

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕМАТИЧЕСКИХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РОТОРНОЙ МЕЛЬНИЦЫ

Качаев А.Е.¹, Сеница Е.В.², Уральский А.В.², Орехова Т.Н.², Строкова В.В.²

¹*Всероссийский научно-исследовательский институт орошения и сельхозводоснабжения «Радуга», Радужный;*

²*Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород*

Ключевые слова: измельчение, роторная мельница, абсолютная скорость, частица, производительность, скорость разрушения, удар, сила разрушения.

Аннотация. В данной научной статье рассматриваются аналитические исследования кинематических и технологических параметров роторной мельницы, что является важным направлением для повышения эффективности оборудования в машиностроении и горнодобывающей промышленности. Авторы подчеркивают значимость разработки эффективных роторных мельничных установок, способных обеспечить высокую производительность при минимальных энергетических затратах. Исследования направлены на оптимизацию конструктивных особенностей роторных мельниц, что позволяет снизить износ деталей и увеличить срок службы оборудования. В статье представлены методы математического моделирования и анализа технологических процессов, а также уравнения, описывающие движение частиц в потоке несущей среды. Основное внимание уделяется взаимосвязи между конструктивными параметрами и технологическими характеристиками мельниц, что способствует созданию более совершенных технологий переработки сырья и повышению конкурентоспособности предприятий. Результаты исследований могут быть использованы для разработки новых конструкций мельниц и модернизации существующих агрегатов.

ANALYTICAL STUDIES OF KINEMATIC AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF A ROTARY MILL

Kachaev A.E.¹, Sinitsa E.V.², Uralsky A.V.², Orekhova T.N.², Strokova V.V.²

¹*All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga", Raduzhnyi;*

²*Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, Belgorod*

Keywords: grinding, rotary mill, absolute speed, particle, productivity, destruction rate, impact, destruction force.

Abstract. This scientific article considers analytical studies of the kinematic and technological parameters of a rotary mill, which is an important direction for improving the efficiency of equipment in mechanical engineering and the mining industry. The authors emphasize the importance of developing efficient rotary milling units capable of providing high productivity with minimal energy costs. The studies are aimed at optimizing the design features of rotary mills, which reduces wear of parts and increases the service life of the equipment. The article presents methods of mathematical modeling and analysis of technological processes, as well as equations describing the motion of particles in the flow of the carrier medium. The main attention is paid to the relationship between the design parameters and technological characteristics of mills, which contributes to the creation of more advanced technologies for processing raw materials and increasing the competitiveness of enterprises. The research results can be used to develop new mill designs and modernize existing units.

Введение. В современном машиностроении и горнодобывающей промышленности особое значение приобретает разработка эффективных и надежных мельничных установок, способных обеспечивать высокую производительность при минимальных энергетических затратах [1]. Роторные мельницы являются важным элементом технологических цепочек, используемых для измельчения различных материалов, таких как руда, уголь, строительные отходы и другие сырьевые ресурсы [2]. Однако для достижения максимальной производительности и снижения издержек необходимо проводить системные исследования кинематических и технологических параметров таких агрегатов.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью повышения конкурентоспособности горнодобывающих производств и предприятий, выпускающих

строительные материалы, за счет внедрения инновационных технологий и оптимизации оборудования. Современные требования к энергоэффективности, экологической безопасности и надежности оборудования требуют глубокого анализа его конструктивных элементов, кинематических параметров и технологических режимов работы. В частности, оригинальные конструкции роторных мельниц требуют специальных аналитических подходов для определения их оптимальных параметров, что позволит снизить износ деталей, увеличить срок службы и обеспечить стабильную работу в условиях интенсивной эксплуатации [3].

Помимо прочего актуальность аналитических расчетов мельниц роторного типа связано с численным моделированием процессов, протекающих внутри их помольных камер [4]. Разработка цифровых двойников технологического оборудования с возможностью их верификации относительно математических моделей технологических процессов также является весьма актуальной задачей.

