

ПРОМЫШЛЕННАЯ АПРОБАЦИЯ МЕЛЬНИЦЫ ДИНАМИЧЕСКОГО САМОИЗМЕЛЬЧЕНИЯ «МКАД-2»

Остановский А.А.
ООО «Оптимаруза», Руза

Ключевые слова: самоизмельчение, замкнутый контур, промышленные исследования, ротор, производительность, гранулометрический состав, удельные энергозатраты, циркулирующая энергия, работоспособность, ремонтпригодность.

Аннотация. Дан анализ эксплуатационных недостатков традиционных дробильных и измельчительных машин. Обоснована целесообразность применения для измельчения материалов мельниц динамического самоизмельчения. Отмечены недостатки мельниц с открытой кинематической цепью системы «МАЯ». Предложены мельницы с замкнутой кинематической цепью системы «МКАД», характеризующиеся меньшими удельными энергетическими затратами. Приведены результаты промышленной апробации и исследования мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-2» с диаметром ротора 500 мм. Представлена её конструкция, техническая характеристика и описание принципа работы. Проведен промышленный эксперимент по определению производительности и удельных энергозатрат при измельчении разных по физико-механическим характеристикам материалов. Создано измерительное устройство для измерения потребляемой мощности, представлена электрическая схема для определения энергозатрат и принцип её работы. Дан анализ удельных энергозатрат и гранулометрического состава измельченного мергеля, полученного при применении мельниц «МКАД-1» и «МКАД-2».

RESULTS OF INDUSTRIAL TESTING OF THE VERTICAL DYNAMIC SELF- GRINDING MILL "MKAD-2"

Ostanovskiy A.A.
ООО "Optimaruza", Ruza

Keywords: autogenous grinding, closed circuit, industrial research, rotor, productivity, granulometric composition, specific energy consumption, circulating energy, operability, maintainability.

Abstract. The analysis of operational shortcomings of traditional crushing and grinding machines is given. The expediency of using dynamic self-grinding mills for grinding materials is substantiated. The disadvantages of mills with an open kinematic chain of the "MAYA" system are noted. Mills with a closed kinematic chain of the MKAD system, characterized by lower specific energy costs, are proposed. The results of industrial testing and research of the dynamic self-grinding mill of the MKAD-2 system with a rotor diameter of 500 mm are presented. Its design, technical characteristics and description of the operating principle are presented. An industrial experiment was conducted to determine the productivity and specific energy consumption during grinding of materials with different physical and mechanical characteristics. A measuring device for measuring power consumption has been created, an electrical circuit for determining energy costs and its operating principle are presented. The analysis of specific energy consumption and granulometric composition of crushed marl obtained using the mills "MKAD-1" and "MKAD-2" is given.

Введение

Механическое разрушение твердых материалов с целью сокращения их размеров и разделения на составные части широко применяется во многих отраслях народного хозяйства и является одной из важнейших операций в технологии подготовки минерального сырья к дальнейшей переработке. Применяемые в производстве техника и технология дробления и измельчения кускового минерального сырья с использованием щёковых, конусных и валковых дробилок, стержневых и шаровых мельниц не отвечают мировому уровню.

Материалы и методы исследования

Перспективным направлением в области переработки минерального сырья в последние 30-40 лет является применение измельчительных машин, в основе конструкции которых используется способ разрушения кускового материала, основанный на его самоизмельчении [1].

Особый интерес с точки зрения дальнейшего развития способа самоизмельчения, представляют мельницы динамического самоизмельчения системы «МАЯ», разработанные и

названные по имени автора этого способа и её конструкции А.В. Ягупова. В основу работы таких мельниц положен способ измельчения материала в результате соударения, сжатия, скалывания и истирания частиц друг о друга [2].

Анализ результатов их эксплуатации показал, что, несмотря на своё эксплуатационное преимущество в сравнении с традиционными дробильно-измельчительными машинами, с точки зрения возможности дальнейшего снижения энергозатрат они достигли своего предела. Это связано с тем, что в них для разрушения материала используется кинетическая энергия вращающегося ротора, которая для протекания режима самоизмельчения не должна превышать определенного критического значения. Выход за его пределы приводит к переизмельчению материала и росту энергозатрат [3].

Альтернативой традиционным измельчительным машинам и мельницам системы «МАЯ» в последние 8-10 лет являются вертикальные мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД» с замкнутой кинематической цепью [4].

Принцип работы мельниц системы «МКАД» заключается в том, что для разрушения материала используется не только кинетическая энергия вращающегося ротора, но и циркулирующая энергия, возникающая в замкнутом контуре. Её возникновение осуществляется путем подведения мощности от вала приводного двигателя к вертикальному столбу материала по двум параллельным ветвям, выполненным в кинематическом несоответствии [5]. Возникновение циркулирующей энергии приводит к снижению энергетических затрат.

На рисунке 1 представлен разработанный способ, создающий напряжение в контуре мельницы с замкнутой кинематической цепью, приводящий к возникновению циркулирующей энергии.

В разработанной схеме мощность $N_{дв}$ от приводного двигателя 1 к вертикальному столбу материала 6 подводится по нижней 2 и верхней 3 ветви замкнутого контура. После рассоединения потока мощности в точке А он разделяется на два потока мощностей – нижнего $N_{нижн}$ и верхнего $N_{верх}$, которые подводятся к нижней 9 и верхней 10 части этого столба и вновь сливаются в точке Б, условно разделяющей вертикальный столб 6 на две равные части. Изменение величины потоков мощностей $N_{нижн}$ и $N_{верх}$, поступающих к этим частям вертикального столба 6, производится по аналогии с гидравлическим регулированием с помощью регуляторов потока мощности 7 и 8, установленных на нижней 2 и верхней 3 ветви замкнутого контура. В качестве регуляторов потоков мощности в реальных условиях может быть использованы кинематические передачи, к которым относятся ременные, цепные, зубчатые или другие виды передач, которые позволяют изменять величину подводимых к чашеобразному ротору 4 и барабану 5 крутящих моментов. При таком способе подведения мощности к вертикальному столбу 6 материала приведет к изменению поведения тел, составляющих его основу. В результате из-за разных линейных скоростей тел в нижней 9 и верхней 10 части вертикального столба 6 возникнет граничная области 11, в которой из-за их разности будет сопровождаться возрастанием процесса их истирания и увеличению содержания в гранулометрическом составе измельченного материала наиболее мелких фракций.

