

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА И ВЫСОТЫ АКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ РОТОРА ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЯ ВСТРЕЧНОГО УДАРА

В. В. Зубов¹, Д. И. Симисинов¹, С. Г. Фролов¹

¹ Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия (620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30), e-mail: 7sinov@mail.ru

Аннотация: рассматривается проектирование основных параметров измельчителя роторного встречного удара (ИРВУ). Измельчители имеют достаточно простое устройство и компактное исполнение, прямой привод наружного и внутреннего дисков от стандартных электродвигателей. Находят применение как в промышленности при измельчении небольших объемов гравийного и песчаного материалов, так и для пробоподготовки в испытательных лабораториях. Исследования процессов измельчения материалов встречным ударом вообще и в частности роторным измельчителем встречного удара изучены недостаточно подробно. В работе решена актуальная проблема разработки отсутствующей методики расчета основных геометрических параметров рассматриваемого измельчителя при его проектировании. Авторами на основе обобщения собственного опыта проектирования предложен методический подход к определению геометрических параметров ротора измельчителя встречного удара. Показано, что возможны два пути проектирования: без минимизации напора и с обеспечением минимального напора ротора-вентилятора. Результаты выполненных расчетов по приведенным эмпирическим зависимостям позволили сформулировать соответствующие рекомендации по радиусам, зазорам ротора, размерам активных элементов. Учтены эксплуатационные, технологические критерии для разрушения различных фракций материала. Предусмотрен проверочный расчет активных элементов на прочность. Материал статьи будет полезен для предприятий и организаций, занимающихся проектированием, производством и изготовлением измельчителей, а также студентов и аспирантов вузов.

Ключевые слова: ротор, конструкция, алгоритм, зазор ротора, радиус ротора, скорость удара, измельчитель встречного удара.

Для цитирования: Зубов В. В., Симисинов Д. И., Фролов С. Г. Определение количества и высоты активных элементов ротора измельчителя встречного удара // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 1-1. – С. 193–205. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_193.

The definition of the radial dimensions of the oncoming counterblow grinder

V. V. Zubov¹, D. I. Simisinov¹, S. G. Frolov¹

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract: The article discusses the design of the main parameters of the oncoming counterblow grinder. The grinders have a fairly simple device and compact design, have a direct drive of

external and internal disks from standard electric motors. They are used both in industry when grinding small volumes of gravel and sand materials, and for sample preparation in testing laboratories. Studies of the processes of grinding materials by counter impact in general, and in particular, by a rotary counter impact grinder have not been studied in sufficient detail. The paper solves the actual problem of developing a missing methodology for calculating the basic geometric parameters of the grinder in question during its design. The authors, based on the generalization of their own design experience, proposed a methodological approach to determining the geometric parameters of the rotor of the oncoming impact grinder. It is shown that two ways of designing are possible: without minimizing the head and with ensuring the minimum head of the rotor-fan. The results of the calculations performed according to the given empirical dependencies made it possible to formulate appropriate recommendations on the radius, rotor gaps, and sizes of active elements. Operational and technological criteria for the destruction of various fractions of the material are taken into account. A verification calculation of the active elements for strength is provided. The material of the article will be useful for enterprises and organizations involved in the design, production and manufacture of shredders, students and postgraduates of universities.

Key words: the rotor design, algorithm, gap of rotor, radius of rotor, speed of impact, the counterblow grinder.

For citation: Zubov V. V., Simisinov D. I., Frolov S. G. The definition of the radial dimensions of the oncoming counterblow grinder. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(1-1):193–205. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_011_0_193.

Введение

Измельчение является очень энергоемким процессом горного и металлургического производства. Около 58% потребляемой энергии при добыче полезных ископаемых используется для разрушения материалов [1–5], что обусловлено высокими требованиями к степени измельчения, связанными с тонкой вкрапленностью полезных ископаемых, низкими производительностью и КПД применяемого измельчительного оборудования. Поэтому проектирование энергоэффективного оборудования является актуальной задачей.

В горной и металлургической промышленности, лабораторных исследованиях находят применение измельчители роторного типа. В сравнении с роторными мельницами, дезинтеграторами, дисмембраторами, дисковыми и вибрационными истирателями измельчители роторного типа при минимальных массогабаритных харак-

теристиках имеют достаточно высокую производительность и надежность [6]. Недостатком существующих промышленных роторных измельчителей является низкая степень измельчения материала [7, 8].

Причиной указанного недостатка работы измельчителей является отсутствие методик расчета основных геометрических параметров рассматриваемого измельчителя при его проектировании, которые учитывают процессы, происходящие в лабиринтном роторе измельчителя во время разрушения материала [9, 10].

Вклад в изучение, разработку и совершенствование роторных измельчителей внесли работы Л. А. Вайсберга [11, 12], Л. Ф. Биленко [13], Э. А. Хопунова [14], А. И. Матвеева [10], А. И. Афанасьева [15] и других ученых.