Проведение аналитических исследований технологических и кинематических параметров различных роторных мельниц позволяет выявить взаимосвязь между конструктивными особенностями и технологическими характеристиками устройства, чтобы в дальнейшем продолжить работу по оптимизации ее режимных параметров для различных измельчаемых материалов [5]. Это важно для разработки новых конструкций мельниц и совершенствования (модернизации) на предприятиях существующих агрегатов с улучшенными показателями измельчения.

В условиях ограниченности ресурсов и необходимости снижения экологического воздействия такие исследования приобретают особую актуальность. Они способствуют созданию более совершенных технологий переработки сырья, что в конечном итоге способствует развитию промышленности в целом. Таким образом, проведение аналитических исследований кинематических и технологических параметров роторной мельницы оригинальной конструкции является важным направлением научных разработок, направленных на повышение эффективности оборудования, снижение затрат и обеспечение экологической безопасности производственных процессов.

Целью исследования является разработка методики расчета кинематических и технологических параметров работы роторной мельницы оригинальной конструкции.

Материалы, методы и объект исследования. Объектом исследования является оригинальная конструкция роторной мельницы [6], показанная на рисунке 1. Экспериментальная установка роторной мельницы показана в составе помольного комплекса.



Рис. 1. Экспериментальная установка помольного комплекса с роторной мельницей оригинальной конструкции (составлено Т.Н. Ореховой)

Технологический процесс измельчения материалов с использованием данной мельницы последовательно (от загрузки до разгрузки) показан на рисунке 2.

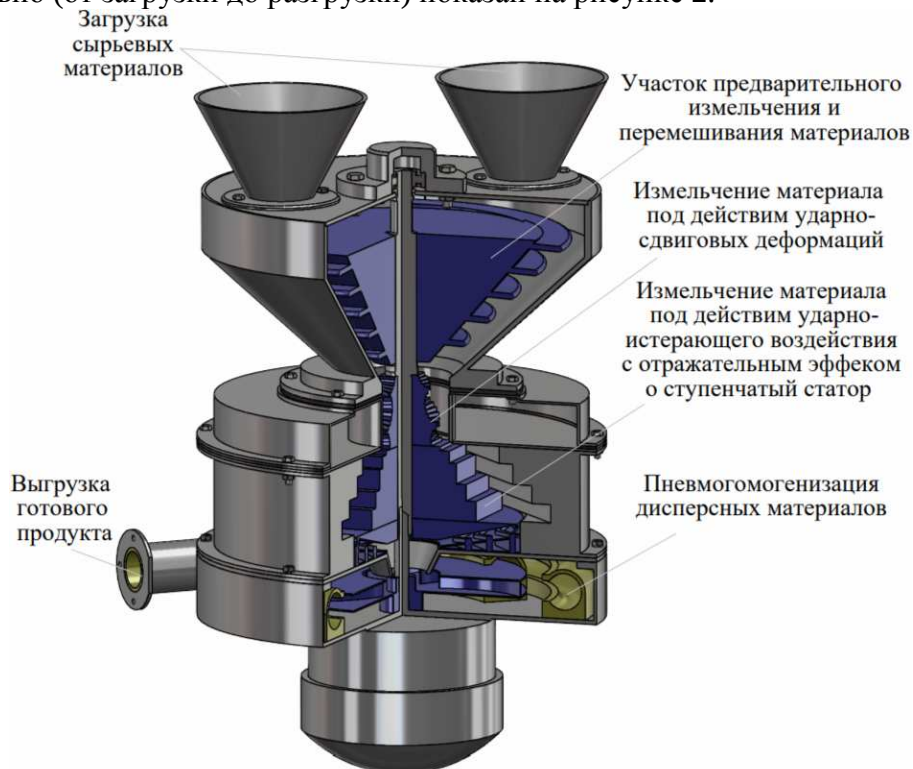


Рис. 2. Устройство роторной мельницы и технологические стадии измельчения материалов (составлено А.Е. Качаевым)

