижний конец вала; 5 – приводной шкив верхней ветви клиноременной передачи; 6 – приводной шкив нижней ветви клиноременной передачи

В свою очередь момент, возникающий из-за скручивания концов вала, определится из соотношения

$$M_i = \frac{\Delta\varphi_i \cdot [\varepsilon] \cdot J_p}{l}, H \cdot m \quad (5)$$

где l – длина вала электродвигателя, м; $[\varepsilon]$ – модуль сдвига для материала вала электродвигателя, МПа/м; J_p – полярный момент инерции вала электродвигателя, m^4 .

$$J_p = \frac{\Delta\varphi_i \cdot d_{cp}^2}{32}, m^4 \quad (6)$$

где d_{cp} – средний диаметр вала приводного двигателя, м.

Таким образом, мощность замкнутого контура $N_{зкi}$ будет равна сумме мощностей, подводимой к ротору $N_{рот}$ и барабану $N_{бар}$ и уравновешенной мощностью, необходимой для скручивания концов вала приводного двигателя на некоторую величину, определяемую их разностью – $\Delta\varphi_i$:

$$N_{рот} + N_{бар} - N_{скр} = 0, \quad (7)$$

где $N_{рот}$ – мощность на роторе, $N_{бар}$ – мощность на барабане.

Мощность в замкнутом контуре мельницы будет определяться, как

$$N_{зк} = N_{бар} + N_{рот}, \quad (8)$$

В результате такого способа передачи мощности от приводного двигателя по ветвям замкнутого контура к столбу измельчаемого материала приводится в движение не только нижняя часть столба, но его верхняя часть за счёт вращения барабана. Это приведёт к тому, что внутри барабана в движении будет участвовать значительно большее количество частиц, чем это происходит при неподвижном барабане. За счёт вовлечения в движение частиц верхней части столба будет происходить заполнение перемещающимися частицами всей полости барабана, что позволит снизить объём застойных зон и увеличить их интенсивность взаимодействия между собой. Разность линейных скоростей частиц в верхней и нижней части столба при их соприкосновении приведёт к увеличению доли касательной составляющей от суммарного (дополнительного) напряжения между ними и возникновению дополнительного силового поля, в котором в каждой точке пространства каждая частица будет подвержена дополнительному силовому воздействию (рис. 6).

Поэтому интенсивность разрушения в единицу времени будет возрастать, а энергозатраты будут снижаться в сравнении с мельницами системы «МАЯ», в которых вращается только нижний ротор при тех же режимных и конструктивных параметрах, при которых выполнялись экспериментальные исследования на мельницах системы «МАЯ».

Поэтому с точки зрения энергоэффективности при измельчении материала мельницы системы «МКАД» имеют существенные преимущества с мельницами системы «МАЯ», что выдвигает задачу экспериментальным путём подтвердить этот вывод.

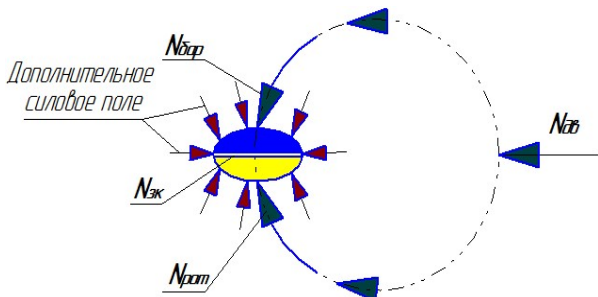


Рис. 6. Передача потока мощности от приводного двигателя к измельчаемому материалу по верхней и нижней ветви замкнутого контура:

$N_{дв}$ – мощность на валу приводного двигателя;
 $N_{рот}$ – поток мощности, подводимый к нижней части столба; $N_{бар}$ – поток мощности, подводимая к верхней части столба измельчаемого материала

Для мельницы системы «МКАД» подведение крутящего момента к столбу измельчаемого материала осуществляется путем его подвода по нижней 6 и верхней 5 ветви замкнутого контура. Этим обеспечивается одновременное вращение в одном направлении нижнего ротора и барабана.

