

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-93-105

¹Качаев А.Е., ²Севостьянов В.С.¹Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

E-mail: doctor_cement@mail.ru

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ, ПОТРЕБЛЯЕМОЙ ДЕЗИНТЕГРАТОРОМ НА ТРЕНИЕ, ПРИ ДВИЖЕНИИ ОТНОСИТЕЛЬНОГО СЛОЯ МАТЕРИАЛА В ПОМОЛЬНОЙ КАМЕРЕ МЕЛЬНИЦЫ

Аннотация. Теоретические исследования в области расчета параметров мощности мельниц дезинтеграторного типа являются актуальными. Связано это с необходимостью их инженерного обоснования для последующего сравнения с результатами экспериментальных исследований измельчителей подобного типа. В процессе разработки методики расчета мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала внутри помольной камеры, были использованы прямые математические методы моделирования для определения силовых и энергетических параметров агрегата. Математическое моделирование процесса трения относительного слоя материала о рабочие поверхности помольной камеры проводилось на основании известных исследований о трении. Разработана и предложена к использованию методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Обозначены и выделены основные конструктивные параметры камеры помола мельницы, которые влияют на формирование показателя мощности мельницы, расходуемой ею на сопротивление трению двухфазного потока по основным поверхностям камеры помола дезинтегратора. Математически установлено, что конструктивно-технологические параметры оригинальной конструкции помольной камеры мельницы, ее скоростные режимы вращения роторов и кинематические параметры двухфазного потока находятся во взаимосвязи с энергетическими показателями ее работы. Представлены графические зависимости мощностей, потребляемых роторами дезинтеграторной мельницы на трение, от скоростных параметров вращения роторов при фиксированных значениях конструктивных параметров. На основании проведенного анализа расчета параметров мощностей, расходуемых дезинтегратором на трение материала о рабочие поверхности его помольной камеры, рекомендовано использовать представленный подход для расчета аналогичных показателей мощности и для других конструктивных решений роторных мельниц. Использование данной методики расчета в прогнозе продолжительности работы мельницы дезинтеграторного типа позволит сократить износ рабочих поверхностей помольной камеры, тем самым, повысив надежность при эксплуатации агрегата.

Ключевые слова: дезинтеграторная мельница, мощность, трение, помольная камера, момент трения, ротор.

Введение. Наиболее важным вопросом в промышленности строительных материалов остается износ технологического оборудования. В помольных, смесительных, формующих установках при производстве строительных материалов наблюдается изнашивание рабочих поверхностей, ударных частей, лопастей и др. [1–2]. Сдерживающим фактором в развитии помольного, смесительного и гранулирующего оборудования является намот металлических материалов в объеме готового продукта. Конструктивные особенности различных устройств смесителей и измельчителей постоянно совершенствуются на предмет обеспечения надежности работы таких агрегатов и повышения качества готового продукта [3].

Контактные напряжения на границе взаимодействия частицы материала с рабочим элементом измельчителя, или, например, лопастью роторного смесителя, позволяют оценивать величину износа в зависимости от энергетических параметров работы оборудования [4]. Однако, следует понимать, что оригинальные конструкции помольных агрегатов для различных технологических процессов промышленности строительных материалов по-разному испытывают нагрузки на трение. В зависимости от конструктивных особенностей измельчителя, его назначения и сложности технологического исполнения результат оценки его износа будет различным: при ультратонком помоле

($S_{уд} = 4000\text{--}6000 \text{ см}^2/\text{кг}$) величина износа контактных, рабочих поверхностей резко возрастает [5] при средней твердости измельчаемого материала по шкале Мооса 5–7 единиц, при грубом помоле (например, известняка до $S_{уд} = 1500\text{--}2000 \text{ см}^2/\text{кг}$) показатель износа в два раза ниже по сравнению с вышеуказанным условием [6].

В работе технологического оборудования очень важно учитывать условия процессов трения частиц материала по их рабочим и контактными поверхностям. Особенно износостойкими показателями для технологических процессов измельчения различных материалов должны обладать мельницы. Оценка процессов, связанных с износом материалов, из которых выполнены внутренние детали и узлы мельниц, необходима для прогнозирования сроков эффективной работы помольных агрегатов, а также объема качественной готовой продукции на единицу металлоемкости оборудования [7].

В зависимости от сложности конструктивного исполнения технологического оборудования меняются показатели его надежности, в том числе и физического износа контактных, рабочих поверхностей. В дезинтеграторной мельнице [8], показанной на рис. 1, сконструирована оригинальная конструкция помольной камеры. Ее отличительной особенностью является закрытое

конструктивное исполнение, обеспечивающее внутреннюю циркуляцию воздушно-материального потока [9]. Конструкции роторов мельницы, образующие помольную камеру, показаны на рис. 2.



Рис. 1. Дезинтеграторная мельница



Рис. 2. Конструкции роторов дезинтеграторной мельницы, образующие помольную камеру:
а) – внешний ротор; б) – внутренний ротор.

Целью настоящего исследования является разработка методики определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на

трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора.

Разработка такой методики расчета позволит определить количество энергии, которая потребляется мельницей при нагрузках трения, действующих внутри помольной камеры. Алгоритм расчета мощности, которая потребляется дезинтеграторной мельницей на трение слоя материала о рабочие поверхности помольной камеры, может быть использован для составления подобных расчетов относительно аналогичных конструктивных решений роторных мельниц. Определение мощности, расходуемой дезинтегратором на трение, позволит спрогнозировать износ рабочих поверхностей помольной камеры и тем самым,

повысить надежность и долговечность работы агрегата.

Методы и оборудование. При разработке методики расчета величины мощности, необходимой для преодоления трения воздушно-материальным потоком относительной высоты о рабочие поверхности помольной камеры в качестве объекта исследования использовался экспериментальный образец дезинтеграторной мельницы, показанный на рис. 1. Конструктивное исполнение помольной камеры дезинтеграторного агрегата показано на рис. 3.

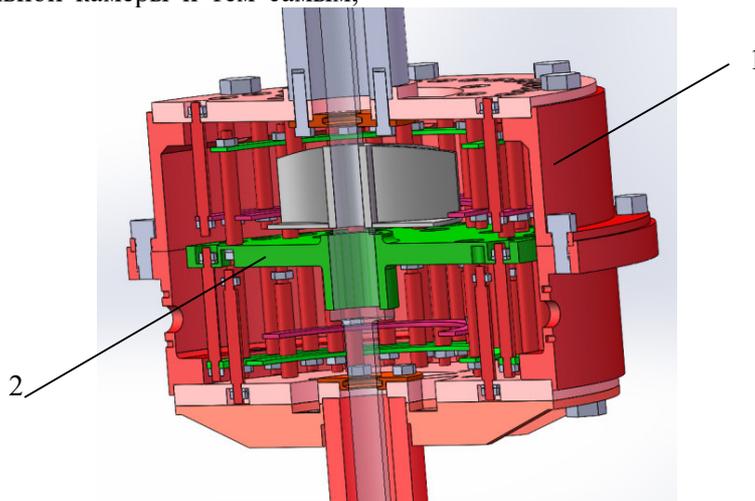


Рис. 3. Конструкция камеры помола дезинтеграторного измельчителя:
1 – внешний ротор; 2 – внутренний ротор.