При проведении аналитических исследований кинематических и технологических параметров роторной мельницы [6] использовались следующие методы исследования: аналитические – математическое моделирование и расчет взаимосвязей между конструктивными параметрами и технологическими характеристиками мельницы. Используются уравнения механики, кинематики, динамики для определения оптимальных режимов работы мельницы; теоретические – анализ технологических процессов измельчения, взаимодействия материалов с рабочими элементами мельницы, оценка эффективности измельчения при различных параметрах.

Таким образом, приведенный выше комплекс методов позволяет всесторонне проанализировать конструкцию мельницы с целью повышения ее эффективности и надежности, а также получения методики расчета ее кинематических и технологических параметров.

Основная часть. Процесс измельчения сырья в мельнице [6] разработанной конструкции связан с кинематическими параметрами движения частицы в потоке несущей фазы (воздуха) – энергоносителя. Скоростной режим частиц и их способность измельчения в этот период определяют приведенную производительность мельницы. Для настоящего исследования рассмотрим системы дифференциальных уравнений для энергоносителя и частиц материала.

Уравнения движения и неразрывности осесимметричного несжимаемого газового потока – энергоносителя для условий его центробежного движения внутри камеры помола мельницы можно описать так [7]:

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial r} + W \frac{\partial V}{\partial z} - \frac{U^2}{r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu_s \cdot r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu_s \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial r} \right) \right] - 2\mu_s \frac{V}{r^2}, \quad (1)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial U}{\partial t} + V \frac{\partial U}{\partial r} + W \frac{\partial U}{\partial z} - \frac{U \cdot V}{r} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_s \cdot r \left(\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_s \frac{\partial U}{\partial z} \right) + \frac{\mu_s}{r^2} \left(\frac{\partial U}{\partial r} - \frac{U}{r} \right), \quad (2)$$

$$\rho \cdot \left(\frac{\partial W}{\partial t} + V \frac{\partial W}{\partial r} + W \frac{\partial W}{\partial z} \right) = - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[\mu_{\epsilon} \cdot r \left(\frac{\partial V}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_{\epsilon} \frac{\partial W}{\partial z} \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial (Vr)}{\partial r} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0, \quad (4)$$

где W , V , U – осевая, радиальная и окружная скорости энергоносителя, м/с; ρ – плотность энергоносителя – воздуха, кг/м³; μ_{ϵ} – эффективная вязкость воздуха, Па·с; P – статическое давление воздуха в помольной камере мельницы, Па; r – цилиндрический параметр помольной камеры, м; z – осевая координата помольной камеры мельницы, м; t – время, с.

Движение одиночной шарообразной частицы размером d_p в газовом потоке определяется системой уравнений одиночной частицы и подходом Лагранжа [1]:

$$\frac{dr}{dt} = V_p, \quad (5)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = U_p, \quad (6)$$

$$\frac{dz}{dt} = W_p, \quad (7)$$

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{V_p^2}{r} + a_1(V - V_p), \quad (8)$$

$$\frac{dU_p}{dt} = - \frac{U_p \cdot V_p}{r} + a_1(U - U_p), \quad (9)$$

$$\frac{dW_p}{dt} = -g + a_1(W - W_p), \quad (10)$$

где W_p , V_p , U_p – осевая, радиальная и окружная скорости частицы в потоке энергоносителя, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с; a_1 – коэффициент, определяющий характер движения сферической частицы, вычисляется из соотношения по [8]:

$$a_1 = \frac{3 \cdot \rho}{4 \cdot \rho_p} C_f, \quad (11)$$

где ρ_p – плотность частицы измельчаемого материала, кг/м³; C_f – коэффициент аэродинамического сопротивления сферической частицы, определяемый по аппроксимационным формулам в зависимости от числа Рейнольдса [9].