Конструктивная схема мельницы с замкнутым контуром выполнена таким образом, что передаточные отношения в верхней и нижней ветви не равны между собой, т. е. $i_{верх} \neq i_{нижн}$. При этом вращение барабана происходит в том же направлении, как и у чашеобразного ротора, но угловая

скорость вращения ротора 4 превышает угловую скорость вращения барабана 5, т. е. $\omega_{рот} > \omega_{бар}$. При этом разность между частотами вращения чашеобразного ротора и барабана находится в пределах $\Delta n = n_{рот} - n_{бар} = 300 \div 400$ об/мин.

Это позволит обеспечить движение частиц в полости барабана по тороидальной траектории, при которой осуществляется режим самоизмельчения, которого разработана соответствующая теория и создан математический аппарат, достаточно точно описывающий массовые и силовые показатели процесса самоизмельчения [17].

В мельнице разработанной конструктивной схемы с помощью специальной программы производится одновременное фиксирование мгновенного числа оборотов верхнего 5 и нижнего 6 конца вала 4, электродвигателя при передаче разных по величине крутящих моментов по нижней и верхней ветвям замкнутого контура. При этом верхний 5 и нижний 6 концы вала электродвигателя будут совершать разное число оборотов за фиксированный период времени t_i .

На дисплей электронно-вычислительного блока 3 выводится информация о направлении счета первого (нижнего) 1 и второго (верхнего) 2 датчиков угловых перемещений, количество подсчитанных импульсов, разность показаний углов скручивания концов вала электродвигателя $\Delta\varphi$, число оборотов двигателя – $n_{дв}$, также частота вращения нижнего и верхнего конца вала (рис. 7).

В этот же период производится фиксирование силы тока I_i и напряжения U_i . Зафиксированные результаты измерения выводятся на экран ЭВМ 32.

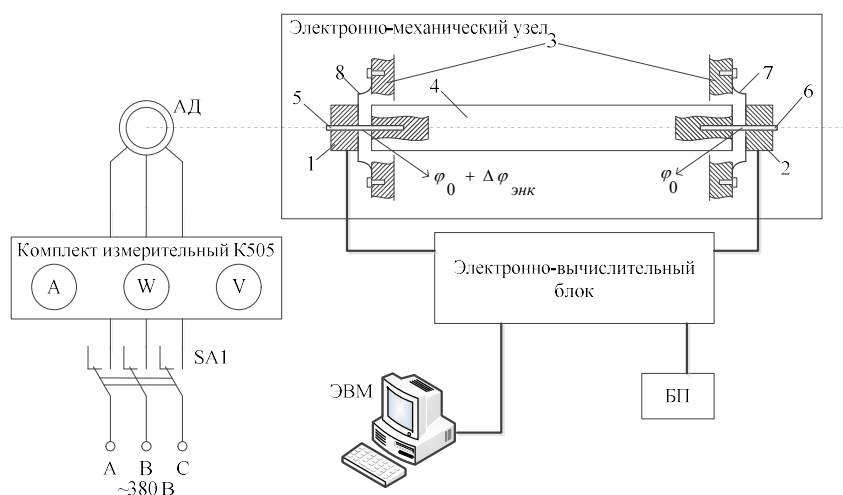


Рис. 7. Структура экспериментальной установки для измерения разности углов скручивания концов вала приводного двигателя $\Delta\varphi$:

1 – верхний датчик угловых перемещений нижнего конца вала; 2 – нижний датчик угловых перемещений нижнего конца вала; 3 – лапка датчика; 4 – вал приводного двигателя; 5 – верхняя соединительная шпилька; 6 – нижняя соединительная шпилька; 7, 8 – установочные кронштейны