Измельчители роторные встречного удара (ИРВУ), принцип действия которых основан на разрушении частиц горной породы встречным ударом, наи-

более близки по действию к дезинтеграторам [5]. Ключевым конструктивным отличием ИРВУ является конструктивно заданная геометрия рабочей зоны дезинтеграции, образованной каналами в кольцевых выступах измельчителя. По этой причине для ИРВУ характерно проявление стадийности измельчения материала по сравнению с процессами измельчения в дезинтеграторах. В связи с этим процесс измельчения материала при его прохождении через рабочую зону дезинтеграции ИРВУ хорошо поддается математическому анализу.

Устройство рабочего органа ИРВУ показано на рис. 1.

Основными элементами ИРВУ являются два ротора-вентилятора (РВ), выполненные в виде дисков, установленных на валах без дополнительных сопрягаемых деталей. Каждый ротор вращается на валу своего электродвигателя навстречу друг другу (приводы на рисунках не показаны). Измельчаемый материал подается в загрузочное окно 1, после измельчения напором воздуха выносится через разгрузочное окно 2.

В корпусе измельчителя 3 на одной оси установлены верхний (или вну-

тренний) 4 и нижний (или наружный) 5 роторы. На каждом диске ротора расположены ряды кольцевых выступов, радиальных каналов и стоек. Внешний вид роторов приведен на рис. 2, а; на рис. 2, б указаны роторы в сборе.

Конструкция верхнего ротора 4 (см. рис. 1) содержит закрепленное на его валу основание круглой формы, на котором расположены жестко закрепленные по его краям и равномерно распределенные подающие стойки 6 в количестве от 4 до 6 штук. На стойки прикреплен плоский диск с центральным отверстием, сопряженным с загрузочным окном 1. Основание, стойки и диск образуют рабочую камеру круглой формы с радиальными каналами по периметру. На стороне диска, обращенной к нижнему ротору, симметрично расположены кольцевые выступы 7, в которых с одинаковым шагом расположены радиальные каналы 8, 9, 10. При этом в каждом кольцевом выступе присутствует радиальный канал.

Конструкция нижнего ротора 5 представляет собой плоский диск, установленный на валу ротора. На стороне диска, обращенной к верхнему

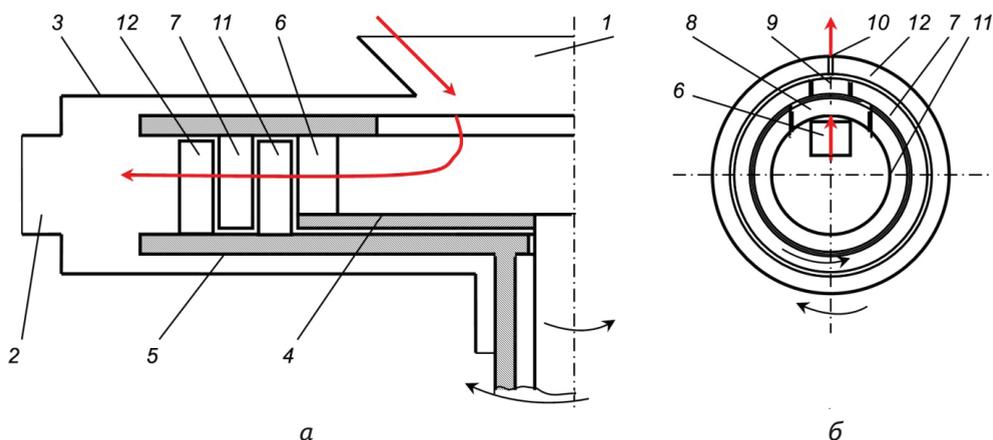


Рис. 1. Рабочий орган измельчителя роторного встречного удара: а – вид с боку; б – вид со стороны разгрузочного окна

Fig. 1. Counterblow grinder working body: a – side view; b – view from the unloading window

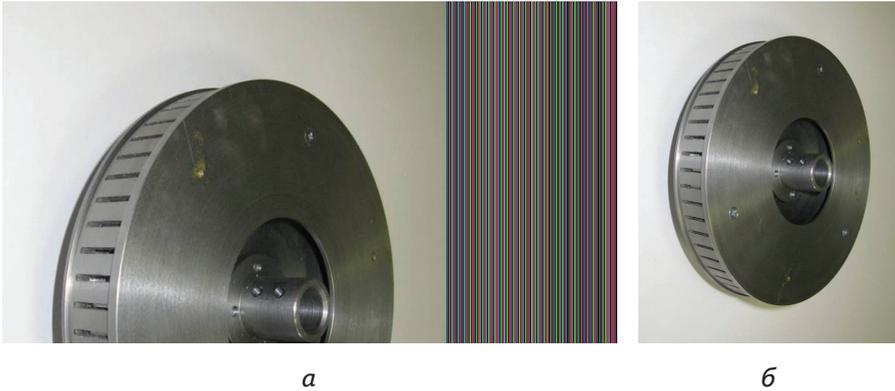


Рис. 2. Роторы измельчителя: а – роторы верхний и нижний; б – роторы в сборе
 Fig. 2. Grinder rotor: a – upper and lower rotors; b – assembled rotors