На основе разработанного способа создан экспериментальный образец мельницы с замкнутой кинематической цепью системы «МКАД-1» (рис. 2).

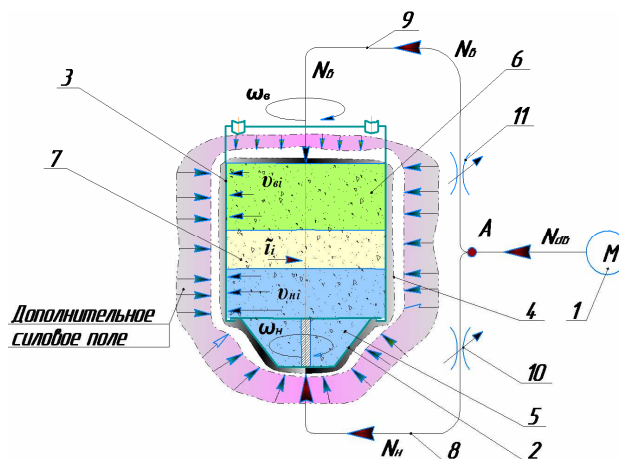
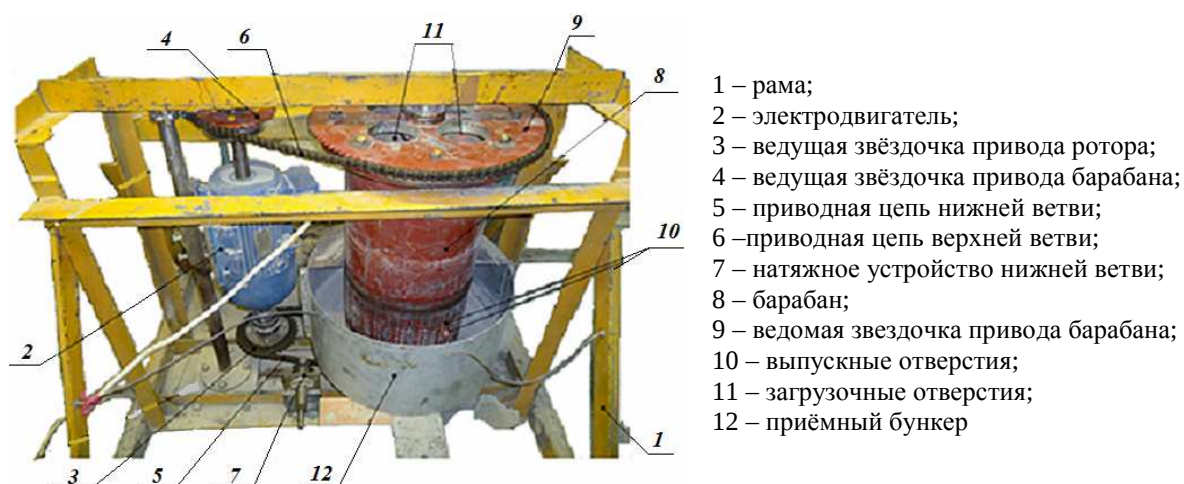


Рис. 1. Подведение мощности от вала приводного двигателя к вертикальному столбу материала по двум по двум параллельным ветвям



- 1 – рама;
- 2 – электродвигатель;
- 3 – ведущая звёздочка привода ротора;
- 4 – ведущая звёздочка привода барабана;
- 5 – приводная цепь нижней ветви;
- 6 – приводная цепь верхней ветви;
- 7 – натяжное устройство нижней ветви;
- 8 – барабан;
- 9 – ведомая звёздочка привода барабана;
- 10 – выпускные отверстия;
- 11 – загрузочные отверстия;
- 12 – приёмный бункер

Рис. 2. Экспериментальный образец мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-1» с замкнутой кинематической цепью

Результаты

Проведенные исследования на экспериментальном образце мельницы «МКАД-1» с диаметром ротора 300 мм позволили установить её энергетическое преимущество в сравнении с мельницей с открытой кинематической цепью системы «МАЯ» [6].

В результате экспериментальных исследований и полученных результатов проведения полно-факторного эксперимента [7] при соблюдении принципов подобия для подобных механизмов [8] построены графики затрачиваемой мощности в зависимости от влияющих факторов, которые представлены на рисунках 3 и 4.

Результат одного из опытов, полученного при проведении 23-х опытов полно-факторного эксперимента (опыт №16) при принятых значениях влияющих факторов: кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура $i_{\text{кн}} = 0,32$; высоты засыпки материала $H_{\text{сл}} = 500$ мм; диаметре выпускных отверстий $d_{\text{вып}} = 9,0$ мм за период измельчения, представлен на рисунке 3.

Для определения затрачиваемой мощности для мельницы с открытой кинематической цепью «МАЯ» после проведения каждого опыта производилось приведение мельницы системы «МКАД-1» в физическую модель мельницы системы «МАЯ».

Приведение мельницы из одной системы в другую производилось путём отсоединения привода барабана и его стопорением с помощью упора.

По полученным в результате измерения мгновенным значениям потребленной мощности согласно опытным данным построен график потребляемой мощности при равных значениях – высоты засыпки материала $H_{\text{сл}} = 500$ мм, диаметре выпускных отверстий в барабане $d_{\text{вып}} = 9,0$ мм и частоты вращения чашеобразного ротора, равной разности между частотой вращения ротора и барабана в мельнице системы «МКАД»: $n_{\text{рот(мая)}} = n_{\text{рот(мкад)}} - n_{\text{бар(мкад)}} = 400 - 100 = 100$ об/мин (рис. 4).

Обработка полученных экспериментальных данных потребленной мощности позволили определить затраты электроэнергии для физической модели мельницы системы «МАЯ» и сопоставить их с затратами энергии в замкнутом контуре, зафиксированными в 16-ом опыте для мельницы системы «МКАД».

Интегрирование кривой, изображенной на рисунке 4, дало следующий результат энергозатрат для мельницы с открытой кинематической цепью системы «МАЯ»:

$$E_{\text{сети(мая)}} = \int_0^{0.05} (-67816 \cdot t^3 + 6330 \cdot t^2 - 209,24 \cdot t + 5,6977) dt = 0,181. \quad (1)$$

Сопоставление значений затрат электроэнергии в замкнутом контуре мельницы системы «МКАД» и физической модели мельницы системы «МАЯ» представлены в таблице 1.