Для измерения мощности в замкнутом контуре мельницы $N_{зк}$ используется методика косвенного измерения мощности, основанная на вычислении выражения:

$$N_{зк} = M_{дв} \cdot \Delta\varphi_{скр} \cdot k_{тар} \cdot k_{пер} \cdot \omega_{дв}, \quad (9)$$

где $\Delta\varphi$ – разность углов скручивания концов вала электродвигателя, рад; $k_{тар}$ – коэффициент тарировки, связывающий истинный крутящий момент $M_{дв}$ и величину разности углов скручивания концов вала электродвигателя – $\Delta\varphi_{скр}$; $k_{пер}$ – коэффициент перехода, связывающий количество фиксированных импульсов датчика угловых перемещений за n оборотов двигателя; ω_i – угловая скорость вала приводного двигателя в i -й период времени, 1/с.

$$k_{пер} = \frac{360}{10000} = 0,036 \text{ град/дел.}$$

где $n_{имп} = 10000$ – число импульсов, фиксируемых датчиком угловых перемещений за один оборот вала двигателя.

На рис. 9 и 10 представлены диаграммы измерения мощности в замкнутом контуре мельницы $N_{зк}$ и мощности, потребляемой из сети $N_{сети}$ при различных конструктивных и режимных параметрах при исследовании мельницы системы «МКАД» за период времени, равным $t_i = 3$ мин (0,06 час) [18].