ротору, также симметрично располагаются кольцевые выступы 11 и 12 с расположенными на них, на равных расстояниях друг от друга, радиальными каналами, при этом кольцевые выступы диска нижнего ротора с гарантированными зазорами размещены между кольцевыми выступами диска верхнего ротора. Выступы и стойки дисков в сборе образуют рабочую зону дезинтеграции (см. рис. 2, б). Ряд стоек является 1-м рядом активных элементов зоны дезинтеграции, кольцевые выступы 7 верхнего ротора 4 и кольцевые выступы 11 и 12 нижнего ротора 5 являются 2, 3, 4-м рядами активных элементов измельчителя.

Количество кольцевых выступов на обоих плоских дисках, а также ширина и количество радиальных каналов в кольцевых выступах определяются прочностными характеристиками измельчаемого материала, требованиями к конечному продукту и диаметром роторов.

При вращении с высокой угловой скоростью ротор создает воздушный поток от загрузочного окна к разгрузочному. Поток положительно влияет на процесс измельчения, осуществляя сепарацию частиц. В то же время на его создание расходуется часть энергии

двигателей, в связи с чем существует необходимость минимизации создаваемого ротором расхода воздуха по критерию достаточности для эффективной сепарации.

Методы

Рассмотрим два варианта расчета конструкции ИРВУ: без минимизации давления ротора-вентилятора (вариант 1) и с минимальным давлением РВ (вариант 2), при котором выполняется условие $p = p_{\min}$.

При первом варианте конструкции ИРВУ угловые скорости дисков РВ равны: $\omega_1 = \omega_2$. Поскольку внешний радиус 1-го ряда активных элементов, представленного стойками 6 верхнего диска 4 равен внутреннему радиусу 2-го ряда активных элементов, представленного кольцевыми выступами 11 нижнего диска 5, $r_{12} \approx r_{21}$, можно с достаточной степенью точности предположить, что скорости дисков $u_{12} = u_{21}$ и, соответственно, скорость удара

$$V_{\text{уд}} \approx 2\dot{u}_1 r_{12}. \quad (1)$$

Чаще всего рекомендуется использовать наиболее доступный электропривод от короткозамкнутых асинхронных двигателей с установкой дисков РВ

непосредственно на вал электродвигателя. Такое решение исключает передаточные механизмы в конструкции измельчителя [16–18]. С учетом того, что размеры роторов измельчителя не должны превышать 200 мм, рекомендуемый выбор привода — два асинхронных двигателя с частотой вращения $n_{дв} = 3000$ об/мин, таким образом,

$$\omega_1 = \frac{\pi n_{дв}}{30}, \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где $n_{дв}$ — паспортная скорость вращения двигателя.

В соответствии с (1) и (2) получаем, что основной геометрический параметр ротора — внешний радиус стоек r_{12} (рис. 3) — может быть получен из выражения

$$r_{12} = \frac{v_{уд}}{2\omega_1}, \text{ м}. \quad (3)$$

Полученное значение радиуса r_{12} следует округлить до большего целого числа.

На следующем этапе расчета следует задать внутренний радиус стоек r_{11} (см. рис. 3). С целью увеличения производительности ИРВУ необходимо задавать минимальное значение радиуса, что обеспечит повышение относительной скорости измельчаемых частиц.

Для равномерного распределения разрушаемых частиц по поверхностям дисков роторов подачу разрушаемого материала необходимо производить на поверхность диска ротора 4 (см. рис. 1, а), лишенную выступов и впадин. Поэтому, исходя из опыта эксплуатации ИРВУ, для сохранения максимальной полезной площади поверхности диска толщину стоек рекомендуется принимать равной 10 мм. Тогда определяемый радиус стоек r_{11} будет на 10 мм меньше, чем r_{12} [19]:

$$r_{11} = r_{12} - 10. \quad (4)$$

Внутренний радиус 2-го ряда активных элементов, представленный кольцевыми выступами 11 (см. рис. 1, а), равен

$$r_{21} = r_{12} + \delta_r, \quad (5)$$

где δ_r — радиальный зазор между стойками наружного и внутреннего дисков.

Значение минимальной величины зазора δ_r , обеспечивающей самоочистку дисков от шлама, образующегося при измельчении продукта, является обязательным условием, способствующим, помимо этого, компенсации отклонения размеров деталей при их изготовлении [18]. Опыт производства измельчителей позволил определить оптимальное значение $\delta_r = 0,5$ мм [20].

