



ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
 УДК 621.9;621.926
 DOI: 10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175

ПРИМЕНЕНИЕ ВИБРОПРИВОДОВ С МОДУЛИРУЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В ДРОБИЛКАХ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ФРАКЦИОННЫМ СОСТАВОМ ДИСПЕРСНОЙ ФАЗЫ

Сергеев Ю.С.¹, Платов С.И.², Гузеев В.И.¹, Сергеев С.В.¹

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. При обогащении ценных минералов отбраковывают породу, не соответствующую требуемому качеству. Глубокая переработка таких отходов диспергированием позволит наиболее полно их использовать в других отраслях. На сегодня процесс разьединения минералов достигается только поэтапным дроблением, а традиционные способы не обеспечивают однородность дисперсных частиц. Это объясняется тем, что у таких пород сложное трехосное напряженное состояние, а разрушение при диспергировании может происходить либо по плоскостям напластования, либо по плоскостям с критическим значением комбинаций напряжений, характерных для данного минерала. Анизотропная структура среды может быть трансверсальной и ортотропной со своими характерными топологическими картинами тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у анизотропных материалов нет предсказуемости в формировании «сетки» трещин, то при использовании традиционных методов диспергирования невозможно управлять размером дисперсных частиц. В реальном твердом теле всегда существует система пространственных микро- и макродефектов, статически распределенных в массиве тела и частично выходящих на его поверхность. Такие дефекты обладают высокой подвижностью и способны к коагуляции и аннигиляции из-за теплового движения молекул и механических напряжений. Следовательно, процесс деформации тела сводится к увеличению размеров и количества макро- и микродефектов. Новая концепция размерного диспергирования хрупких сред обоснована повышением объемной геометрической однородности получаемых дисперсных частиц. Это можно достигнуть путем введения в зону разрушения материала комплексного управляемого вибрационного воздействия в виде принудительных амплитудно-модулируемых колебаний рабочего органа конусной дробилки для одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин. Такой подход управления трещинообразованием позволит одновременно добиваться квазиоднородности дисперсного продукта, а однородная крошка способствует реализации воксельного (селективного) принципа укладки дисперсных частиц, применяемых в композитах, так как они теснее укладываются.

Ключевые слова: диспергирование, хрупкие материалы, виброприводы с модулирующими свойствами, управление однородностью, производство дисперсных материалов, энергосберегающие станки

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (региональный конкурс Челябинской области) № 22-29-20067, <https://rscf.ru/project/22-29-20067/>.

© Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В., 2023

Для цитирования

Применение виброприводов с модулирующими свойствами в дробилках хрупких материалов для управления фракционным составом дисперсной фазы / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2023. Т. 21. №4. С. 164-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
 The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

APPLICATION OF VIBRATION DRIVES WITH MODULATING PROPERTIES IN CRUSHERS OF BRITTLE MATERIALS TO CONTROL THE FRACTIONAL COMPOSITION OF THE DISPERSED PHASE

Sergeev Yu.S.¹, Platov S.I.², Guzeev V.I.¹, Sergeev S.V.¹

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. When beneficiating valuable minerals, rock failing to meet the required quality is rejected. Downstream processing of such wastes by dispersing contributes to their fullest utilization in other industries. Today, the mineral separation process is achieved by step-by-step crushing only, and conventional methods do not ensure homogeneity of dispersed particles. This is explained by the fact that such rocks have a complex triaxial stress state, and the destruction during dispersion can occur along either the layering planes, or the planes with a critical value of stress combinations, characteristic of a given mineral. An anisotropic structure of the medium can be transversal and orthotropic with its characteristic topological patterns of stress tensors. Therefore, a different competing fracture mechanism is desirable for each type of medium texture during dispersion. Since anisotropic materials have no predictability in the formation of a “grid” of cracks, it is impossible to control the size of dispersed particles, when using conventional dispersing methods. Real solid bodies always contain a system of spatial micro- and macro-defects statically distributed in the body mass and partially extending to its surface. Such defects have high mobility and are capable of coagulation and annihilation due to thermal motion of molecules and mechanical stresses. Consequently, the process of deformation of the body is reduced to an increase in the size and number of macro- and micro-defects. A new concept of dimensional dispersion of brittle media is justified by increasing the volumetric geometric homogeneity of the resulting dispersed particles. This can be achieved by integrated controlled vibration introduced into the material fracture zone as forced amplitude-modulated vibrations of the working body of a cone crusher for a simultaneous formation of an extensive network of deep and surface cracks. This approach of crack formation control results in achieving quasi-homogeneity of the dispersed product at a time, and homogeneous crushed particles contribute to applying a voxel (selective) principle of stacking dispersed particles used in composites, as they are more closely stacked.