Методика определения показателей мощности, необходимой для преодоления трения воздушно-материальным потоком внутри помольной камеры мельницы, использует прямые методы математического моделирования процессов. В методике используются результаты известных исследований по трению материалов о различные вращающиеся криволинейные поверхности [10-13].

Основная часть. Явление трения в дезинтеграторах является одной из важнейших причин, которая сдерживает широкое использование дезинтеграторных технологий измельчения в промышленности строительных материалов. Небольшие по размерам (например, по сравнению с молотковыми мельницами) ударные элементы различного профиля интенсивно изнашиваются и снижают надежность работы агрегата. Поэтому необходимо оценить количество энергии, которое тратится мельницей на трение двухфазного потока по контактным поверхностям помольной камеры измельчителя.

Двухфазный поток во вращательно-вихревом движении внутри помольной камеры мельницы вступает во взаимодействие с ударными элементами роторов и различными контактными поверхностями, принадлежащими камере помола

мельницы. При этом необходимо отметить, что форма ударных элементов, скоростные параметры вращения роторов, плотность двухфазного потока также оказывают влияние на величину мощности мельницы, которая потребляется ею на преодоление сопротивления всех силовых факторов трения.

На рабочие, контактные поверхности и ударные элементы помольной камеры измельчителя, представленной на рис. 3, — на внешний и на внутренний роторы — воздействуют силовые факторы трения воздушно-материального потока с дисперсными частицами. Вид этих взаимодействий и определяет характер трения двухфазного потока по различным криволинейным поверхностям.

В процессе взаимодействия воздушно-материального потока с рабочими поверхностями помольной камеры в местах контакта возникают различные силовые воздействия (ударные, сдвиговые и др.), одним из которых является воздействие трения, оказываемое со стороны частиц измельчаемого материала. Для нашего расчета мощности представим суммарную силу трения как сумму обобщенных силовых характеристик процесса трения, которые создаются и действуют на цилиндрические поверхности каждого из роторов внутри помольной камеры — $P_{б.внут}$ — и на

торцевые поверхности роторов – $P_{т.внут.}$. С акцентуируем внимание на том, что на торцевых поверхностях роторов по спиральной траектории устанавливаются ударные элементы, например, круглого (или произвольного) поперечного сечения. Геометрическое сечение ударных элементов определяется в зависимости от физико-механических характеристик измельчаемого материала. Силовой фактор трения двухфазного потока от-

носительно торцевой поверхности внешнего ротора имеет вид обобщенной характеристики совместного действия сил $P'_{т.тр.}$ и $P''_{т.тр.}$. Силовые факторы $P'_{т.тр.}$ и $P''_{т.тр.}$, соответственно, характеризуют процессы определенного воздействия двухфазного потока о торцевую площадь нижнего диска внешнего ротора и сложного обтекания вращающихся ударных элементов роторов двухфазным потоком.

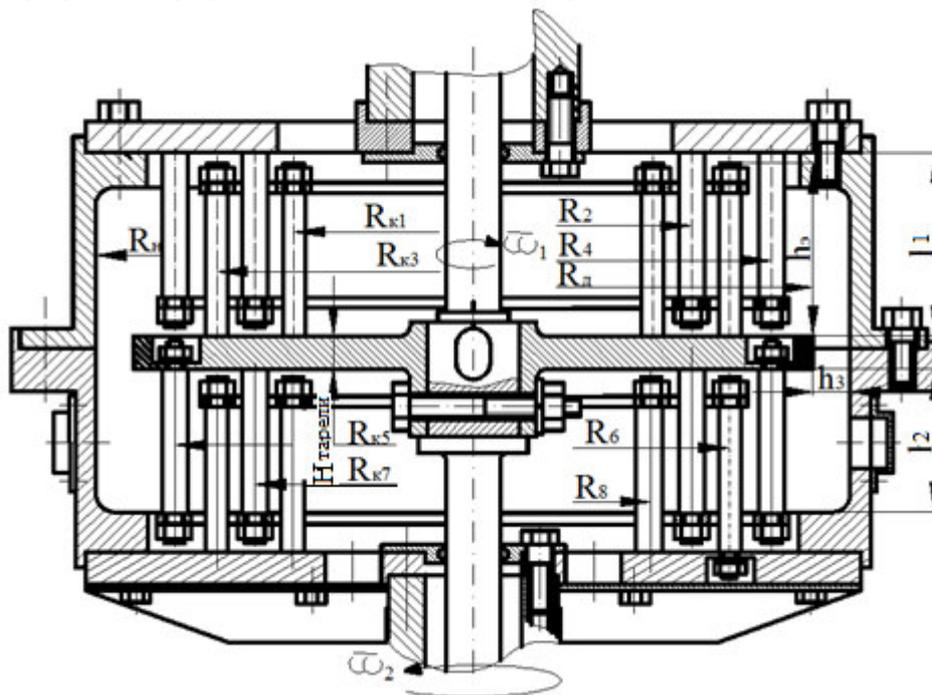


Рис. 4. Схема для расчета мощности мельницы, которая расходуется ею на сопротивление двухфазным потоком трению по контактным поверхностям камеры помола

Для сбора силовых нагрузок, действующих со стороны двухфазного потока на поверхности камеры помола, необходимо определиться с характером силовых нагрузок. Силовое равенство можно заключить в следящий вид:

$$\sum P_{тр.1} = \sum P_{б.внут.1} + \sum P_{т.внут.1} = P_{б.внут.1} + P'_{т.тр.1} + P''_{т.тр.1}. \quad (1)$$

Принимаем индекс 1 – для обозначения наружного ротора, индекс 2 – для внутреннего ротора.

Рассмотрим параметры трения, связанные с наружным ротором (индекс 1).