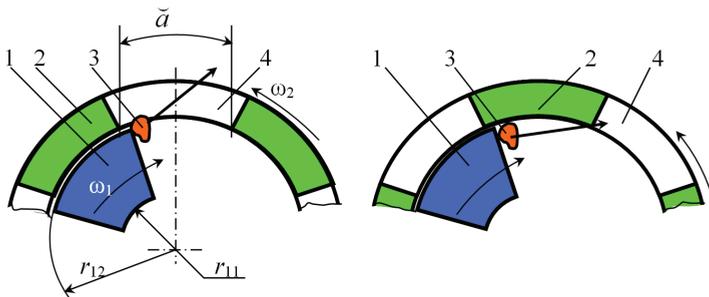


Рис. 3. Схема взаимодействия дисков с частицей: 1 — стойка; 2 — кольцевой выступ; 3 — разрушаемая частица; 4 — радиальный канал

Fig. 3. The scheme of interaction of disks with a particle: 1— stand; 2 — protrusion; 3 — destructible particle; 4 — radial channel

Для разрушения материалов с низкой плотностью, склонных к образованию пыли, важно сократить поступление воздуха в зону дезинтеграции. Для этого необходимо удалить часть стоек 6, соблюдая симметричность их расположения по диску. Число стоек в зависимости от материала устанавливается на основе результатов пробного измельчения малых количеств материала.

Увеличение скорости удара приводит к увеличению доли мелких фракций в получаемом продукте, также следует учитывать особенности ударного измельчения песка.

Ширина канала a_2 между 2-м рядом активных элементов (см. рис. 3) назначается в зависимости от крупности измельчаемого материала (диаметра частиц d); принимается близкой к размерам частиц для гравийного материала или пропорциональной радиусу стоек для песка, как установлено нами в работе [20]:

– для гравийного материала

$$a_2 = (1,0 \dots 1,25); \quad (6)$$

– для мелкого песка

$$a_2 = 2d \frac{r_{12}}{\sqrt{r_{12}^2 - r_{11}^2}}. \quad (7)$$

Полученное значение a_2 следует округлить до целого большего числа.

Высота активных элементов 2-го ряда, представленных кольцевыми выступами 11,

$$\begin{aligned} \Delta r_2 &= (2,5 \dots 3,0) \Delta r_{2\min} = \\ &= (2,5 \dots 3,0) a_2 \operatorname{tg} \alpha_{12} = \\ &= (1,25 \dots 1,50) a_2 \sqrt{1 - \frac{r_{11}^2}{r_{12}^2}}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\Delta r_{2\min}$ – минимальная высота активных элементов; α_{12} – угол между радиусом диска и направлением движе-

ния частицы в канал 2-го ряда активных элементов.

Полученное значение радиуса Δr_2 следует округлить до большего целого числа.

Внешний радиус 2-го ряда активных элементов – кольцевых выступов 11,

$$r_{22} = r_{21} + \Delta r_2. \quad (9)$$

Внутренний радиус 3-го ряда активных элементов, представленных кольцевыми выступами 7 верхнего ротора 4 (см. рис. 1, а), определяется согласно величине зазора:

$$r_{31} = r_{22} + \delta_r. \quad (10)$$

Размер радиальных каналов a_3 между кольцевыми выступами 7 3-го ряда активных элементов из опыта эксплуатации [19, 21] рекомендуется назначать в пределах 2–3 мм при их высоте $\Delta r_3 = 3\text{--}5$ мм. При этом следует учитывать, что минимальная толщина кольцевых выступов ограничена технологичностью их изготовления [18].

Внешний радиус 3-го ряда активных элементов и внутренний радиус 4-го ряда активных элементов, образованных кольцевым выступом 12 (см. рис. 1, а), рассчитываются по аналогичным формулам:

$$r_{32} = r_{31} + \Delta r_3; \quad (11)$$

$$r_{41} = r_{32} + \delta_r. \quad (12)$$

Ширина радиального канала между кольцевыми выступами 4-го ряда активных элементов a_4 назначается в зависимости от измельчаемого материала и методов отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний [20]:

– 1 мм для измельчения материалов в соответствии с ГОСТ 32520 «Руды железные, концентраты, агломераты и окатыши. Общие требования к методам химического анализа» (или подоб-

ными дезинтегрируемыми материалам и методикам);

– 2 мм для измельчения материалов в соответствии с ГОСТ 10742 «Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний» (или подобными материалам и методикам).

При этом высота активных элементов – кольцевых выступов 12, Δr_4 назначается в диапазоне от 2 до 4 мм в зависимости от величины радиуса r_{41} , большие значения – при максимальных радиусах кольцевых выступов вплоть до 200 мм.

Внешний радиус 4-го ряда активных элементов – кольцевых выступов 12,

$$r_{42} = r_{41} + \Delta r_4. \quad (13)$$

Одним из критериев обеспечения минимальных массогабаритных характеристик проектируемого измельчителя является ограничение величины внешнего радиуса 4-го ряда активных элементов до 200 мм:

$$r_{42} \leq 200 \text{ мм}. \quad (14)$$

В случае, если критерий (14) не соблюдается, то для уменьшения радиуса активных элементов потребуется увеличить скорости роторов ω_1 и ω_2 и соответственно уменьшить радиусы кольцевых выступов r_{41} и r_{42} .