Keywords: dispersing, brittle materials, modulating vibration drives, homogeneity control, production of dispersed materials, energy-saving machines

The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (a regional competition of the Chelyabinsk Region), No. 22-29-20067, <https://rscf.ru/en/project/22-29-20067/>.

For citation

Sergeev Yu.S., Platov S.I., Guzeev V.I., Sergeev S.V. Application of Vibration Drives with Modulating Properties in Crushers of Brittle Materials to Control the Fractional Composition of the Dispersed Phase. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2023, vol. 21, no. 4, pp. 164-175. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2023-21-4-164-175>

Введение

При индустриальном развитии один из сегментов экономики формирует производства, перерабатывающие отходы во вторсырьё. Развитие таких производств обеспечивает экологическую безопасность и экономит природные ресурсы [1]. При добыче минералов ценных пород – мрамора, змеевика, яшмы и других – отбраковывают породу, не соответствующую качеству основного сырья, либо из-за малости кусков, либо из-за включений в их друзах или жёздах. Такая порода поступает в отвалы [1] и не применяется. Глубокая переработка таких отходов может быть хорошим подспорьем в отраслях от стройиндустрии до художественной промышленности [2]. Примерами таких отраслей являются приготовление пигментов для красок и жидкого камня для элементов мебели, декоративного щебня для мозаики и панно,

материалов для ландшафтного дизайна и др., что позволяет переформатировать и дополнить строительный сектор. Такая тенденция объединяет искусство с промышленными производствами [3].

Современным трендом в прикладном искусстве является художественный промысел «картины из каменной крошки» [4]. Производство картин требует сырьё в виде разноцветной (до 20 видов) каменной крошки с различной формой и дисперсностью от 0,1 до 8 мм. Художник укладывает кристаллы различной формы и цвета, фиксируя клеем в соответствии с художественным замыслом сюжета. В перечисленных отраслях производства возникает проблема обеспечения однородности частиц минералов. Процесс обогащения полезных ископаемых включает высвобождение зерен ценного минерала от пустой породы и их концентрацию. Разъединение минералов достигается дроблением до требуемой крупности с минимальным

переизмельчением [5]. Традиционные способы не обеспечивают однородность дисперсных частиц. Размерное же диспергирование вязких и хрупких материалов [6] позволяет реализовать воксельный (селективный) принцип укладки дисперсных частиц, так как они теснее укладываются, повышая укрывистость поверхности и прочность покрытия.

В классической теории разрушения хрупких материалов допущением является их изотропность и однородность. Однако при высоких механических напряжениях структурные элементы минералов вместо беспорядочной ориентировки в поликристалле приобретают текстуру, в которой явно выражены главные направления пластических деформаций. Это главное, что проявляет анизотропность физико-механических свойств за пределом упругости. Поскольку в особенности у таких пород сложное трехосное напряженное состояние, то и разрушение при диспергировании может происходить либо по плоскостям напластования, являющимися по факту плоскостями ослабления, либо по плоскостям с критическим значением комбинаций напряжений типа Кулона-Мора [7] с коэффициентом сцепления и углом внутреннего трения, характерными для данного минерала в целом.