Установленное энергетическое преимущество мельницы с замкнутой кинематической цепью вызвало необходимость в изготовлении мельницы этой системы для промышленной

апробации с диаметром ротора 500 мм. Учитывая выявленные конструктивные и эксплуатационные недостатки при проведении экспериментальных исследований на мельнице «МКАД-1», был сделан вывод о том, что путем разработки и реализации в ней патентованных схемных решений можно создать более совершенную конструкцию. Это позволяет повысить её производительность, работоспособность и ремонтпригодность.

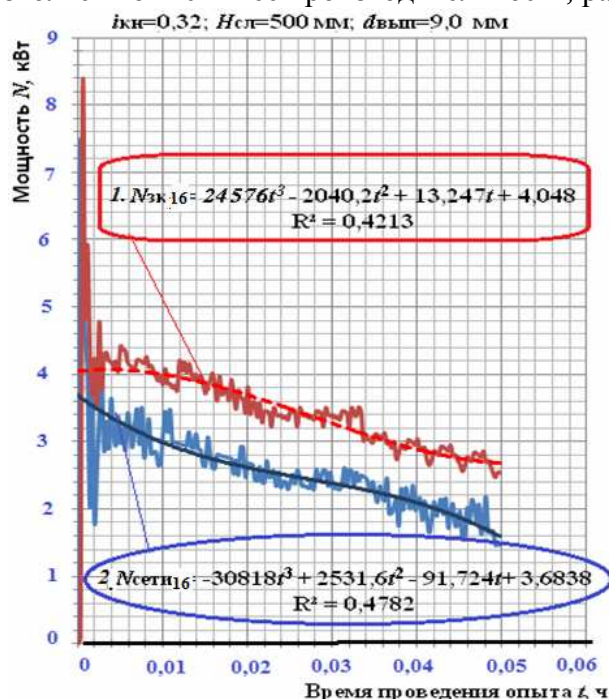


Рис. 3. Мощность в замкнутом контуре и мощность, потребляемая из сети в 16-ом опыте полнофакторного эксперимента мельницы с замкнутой кинематической цепью системы «МКАД»

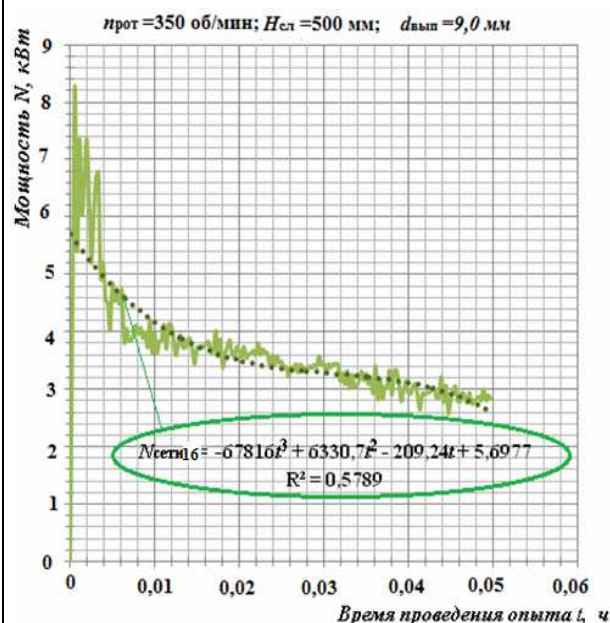


Рис. 4. Мощность, потребляемая из сети в 16-ом опыте полно факторного эксперимента физической модели мельницы с открытой кинематической цепью системы «МАЯ»

Табл. 1. Энергозатраты в мельнице с замкнутой и открытой кинематической цепью в 16-м опыте

№	Тип кинематической цепи в мельнице	Энергопотребление в опыте $E(мкад)_{16}$, кВт·ч
1	С замкнутой кинематической цепью (система МКАД)	0,172
2	С открытой кинематической цепью (система МАЯ)	0,181
3	Разность, %	4,97

Важным этапом в совершенствовании и развитии вертикальных мельниц динамического самоизмельчения с замкнутой кинематической цепью (индифферентной группой) является промышленная апробация. Её цель заключается в подтверждении работоспособности созданной машины в промышленных условиях и сопоставление некоторых технических характеристик, полученных при экспериментальных исследованиях на мельнице «МКАД-1». На основе результатов лабораторных исследований этой мельницы «был разработан проект и изготовлен промышленный образец мельницы «МКАД-2» с диаметром ротора $D_{рот2}=500$ мм (рис. 5).

При создании мельницы системы «МКАД-2» в её конструкции были реализовано четыре запатентованных схемных решений, позволяющие повысить производительность, работоспособность и ремонтпригодность [9-11].

Проведенные испытания на холостом ходу и под нагрузкой не выявили заметных отклонений в работе мельницы, подтвердили правильность принятых технических решений и усовершенствовать технологический процесс изготовления наиболее ответственных рабочих элементов машины (ротора, барабана, сменной рубашки) в условиях производства, не обладающего сложным станочным оборудованием.