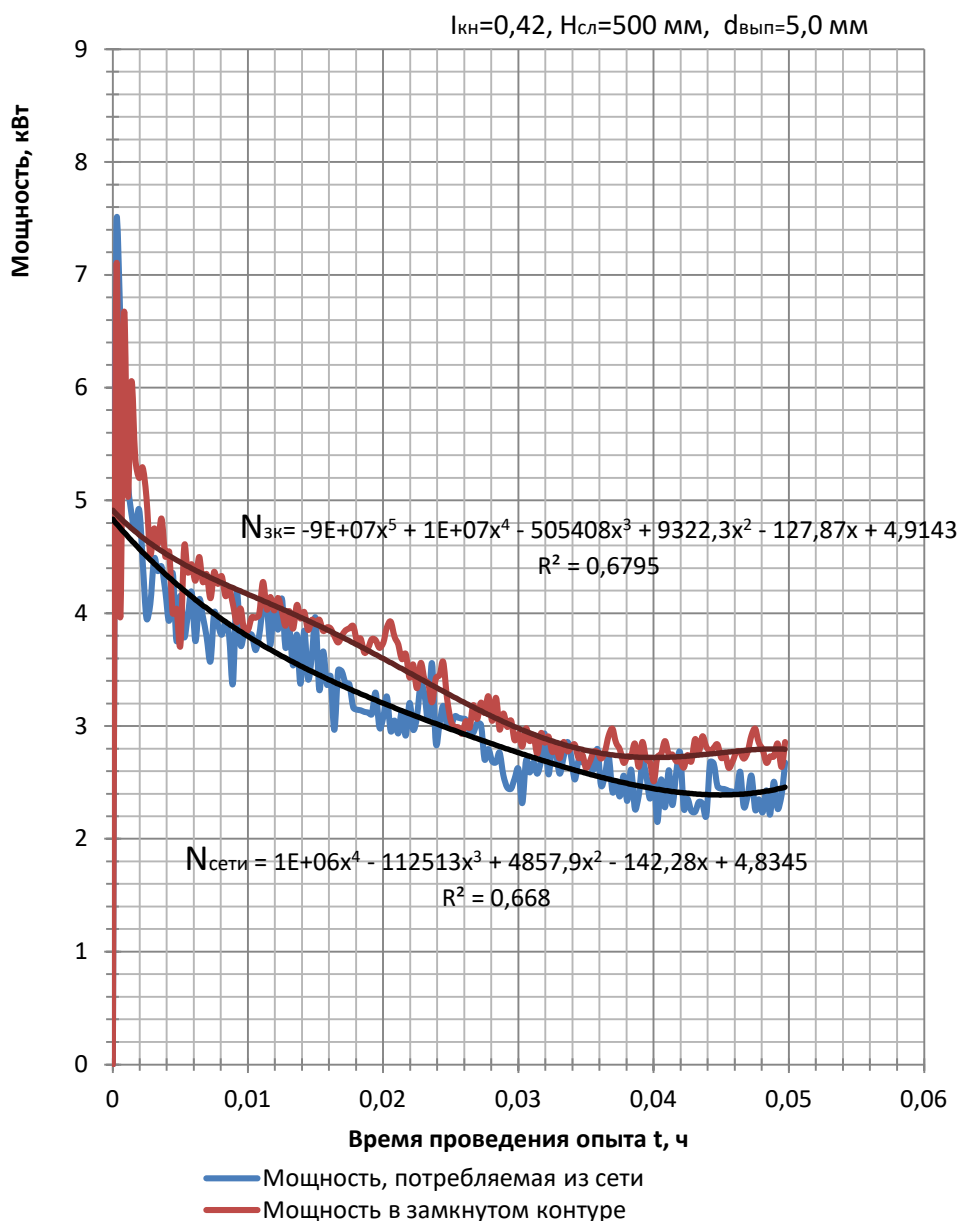


Рис. 8. Диаграмма измерения мощности в замкнутом контуре мельницы $N_{зк}$ и мощности, потребляемой из сети

$N_{сети}$ при параметрах:
 $I_{кн}=0,42; H_{сл}=500 \text{ мм}; d_{вып}=5,0 \text{ мм}$