Анизотропная структура среды может быть трансверсальной и ортотропной со своими характерными топологическими картинами тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у анизотропных материалов нет предсказуемости в формировании «сетки» трещин, то при использовании традиционных методов диспергирования невозможно управлять размером дисперсных частиц. В реальном твердом теле всегда существует система пространственных микро- и макродефектов, статически распределенных в массиве тела и частично выходящих на его поверхность. Такие дефекты обладают высокой подвижностью и способны к коагуляции и аннигиляции из-за теплового движения молекул и механических напряжений. Следовательно, процесс деформации тела сводится к увеличению размеров и количества макро- и микродефектов. При достижении определенной плотности таких дефектов в массиве тела возникает трещина с размерами, превышающими критические. Далее рост трещины происходит самопроизвольно до разрушения тела. При уменьшении внешней нагрузки трещины в массиве тела смыкаются, а энергия аннигилированных поверхностей трансформируется в тепло. Этот процесс несовершенен, поскольку трещины в массиве тела смыкаются не полностью. Следовательно, при сообщении периодической нагрузки с каждым последующим циклом количество дефектов в теле будет прирастать, а прочность тела снижаться из-за усталости. Отсюда следует, что если телу сообщить энергию A , превышающую предельную энергию упругих деформаций A_y , то оно разрушится с образованием новой поверхности ΔS , величина которой пропорциональна энергии перенапряжения A_s . Тогда энергетический баланс процесса разрушения [8-10]

$$A = A_y + A_s = \frac{\sigma_p^2 V}{2E} + K_R \Delta S, \quad (1)$$

где σ_p – предельное напряжение упругих деформаций; V – объем тела; E – модуль Юнга; K_R – коэффициент Ребиндера, отражающий затрату работы на образование единицы новой поверхности; ΔS – удельная поверхность.

Работа образования новой поверхности A_s является полезной, а работа упругих деформаций A_y – это диссипативные потери. Поэтому коэффициент полезного действия (КПД) процесса измельчения

$$\eta_i = \frac{A_s}{A} = \frac{A_s}{A_y + A_s} = \frac{1}{1 + A_y/A_s}. \quad (2)$$

Из (2) следует, что КПД можно повысить либо увеличением перенапряжения A_s , например высокоскоростным ударом, либо уменьшением A_y , например снижением σ_p посредством поверхностно-активных веществ (ПАВ). Для роста трещин во времени гораздо предпочтителен первый вариант, поскольку ПАВ изменяет физико-химический состав материала. При малом же времени микродефекты не успевают мигрировать в область крупных трещин и прочность хрупкого тела возрастает. Поскольку прочность тела зависит от его габаритных размеров, то она возрастает с их уменьшением и обусловлена уменьшением максимальной длины трещины. Иными словами, если на хрупкое тело принудительно периодически воздействовать силой Q с малой амплитудой и достаточно высокой частотой (рис. 1, а), то оно полностью не разрушится, но от него будут отделяться маленькие частицы с размерами $K = 1/2, 1/4$ и т.д., по сравнению с массивом разрушаемого тела. Если, наоборот, к этому же телу приложить периодическое ударное усилие Q_1 с большой амплитудой, но низкой частотой (рис. 1, б), то оно разрушится на несколько крупных частей с размерами $K = 1$.

Значит, при низкой частоте и большой амплитуде глубина проникновения трещин будет больше, чем при высокой частоте и малой амплитуде. Однако по мере уменьшения размера измельчаемых частиц частоту воздействия необходимо увеличивать, а амплитуду уменьшать, поскольку размеры трещины в частице уменьшаются. Отсюда основные проблемы – это:

- ограниченность скорости соударения рабочего органа станка и массива при крупном измельчении (60-70 м/с), а при мелком и тонком – до 200 м/с;
- в вибромельницах уменьшение частоты вибропривода приводит к возрастанию мощности и увеличению амплитуды колебаний, а значит, к росту динамических реакций на опоры;
- многостадийность измельчения материала: крупное, среднее или мелкое из-за архаичности оборудования [5].