Для уменьшения скоростей в пределах 20% рекомендуется воспользоваться возможностью асинхронных двигателей работать при частоте напряжения электрического тока 60 Гц.

Число активных элементов 1–4-го рядов: стоек 6 первого ряда s_1 и кольцевых выступов 11, 7, 12 ($s_2 - s_4$) принимается в зависимости от соблюдения следующих ограничений [19, 22, 23]:

а) $b_2 = 5 \dots 10$ мм; $b_3 = (1,0 \dots 1,5) a_3$; $b_4 = 3$ мм, где b_2, b_3, b_4 – ширина

активного элемента соответственно 2-го, 3-го и 4-го ряда;

б) $360/s_i = C_i$, где i – номер ряда (принимает значения от 1 до 4); C_i – целое число;

в) s_1 и s_2 не должны быть кратными друг другу.

Ширину b_1 кольцевых выступов 11 рекомендуется принимать в диапазоне значений $b_1 = 10-12$ мм.

Ширина b_2 кольцевых выступов 7 принимается в зависимости от измельчаемого материала:

– для гравия низкой прочности или мелкого песка – выбирается ширина кольцевых выступов меньшего размера;

– для гравия высокой прочности и песка крупностью порядка 2 мм – выбирается ширина кольцевых выступов большего размера.

Выполнение технологического критерия (б) позволяет обрабатывать радиальные каналы с применением универсальной делительной головки фрезерного станка.

Выполнение критерия (в) позволяет снизить динамику нагрузки на измельчитель за счет исключения работы наружного и внутреннего роторов в резонансных режимах [24, 25].

Фактически размер активных элементов – стоек и выступов разных рядов – может различаться по длине (соответственно, ширина кольцевых выступов может иметь различный размер): f_2, f_3, f_4 . Наименьшая ширина выступов должна равняться $f_{\min} = 20-25$ мм из соображений прочности элементов и достаточного ресурса при их абразивном изнашивании.

Механическую прочность активных элементов, выполненных в виде кольцевых выступов, необходимо проверить на соблюдение условия

$$v_j \geq [v], \quad (15)$$

где $j = 2, 3, 4$ — номер ряда активных элементов; v_j — деформация активного элемента j -го ряда, $[v] = 0,1\delta_r$ — допустимая деформация материала активного элемента.

Деформации v_2 активных элементов 2-го ряда ИРВУ, предназначенного для дезинтеграции гравия, в соответствии с (14) определяются как [26]

$$v_2 = 1500 \frac{\omega_2^2 f_2^4 \left[\rho_c \left(r_{21} + \frac{\Delta r_2}{2} \right) \Delta r_2 + \rho_m \left(r_{21} + \frac{d_j}{2} \right) d_j \right]}{E \Delta r_2^3}, \text{ мм}, \quad (16)$$

где $E = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па — модуль Юнга; все указанные линейные размеры подставляются в метрах.

Деформации v_3 активных элементов 3-го ряда равны

$$v_3 = 1500 \frac{\omega_3^2 f_3^4 \rho_c \left(r_{31} + \frac{\Delta r_3}{2} \right)}{E \Delta r_3^2}, \text{ мм}. \quad (17)$$

Деформации v_4 , а также v_2 при измельчении гравия низкой прочности или мелкого песка определяются по (17) при соответствующих характеристиках.

В случаях, если условие (15) не выполняется, необходимо:

- увеличить высоту кольцевых выступов дисков;
- уточнить радиусы кольцевых выступов пропорционально увеличению высоты выступов.

При выполнении условия (15) расчет количества и высоты активных элементов ротора по **первому варианту** конструкции ИРВУ следует считать выполненным.

Для **второго варианта** конструкции ИРВУ с целью определения числа оборотов дисков ротора необходимо назначить скорость удара частицы, после этого задать внешний радиус 2-го ряда активных элементов ротора r_{12} в соответствии с таблицей. Рекомендации по определению основного геометрического параметра — внешнего радиуса 2-го ряда активных элементов в зависимости от скорости удара (см. таблицу), получены нами на основе расчетов по изложенной методике проектирования геометрических параметров роторов и анализа полученных результатов.