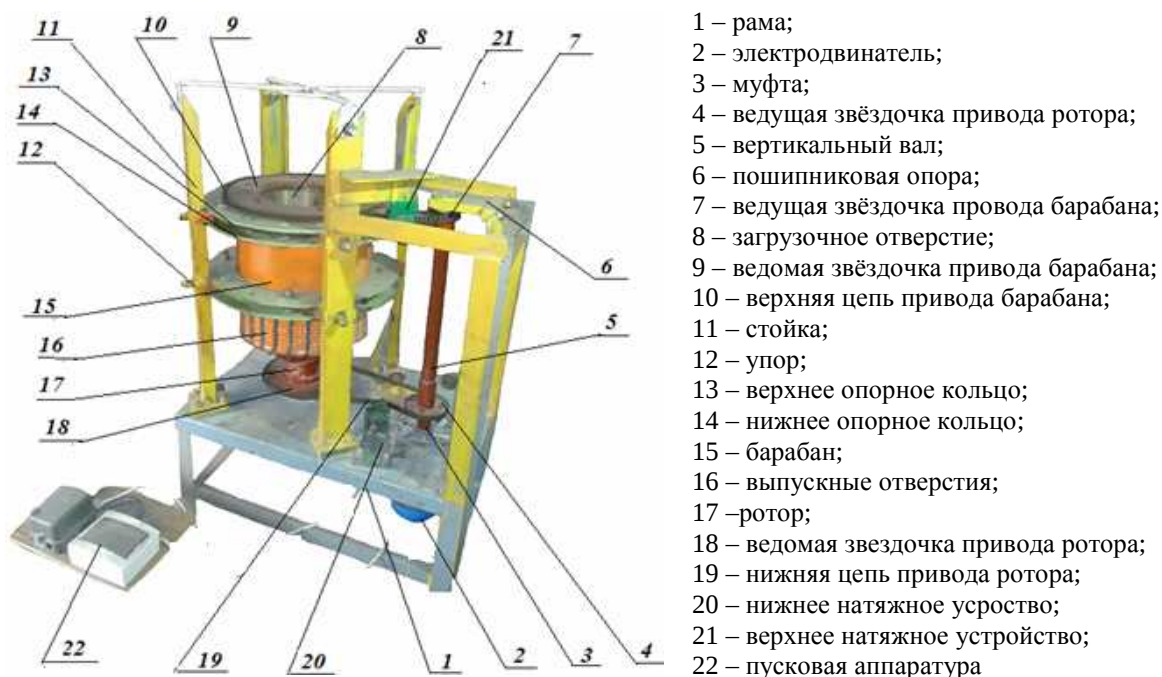


Рис. 5. Опытно-промышленный образец вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-2» с индифферентной группой

Мельница «МКАД-2» имеет механизм замкнутого контура, образуемый нижним и верхним концом вертикального вала 5 электродвигателя 2, ротором 17, барабаном 15 и материалом, находящемся в нём. Его наличие приводит за счёт выполнения верхней и нижней ветви с кинематическим несоответствием при передаче по ним разных по величине крутящих моментов к деформации (скручиванию) вала, возникновению и созданию в контуре напряженного состояния, при котором разрушение кускового материала будет производиться с более высокой интенсивностью.

Используемая компоновка позволяет не только обеспечить непрерывную подачу материала через загрузочное отверстие 10, но и упрощает конструкцию, обеспечивает несложный доступ к основным узлам мельницы и простоту обслуживания при её эксплуатации и ремонте [12].

Основные технические характеристики промышленного образца вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-2» представлены в таблице 2.

Табл. 2. Основные технические характеристики промышленного образца вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-2»

Наименование параметра	Значение параметра
Диаметр ротора $D_{\text{рот}}$, мм	500
Высота барабана $H_{\text{бар}}$, мм	640
Угол образующей конической стенки, град	45
Тип электродвигателя:	A132S6Y3
- частота вращения вала, мин ⁻¹	960
- мощность $N_{\text{дв}}$, кВт	5,5
- $\cos \varphi$	0,72
Масса, кг	315

Измерение производительности мельницы производилось путём измерения веса измельченного материала, заполняющего приёмную ёмкость за период его измельчения на электронных весах типа TOR PS -300 за период измельчения t_i , равный 3 мин (0,05 час). В результате измельчения мергеля, угля марки антрацит, отходов керамического кирпича марки М125 и глинистого сланца с исходной крупностью кусков $D_{\text{исх}} \leq 50$ мм были получены

результаты производительности при значении кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура $I_{\text{кн}}=0,37$, гранулометрического состава и удельных энергозатрат при диаметре выпускных отверстий в барабане $d_{\text{вып}}=7,0$ мм и высоте его засыпки $H_{\text{сл}}=500$ мм (табл. 3).

Табл. 3. Производительность опытно-промышленного образца мельницы «МКАД-2»

№	Тип материала	Краткая характеристика физико-механических свойств	Исходная крупность загружаемых кусков, $D_{\text{исх}}$, мм	Минутная производительность $G_{\text{вых}}$, кг/мин
1	Мергель	Предел прочности одноосному сжатию $R_{\text{сж}}=3,3$ МПа	≤ 50	10,33
2	Уголь марки антрацит	Крепость по шкале М.М. Протоdjаконова $f \leq 2$	≤ 50	9,42
3	Отходы кирпича	Марка М150, прочность 150 кг/см ²	≤ 50	8,73
4	Глинистый сланец	Крепость по шкале М.М. Протоdjаконова $f=11-12$	≤ 50	7,73

Результаты измерения затрачиваемой мощности и производительности, а также данных экспериментального исследования мельницы «МКАД-1» позволили построить график зависимости от диаметра ротора для разных по своим физико-механическим свойствам – мергеля, угля и битого кирпича марки М150 и глинистого сланца (рис. 6).

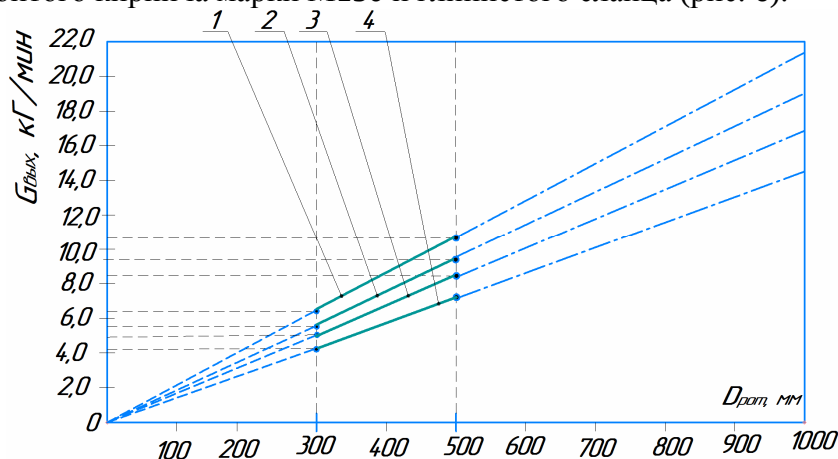


Рис. 6. Зависимость производительности от диаметра ротора: 1 – мергель; 2 – уголь марки антрацит; 3 – отходы керамического кирпича марки М150; 4 – глинистый сланец

Построенные зависимости позволяет спрогнозировать величину производительности при применении мельниц этой системы с диаметром ротора $D_{\text{рот}}=1000$ мм и более. Например, при измельчении мергеля в мельнице с диаметром ротора 1000 мм её производительность составит 10,33 кг/мин (0,62 т/ч); при измельчении угля марки антрацит – 9,42 кг/мин (0,565 т/ч), отходов керамического кирпича марки М125 – 8,73 кг/мин (0,524 т/ч) и глинистого сланца 7,73 кг/мин (0,448 т/ч) результаты производительности являются важным ориентиром для разработчиков при создании мельниц системы «МКАД» больших типоразмеров и прогнозирования их производительности.