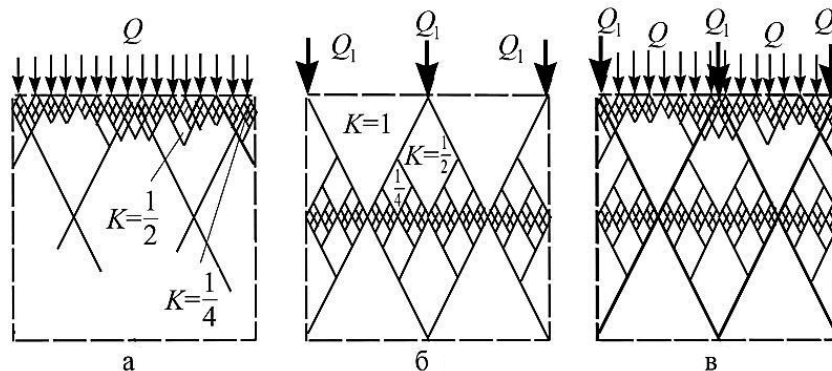


Рис. 1. Схема трещинообразования: а – при высокочастотном воздействии с небольшой амплитудой; б – при низкочастотном воздействии с большой амплитудой; в – при низко- и высокочастотных колебаниях

Fig. 1. Crack formation: а is at high-frequency impact and low amplitude; б is at low-frequency impact and high amplitude; в is at low- and high-frequency vibrations

Известно, что полезная мощность дробилок может быть повышена изменением частоты колебаний помольной камеры [10]. С ростом частоты колебаний вибропривода при постоянном моменте мощность возрастает быстрее, чем растут нагрузки, разрушающие опоры, а отношение полезной мощности вибропривода к центробежной силе пропорционально его моменту. Значит, при увеличении момента вибропривода, например применением синфазных виброприводов, мощность и производительность увеличатся в q_2 раз, то есть эффективность использования каждого вибропривода возрастет в q раз.

Методика проведения исследований

Наиболее перспективным способом борьбы с двумя первыми недостатками процесса разрушения хрупких материалов является переход от традиционного принципа дробления с заданной деформацией материала к принципу с заданным усилием [5, 11, 12]. Предлагается другой, более совершенный способ дробления, при котором все три указанных недостатка устраняются путем применения в дробилке роторно-дебалансного вибропривода [12]. Это позволяет совместить процессы предварительного и мелкого дробления хрупких материалов (рис. 1, в) за счет того, что на хрупкое тело можно оказывать разрушающее амплитудно-модулированное вибрационное воздействие. Причем, изменяя параметры амплитудно-модулированных колебаний, возможно управлять процессом хрупкого размерного измельчения за счет обеспечения сложных форм колебаний исполнительного органа станка. В предлагаемом роторно-дебалансном виброприводе (рис. 2, а) ротор 1 (массой m , жесткостью j и радиусом r_1) и подпружиненное контртело 3 сопрягают с тарированной силой P_{oc} прижима, обкатывают его по замкнутой траектории с амплитудой A , частотой ω_1 , создавая силу F_1 , и одновременно воздействуют на них вращающейся (с частотой ω_2 ротора 1) неуравновешенной радиальной силой F_2 , которая обеспечивается, например, вращением дебаланса 2 [12].

Для определения формы траектории создаваемых виброперемещений из-за колебаний, создаваемых роторно-дебалансным виброприводом, рассмотрим изменение радиус-вектора суммарной амплитуды A колебаний (рис. 2, б). Радиус-вектор суммарной амплитуды A колебаний равен

$$\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2, \quad (3)$$

где A_1 – радиус-вектор амплитуды колебаний ротора; A_2 – радиус-вектор амплитуды колебаний, генерируемых неуравновешенной радиальной силой F_2 .

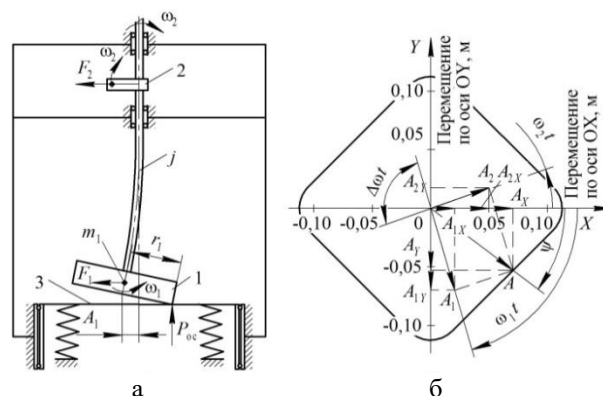


Рис. 2. Схема возбуждения амплитудно-модулированных колебаний: а – вибропривод; б – схема формирования сложной траектории виброперемещений