Определим силовой фактор трения двухфазного потока, который направлен на изнашивание цилиндрической поверхности наружного ротора. Причем его направление определяется с боковой стороны. Значит, с учетом результатов исследований в работе [14] выражение для определения данного силового фактора трения будет выглядеть следующим образом:

$$P_{б.внут.1} = \zeta \cdot \frac{\rho \varphi \cdot W_n^2}{2} \cdot A_{б.н.}, \quad (2)$$

где $A_{б.н.}$ – значение контактной поверхности наружного ротора, m^2 ; W_n – относительная тангенциальная скорость движения по окружности внутренней цилиндрической поверхности наружного ротора, m/c (данный параметр рассчитывается с помощью параметров кинематики трения частицы материала о вращающуюся цилиндрическую поверхность [15]); ζ – коэффициент аэродинамического сопротивления, выбор коэффициента осуществляется с учетом результатов работы [15], и для нашей методики может быть представлен в виде следующей математической функции:

$$\zeta = f(Re, G), \quad (3)$$

здесь G – критерий поверхностного подобия геометрии помольной камеры, характеризуется соотношением оптимального зазора Z между ударными элементами роторов к внутреннему размеру $D_{вн}$ наружного ротора:

$$G = \frac{Z}{D_{вн}}. \quad (4)$$

Re – автомодельный критерий Рейнольдса для нашего рассматриваемого случая. По результатам работы [16] получаем следующее выражение для числа Re в автомодельной области:

$$Re = \frac{\Omega_1 \cdot D_{\text{вн}}^2}{2\mu} \cdot \rho_{\varphi}, \quad (5)$$

где Ω_1 – численная характеристика угловой скорости наружного ротора, rad/c ; μ – динамический коэффициент вязкости двухфазного потока, определяемый по методике в [17], $кг/м \cdot с$. Рассчитывается Ω_1 из режимов работы агрегата для различных измельчаемых материалов и связана со скоростными параметрами вращения ротора.

Для выражения (2) важно верно определить W_n . Это параметр связан с относительной тангенциальной скоростью движения по криволинейной поверхности, которую образует наружный ротор. Относительную тангенциальную скорость движения W_n определить можно из известного выражения [18]:

$$W_n = \Omega_1 \cdot R_{\text{б.нар}}, \quad (6)$$

где $R_{\text{б.нар}}$ – радиальный размер от оси инерции наружного ротора до его внутренней цилиндрической поверхности до, $м$.

Параметр, связанный с размером площади контактной поверхности обозначим через обобщенную величину площади цилиндрической поверхности наружного ротора, которая находится внутри помольной камеры. Рассчитаем ее по уравнению [20]:

$$A_{\text{б.н.}} = 2\pi \cdot R_{\text{б.нар.}} \cdot l_0, \quad (7)$$

здесь h_0 – вертикальный габарит оригинальной конструкции помольной камеры, определяется величиной высоты наружного ротора, $м$. Определить его можно как сумму геометрических параметров высот верхней и нижней частей роторов, которые образуют помольную камеру мельницы [21-22]:

$$l_0 = l_1 + l_2 + d_{\text{диска}} \approx 2,2h_3 + d_{\text{диска}}, \quad (8)$$

где $d_{\text{диска}}$ – высота диска (тарели), который входит в состав внутреннего ротора, $м$; l_1, l_2 – вертикальные длины верхней и нижней частей рабочего объема помольной камеры мельницы, $м$. Вышеуказанные параметры геометрически рассчитываются из условия, что $l_1 = l_2 \approx 1,1h_3$; h_3 – высота ударного элемента, например, круглой формы, $м$.

Теперь необходимо произвести математические преобразования выражения (2) настоящей методики, для этого модифицируем его предложенными выражениями (6) и (7). Тогда получим, что:

$$P_{\text{б.внут.1}} = \pi \cdot \Omega_1 \cdot \rho_{\varphi} \cdot \zeta \cdot l_0 \cdot R_{\text{б.нар}}^3. \quad (9)$$

Для алгебраической конфигурации отнесем высоту помольной камеры l_0 , представляющую габаритным размером внутренней поверхности наружного ротора, к размеру внутреннего диаметра D_e , получим соотношение в виде [23]:

$$C_1 = \frac{l_0}{D_e}. \quad (10)$$

С учетом соотношения (10) расчетное выражение (9) для определения $P_{\text{б.внут.1}}$ будет иметь вид:

$$P_{\text{б.внут.1}} = 0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_{\varphi} \cdot \zeta \cdot D_e^4 \cdot C_1. \quad (11)$$

Для определения характеристик мощности представим момент силового фактора $P_{\text{б.внут.1}}$ для оси инерции наружного ротора в следующем виде (до множим уравнение (11) на плечо $R_{\text{б.нар}}$):

$$M_{\text{б.внут.1}} = 0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_{\varphi} \cdot \zeta \cdot D_e^5 \cdot C_1. \quad (12)$$

Аналогичным путем можем рассчитать составляющие силовые факторы для торцевой силы трения $P_{\text{т.внут.1}}$. По представленной выше методике расчета составляющих силовых факторов для боковой и торцевой сил, действующих на поверхности контакта помольной камеры, находим силу трения $P'_{\text{т.мп.1}}$ – двухфазного потока о торцевую поверхность нижней части наружного ротора дезинтеграторной мельницы.

Представим силовой фактор трения $P'_{\text{т.мп.1}}$ двухфазного потока по аналогии с уравнением (2) в следующем виде (этот фактор оказывает воздействие на торцевую поверхность нижней плоской части наружного ротора):

$$dP'_{\text{т.мп.1}} = \frac{1}{2} \cdot \zeta \cdot \rho_{\varphi} \cdot W_{\text{н.ч}}^2 \cdot dA'_{\text{мп}}, \quad (13)$$

где $W_{\text{н.ч}}$ – скоростная характеристика любой элементарной площадки нижней плоской части наружного ротора в его вращательном движении, $м/с$, определяется представленным выше выражением (6); $dA'_{\text{мп}}$ – бесконечно малая площадка трения воздушной фазы с частицами о нижнюю плоскую часть наружного ротора, $м^2$, в данной методике рассчитывается по аналогичному формуле (7) выражению и в интегральном виде выглядит так:

$$\int A'_{\text{мп}} = 2\pi \int_{R_1}^{R_2} R dR, \quad (14)$$

здесь R – величина расстояния расположения любой элементарной поверхности нижней плоской части наружного ротора до оси его вращения, $м$.