Радиальная, тангенциальная и осевая составляющие абсолютной скорости несущей среды (воздуха) в помольной камере мельницы могут быть рассчитаны по следующим выражениям, получаемым из решений уравнений (1)-(10) представленных выше:

$$V = \frac{\tau [\rho_p (U_p^2 - \mu_{\epsilon} V_p r) - P]}{r \cdot \rho_p (1 - \mu_{\epsilon} \tau)}, \quad (12)$$

$$U = \frac{U_p \cdot \tau \cdot [(V_p - \mu_{\epsilon} r)]}{r (1 - \mu_{\epsilon} \tau)}, \quad (13)$$

$$W = \frac{\tau \left(\mu_{\epsilon} \cdot V_p + \frac{P}{\rho_p \cdot z} \right)}{(1 - \mu_{\epsilon} \tau)}, \quad (14)$$

где τ – время релаксации скорости поступательного движения частицы, с (определяется в соответствии с работой [10]).

Роторные мельницы выделяются наличием нескольких изменяемых параметров, которые необходимо изучить для достижения оптимальной производительности. В частности, к ним относятся окружная скорость молотков и скорость, требуемая для дробления исходного материала, число ступеней дробления, а также угол смещения роторов.

Подбор окружной скорости бил определяется необходимостью обеспечения достаточной кинетической энергии для разрушения крупных частиц [11].

Согласно устройству роторной мельницы, показанному на рисунке 1, при измельчении материала под воздействием ударных элементов ротора мельницы частицы совершают вращательное движение, следуя по конусообразной винтовой траектории к отверстию для перехода на следующую стадию механического воздействия (от загрузки в зону ударно-сдвиговых деформаций, затем в зону ударно-истирающего воздействия и т.д.).

На скорость перемещения материала вдоль оси ротора V_m и угол наклона винтовых пластин β в разных секциях ротора оказывают влияние два ключевых фактора: число ударных элементов Z в поперечном сечении S_i мельницы и линейная скорость этих элементов $V_{y.э.}$. Именно $V_{y.э.}$ определяет интенсивность разрушения (V_{dez}) частиц материала в данной секции. Варьируя количеством ударных элементов Z и их линейной скоростью $V_{y.э.}$, мы модифицируем как частоту, так и силу ударного воздействия на измельчаемый материал. Для оценки интенсивности воздействия введем понятие «зон активного воздействия». Количество этих зон определяется как отношение общего числа ударных элементов к площади поперечного сечения мельницы. Эта величина отражает частоту ударов, приходящихся на единицу площади обрабатываемого материала:

$$k_z = \frac{Z \cdot N}{S_i}, \quad (15)$$

где Z – количество ударных элементов на ступени ротора, штю; N – количество ступеней измельчения ротора, шт.; S_i – площадь поперечного сечения мельницы, m^2 .

Следовательно, размер частиц R после измельчения и объемная пропускная способность Q напрямую определяются величиной линейной скорости $V_{y.э.}$ ударных элементов, а также числом действующих зон активного удара:

$$Q, R = f(V_{y.э.}, k_z). \quad (17)$$

В зависимости от необходимой энергии удара определяется линейная скорость ударных элементов, что позволяет определить количество зон активного воздействия на обрабатываемый материал. Осевая скорость движения материала в помольной камере мельницы через объемную производительность Q можно определить по формуле (5):

$$V_m = \frac{Q}{S_i \cdot \rho_p}. \quad (18)$$

Анализ оригинальной конструкции роторной мельницы, показывает, что при увеличении количества зон активного воздействия и линейной скорости ударных элементов $V_{y.э.}$ возрастает количество и сила ударного воздействия на материал, что увеличивает время нахождения материала в рабочей зоне, а осевая скорость движения материала при этом уменьшится. Тогда для осевой скорости движения материала V_m запишем зависимость:

$$V_m = \frac{k_p}{V_{y.э.} \cdot k_z}, \quad (19)$$

где k_p – коэффициент, связывающий скорость движения материала с линейной скоростью ударных элементов, количеством зон активного воздействия на обрабатываемый материал, характеризуется ускорением силы тяжести, участвующей в осевом продвижении материал внутри помольной камеры, c^{-2} .