Вычисление удельных энергозатрат $E_{\text{уд}}$ при измельчении исследуемого материала осуществлялось по формуле

$$E_{\text{уд}} = \frac{\mathcal{E}_i}{G_{\text{вых}i}}, \quad (2)$$

где $\mathcal{E}_i$ – энергозатраты за период измельчения, кВт·ч; $G_{\text{вых}i}$ – производительность машины, т; t_i – период измельчения, ч.

Так как по мере измельчения материала и эвакуации его за внешние контуры барабана при отсутствии непрерывного пополнения его новыми порциями высота в барабане будет уменьшаться. Следовательно, из-за этого будет снижаться нагрузка и потребляемый расход электроэнергии. Поэтому при использовании для измерения потребляемой мощности с помощью показывающих измерительных устройств – вольтметра и амперметра приведёт к высоким погрешностям, что выдвинуло задачу по разработке измерительного устройства энергозатрат за рассматриваемый период измельчения. Принцип его работы заключается в том, что им фиксируется, производится запись с выводом на экран ЭВМ мгновенных значений напряжения в сети $U_{сетиi}$ и тока $I_{сетиi}$ за период измельчения t_i . По полученным значениям этих параметров производится вычисления мгновенных значений мощности, потребляемой из сети $N_{сетиi}$ по формуле

$$N_{сетиi} = U_{сетиi} \cdot I_{сетиi} \cdot \cos\varphi, \quad (3)$$

где $\cos\varphi$ – коэффициент сдвига фаз.

На основе полученных данных мгновенных значений мощности с помощью программы «Excel-20» построена графическая зависимость мощности за период измельчения t_i при заданных значениях кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура $I_{кн}$, высоты засыпки исходного материала в барабан $H_{сл}$ и диаметра выпускных отверстий в барабане $d_{вып}$:

$$N_{сетиi} = f(I_{кн}, H_{сл}, d_{вып}), \quad (4)$$

Удельные энергозатраты при измельчении определяют, как

$$E_{уд,i} = \frac{\int_0^t N_i d(t_i)}{G_{вып,i}}, \quad (5)$$

где $G_{вып,i}$ – производительность за рассматриваемый период; t_i – период измельчения, ч.

Процедура вычисления энергетических показателей осуществлялась с помощью разработанного измерительного устройства, электрическая схема которого представлена на рисунке 7.

Устройство содержит два разъёмных соединителя, при помощи которых осуществляется его подключение к трёхфазной сети переменного тока и асинхронному электродвигателю (АД) установки измельчительной, датчик напряжения (ТР), датчик тока (ТА), регистратор сигналов, преобразователь напряжения (ПН) и источник питания (GB1).

Датчик напряжения (ТР) представляет собой трансформатор с номинальным напряжением первичной обмотки 0,4 кВ, подключаемой между фазами А, В.

Трансформатор (ТР) предназначен для преобразования линейного напряжения трёхфазной сети 0,4 кВ в переменное напряжение величиной до 1 В.

Чувствительность датчика напряжения выбрана равной 1,62 мВ/В.

Датчик тока (ТА) осуществляет преобразование переменного тока протекающего в фазе С в напряжение величиной до 1 В. Чувствительность датчика тока выбрана равной 36 мВ/А.

Выходные сигналы с датчика тока ТА ($U(I_c)$) и датчика напряжения ТР ($U(U_{AB})$) подведены ко входам регистратора сигналов.

Регистратор сигналов получает питание от импульсного преобразователя напряжения (ПН) величиной 50 В, запитываемого от аккумуляторной батареи (GB1) с выходным напряжением 12 В.

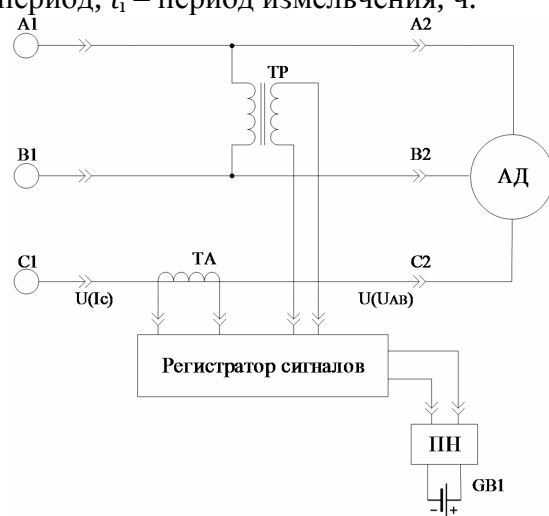


Рис. 7. Электрическая схема измерительного устройства в мельнице системы «МКАД-2» для измерения напряжения и тока

Регистратор сигналов представляет собой электронное устройство, входящее в состав программно-аппаратного комплекса, предназначенного для записи сигналов на съёмный носитель памяти.

Аппаратная часть устройства выполнена на 32-разрядном ARM микроконтроллере типа STM32F103, программное обеспечение которого позволяет производить запись сигнала с дискретностью в 1 миллисекунду по каждому каналу из 5 каналов.

Информация считывается с SD-карты, которая легко извлекается из прибора.

Для обработки и визуализации данных, записанных на карту памяти, используется программный анализатор, который все регистрируемые параметры отображает на мониторе компьютера (рис. 8).

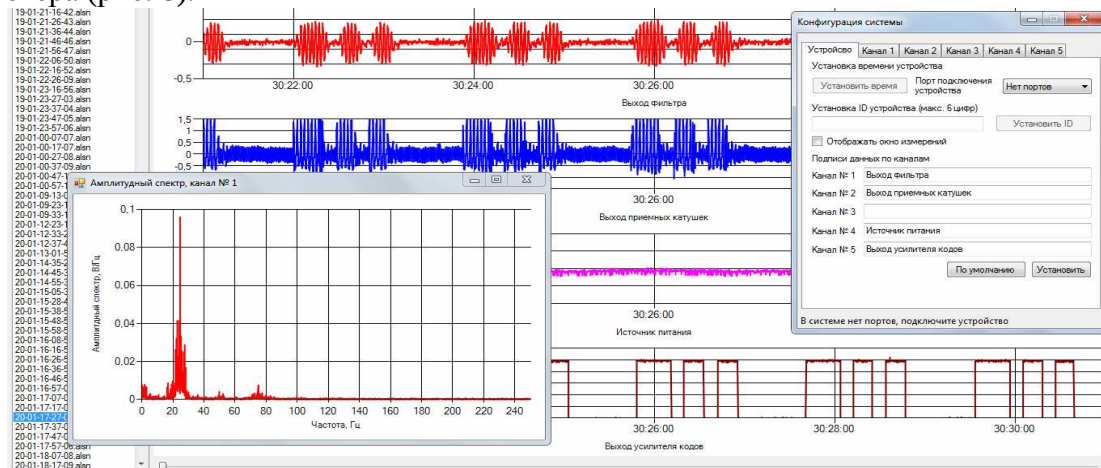


Рис. 8. Окно программного анализатора

Также программный анализатор позволяет масштабировать графики, как по времени, так и по амплитуде, проводить курсорные измерения и цифровую фильтрацию данных.