На основании вышеизложенного для выражения (13) выполним алгебраические преобразования, после чего выражение будет иметь вид:

$$dP'_{m.mp.1} = 2\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R^3 dR. \quad (15)$$

Выведем уравнение для определения момента силового фактора $dP'_{m.mp.1}$ относительно оси инерции нижней плоской части наружного ротора, которое нам в нашей методике будет необходимо для определения параметров мощности. Оно будет иметь следующий вид (до множим $dP'_{m.mp.1}$ на плечо R):

$$dM'_{m.mp.1} = R \cdot dP'_{m.mp.1} = 2\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R^4 dR. \quad (16)$$

Окончательно представим выражение (16) доступное к расчетной работе с подстановками, выполненными выше, относительно всей торцевой поверхности нижней плоской части наружного ротора в виде:

$$M'_{m.mp.1} = \frac{\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_6^5}{80}. \quad (17)$$

Аналогичным образом в методике расчета теперь необходимо определить вторую составляющую суммарного силового фактора трения $P''_{m.mp.}$, который действует посредством оказываемым двухфазным потоком давлением в рабочем объеме камеры помола на торцевую поверхность наружного ротора и на контактные поверхности ударных элементов мельницы.

Теперь для $P''_{m.mp.}$ на основании вышеизложенной методики для удовлетворения приведенного выше равенства (2) элементарный силовой фактор трения $P''_{m.mp.1}$ потока энергоносителя с частицами измельчаемого материала, который направленно воздействует на единичный ударный элемент z -четного ряда ротора, рассчитывается по формуле:

$$dP''_{m.mp.1} = \frac{1}{2} \zeta \cdot \rho_\varphi \cdot W_z^2 \cdot dA''_{mp}, \quad (18)$$

$$M''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3. \quad (22)$$

После определения всех составляющих моментов рассчитаем обобщенный момент суммарного силового фактора трения $P_{mp.1}$ по выражению алгебраической суммы следующих величин:

$$\begin{aligned} \sum M_{mp.1} = M_{\delta,внут.1} + M'_{m.mp.1} + M''_{m.mp.1} = & (0,125\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_6^5 \cdot C_1) + \left(\frac{\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_6^5}{80} \right) + \\ & + \left(0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3 \right). \end{aligned} \quad (23)$$

После математических преобразований (23) окончательно получим:

$$\sum M_{mp.1} = 0,25\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \left[\frac{D_6^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{l_0}{D_6} \right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \right]. \quad (24)$$

где W_z – окружная скорость движения ударного элемента z -четного ряда наружного ротора, m/c , рассчитываемая по аналогии с выражением (6) настоящей методики; dA''_{mp} – бесконечно малая площадка трения двухфазного потока внутри помольной камеры о контактные поверхности ударного элемента, например, круглого поперечного сечения, z -четного ряда наружного ротора, m^2 . Данный параметр для ударного элемента можно определить из выражения:

$$dA''_{mp} = 0,75\pi \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3, \quad (19)$$

d_3 – диаметр ударного элемента, например, круглой формы, m .

Теперь мы можем проинтегрировать выражение (18), после чего получим выражение для определения силы трения на условном ряду ударных элементов:

$$P''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R_z^2 \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3, \quad (20)$$

где R_z – расстояние от оси установки ударных элементов z – четного ряда ротора до центра его инерции (вращения), m .

В методике важно определить четные ряды ударных элементов, которые располагаются на том или ином роторе. Эти значения необходимо ввести в выражение (20). Тогда с учетом определенного количества ударных элементов n_z в z – четном ряду, просуммировав их, окончательно получим модифицированное выражение в виде:

$$\begin{aligned} P''_{m.mp.1} = 0,75\pi \cdot \Omega_1^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot (R_2^2 n_2 + R_4^2 n_4 + \\ + R_6^2 n_6 + R_8^2 n_8) \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3. \end{aligned} \quad (21)$$

Для нашей методики определения мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала в помольной камере мельницы, определяем момент силы $P''_{m.mp.1}$ относительно оси инерции наружного ротора в окончательном виде:

После определения всех необходимых составляющих мощности сил трения, которая тра-

тится на преодоление взаимодействия слоя материала с поверхностями наружного ротора, можем записать выражение для $N_{mp,1}$:

$$N_{mp,1} = \sum M_{mp,1} \cdot \Omega_1 = 0,25\pi \cdot \Omega_1^3 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \left[\frac{D_6^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{l_0}{D_6} \right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (R_2^3 n_2 + R_4^3 n_4 + R_6^3 n_6 + R_8^3 n_8) \right]. \quad (25)$$

Выражение (25) устанавливает зависимость мощности, которая тратится на трение двухфазного потока по поверхностям наружного ротора, от конструктивно-технологических характеристик помольной камеры мельницы, кинематических особенностей движения двухфазного потока в объеме оригинальной конструкции помольной камеры агрегата. Полученное выражение (25) позволяет рассчитывать оптимальные показатели работы проектируемого по данной конструктивной схеме агрегата во взаимосвязи с

конструктивными элементами мельницы и масштабировать данную конструкцию мельницы для различных измельчаемых материалов с различной необходимой производительностью по готовому продукту.

В совершенной аналогии, установленной выше, относительно выражения (1), суммарный силовой фактор трения $P_{mp,2}$, который воздействует на любую элементарную площадь поверхности внутреннего ротора, определится так:

$$\sum P_{mp,2} = \sum P_{б.внут.2} + \sum P_{т.внут.2} = P_{б.внут.2} + P'_{т.мп.2} + P''_{т.мп.2}. \quad (26)$$

Для определения боковой составляющей силы трения $P_{б.внут.2}$ на внутреннем роторе согласно рис. 4 и представленному в методике расчета выражению (9) после соответствующих математических преобразований будем иметь:

$$P_{б.внут.2} = \pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R_m^3 \cdot d_m, \quad (27)$$

где Ω_2 – угловая характеристика скорости вращения внутреннего ротора в помольной камере мельницы, рад/с; d_m – диаметр тарели внутреннего ротора мельницы, м; R_m – радиус центральной тарелки внутреннего ротора дезинтеграторной мельницы, м.

Для упрощения математических выражений выразим высоту тарели внутреннего ротора тарели внутреннего ротора $H_{тарели}$ через диаметральный размер тарели D_m , обозначив все это через:

$$C_2 = \frac{H_{тарели}}{D_m}. \quad (28)$$

После преобразований выражение (27) по аналогии с (11) будет выглядеть так:

$$dM'_{т.мп.2} = dP'_{т.мп.2} \cdot R_i = 2\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R_m^4 dR_i, \quad (32)$$

где R_i – плечо элементарной силы трения $dP'_{т.мп.2}$, полученной в выражении (31), от точки приложения нагрузки до оси вращения внутреннего ротора, м.