Подставив выражение (15) в (19) и выполнив преобразования, получаем формулу для определения осевой скорости движения материала V_m внутри помольной камеры мельницы в зависимости от скорости движения ударных элементов $V_{y.э.}$ в i -том сечении:

$$V_m = 900 \cdot \frac{k_p \cdot \pi \cdot D_{cp}^2}{V_{y.э.} \cdot Z \cdot N}, \quad (20)$$

где D_{cp} – средний диаметр окружности, описываемой ударным элементом в i -том сечении, м.

При известной скорости движения материала V_m для процесса измельчения и объемного веса измельчаемого материала можно численно определить объемную производительность мельницы. Выразим из (3) Q получаем:

$$Q = V_m \cdot S_i \cdot \rho_p. \quad (21)$$

Выражение (20) подставляем в (21) и выполним алгебраические преобразования. Получим формулу для определения объемной производительности при измельчении материала в роторной мельнице:

$$Q = 3,33 \cdot \frac{\pi^2 \cdot D_{cp}^4 \cdot k_p}{V_{y.э} \cdot Z \cdot N} \cdot \rho_p. \quad (22)$$

Вычисленные параметры кинематики двухфазного потока и объемной производительности мельницы по полученным аналитическим выражениям относятся к абсолютным показателям. Однако процесс помола необходимо считать весьма стохастичным, а, значит, в таком случае необходимо понимать величину скорости, при которой будет происходить эффективное разрушение частиц. Помимо всего прочего необходимо определять условие, при котором частицы материала в заданном скоростном режиме работы ротора будут эффективно измельчаться. Такой режим и будет определять приведенную производительность роторной мельницы по готовому продукту.

Результаты и обсуждение. Согласно результатам работы [12], эмпирическая формула для мельниц роторного типа позволяет определить необходимое для разрушения частицы (куска) материала усилие в зависимости от начальных и конечных размеров частиц (кусков) измельчаемых материалов. Выражение имеет вид:

$$F_p = \frac{d_0^n \cdot d_k^{2-n}}{1,59} \cdot \sigma_p, \quad (23)$$

где d_0 – начальный диаметр частицы (куска) измельчаемого материала, м; d_k – конечный диаметр частицы измельчаемого материала, м; σ_p – предел прочности измельчаемого материала при раздавливании образцов неправильной формы размером d_0 , Па; n – показатель степени, характеризующий масштабный фактор.

В исследованиях [13], относящихся к роторным агрегатам, установлена зависимость силы удара рабочего элемента ротора по частице, которую необходимо разрушить. Сила удара элемента ротора по частице заданного размера (r_p) имеет следующий вид:

$$F_y = \frac{2(1-k)^2 \delta \cdot m_{y.э} \cdot V_{dez}^2 \cdot E}{d_p \cdot \sigma_{сж}}, \quad (24)$$

где k – коэффициент восстановления частицы материала при ударе, определяется в соответствии с существующей методикой [14]; δ – доля кинетической энергии от потеранных скоростей движения частицы и ударного элемента роторов (определяется по теореме Карно); $m_{y.э}$ – масса ударного элемента, кг; V_{dez} – скорость, при которой происходит разрушение частицы (куска) материала, м/с; E – модуль упругости измельчаемого материала, МПа; d_p – средневзвешенный размер частиц, м; $\sigma_{сж}$ – предел прочности измельчаемого материала на сжатие, МПа.