Все значения сигналов и их временные параметры, выводимые на графиках, соответствуют фактическим с погрешностью не более 6%, что подтверждается полученными в центре стандартизации и метрологии сертификатами о калибровке. Технические характеристики регистратора сигналов приведены в таблице 4.

Табл. 4. Основные технические характеристики изделия

№	Наименование параметра	Значение параметра
1	Напряжение питания, В	18÷75
2	Потребляемая мощность, не более, Вт	5
3	Количество каналов регистрации данных	3 дифференциальных 2 однополярных
4	Диапазон входных напряжений для дифференциальных каналов, В	-1,5÷1,5
5	Относительная погрешность измерений для дифференциальных каналов, не более, %	6
6	Объем сменной карты памяти, ГБ	16 (32)
7	Время непрерывной записи данных на карту памяти, час	341 (682)
8	Тип интерфейса для связи с компьютером	USB

В схеме для получения экспериментальных данных, применён трансформатор тока и напряжения, обладающие высокой линейностью характеристик (нашли также широкое применение в промышленных системах измерения и защиты электрооборудования), что повышает точность измерений, а также трансформаторы обеспечивают гальваническую развязку от сети 380 В и повышают безопасность процесса экспериментальных исследований в целом. Применение устройства регистрации РП-АЛСН обосновывается приемлемой погрешностью измерений, значение которой подтверждается сертификатом о калибровке, выданным Ростовский Центром стандартизации и метрологии [13]. В ходе анализа и

обработки экспериментальных данных использовано следующее программное обеспечение: программный анализатор устройства *ПП-АЛСН*, *Microsoft Office Excel*.

Преобразование этих полученных сигналов в реальные показатели (значения мощности) получены путем расчета действующих (среднеквадратических) значений тока и напряжения с последующим перемножением их между собой, а также коэффициентом сдвига фаз электродвигателя:

$$N_{\text{потр}i} = I_i \cdot U_i \cdot \cos\varphi, \quad (6)$$

где I_i – мгновенное значение тока в i -й момент времени, А; U_i – мгновенное значение напряжения в i -й момент времени, В; $\cos\varphi=0,72$ – коэффициентом сдвига фаз электродвигателя

На рисунке 9 представлено реальное измерительное устройство для измерения энергетических параметров в мельнице системы «МКАД-2».

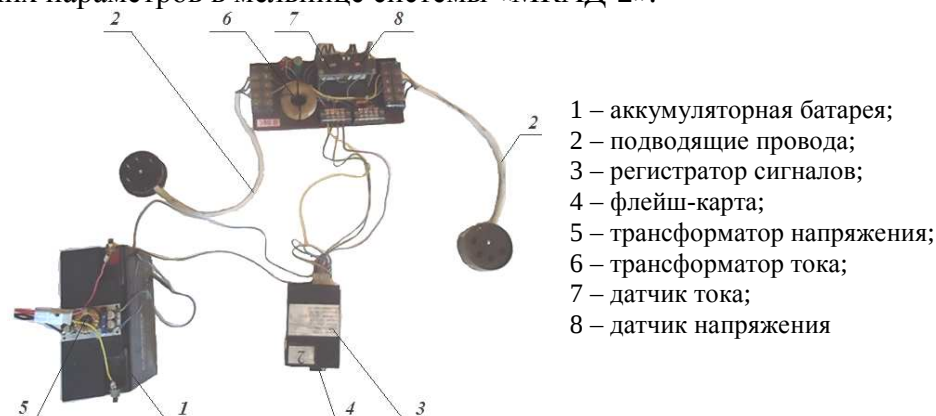


Рис. 9. Устройство для измерения потребляемой мощности в промышленном образце мельнице мельницы «МКАД-2»

Такое построение измерительного устройства и принцип его функционирования обеспечивает необходимую для данного измельчительного устройства точность измерений, а также гальваническую развязку элементов схемы. На рис. 10 представлены результаты записи мгновенных значений напряжения U_i и тока I_i за период измельчения t_i , составляющий 3 мин (0,05 ч) при измельчении мергеля с исходной крупностью кусков $D_{\text{исх}} \leq 50$ мм (рис. 10).

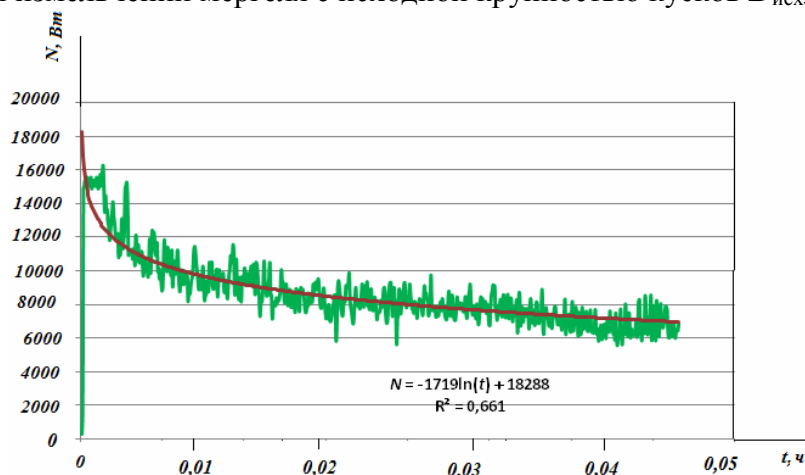


Рис. 10. Результаты записи активной мощности, потребляемой электродвигателем А132S6 в мельнице «МКАД-2» за период измельчения и её аппроксимация с помощью логарифмической функции:

R^2 – достоверность аппроксимации

Аппроксимация полученной на графике зависимости $N=f(I_{\text{кн}}, H_{\text{сл}}, d_{\text{вып}})$ произведено с помощью логарифмической функции типа $f(x)=\ln(x)$, позволяющий получить наименьшее значение достоверности аппроксимации R^2 .