Fig. 2. Excitation of amplitude-modulated vibrations: а is by a vibration drive; б is formation of a complex trajectory of vibration displacements

Система уравнений проекций колебаний радиус-вектора суммарной амплитуды A имеет следующий вид:

$$\begin{cases} A_x = A_1 \cos(\omega_1 t) + A_2 \cos(\omega_2 t); \\ A_y = A_1 \sin(\omega_1 t) - A_2 \sin(\omega_2 t), \end{cases} \quad (4)$$

где ω_1 – частота колебаний ротора; ω_2 – частота вращения; t – рассматриваемый промежуток времени.

Введем обозначения и подставим в (4)

$$\begin{cases} \omega_1 + \omega_2 = \Delta\omega; \\ A_2 + A_1 \cos(\Delta\omega t) = A \cos \psi; \\ A_1 \sin(\Delta\omega t) = A \sin \psi, \end{cases} \quad (5)$$

получим систему уравнений

$$\begin{cases} A_x = A \cos(\psi - \omega_2 t); \\ A_y = A \sin(\psi - \omega_2 t), \end{cases} \quad (6)$$

где ψ – текущий угол.

Из системы уравнений (6) находим амплитуду радиус-вектора колебаний A :

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\omega t)}, \quad (7)$$

При этом амплитуда высокочастотных колебаний A_1 равна

$$A_1 = \frac{r_1 \omega_2}{\omega_1}, \quad (8)$$

где r_1 – радиус ротора; ω_1 – частота колебаний ротора; ω_2 – частота вращения ротора.

Общеизвестно, что амплитуда колебаний вынуждающей силы [5] равна

$$A_2 = \frac{F_2}{M \omega_2^2}, \quad (9)$$

где F_2 – неуравновешенная радиальная сила; ω_2 – частота вращения; M – суммарная масса тел.

Для определения амплитуды радиус-вектора колебаний A подставим выражения (8) и (9) в (7), получим

$$A = \sqrt{\left(\frac{r_1 \omega_2}{\omega_1}\right)^2 + \left(\frac{F_2}{M \omega_2^2}\right)^2 + 2 \frac{r_1 \omega_2 F_2}{\omega_1 M \omega_2^2} \cos(\Delta\omega t)}. \quad (10)$$

Введя коэффициенты

$$n = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \quad k = \frac{1}{M \omega_2^2},$$

получим значение амплитуды радиус-вектора колебаний A :

$$A = \sqrt{(r_1 n)^2 + (F_2 k)^2 + 2 r_1 F_2 n k \cos(\Delta\omega t)}. \quad (11)$$

В этом выражении первое слагаемое под корнем $(r_1 n)^2$ – высокочастотная составляющая (по сравнению с частотой вращения), второе слагаемое $(F_2 k)^2$ – низкочастотная составляющая, зависящая от действия неуравновешенной радиальной силы F_2 , суммарной массы тел M , а третье слагаемое $2 r_1 F_2 n k \cos(\Delta\omega t)$ – составляющая разности фаз колебаний $\Delta\omega t$. Используя зависимость (11), управляют величиной суммарной амплитуды A , изменяя параметры этих составляющих. Требуемые параметры низкочастотных колебаний, вызванных неуравновешенной силой F_2 , зада-

ют посредством изменения скорости вращения ω_2 и величиной силы F_2 . Параметрами колебаний ротора (амплитуда A_1 и частота колебаний ω_1) управляют, например, посредством изменения осевой силы прижима P_{oc} в соответствии с зависимостями, приведенными в [12]. Иными словами, формой траектории колебательных суммарных перемещений управляют посредством изменения частоты и амплитуды колебаний ротора и неуравновешенной радиальной силы.