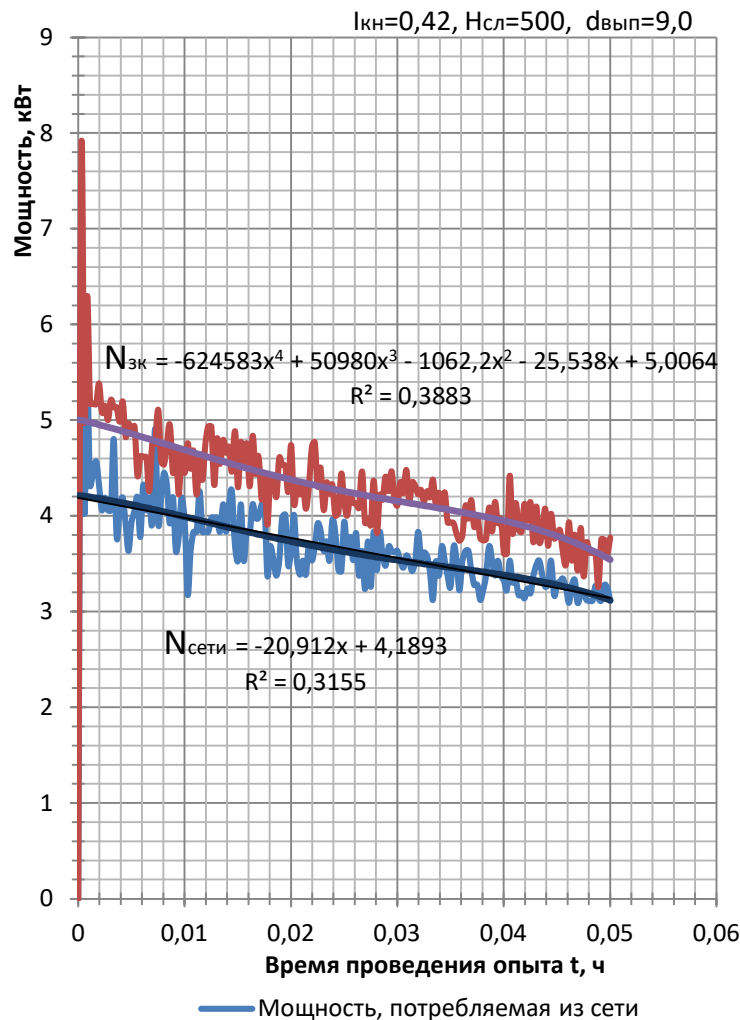


Рис. 9. Диаграмма измерения мощности в замкнутом контуре мельницы $N_{зк}$ и мощности, потребляемой из сети $N_{сети}$, при параметрах: $I_{кн}=0,42$; $H_{сл}=500$ мм; $d_{вып}=9,0$ мм

Относительная энергоэффективность измельчения мергеля со средней крупностью исходных кусков $d_{ср}=40$ мм за период помола, равном $t=0,06$ ч (180 с) определяется из выражения

$$\Delta_3 = \frac{E_{зк} - E_{сети}}{E_{зк}}, \% \quad (10)$$

где $E_{зк}$ – энергия замкнутого контура за период измельчения, Дж; $E_{сети}$ – энергия, потреблённая из сети за период измельчения, Дж.

Энергия, возникшая в замкнутом контуре, определится как

$$E_{зк} = \int_0^t f_1(N_{зк}) \cdot d(t), \quad (11)$$

Энергия, потреблённая из сети, будет равна

$$E_{сети} = \int_0^t f_2(N_{сети}) \cdot d(t), \quad (12)$$

Относительная энергоэффективность процесса для двух случаев составила: а) для диаграммы (рис. 9) – 9 %; б) для диаграммы (рис. 10) – 26 %, что доказывает целесообраз-

ность построения структурных схем вертикальных мельниц динамического самоизмельчения с использованием замкнутого контура.

Выводы. Из выше изложенного материала можно сделать следующие выводы.

1. Анализ баланса энергозатрат, показал, что только незначительная часть потребленной электроэнергии (до 17 %) используется непосредственно для разрушения измельчаемого материала, что определяет, в конечном счете, определяет низкую энергоэффективность измельчительного оборудования, в том числе и вертикальных мельниц динамического самоизмельчения.

2. Существующие вертикальные мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ» достигли своего предела в возможности снижения энергозатрат, так в их основе для разрушения кусков используется кинетическая энергия вращающегося ротора, зависящая в основном от его угловой и которая имеет определенное критическое значение, выше или ниже ко-

торого процесс самоизмельчения протекает неудовлетворительно и ведет к возрастанию энергозатрат.

3. Перспективным направлением повышения энергоэффективности за счет снижения энергозатрат является использование в конструктивных схемах вертикальных мельниц динамического самоизмельчения замкнутых контуров, в которых за счет выполнения ветвей замкнутого контура с кинематическим несоответствием возникает так называемая «циркулирующая» мощность, что приводит к дополнительному силовому воздействию на кусков и частиц между собой, что способствует снижению энергозатрат.

4. Экспериментальные исследования вертикальной мельниц системы «МКАД» подтвердили, что мощность в замкнутом контуре превышает мощность, потребляемую из сети.