Приравняв выражения (23) и (24) друг к другу, и выразив из них параметр V_{dez} , получим окончательное выражение для определения скорости разрушения частицы материала заданного диаметра в роторной мельнице разработанной конструкции:

$$V_{dez} = \sqrt{\frac{d_0^n \cdot d_k^{2-n} \cdot \sigma_p \cdot d_p \cdot \sigma_{сж}}{3,18 \cdot \delta \cdot (1-k)^2 \cdot m_{y.э} \cdot E}}. \quad (25)$$

Следовательно, абсолютная скорость движения частицы, складывающаяся из квадратичной алгебраической суммы составляющих ее скоростей [15] по выражениям (5)-(7), должна удовлетворять условию:

$$V_A = \sqrt{(V_p)^2 + (U_p)^2 + (W_p)^2} \leq V_{dez}, \quad (15)$$

где V_A – абсолютная скорость движения частицы в помольной камере, определяемая по результатам численного расчета выражений (5)-(7), м/с.

Окончательно выражение для расчета приведенной производительности роторной мельницы в зависимости от начального и конечного размеров частиц (кусков) измельчаемого материала, его физико-механических характеристик можно определить из выражения на основании уравнения (21):

$$Q = \sqrt{\frac{d_0^n \cdot d_k^{2-n} \cdot \sigma_p \cdot d_p \cdot \sigma_{сж}}{3,18 \cdot \delta \cdot (1-k)^2 \cdot m_{y.э} \cdot E}} \cdot S \cdot \rho_p. \quad (16)$$

Полученное аналитическое выражение для определения приведенной производительности роторной мельницы оригинальной конструкции устанавливает зависимость от параметров прочности материала, размеров начального и конечного продукта измельчения, а также массовых и энергетических параметров ротора мельницы. Полученное выражение для приведенной производительности позволяет подобрать необходимый скоростной режим для измельчения того или иного материала с начальным размером частицы d_0 , который может изменяться в пределах средневзвешенного размера частиц d_p .

Выводы. При помощи аналитического решения дифференциальных уравнений несущей среды (воздуха) получены уравнения, позволяющие рассчитать абсолютную скорость энергоносителя в центробежном поле роторной мельницы. Определено, что движение одиночной шарообразной частицы со средневзвешенным размером d_p в газовом потоке определяется системой уравнений одиночной частицы, решение которой для оригинальной конструкции найдено в настоящем исследовании. Установлены зависимости радиальной, тангенциальной и осевой составляющих абсолютной скорости несущей среды (воздуха) в помольной камере мельницы от соответствующих составляющих скоростей частицы внутри помольной камеры агрегата. Получено выражение для приведенной производительности агрегата в функциональной зависимости от параметров прочности материала, размеров начального и конечного продукта измельчения, а также массовых и энергетических параметров ротора мельницы. Представлена методика последовательных расчетов кинематических и технологических параметров для мельницы оригинальной конструкции. Полученные результаты настоящего исследования могут быть использованы различными инженерами для расчета представленных параметров роторных мельниц различных конструктивных исполнений.

Список литературы

1. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Орехова Т.Н., Шкарпеткин Е.А. Дезинтегратор с внутренним рециклом измельчаемых материалов (монография). – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – 150 с.
2. Зарипов А.Н., Бушков В.В., Ланцев А.В., Кузнецов Д.С., Усов Д.А. Роторная мельница “МР-м” для приготовления буровых глинистых растворов // Фундаментальные научные исследования: теоретические и практические аспекты: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 16 мая 2022г. – Кемерово: ООО «Западно-Сибирский научный центр», 2022. – С. 82-85.
3. Михайличенко С.А., Шаталов А.В., Шаталов В.А. Определение основных параметров роторно-центробежного агрегата // Машины, агрегаты и процессы в строительной индустрии: Сборник докладов национальной конференции, Белгород, 10 июня 2021г. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 80-86.
4. Липанов А.М., Жиров Д.К. Математическое моделирование динамики движения частиц в установках по измельчению центробежно-ударного типа. Часть 1. Математическая модель // Химическая физика и мезоскопия. – 2014. – Т. 16, № 1. – С. 82-87.
5. Севостьянов В.С., Качаев А.Е., Бойчук И.П., Кузнецова И.А. Теоретические исследования процессов в роторной мельнице с комбинированным воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2017. – №9. – С. 122-129. – doi.org/10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
6. Патент №2444407 РФ. Роторная мельница / С.Н. Глаголев, В.С. Севостьянов, А.М. Гридчин, В.С. Лесовик, И.Г. Королев, А.Е. Качаев, М.Е. Шенцева, Т.Н. Орехова. – Заявка №2010138884 от 21.09.2010; опубл. 10.03.2012.