Из приведенных уравнений видно, что радиус-вектор колебаний A зависит от частот ω_1 и ω_2 и амплитуд A_1 и A_2 колебаний ротора и неуравновешенной радиальной силы F_2 , а следовательно, форма траектории меняется от квазикруговой (рис. 3, а) до линейной (рис. 3, б), а при определенных условиях имеет многоугольную форму или даже фигуры Лиссажу (рис. 3, в), что подтверждено результатами компьютерного эксперимента [12].

Согласно [10] при вибрационном измельчении наблюдается при высоких частотах и малых амплитудах поверхностное распространение множества трещин (см. рис. 1, а), а при больших амплитудах и низких частотах колебания измельчающего органа – распространение единичных обширных трещин (см. рис. 1, б). Этот эффект применительно к измельчению хрупких материалов полезен тем, что в отличие от квазикруговой траектории, где скорость рабочего органа станка будет равномерной и менее эффективной, другие формы траектории рабочего органа станка будут иметь свои положительные эффекты. Например, при линейной форме траектории частота колебаний рабочего органа будет низкая, а амплитуда большой, что характерно для крупного измельчения, при траектории движения рабочего органа дробилки, имеющей форму круга или эллипса, частота колебаний будет высокой, а амплитуда маленькой, что характерно для мелкого измельчения.

При совмещении низко- и высокочастотных колебаний, то есть при их модуляции, трещинообразование произойдет как по поверхности, так и в глубине материала (см. рис. 1, в), а при определенном сочетании частот и амплитуд будет наблюдаться измельчение с максимальным эффектом. При этом трещины поверхностные и глубинные будут соединяться, создавая разветвленную «сеть» (см. рис. 1, в) и, соответственно, наибольшую степень измельчения, а при их полном замыкании будет наблюдаться наиболее равномерный гранулометрический состав размера b_k частиц после помола. Стоит отметить, что при форме траектории рабочего органа станка, отличающейся от квазикруговой, его движение будет постоянно меняться от равноускоренного до равнозамедленного, что позволит повысить эффективность измельчения хрупких материалов высокоскоростным ударом, провоцирующим повышенное трещинообразование [10]. Важно отметить, что именно сложная форма колебаний исполнительного органа станка обеспечит разнонаправленное, случайным образом, ударное разрушающее воздействие на твердые хрупкие среды независимо от сложности их текстуры, существенно повышая вероятность разрушения среды по опасным ее слоям.

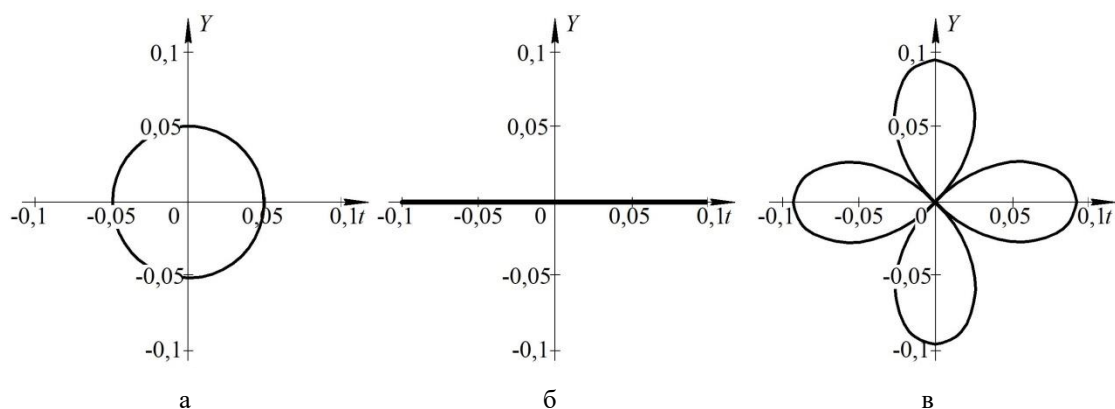


Рис. 3. Формы траекторий колебаний, создаваемых роторно-дебалансным виброприводом: а – окружность, когда одна из частот равна 0; б – прямая, когда амплитуды и частоты равны, колебания антифазы; в – фигура Лиссажу, когда амплитуды равны, а соотношения частот равно 3, колебания антифазы