Рекомендуемые значения радиуса 2-го ряда активных элементов
Recommended values of the radius of the second row of active elements

	Интервал скоростей удара, м/с		
	37±7	51±7	65±7
Внешний радиус 2-го ряда активных элементов r_{12} , мм	60±5	70±5	80±5

После определения r_{12} определяются другие геометрические параметры ротора по формулам (4) — (14) и угловые скорости при соблюдении следующих условий:

$$v_{\max} = \frac{qf^4}{8EJ} \leq [v], \quad (18)$$

$$\Delta r_2 = r_{22} - r_{21} \geq \text{atg}\alpha_2, \quad (19)$$

$$\omega_1 = \frac{v_{\text{уд}}(2r_{42}^2 + r_{22}^2 - r_{12}^2 - r_{32}^2)}{2r_{12}r_{42}^2}; \quad (20)$$

$$\omega_2 = \frac{v_{\text{уд}}}{r_{12}} - \omega_1. \quad (21)$$

На последнем этапе определяются количество стоек 1-го и кольцевых выступов со 2-го по 4-й ряды активных элементов $s_1 \dots s_4$ и проводится проверочный расчет активных элементов на прочность по условиям (15) – (17).

Заключение

Таким образом, на основе выполненных теоретических расчетов и полученных экспериментальных данных представлена методика определения геометрических параметров ротора измельчителя встречного удара на базе двух вариантов проектирования: 1) в отсутствие минимизации напора и 2) в режиме минимального напора ротора-вентилятора.

Методика позволяет определить оптимальные геометрические параметры машины в условиях минималь-

ных массогабаритных характеристик проектируемого измельчителя, технологичности его изготовления в зависимости от характеристик исходного продукта (от гравия до мелкого песка):

- характеристики приводов измельчителя;
- размеры и зазоры роторов;
- количество и размеры стоек верхнего ротора;
- количество и размеры кольцевых выступов и радиальных каналов верхнего и нижнего ротора.

Соблюдение предложенной методики проектирования ИРВУ позволит повысить производительность процесса измельчения и вместе с тем исключить переизмельчение продукта и обеспечить самоочистку дисков от шлама и механическую прочность активных элементов, снизить динамику нагрузки на измельчитель.

Методика рекомендуется к применению в проектировании ИРВУ, предназначенных для измельчения небольших объемов гравийного и песчаного материалов и для пробоподготовки в испытательных лабораториях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Holmberga K., Kivikytö-Reponena P., Härkisaarib P., Valtonenb K., Erdemir A.* Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry // *Tribology International*. 2017, vol. 115, pp. 116–139. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.
2. *Taylor L., Skuse D., Blackburn S., Greenwood R.* Stirred media mills in the mining industry: Material grindability, energy-size relationships, and operating conditions // *Powder technology*. 2020, vol. 369, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.057.
3. *Dogra M., Sharma V. S., Dureja J. S., Gill S. S.* Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding. A review // *Journal of cleaner Production*. 2018, vol. 197, pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.280.
4. *Корчевский А. Н., Назимко Е. И., Серафимова Л. И., Науменко В. Г.* Подготовительные процессы при обогащении полезных ископаемых. Дробление, измельчение, грохочение и классификация. — Донецк: ДонНТУ, 2017. — 180 с.
5. *Голик В. И.* Исследование влияния свойств твердых тел на энергетику измельчения в мельницах // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. — 2021. — № 10. — С. 112–122. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_112.

6. Patel D. K., Goyal D., Pabla B. S. Optimization of parameters in cylindrical and surface grinding for improved surface finish // Royal Society open science. 2018, vol. 5, no. 5. DOI: 10.1098/rsos.171906.

7. Sharapov R. R. Determination of the boundary conditions of the grinding load in ball mills // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2018, vol. 307, no. 1, p. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/307/1/012047.

8. Bardovsky A. D., Valeeva L. M., Basyrov I. I. A plant with a rotary jet grinder to produce small fractions of mineral raw material // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2020, vol. 971, no. 5, p. 052004. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052004.

9. Горлов И. В., Митусов П. Е., Беляев А. М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. — 2022. — № 6 (1155). — С. 44–47. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-44-47>.

10. Матвеев А. И., Винокуров В. Р. Разработка конструкции нового измельчителя горных пород комбинированного действия // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2020. — Т. 25. — № 3. — С. 63–73. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6.

11. Вайсберг Л. А., Коровников А. Н., Трофимов В. А. Модернизация технологических циклов грохочения на основе инновационного оборудования (к 100-летию института «Механобр») // Горный журнал. — 2017. — № 1. — С. 11–17. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02.

12. Вайсберг Л. А., Сафронов А. Н. О применении вибрационной дезинтеграции для переработки различных материалов // Обогащение руд. — 2018. — № 1. — С. 3–11. DOI: 10.17580/or.2018.01.01.

13. Биленко Л. Ф., Дьячкова Т. Ф. Способы совершенствования технологии дробления–измельчения руд на примере Богословского алюминиевого завода // Обогащение руд. — 2007. — № 4. — С. 3–7.

14. Хопунов Э. А. Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья // Современная техника и технологии. — 2014. — № 10. — С. 42–51.

15. Афанасьев А. И., Паньков С. А., Потапов В. Я., Фефелов М. И. Экспериментальные исследования ударного разрушения бедных сульфидных руд // Современные проблемы науки и образования. — 2013. — № 6. — С. 159.

16. Palaniandy S., Halotoan R., Ishikawa H. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit—The multi-component approach // Minerals Engineering. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.019.