Проинтегрируем выражение (32), тогда получим, что момент $M'_{т.мп.2}$ учтенной торцевой площади поверхности тарели внутреннего ротора по аналогии с методикой получения выражения (17) будет равен:

$$M'_{т.мп.2} = 0,0125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_m^5. \quad (33)$$

$$P_{б.внут.2} = 0,125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_m^4 \cdot C_2. \quad (29)$$

В соответствии с вышеуказанной методикой момент силы трения $P_{б.внут.2}$ относительно оси инерции внутреннего ротора определяется из аналогичного (12) выражения:

$$M_{б.внут.2} = 0,0625\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_m^5 \cdot C_2. \quad (30)$$

По такой же аналогии с выражениями (13 - 14) элементарная сила трения двухфазного потока, оказывающая воздействие на элементарную торцевую площадь поверхности тарели внутреннего ротора дезинтеграторной мельницы, по выражению (2) представленной методики запишется так:

$$dP'_{т.мп.2} = 2\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot R_m^3 dR. \quad (31)$$

Нам для расчетов необходимо определить момент силового фактора $P'_{т.мп.2}$ относительно оси инерции вращающейся тарели внешнего ротора. Делаем это по аналогии с выражением (16):

Для выражения (26) рассчитать вторую составляющую суммарного силового фактора трения $P''_{т.мп.2}$, действующего на торцевую площадь поверхности тарели внутреннего ротора возможно исходя из выражений (18 - 19). Тогда получим, что:

$$P''_{т.мп.2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot L_u^2 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot h_3, \quad (34)$$

где L_u – длина спирали по ее дуге от первого ударного элемента до конечного, м. По такой спирали

располагаются на роторе только ударные элементы u -нечетных рядов. Для этого параметра важно отметить, что длина дуги спирали L_n находится в функциональной зависимости с радиусом ее кривизны [24-25].

$$P''_{m,mp.2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3 \cdot (L_1^2 m_1 + L_3^2 m_3 + L_5^2 m_5 + L_7^2 m_7). \quad (35)$$

Момент силового фактора $P''_{m,mp.2}$ для оси инерции внутреннего ротора запишется в виде:

$$M''_{m,mp.2} = 0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3 \cdot (L_1^3 m_1 + L_3^3 m_3 + L_5^3 m_5 + L_7^3 m_7). \quad (36)$$

Значит суммарный момент обобщенного силового фактора трения $P_{mp.2}$ представится в виде суммы:

$$\sum M_{mp.2} = M_{б.внут.2} + M'_{m,mp.2} + M''_{m,mp.2} = (0,0625\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_m^5 \cdot C_2) + (0,0125\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot D_m^5) + \left(0,75\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \cdot \frac{d_3}{2} \cdot h_3 \cdot (L_1^3 m_1 + L_3^3 m_3 + L_5^3 m_5 + L_7^3 m_7)\right). \quad (37)$$

Аналитически преобразуем уравнение (37), получаем:

$$\sum M_{mp.2} = 0,25\pi \cdot \Omega_2^2 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \left[\frac{D_m^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{H_{маре.ну}}{D_m}\right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (L_1^3 z_1 + L_3^3 z_3 + L_5^3 z_5 + L_7^3 z_7) \right]. \quad (38)$$

Определим величину мощности, которая расходуется мельницей на трение при движении

Теперь нам необходимо определить для выражения (34) через введение в него количества ударных элементов m_z в u – нечетных рядах величину $P''_{m,mp.2}$:

относительного слоя материала по рабочим поверхностям внутреннего ротора по обобщенной формуле:

$$N_{mp.2} = \sum M_{mp.2} \cdot \Omega_2 = 0,25\pi \cdot \Omega_2^3 \cdot \rho_\varphi \cdot \zeta \left[\frac{D_m^5}{20} \cdot \left(1 + 5 \frac{H_{маре.ну}}{D_m}\right) + 1,5d_3 \cdot h_3 (L_1^3 z_1 + L_3^3 z_3 + L_5^3 z_5 + L_7^3 z_7) \right]. \quad (39)$$

Результатом аналитических исследований стала разработанная методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Представленные в настоящей методике выражения (25) и (39) получены аналитически и способствуют отражению численных результатов расчета параметров мощностей трения, которые вызываются двухфазным потоком внутри камеры в результате трения о ее контактные рабочие поверхности. Представленные в методике окончательные выражения (25) и (39) помогают численно рассчитать величину мощности каждого из роторов дезинтегратора, которая затрачивается им на сопротивление всевозможным силовым характеристикам трения во время движения двухфазного потока внутри оригинальной конструкции помольной камеры агрегата.

Аналитические выражения (25) и (39) показывают свою зависимость не только от конструктивно-технологических параметров работы мельницы, но и устанавливают определенную связь в зависимости от физико-механических характеристик двухфазного потока и его кинематических параметров.

Графическая интерпретация численных расчетов мощностей роторов $N_{mp.1}$ и $N_{mp.2}$ в зависимости от угловой скорости вращения каждого из них показана на рис. 5. Величины моментов трения $M_{mp.1}$ и $M_{mp.2}$, полученных в выражениях (24) и (38) соответственно, определяют особенности контакта двухфазного потока с поверхностями помольной камеры: это зависит и от профиля ударных элементов, и от аэродинамического сопротивления объема помольной камеры; при этом существенное влияние на момент трения каждого из роторов оказывает геометрия расположения ударных элементов и кинематические параметры двухфазного потока.

Методика определения мощностей трения для наружного и внутреннего роторов отработана и графически представлена на рис. 5. По предложенной методике произведен численный расчет всех параметров, учтенных при ее разработке.

В соответствии с функциональной зависимостью, показанной на рис. 5, анализ параметров мощности трения настоящей методики численно показывает, что для наружного ротора мощность трения – $N_{mp.1}$ составляет 1425 Вт - при $\Omega_1 = 628$ рад/с (соответствует частоте вращения ротора $n_1 = 6000$ мин⁻¹); максимальное значение для

внутреннего ротора мощность трения – $N_{mp.2}$ составляет 1020 Вт – при также $\Omega_2 = 628$ рад/с (соответствует частоте вращения ротора $n_1 = 6000$ мин⁻¹). Зависимость мощности трения от угловой

скорости вращения роторов – линейная. Это связано с различными величинами $M_{mp.1}$ и $M_{mp.2}$, а также с линейно меняющейся угловой скоростью вращения роторов.