7. Попов В.Н., Латухина Е.А. Вычисление макропараметров разреженного газа в задаче о течении Куэтта методом дискретных скоростей // Вестник Государственного университета просвещения. Серия: Физика-Математика. – 2018. – №4. – С. 140-149. – doi.org/10.18384/2310-7251-2018-4-140-149.
8. Шувалов С.И., Андреев А.А. Математическое моделирование процесса разделения пыли в динамическом сепараторе // Повышение экономичности, надежности и экологической безопасности ТЭС: материалы научно-технической конференции, 18-19 мая 2005г., Москва. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – С. 185-191.
9. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
10. Пономарев В.Б., Фесун И.П. Математическое моделирование скорости осаждения частиц с учетом динамической релаксации // Теоретические основы химической технологии. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 636-642. – doi.org/10.31857/S0040357120040119.
11. Качаев А.Е. К определению времени удара и мощности дезинтегратора, расходуемой на измельчение при ударном воздействии // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2011. – №3. – С. 60-64.
12. Абушкевич А.А. Энергосберегающий помольный комплекс для цементного клинкера на основе роторно-цепного предизмельчителя и трубной мельницы: Дисс. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2000. – 153 с.
13. Качаев А.Е. Дезинтегратор с внутренним рециклом измельчаемых материалов: Дисс. ... канд. техн. наук. – Белгород, 2013. – 210 с.
14. Раус Э.Дж. Динамика системы твердых тел: В 2-х т. / пер. с англ. Ю.А. Архангельского. – Т. 1. – М.: Наука, 1983. – 463 с.
15. Лежава А.Г., Барсуков В.Г. Метод расчетной верхней оценки диапазона скоростей движения дисперсных частиц в центробежных ускорителях // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. – 2021. – Т. 11, №1. – С. 97-107.
16. Romanovich A.A., Bogdanov V.S., Romanovich L.G. Determination of power mill spent on the creation of the longitudinal motion of the grinding load // Journal of Applied Engineering Science. 2015, vol. 13, no. 3, pp. 155-160. – doi.org/10.5937/jaes13-8115.