17. Botha S., Le Roux J. D., Craig I. K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit // Minerals Engineering. 2018, vol. 123, pp. 49–62. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.016.

18. Zubov V. V., Simisinov D. I., Akhlyustina N. V., Khazin M. L., Davydov S. Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder // Refractories and Industrial Ceramics. 2018, vol. 58, no. 5, pp. 521–524. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0136-1>.

19. Ляпцев С. А., Ахлюстина Н. В. Моделирование движения частицы в измельчителе // Известия вузов. Горный журнал. — 2007. — № 8. — С. 107–110.

20. Ахлюстина Н. В., Зубов В. В. Управление воздушным потоком в каналах ротора измельчителя встречного удара // Известия вузов. Горный журнал. — 2015. — № 3. — С. 126–132.

21. Халкечев Р. К. Мультифрактальная модель распространения трещин в поликристаллах при ударных нагрузках // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2012. — № 3–2. — С. 17–23.

22. Матвеев А. И., Винокуров В. Р. Экспериментальные исследования по интенсификации процессов измельчения в ступенчатой центробежной мельнице // Природ-

ные ресурсы Арктики и Субарктики. — 2019. — Т. 24. — № 2. — С. 56–63. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-5.

23. Савиных П. А., Исупов А. Ю., Иванов И. И. Определение основных кинематических показателей движения частицы в канале распределительной чаши центробежно-роторного измельчителя // Вестник НГИЭИ. — 2020. — № 7 (110). — С. 37–46. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10062.

24. Батыров В. И., Алхудов Т. М. Обоснование основных конструктивных и технологических параметров двухвалкового роторного измельчителя // Известия Кабардино-Балкарского государственного аграрного университета им. В. М. Кокова. — 2022. — № 4 (38). — С. 87–97. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.

25. Жабин А. Б., Лавит И. М., Поляков А. В., Керимов Э. Э. Математическая модель разрушения горных пород ударным инструментом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2020. — № 11. — С. 140–150. DOI: 10.25018/0236-14932020-11-0-140-150.

26. Брагин В. Г., Волков Е. Б., Казаков Ю. М. Теоретическая механика. — Екатеринбург: УГГУ, 2018. — 249 с. **ПЛАБ**

REFERENCES

1. Holmberga K., Kivikytö-Reponena P., Härkisaarib P., Valtonenb K., Erdemir A. Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry. *Tribology International*. 2017, vol. 115, pp. 116–139. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.

2. Taylor L., Skuse D., Blackburn S., Greenwood R. Stirred media mills in the mining industry: Material grindability, energy-size relationships, and operating conditions. *Powder technology*. 2020, vol. 369, pp. 1–16. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.04.057.

3. Dogra M., Sharma V. S., Dureja J. S., Gill S. S. Environment-friendly technological advancements to enhance the sustainability in surface grinding. A review. *Journal of cleaner Production*. 2018, vol. 197, pp. 218–231. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.05.280

4. Korchevsky A. N., Nazimko E. I., Serafimova L. I., Naumenko V. G. Preparatory processes in the enrichment of minerals. Crushing, grinding, screening and classification. Donetsk: DonNTU, 2017. 180 p. [In Russ].

5. Golik V. I. Investigation of the influence of the properties of solids on the energy of grinding in mills. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 10, pp. 112–122. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_10_0_112.

6. Patel D. K., Goyal D., Pabla B. S. Optimization of parameters in cylindrical and surface grinding for improved surface finish. *Royal Society open science*. 2018, vol. 5, no. 5. DOI: 10.1098/rsos.171906.

7. Sharapov R. R. Determination of the boundary conditions of the grinding load in ball mills. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2018, vol. 307, no. 1, p. 012047. DOI: 10.1088/1757-899X/307/1/012047.

8. Bardovsky A. D., Valeeva L. M., Basyrov I. I. A plant with a rotary jet grinder to produce small fractions of mineral raw material. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing. 2020, vol. 971, no. 5, p. 052004. DOI: 10.1088/1757-899X/971/5/052004

9. Gorlov I. V., Mitusov P. E., Belyaev A. M. Analysis of the grinding process of weak rocks. *Ugol*. 2022, no. 6 (1155), pp. 44–47. [In Russ]. DOI: <http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2022-6-44-47>.

10. Matveev A. I., Vinokurov V. R. Design development of a new combined-action rock shredder. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2020, vol. 25, no. 3, pp. 63–73. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2020-25-3-6.