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. Технология сырья на перепутье. Проблемы и перспективы. Пер. с англ./Под ред. Б.А. Уилса, Р.В. Барая. М.: Недра, 1992. 272 с.
3. Пивняк Г.Г., Вайсберг Л.А., Кириченко В.И., Пилов В.И. Измельчение. Энергетика и технология. М.: Издательский дом «Руда и Металлы». 2007. 296 с.
4. А. с. № 651845 (СССР), МПК 4 В 02 С13/14. Способ измельчения материала/ Ягупов А.В.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. № 2331562; заявл. 09.06.1976, опубл. 15.03.1979, Бюл. №11. 3 с.
5. А.с. № 710632 (СССР), МКИ В 02 С 13/00. Мельница динамического самоизмельчения «МАЯ»/ Ягупов А. В.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. заявка № 2325134; заявл. 17.02.1976, опубл. 25.01.1980, Бюл. №3. 4 с.
6. А. с. №1308382 (СССР), МКП 4 В 02 С 13/14. Мельница динамического самоизмельчения/ Ягупов А.В., Хетагуров В.Н., Гегелашвили М.В., Фридман Е.М.; заявитель Северо-Кавказский горно-металлургический институт. заявка № 4000261; заявл. 30.12.1985, опубл. 07.08.87, Бюл. №17. 3 с.
7. Гегелашвили М.В. Определение границ скоростных режимов движения материала в мельнице динамического самоизмельчения «МАЯ»// Механизмы и машины ударного, периодического и вибрационного действия. Матер. междунар. симп. (Орел 22-24 нояб. 2000 г.) Орел ОПУ. 2000. С. 245–249.
8. Ягупов А. В., Хетагуров В. Н. О повышении эксплуатационной надежности вертикальной мельницы МАЯ. Межведомственный сборник научных трудов «Механобра»: Дробильно-размольное оборудование и технология дезинтеграции. Л. 1989. С. 55–64.
9. Выскребенец А.С., Хетагуров В.Н., Кибилов С.Г., Маруфова О.А. Защита от износа рабочих органов центробежной мельницы динамического самоизмельчения // Технология ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки: В 2 ч. Часть 1: Материалы 10-й Международной научно-практической конференции: СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 567 с.
10. 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, 17.02.2011, патентообладатель «Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный технический университет (Новочеркасский политехнический институт)» Оpubл. 10.11.2012 г. Бюл. №31. 4 с.
11. 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, 14.06.2012, патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» (ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»), Оpubл. 27.10.2013, Бюл. № 30.
12. Пат. на изобретение №2526668 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Устройство для измельчения материала. Дровников А.Н., Остановский А.А. Заявка: 2012149328/13, 19.11.2012, патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса» (ФГБОУ ВПО «ЮРГУЭС»), Оpubл. 27.08.2014. Бюл. №24. 4 с.
13. Пат. на изобретение №. 2558205 Российская Федерация. МПК В02С13/14. Мельница. Дровников А.Н., Исаков В.С., Остановский А.А., Никитин Е. В., Маслов Е. В., Городнянский В.М., Черкесов В.Ю. Заявка: 2014110456/13, 18.03.2014 патентообладатель: «Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет» (ДГТУ), Опубл. 27.07.2015 Бюл. № 21. 4 с.

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

15. Баранов Г.Г. Курс теории механизмов и машин. М., «Машиностроение». 1967.

16. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. Изд. пятое, издательство «Наука», М.: 1971. 930 с.

17. Тихомиров В.Б. Планирование и анализ эксперимента (при проведении исследований в лёгкой и текстильной промышленности). М.: Лёгкая индустрия, 1974. 262 с.

18. 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.

Ostanovskiy A.A.

FEATURES OF THE WORKING PROCESS OF GRINDING IN THE MILL DYNAMIC SELF-MILLING OF THE «MKAD» SYSTEM

The balance of energy costs when grinding materials and the relevance of solving the problem of reducing energy consumption are given. To solve this problem, it is proposed to use a mill of dynamic self-crushing whose structure has a closed circuit in which, in addition to kinetic energy, particles are destroyed by the so-called "circulating" power. The experimental data obtained from the diagram of measuring power in a closed circuit and consumed from the network, showing the energy efficiency of the mills of the «MKAD» system are given.

Keywords: *power consumption, mill, self-shredding, structure of the mechanism, design scheme, closed circuit, kinematic mismatch, torque, power.*

Остановский Александр Аркадьевич, докторант, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технические системы ЖКХ и сферы услуг».

Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета.

Адрес: Россия, 346500, г. Шахты Ростовской области, ул. Шевченко, 147.

E-mail: Ostanovskiy51@mail.ru