Интегрирование функции $N=f(I_{\text{кн}}, H_{\text{сл}}, d_{\text{вып}})$ за период измельчения t_i , равным 3 мин, дало следующее значение энергозатрат за период измельчения

$$\Theta_i = [-1719 \cdot \ln(t) + 18288]d(t) = 1,258 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ч}. \quad (7)$$

Удельные энергозатраты, определенные по формуле (1), составили для мельницы «МКАД-2» $E_{\text{уд(мкд-2)}} = 2,03 \text{ кВт} \cdot \text{ч/т}$.

В таблице 5 представлены результаты вычисленных значений удельной энергоёмкости при измельчении одинакового по своим физико-механическим свойствам материала (мергеля) при приблизительно равных режимных и конструктивных параметрах.

Табл. 5. Удельные энергозатраты мельниц «МКАД-1» и «МКАД-2»

Тип	Диаметр ротора $D_{\text{рот}}$, мм	Высота засыпки $H_{\text{сл}}$, мм	Диаметр выпускных отверстий в барабане $d_{\text{вып}}$, мм	Производительность $G_{\text{вых}}$, т/ч	Удельные энергозатраты $E_{\text{уд}}$, кВт·ч/т	Погрешность в сравнении экспериментом, %	
МКАД-1	300	0,38	540	7,0	0,15	2,14	-
МКАД-2	500	0,37	380	7,0	0,45	2,03	5,2

Анализ полученных результатов удельных энергозатрат на экспериментальном и промышленном образце показывает, что они вполне сопоставимы, а их относительная разность между ними составляет 5,2 %, что свидетельствует о корректном проведении экспериментов и использованного для этого математического аппарата. Исходя из одной поставленной задач при апробации промышленного образца мельницы «МКАД-2» был исследован гранулометрический состав измельченного мергеля, измельчение которого производилось при равных режимных параметрах мельниц обеих систем: а) $I_{\text{кн}}=0,37$; б) диаметр выпускных отверстий $d_{\text{вып}}=7,0$ мм; в) относительная высота загруженного материала составила по отношению к высоты загрузки и среднего размера куска загружаемого материала $k_d = H_{\text{сл}}/d_{\text{ср}} = 12$.

Анализ гранулометрического состава измельчённого мергеля при использовании мельницы производился с помощью набора сит ГОСТ 3584-73, а его результаты для мельниц «МКАД-1 и «МКАД-2», полученные при разных значениях кинематического несоответствия ветвей замкнутого контура, представлены в таблице 6.

Табл. 6. Гранулометрический состав измельченного мергеля в мельницах системы «МКАД-1» и «МКАД-2»

Тип	Производительность, кг/мин	Кинематическое несоответствие $i_{\text{кн}}$	Гранулометрический состав готового продукта $\Delta\psi$, %							
			Фракция, мм							
			7,0-5,0	5,0-2,5	2,5-1,25	1,25-0,63	0,63-0,315	0,315-0,16	<0,16	
МКАД-1	6,24	0,38	17,5	6,2	14,7	14,3	10,5	14,9	23,4	
МКАД-2	10,33	0,37	15,9	5,8	16,1	12,5	10,7	14,2	24,8	
МКАД-1	5,93	0,22	24,2	6,4	15,0	15,3	10,1	9,8	19,3	
МКАД-2	10,12	0,23	22,9	5,5	14,7	13,6	9,4	10,7	23,2	

На рисунке 11 представлены диаграмма содержания фракций помола мергеля мельницами «МКАД-1» и «МКАД-2».

Анализ результатов экспериментального и промышленного исследования гранулометрического состава измельчённого мергеля с исходной крупностью кусков $D_{\text{исх}} = 30$ мм, полученных на экспериментом образце мельнице «МКАД-1» с диаметром ротора $D_{\text{рот}}=300$ мм и промышленных исследований при приблизительно равных режимных параметрах, показывает, что относительная разность между каждой фракцией в среднем не превышает 8%. При этом минимальное соотношение составляет для фракции $0,63 \div 0,315$ мм – 1,9%, а максимальное для фракции $1,25 \div 0,63$ мм – 12,6%, что позволяет с довольно высокой

точностью прогнозировать для такого материала гранулометрический состав измельченного мергеля при применении мельниц системы «МКАД» с диаметром ротора более 500 мм при примерно равных режимных параметрах.



Рис. 11. Сопоставление гранулометрического состава измельченного мергеля мельницами «МКАД-1» и «МКАД-2»

Так как при практически равных режимных параметрах и подобию конструктивных размеров мельниц «МКАД-1» и «МКАД-2» составы фракций после помола практически равны между собой. Это позволяет прогнозировать его состав для диаметров ротора более 500 мм при соблюдении режимных параметров (кинематическом несоответствии ветвей замкнутого контура), диаметре выпускных отверстий в барабане и высоты засыпки исходного материала.

Выводы

1. Создан опытно-промышленный образец мельницы «МКАД-2» с диаметром ротора 500 мм, в котором реализовано четыре запатентованных конструктивных решений, позволяющих повысить производительность, работоспособность и ремонтпригодность.
2. Результаты промышленного эксперимента доказали возможность их применения для измельчения кускового материала, таких как глинистый сланец с твердостью по шкале проф. М.М. Протодяконова $f = 11-12$, что расширяет область применения мельниц этой системы.
3. Проведенные экспериментальные исследования на опытно-промышленном образце позволили определить производительность измельчения разных по своим физико-механическим характеристикам материалов: мергеля, угля марки антрацит, отходов керамического кирпича и глинистого сланца и установить зависимость её от диаметра чашеобразного ротора.
4. Разработана электрическая схема измерительного устройства потребляемой энергии, согласно которой оно изготовлено, позволяющее запись мгновенных значений тока и напряжения сети, что дало возможность произвести расчёт мгновенных значений мощности, на основе которых построен график её зависимости от основных влияющих факторов.
5. Произведён анализ гранулометрического состава измельченного мергеля, позволивший сравнить его результаты с экспериментальными данными и установить относительную разность между содержанием каждой из них.