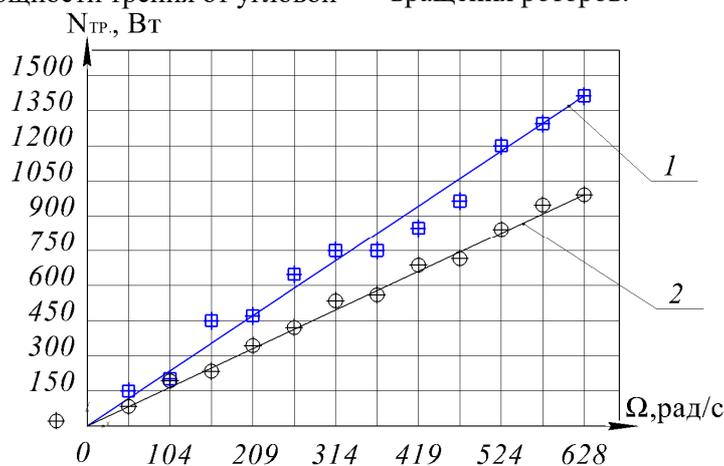


Рис. 5. Аппроксимированные функциональные зависимости потребляемой дезинтегратором мощности трения $N_{mp.}$ от угловой скорости вращения Ω его роторов: 1 – $N_{mp.1}$, Вт; 2 – $N_{mp.2}$, Вт.

Выводы. В результате аналитических исследований разработана и предложена к использованию методика определения величины мощности для оригинальной конструкции мельницы дезинтеграторного типа, расходуемой на трение при движении относительного слоя материала по рабочим поверхностям помольной камеры мельницы в отдельности для каждого ротора. Обозначены и выделены основные конструктивные параметры камеры помола мельницы, которые влияют на формирование показателя мощности мельницы, расходуемой ею на сопротивление трению двухфазного потока по основным поверхностям камеры помола дезинтегратора. Математически установлено, что конструктивные и технологические параметры оригинальной конструкции помольной камеры мельницы, ее скоростные режимы вращения роторов, а также кинематические параметры двухфазного потока находятся во взаимосвязи с энергетическими показателями ее работы. Представлены графические зависимости мощностей, потребляемых роторами дезинтеграторной мельницы на трение, от скоростных параметров вращения роторов при фиксированных значениях конструктивных параметров.

На основании проведенного анализа расчета параметров мощностей, расходуемых дезинтегратором на трение материала о рабочие поверхности его помольной камеры, рекомендовано использовать представленный подход для расчета аналогичных показателей мощности и для других конструктивных решений роторных мельниц. Использование данной методики расчета в прогнозе продолжительности работы мельницы дезинтеграторного типа позволит сократить износ

рабочих поверхностей помольной камеры, тем самым, повысив надежность агрегата при его эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинина Т.Я., Гронь В.А. Факторы абразивного износа и методы повышения износостойкости элементов футеровки барабанных мельниц // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4(48). С. 60–65.
2. Бальмонт Т.М., Гуюмджян П.П., Бальмонт Д.С. Износ ударных элементов ступенчатой мельницы // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2009. № 1. С. 57–60.
3. Шаталов А.В., Тимофеев В.А., Шаталов В.А. Определение основных параметров процесса измельчения в помольном комплексе ПВИ-БМ // Наукоемкие технологии и инновации: электронный сборник научных докладов Международной научно-практической конференции, Белгород, 06–07 октября 2016 года. Том Часть 4. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2016. С. 259–262.
4. Качаев А.Е., Севостьянов В.С., Королев И.Г. Дезинтегратор с ударно-сдвиговым воздействием на измельчаемый материал // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. № 1. С. 102–105.
5. Семикопенко И.А., Воронов В.П., Пензев П.П. Дезинтегратор с эффективной камерой помола // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2010. № 8(620). С. 83–88.

6. Гольшев Л.В., Мысак И.С. Определение потерь металла из-за износа шаров и брони барабана шаровой барабанной мельницы // Энергетик. 2008. № 4. С. 35–36.
7. Сиваченко Л.А., Моисеенко А.Б., Шаройкина Е.А. Создание рессорно-стержневых технологических аппаратов на основе интенсификации контактных взаимодействий их рабочих элементов // Материалы, технологии, инструменты. 2009. Т. 14, № 3. С. 115–119.
8. Пат. № 2377070. МПК7 В 02 С 13/22. Дезинтегратор // Гридчин А.М., Севостьянов В.С., Глаголев Е.С., Качаев А.Е. и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», ООО «ТК-РЕЦИКЛ». №2008118079/03. Заявл. 06.05. 2008; опублик. 27.12.2009.
9. 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: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097.
10. Пестренин В.М., Пестренина И.В., Ландик Л.В. Плоские нестандартные задачи для составного клина, одна из образующих которого скользит без трения вдоль жесткой поверхности // Материалы XIX Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2015), Алушта, 24–31 мая 2015 года. Алушта: Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2015. С. 321–323.
11. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Модели трения в турбулентных потоках при обтекании различных поверхностей // Вестник Казанского технологического университета. 2013. Т. 16, № 23. С. 82–86.
12. Сергеев Н.В., Лактионов Р.Е. Теоретические исследования изменения коэффициента трения при взаимодействии контактирующих поверхностей с добавкой АРВК // Евразийское Научное Объединение. 2021. № 1-2(71). С. 125–129.
13. Веттерген В.И., Пономарев А.В., Соболев Г.А. Изменение строения поверхности гетерогенного нанокристаллического тела (песчаника) при трении // Физика твердого тела. 2017. Т. 59, № 3. С. 569–574. DOI: 10.21883/FTT.2017.03.44172.319.
14. Гарабажиу А.А., Левданский А.Э. Аэродинамика движения частиц измельчаемого материала в рабочей камере роторно-центробежной мельницы // Труды Белорусского государственного технологического университета. Серия 3. Химия и технология неорганических веществ. 1999. № 7. С. 15–27.
15. Турубаев Р.Р., Шваб А.В. Моделирование аэродинамики закрученного турбулентного течения и процесса классификации частиц в вихревой камере. //Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95, № 5. С. 1248–1256.
16. Шиляев М.И., Шиляев А.М. Моделирование процесса пылеулавливания в прямооточном циклоне. 1. Аэродинамика и коэффициент диффузии частиц в циклонной камере // Теплофизика и аэромеханика. 2003. Т. 10, № 2. С. 157–170.
17. Шваб А.В., Евсеев Н. С. Исследование аэродинамики турбулентного закрученного течения в центробежном аппарате. // Известия вузов. Физика. 2012. Т. 55, № 7-2. С. 144–148.
18. Дмитриева Е.В., Плешивцев В. С. Учебное пособие по физике. Механика. Владим. гос. ун-т. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2009. 144 с.
19. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V.S., Kachaev A.E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 022084. DOI 10.1088/1757-899X/327/2/022084.
20. Сафрай В.М. Справочник по высшей математике: с примерами решения задач: для студентов вузов. Москва: Элит, 2004. 356 с.
21. Боровский Д.Н., Сенько Р.А., Гребенчук П.С. Моделирование аэродинамики в центробежно-шаровой мельнице с классификационной камерой // Горная механика и машиностроение. 2022. № 3. С. 89–94.
22. Ханин С.И., Мордовская О.С., Ханина Е.Г. Технологические возможности повышения эффективности работы шаровых мельниц. // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов: Межвузовский сборник научных статей / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Том XVI.: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 279–282.
23. Митрофанов О.В. Актуальные задачи и основные соотношения для исследований композитных панелей несимметричной структуры с учетом геометрической нелинейности // Естественные и технические науки. 2021. № 2(153). С. 140–144. DOI 10.25633/ETN.2021.02.06
24. Яблонев А. Л. Расчет длины дуги контакта деформированного пневматического колеса с торфяной залежью и площади их контакта

// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2010. № 9. С. 45–47.