References

1. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Orekhova T.N., Shkarpetkin E.A. Disintegrator with internal recycle of crushed materials (monograph). – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2024. – 150 p.
2. Zaripov A.N., Bushkov V.V., Lancev A.V., Kuznetsov D.S., Usov D.A. Rotor mill "MR-m" for the preparation of drilling clay solutions // Fundamental scientific research: theoretical and practical aspects: collection of materials of the International scientific and practical conference, Kemerovo, May 16, 2022. – Kemerovo: Limited Liability Company "West Siberian Scientific Center", 2022. – P. 82-85.
3. Mikhailichenko S.A., Shatalov A.V., Shatalov V.A. Determination of the main parameters of a rotary-centrifugal unit // Machines, units and processes in the construction industry: Collection of reports of the national conference, Belgorod, June 10, 2021. – Belgorod: Belgorod State Technological University n.a. V.G. Shukhov, 2021. – P. 80-86.
4. Lipanov A.M., Zhirov D.K. Mathematical modeling of the dynamics of particle motion in centrifugal impact grinding units. Part 1. Mathematical model // Chemical physics and mesoscopy. 2014, vol. 16, no. 1, pp. 82-87.
5. Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A. Theoretical studies of processes in a rotor mill with a combined effect on the ground material // Bulletin of BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2017, no. 9, pp. 122-129. – doi.org/10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
6. Patent No. 2444407 RU. Rotor mill / S.N. Glagolev, V.S. Sevostyanov, A.M. Gridchin, V.S. Lesovik, I.G. Korolev, A.E. Kachaev, M.E. Shentseva, T.N. Orekhova. – Appl. No. 2010138884 from 21.09.2010, publ. 10.03.2012.
7. Popov V.N., Latukhina E.A. Calculation of rarefied gas macroparameters in the Couette flow problem using the discrete velocity method // Bulletin of the State University of Education. Series: Physics-Mathematics. 2018, no. 4, pp. 140-149. – doi.org/10.18384/2310-7251-2018-4-140-149.
8. Shuvalov S.I., Andreev A.A. Mathematical modeling of the dust separation process in a dynamic separator // Improving the efficiency, reliability and environmental safety of thermal power plants: materials of the scientific and technical conference, May 18-19, 2005, Moscow. – М.: MPEI Publ. house, 2005. – P. 185-191.
9. Reynolds A.J. Turbulent Flows in Engineering Applications. – М.: Energy, 1979. – 408 p.
10. Ponomarev V.B., Fesun I.P. Mathematical Modeling of Particle Sedimentation Velocity Taking into Account Dynamic Relaxation // Theoretical Foundations of Chemical Technology. 2020, vol. 54, no. 5, pp. 636-642. doi.org/10.31857/S0040357120040119.
11. Kachaev A.E. On Determining the Impact Time and the Power of a Disintegrator Used for Grinding Under Impact Effects // Bulletin of the BSTU n.a. V.G. Shukhov. 2011, no. 3, pp. 60-64.
12. Abushkevich A.A. Energy-saving grinding complex for cement clinker based on a rotor-chain pre-grinder and a tube mill: Diss. ... cand. of tech. sc. – Belgorod, 2000. – 153 p.
13. Kachaev A.E. Disintegrator with internal recycling of crushed materials: Diss. ... cand. of tech. sc. – Belgorod, 2013. – 210 p.
14. Raus E.J. Dynamics of a System of Rigid Bodies: In 2 volumes / trans. from English by Yu.A. Arkhangel'sky. – Vol. 1. – М.: Science, 1983. – 463 p.

15. Lezhava A.G., Barsukov V.G. Method of calculating the upper estimate of the range of velocities of motion of dispersed particles in centrifugal accelerators // Bulletin of the Yanka Kupala Grodno State University. Series 6. Technology. 2021, vol. 11, no. 1, pp. 97-107.
16. Romanovich A.A., Bogdanov V.S., Romanovich L.G. Determination of power mill spent on the creation of the longitudinal motion of the grinding load // Journal of Applied Engineering Science. 2015, vol. 13, no. 3, pp. 155-160. – doi.org/10.5937/jaes13-8115.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Качаев Александр Евгеньевич – кандидат технических наук, научный сотрудник отдела сельхозводоснабжения	Kachaev Aleksandr Evgenievich – candidate of technical sciences, research fellow at the Department of agricultural water supply
Синица Елена Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»	Sinitza Elena Vladimirovna – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of technological complexes, machines and mechanisms
Уральский Алексей Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры механического оборудования	Uralskiy Aleksey Vladimirovich – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of mechanical equipment
Орехова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Подъемно-транспортных и дорожных машин	Orehova Tatyana Nikolaevna – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of lifting, transport and road machines
Строкова Валерия Валерьевна – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой материаловедения и технологии материалов	Stroкова Valeria Valerievna – doctor of technical sciences, professor, head of the Department of materials science and technology of materials
doctor_cement@mail.ru	

Получена 28.07.2025