Заключение

Апробация созданного опытно-промышленного образца мельницы динамического самоизмельчения «МКАД-2» с диаметром ротора 500 мм подтвердил её работоспособность в условиях, близких к реальным. Полученные экспериментальные данные позволяют создавать мельницы следующего поколения с замкнутой кинематической цепью более крупных типоразмеров – диаметром ротора более 1 м, характеризующихся высокой производительностью и низкими энергозатратами.

Список литературы

1. Хетагуров В.Н. Разработка и проектирование центробежных мельниц вертикального типа. – Владикавказ: Терек, 1999. – 225 с.
2. А.с. №651845 СССР. Способ измельчения материала / А.В. Ягупов. – Заявка №2331562 от 09.03.1976; опубл. 15.03.1979.
3. Гегелашвили М.В. Определение границ скоростных режимов движения материала в мельнице динамического самоизмельчения «МАЯ» // Механизмы и машины ударного, периодического и

вибрационного действия. Материалы международного симпозиума (Орел, 22-24 ноября 2000). – Орел: ОПУ, 2000. – С. 245-249.

4. Патент №2465960 РФ. Измельчитель динамического самоизмельчения / А.Н. Дровников, А.А. Остановский, Е.В. Никитин, И.А. Павлов, Л.А. Осипенко, Н.А. Агафонов. – Заявка №2011106231 от 17.02.2011; опубл. 10.11. 2012, Бюл. №31.
5. Остановский А.А., Дровников А.Н. Закономерности передачи мощности к измельчаемому материалу в мельницах системы «МКАД» // Научное обозрение. – 2017. – №12. – С. 88-96.
6. Остановский А.А. Анализ и выбор рациональной структурной схемы вертикальной мельницы динамического самоизмельчения // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2018. – №1. – С. 66-73.
7. 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.
8. Кирпичев М.В. Теория подобия. – М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1953. – 96 с.
9. Патент №134825 РФ. Измельчитель материала / А.А. Остановский, А.Н. Дровников, Е.В. Маслов. – Заявка №2013105691 от 11.02.2013; опубл. 27.11.2013, Бюл. № 33.
10. Патент №173052 РФ. Мельница / А.А. Остановский, А.Н. Дровников, Е.В. Маслов, Л.А. Осипенко, Э.Ю. Черкесова, Д.В. Костромин. – Заявка №2016144241 от 10.11.2016; опубл. 08.08. 2017, Бюл. №22.
11. Патент №173519 РФ. Мельница динамического самоизмельчения / А.А. Остановский, А.Н. Дровников, А.Н. Рыбальченко, Е.В. Маслов, Г.Е. Осипенко, Н.С. Никитина. – аявка №2017101475 от 17.01.2017; опубл. 30.08 2017, Бюл. №25.
12. Остановский А.А., Маслов Е.В. Модернизация промышленного образца вертикальной мельницы динамического самоизмельчения системы «МКАД-2» // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2020. – №2. – С. 141-146.
13. Федеральное бюджетное учреждение «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии испытаний в Ростовской области» (ФБИ «Ростовский ЦМС»). Свидетельство о калибровке № K08.000559.17.

References

1. Khetagurov V.N. Development and design of vertical centrifugal mills. –Vladikavkaz: Terek, 1999. –225 p.
2. A.c No. 651845 USSR. Method of grinding material / A.V. Yagubov. – Appl. No. 2331562 from 09.03.1976; publ. 15.03.1979.
3. Gegelashvili M.V. Determination of the boundaries of the speed modes of material movement in the dynamic self-grinding mill "MAYA" // Mechanisms and machines of shock, periodic and vibration action. Proceedings of the International Symposium (Orel, November 22-24, 2000). – Orel: OPU, 2000. – P. 245-249.
4. Patent No. 2465960 RU. Dynamic self-grinding grinder / A.N. Drovnikov, A.A. Ostanovskiy, E.V. Nikitin, I.A. Pavlov, L.A. Osipenko, N.A. Agafonov. – Appl. No. 2011106231 from 17.02.2011; publ. 10.11.2012, Bul. No. 31.
5. Ostanovskiy A.A., Drovnikov A.N. Regularities of power transmission to the crushed material in the mills of the MKAD system // Scientific review. 2017, no. 12, pp. 88-96.
6. Ostanovskiy A.A. Analysis and selection of a rational structural scheme of a vertical dynamic self-grinding mill // News of higher educational institutions. North Caucasian region. Technical sciences. 2018, no. 1, pp. 66-73.
7. Ostanovskiy A.A., Maslov E.V. On the determination of productivity and specific energy consumption in a vertical dynamic self-grinding mill with a closed-loop power circuit // News of higher educational institutions. North Caucasian region. 2015, no. 3, pp. 59-67.
8. Kirpichev M.V. Similarity Theory. – M.: Publ. house of the USSR Academy of Sciences, 1953. – 96 p.
9. Patent No. 134825 RU. Material shredder / A.A. Ostanovskiy, A.N. Drovnikov, E.V. Maslov. – Appl. No. 2013105691 from 11.02.2013; published on 27.11.2013, Bul. No.
10. Patent No. 173052 RU. Mill / A.A. Ostanovskiy, A.N. Drovnikov, E.V. Maslov, L.A. Osipenko, E.Y. Cherkesova, D.V. Kostromin. – Appl. No. 2016144241 from 10.11.2016; publ. 08.08.2017, Bul. No. 22.
11. Patent No. 173519 RU. Mill of dynamic self-grinding / A.A. Ostanovskiy, A.N. Drovnikov, A.N. Rybalchenko, E.V. Maslov, G.E. Osipenko, N.S. Nikitina. – Appl. No. 2017101475 from 17.01.2017; publ. 30.08 2017, Bul. No. 25.
12. Ostanovskiy A.A., Maslov E.V. Modernization of an industrial prototype of a vertical dynamic self-grinding mill of the MKAD-2 system // News of higher educational institutions. North Caucasian Region. Technical Sciences. 2020, no. 2, pp. 141-146.
13. Federal Budgetary Institution "State Regional Center for Standardization, Metrology and Testing in Rostov Oblast" (FBI "Rostov CMS"). Calibration Certificate No. K08.000559.17.

Сведения об авторах:

Остановский Александр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент, главный инженер
a.ostanovsky@mail.ru

Information about authors:

Ostanovskiy Aleksandr Arkadievich – candidate of technical sciences, associate professor, chief engineer

Получена 05.12.2024