25. Анахаев К.Н., Амшоков Б.Х., Анахаев К.К. К расчету длины геофизических объектов

гиперболического очертания // Природообустройство. 2021. № 4. С. 85–89. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-85-89

Информация об авторах

Качаев Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой строительного производства. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Коломенский институт (филиал) Московского политехнического университета. Россия, 140402, Московская область, г. Коломна, ул. Октябрьской революции, дом 408.

Севостьянов Владимир Семенович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических комплексов, машин и механизмов. E-mail: tkmm@bstu.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 12.07.2024 г.

© Качаев А.Е., Севостьянов В.С., 2024

¹Kachaev A.E., ²Sevostyanov V.S.

¹Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University,

²Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova

*E-mail: doctor_cement@mail.ru

CALCULATION OF THE POWER CONSUMED BY THE DISINTEGRATOR FOR FRICTION WHEN MOVEMENT OF THE RELATIVE LAYER OF MATERIAL IN THE GRINDING CHAMBER OF THE MILL

Abstract. Theoretical research in the field of calculating the power parameters of disintegrator-type mills is relevant. This is due to the need for their engineering justification for subsequent comparison with the results of experimental studies of grinders of a similar class. In the process of developing a methodology for calculating the power consumed by the disintegrator for friction during the movement of a relative layer of material inside the grinding chamber, direct mathematical modeling methods were used to determine the power and energy parameters of the unit. Mathematical modeling of the process of friction of a relative layer of material on the working surfaces of the grinding chamber was carried out on the basis of well-known studies on friction. A method for calculating the power consumed by a disintegrator for friction during the movement of a relative layer of material in the grinding chamber of a mill is proposed. The main design parameters that influence the formation of the mill power indicator, consumed by it for friction of the material against the working surfaces of the grinding chamber, have been determined. A mathematical relationship has been established between the design and technological parameters of the grinding chamber of the mill and the speed modes of rotation of the rotors with the energy indicators of the operation of the disintegrator mill. Graphical dependences of the powers consumed by the rotors of a disintegrator mill for friction on the speed parameters of rotation of the rotors at fixed values of design parameters are presented. Based on the analysis of the calculation of power parameters consumed by the disintegrator for friction of the material against the working surfaces of its grinding chamber, it is recommended to use the presented approach to calculate similar power indicators for other design solutions of rotary mills. The use of this calculation method in predicting the operating time of a disintegrator-type mill will reduce wear on the working surfaces of the grinding chamber, thereby increasing the reliability of the unit's operation.

Keywords: disintegrator mill, power, friction, grinding chamber, friction moment, rotor.

REFERENCES

1. Druzhinina T.Ya., Gron V.A. Factors of abrasive wear and methods for increasing the wear resistance of lining elements of drum mills [Faktery abrazivnogo iznosa i metody povysheniya iznosostoykosti elementov futerovki barabannykh mel'nits]. Modern technologies. System analysis. Modeling. 2015. No. 4(48). Pp. 60–65. (rus)

2. Balmont T.M., Guyumdzhyan P.P., Balmont D.S. Wear of impact elements of a step mill [Iznos udarnykh elementov stupenchatoy mel'nitsy]. Modern high-tech technologies. Regional application. 2009. No. 1. Pp. 57–60. (rus)

3. Shatalov A.V., Timofeev V.A., Shatalov V.A. Determination of the main parameters of the grinding process in the PVI-BM grinding complex

[Opredeleniye osnovnykh parametrov protsessa izmel'cheniya v pomol'nom komplekse PVI-BM]. High-tech technologies and innovations: electronic collection of scientific reports of the International Scientific and Practical Conference. Vol. Part 4. Belgorod: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. 2016. Pp. 259–262. (rus)

4. Kachaev A.E., Sevostyanov V.S., Korolev I.G. Disintegrator with shock-shear action on the crushed material [Dezintegrtor s udarno-sdvigovym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova. 2010. No. 1. Pp. 102–105. (rus)

5. Semikopenko I. A., Voronov V. P., Penzev P. P. Disintegrator with an effective grinding chamber [Dezintegrator s effektivnoy kameroy pomola]. News of higher educational institutions. Construction. 2010. No. 8(620). Pp. 83–88. (rus)

6. Golyshev L.V., Mysak I.S. Determination of metal losses due to wear of balls and drum armor of a ball drum mill [Opredeleniye poter' metalla iz-za iznosa sharov i broni barabana sharovoy barabannoy mel'nitsy]. Energetik. 2008. No. 4. Pp. 35–36. (rus)

7. Sivachenko L.A., Moiseenko A.B., Sharoykina E.A. Creation of spring-rod technological devices based on the intensification of contact interactions of their working elements [Sozdaniye resorno-sterzhnevnykh tekhnologicheskikh apparatov na osnove intensivatsii kontaktnykh vzaimodeystviy ikh rabochikh elementov]. Materials, technologies, tools. 2009. Vol. 14, No. 3. Pp. 115–119. (rus)

8. Gridchin A.M., Sevost'yanov V.S., Glagolev E.S., Kachaev A.E. Disintegrator. Patent RF, no. 2377070, 2009. (rus)

9. Sevostyanov V.S., Kachaev A.E., Boychuk I.P., Kuznetsova I.A. Theoretical studies of processes in a rotary mill with a combined effect on the crushed material [Teoreticheskiye issledovaniya protsessov v rotornoy mel'nitse s kombinirovannym vozdeystviyem na izmel'chayemyy material]. Bulletin of the Belgorod State Technological University. V.G. Shukhova. 2017. No. 9. Pp. 122–129. DOI: 10.12737/article_59a93b0aa409c9.96285097. (rus)

10. Pestrenin V.M., Pestrenina I.V., Landik L.V. Plane non-standard problems for a composite wedge, one of the generatrices of which slides without friction along a rigid surface [Ploskiye nestandartnyye zadachi dlya sostavnogo klina, odna iz obrazuyushchikh kotorogo skol'zit bez treniya vdol' zhestkoy poverkhnosti]. Proceedings of the XIX International Conference on Computational Mechanics and Modern Applied Software Systems (VMSPPS' 2015), Alushta, May 24–31, 2015. Alushta: Moscow Aviation Institute (National Research University), 2015, Pp. 321–323. (rus)