11. Vaisberg L. A., Korovnikov A. N., Trofimov V. A. Modernization of technological screening cycles based on innovative equipment (to the 100th anniversary of the Institute "Mechanobr"). *Gornyj zhurnal*. 2017, no 1, pp. 11–17. DOI: 10.17580/gzh.2017.01.02 [In Russ.]
12. Vaisberg L. A., Safronov A. N. O application of vibrational disintegration for processing of various materials. *Obogashhenie rud*. 2018, no. 1, pp. 3–11. [In Russ]. DOI: 10.17580/or.2018.01.01.
13. Bilenko L. F., Dyachkova T. F. Ways to improve the technology of crushing and crushing ores on the example of the Theological aluminum plant. *Obogashhenie rud*. 2007, no. 4, pp. 3–7. [In Russ].
14. Hopunov E. A. Analysis of the causes of low energy efficiency of the processes of destruction of mineral raw materials. *Sovremennaya texnika i texnologii*. 2014, no. 10, pp. 42–51. [In Russ].
15. Afanasyev A. I., Pankov S. A., Potapov V. Ya., Fefelov M. I. Experimental studies of impact destruction of poor sulfide ores. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2013, no. 6, pp. 159–159. [In Russ].
16. Palaniandy S., Halomoan R., Ishikawa H. TowerMill circuit performance in the magnetite grinding circuit–The multi-component approach. *Minerals Engineering*. 2019, vol. 133, pp. 10–18. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.12.019.
17. Botha S., Le Roux J. D., Craig I. K. Hybrid non-linear model predictive control of a run-of-mine ore grinding mill circuit. *Minerals Engineering*. 2018, vol. 123, pp. 49–62. DOI: 10.1016/j.mineng.2018.04.016.
18. Zubov V. V., Simisinov D. I., Akhlyustina N. V., Khazin M. L., Davydov S. Ya. Determination of the parameters of a counterblow grinder. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2018, vol. 58, no. 5, pp. 521–524. <https://doi.org/10.1007/s11148-018-0136-1>.
19. Lyaptsev S. A., Akhlyustina N. V. Modeling of particle motion in a shredder. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2007, no. 8, pp. 107–110. [In Russ].
20. Akhlyustina N. V., Zubov V. V. Air flow control in the channels of the rotor of the oncoming impact chopper. *Izvestiya vuzov. Gornyj zhurnal*. 2015, no. 3, pp. 126–132. [In Russ].
21. Khalkechev R. K. Multifractal model of crack propagation in polycrystals under shock loads. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2012, no. 3–2, pp. 17–23. [In Russ].
22. Matveev A. I., Vinokurov V. R. Experimental studies on the intensification of grinding processes in a stepped centrifugal mill. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2019, vol. 24, no. 2, pp. 56–63. [In Russ]. DOI: 10.31242/2618-9712-2019-24-2-5.
23. Savinykh P. A., Isupov A. Yu., Ivanov I. I. Determination of the main kinematic parameters of particle motion in the channel of the distribution bowl of a centrifugal rotary shredder. *Vestnik NGIEI*. 2020, no. 7 (110), pp. 37–46. [In Russ]. DOI: 10.24411/2227-9407-2020-10062.
24. Batyrov V. I., Apkhudov T. M. Substantiation of the main design and technological parameters of a two-roll rotary shredder. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta im. V. M. Kokova*. 2022, no. 4 (38), pp. 87–97. [In Russ]. DOI: 10.55196/2411-3492-2022-4-38-87-97.
25. Zhabin A. B., Lavit I. M., Polyakov A. V., Kerimov Z. E. Mathematical model of rock destruction by percussion instrument. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020, no. 11, pp. 140–150. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-14932020-11-0-140-150.
26. Bragin V. G., Volkov E. B., Kazakov Yu. M. Theoretical mechanics. Yekaterinburg, UGGU, 2018, 249 p. [In Russ].

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Симисинов Денис Иванович — докт. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой эксплуатации горного оборудования, <http://orcid.org/0000-0001-6095-0073>, УГГУ, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, E-mail: 7sinov@mail.ru;

Зубов Владимир Владимирович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры эксплуатации горного оборудования, <http://orcid.org/0000-0003-0659-9870>, УГГУ, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, E-mail: v.zubov.r66@yandex.ru;

Фролов Сергей Георгиевич — канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой технологии и техники разведки, <http://orcid.org/0000-0003-1112-4212>, УГГУ, 620144, Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, E-mail: sergey.frolov@m.ursmu.rumailto:7sinov@mail.ru.

Для контактов: *Симисинов Денис Иванович*, e-mail: 7sinov@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Simisinov D. I., Dr. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Mining Equipment Operation Department, Ural State Mining University 7sinov@mail.ru;

Zubov V. V., Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department Mining Equipment Operation Department, Ural State Mining University v.zubov.r66@yandex.ru;

Frolov S. G., Cand. Sci. (Eng.), Docent, Head of the Department of Technology and Technical Mineral Exploration, Ural State Mining University sergey.frolov@m.ursmu.ru.

Corresponding author: *Simisinov D. I.*, 7sinov@mail.ru.

Получена редакцией 15.05.2023; получена после рецензии 25.11.2023; принята к печати 10.12.2023.

Received by the editors 15.05.2023; received after the review 25.11.2023; accepted for printing 10.12.2023.