11. Laptev A.G., Farakhov T.M. Models of friction in turbulent flows around various surfaces [Modeli treniya v turbulentnykh potokakh pri obtekanii razlichnykh poverkhnostey]. Bulletin of the Kazan Technological University. 2013. Vol. 16. No. 23. Pp. 82–86. (rus)

12. Sergeev N.V., Laktionov R.E. Theoretical studies of changes in the coefficient of friction during the interaction of contacting surfaces with the ARVK additive [Teoreticheskiye issledovaniya izmeneniya koeffitsiyenta treniya pri vzaimodeystvii kontaktiruyushchikh poverkhnostey s dobavkoy ARVK]. Eurasian Scientific Association. 2021. No. 1-2(71). Pp. 125–129. (rus)

13. Vettegren V.I., Ponomarev A.V., Sobolev G.A. Change in the structure of the surface of a heterogeneous nanocrystalline body (sandstone) during friction [Izmeneniye stroyeniya poverkhnosti geterogennogo nanokristallicheskogo tela (peschanika) pri trenii]. Solid State Physics. 2017. Vol. 59. No. 3. Pp. 569–574. DOI 10.21883/FTT.2017.03.44172.319. (rus)

14. Garabazhiu A.A., Levdansky A.E. Aerodynamics of the movement of particles of crushed material in the working chamber of a rotary centrifugal mill [Aerodinamika dvizheniya chastits izmel'chayemogo materiala v rabochey kamere rotorno-tsentrobeznoy mel'nitsy]. Proceedings of the Belarusian State Technological University. Series No 3. Chemistry and technology of inorganic substances. 1999. No. 7. Pp. 15–27. (rus)

15. Turubaev R.R., Shvab A.V. Modeling the aerodynamics of swirling turbulent flow and the process of particle classification in a vortex chamber [Modelirovaniye aerodinamiki zakruchennogo turbulentnogo techeniya i protsessa klassifikatsii chastits v vikhrevoy kamere]. Engineering and Physical Journal. 2022. Vol. 95. No. 5. Pp. 1248–1256. (rus)

16. TShilyaev M.I., Shilyaev A.M. Modeling of the dust collection process in a direct-flow cyclone. 1. Aerodynamics and particle diffusion coefficient in a cyclone chamber [Modelirovaniye protsessa pyleulavlivaniya v pryamotochnom tsiklone. 1. Aerodinamika i koeffitsiyent diffuzii chastits v tsiklonnoy kamere.] Thermophysics and aeromechanics. 2003. Vol. 10. No. 2. Pp. 157–170. (rus)

17. Shvab A.V., Evseev N.S. Study of the aerodynamics of turbulent swirling flow in a centrifugal apparatus [Issledovaniye aerodinamiki turbulentnogo zakruchennogo potoka v tsentrobeznom apparate]. News of universities. Physics. 2012. Vol. 55. No. 7-2. Pp. 144–148. (rus)

18. Dmitrieva E.V., Pleshivtsev V.S. Textbook on physics. Mechanics [Uchebnoye posobiye po fizike. Mekhanika]. Vladim. state u-nt. Vladimir: Vladim Publishing House. state Univ. 2009. 144 p. (rus)

19. Orekhova T.N., Nosov O.A., Prokopenko V. S., Kachaev A. E. Complex modeling of technological processes in pneumatic mixers for production of dry construction mixtures. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 327. 022084. DOI 10.1088/1757-899X/327/2/022084.

20. Safray V.M. Handbook of higher mathematics: with examples of problem solving: for university students [Spravochnik po vysshey matematike: s primerami resheniya zadach: dlya studentov vuzov]. Moscow: Elit. 2004. 356 p. (rus)

21. Borovsky D.N., Senko R.A., Grebenchuk P.S. Modeling of aerodynamics in a centrifugal ball mill with a classification chamber [Modelirovaniye aerodinamiki v tsentrobezhno-sharovoy mel'nitse s klassifikatsionnoy kameroy]. Mining mechanics and mechanical engineering. 2022. No. 3. Pp. 89–94. (rus)

22. Khanin S.I., Mordovskaya O.S., Khanina E.G. Technological possibilities for increasing the efficiency of ball mills [ekhnologicheskkiye vozmozhnosti povysheniya effektivnosti raboty sharovykh mel'nits]. Energy-saving technological complexes and equipment for the production of building materials: Interuniversity collection of scientific articles. Belgorod State Technological University.

V.G. Shukhova. Volume XVI.: Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova, 2017. Pp. 279-282. (rus)

23. Mitrofanov O.V. Current problems and basic relationships for studying composite panels of asymmetric structure taking into account geometric nonlinearity [Aktual'nyye zadachi i osnovnyye sootnosheniya dlya issledovaniy kompozitnykh paneley nesimmetrichnoy struktury s uchetom geometricheskoy nelineynosti]. Natural and technical sciences. 2021. No. 2(153). Pp. 140–144. DOI 10.25633/ETN.2021.02.06. (rus)

24. Yablonev A.L. Calculation of the length of the arc of contact of a deformed pneumatic wheel with a peat deposit and the area of their contact [Raschet dliny dugi kontakta deformirovannogo pnevmaticheskogo koleasa s torfyanoy zalezhyu i ploshchadi ikh kontakta]. Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal). 2010. No. 9. Pp. 45–47. (rus)

25. Anakhaev K.N., Amshokov B.Kh., Anakhaev K.K. Towards the calculation of the length of geophysical objects of hyperbolic outline [K raschetu dliny geofizicheskikh ob'yektov giperbolicheskogo ochertaniya]. Nature Management. 2021. No. 4. Pp. 85–89. DOI: 10.26897/1997-6011-2021-4-85-89. (rus)

Information about the author

Kachaev, Aleksandr E. PhD, Head of the Department of Construction Production. E-mail: doctor_cement@mail.ru. Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University. Russia, 140402, Moscow region, Kolomna, st. October Revolution, building 408.

Sevostyanov, Vladimir S. Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Technological Complexes, Machines and Mechanisms. E-mail: tkmm@bstu.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, st. Kostyukova, 46.

Received 12.07.2024

Для цитирования:

Качаев А.Е., Севостьянов В.С. Расчет мощности, потребляемой дезинтегратором на трение, при движении относительного слоя материала в помольной камере мельницы // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 12. С. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-12-93-105

For citation:

Kachaev A.E., Sevostyanov V.S. Calculation of the power consumed by the disintegrator for friction when movement of the relative layer of material in the grinding chamber of the mill. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2024. No. 12. Pp. 93–105. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-10-93-105