Fig. 3. Shapes of vibration trajectories generated by a rotor-unbalance vibration drive: a is a circle, when one of the frequencies is 0; б is a straight line, when amplitudes and frequencies are equal, vibrations are antiphase; в is a Lissajous figure, when amplitudes are equal, frequency ratio is 3, and vibrations are antiphase

При разрушении хрупких материалов ударом скорость дробления определяют из условия равенства кинетической энергии, развиваемой ей, работе деформации A_{\max} при сжатии материала:

$$\frac{MV_{\max}^2}{2} = A_{\max}. \quad (12)$$

Из соотношения (12) следует, что чем больше скорость дробления, тем больше совершаемая работа, следовательно, выше производительность. Суммарная максимальная скорость дробления, обеспечиваемая роторно-дебалансным виброприводом, равна

$$V_{\max} = \omega_1 A_1 + \omega_2 A_2 = \omega_2 (r_1 + A_2), \quad (13)$$

которая больше скорости дробления, обеспечиваемой роторным инерционным виброприводом, так как она является составляющей суммарной максимальной скорости V_{\max} роторно-дебалансного вибропривода.

Применение в действующих конструкциях конусных дробилок двух синхронизирующихся роторно-дебалансных виброприводов [12] позволяет значительно расширить технологические возможности данного оборудования: увеличить коэффициент вынуждающей силы, управлять формой колебаний рабочего органа, управлять размерностью измельченного сырья. Это позволит увеличить эффективность оборудования, обеспечивая разрушение материалов с наименьшими усилиями, а следовательно, и затратами энергии. Конструктивно дробилка (рис. 4) выполнена в виде дробящего конуса 1, внутреннего конуса 2 и двух роторно-дебалансных виброприводов 3, каждый из которых состоит из ротора 4 и дебаланса 5. Параметрами колебаний роторно-дебалансных виброприводов управляют по зависимости (11), в связи с тем, что виброприводы связаны между собой упругой связью посредством общего контртела – дробящего конуса 1, который может иметь две степе-

ни подвижности в плоскости, перпендикулярной главным осям инерции роторов 4.

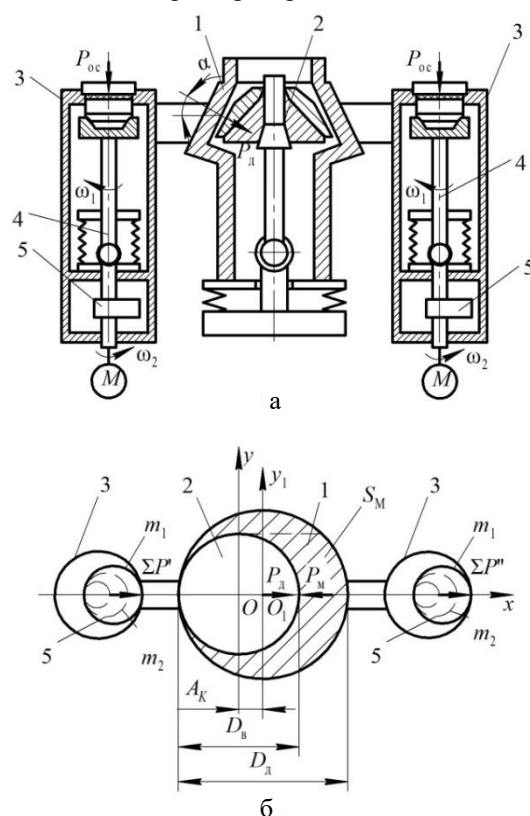


Рис. 4. Конусная инерционная дробилка с самосинхронизирующимся роторно-дебалансным виброприводом: а – кинематическая схема; б – динамическая модель

Fig. 4. An inertial cone crusher with a self-synchronizing rotor-unbalance vibration drive: a is a kinematic scheme; б is a dynamic model

В процессе совместной работы колебания двух роторно-дебалансных виброприводов 3 самопроизвольно синхронизируются [12]. За счет этого в конусной инерционной дробилке генерируется центробежная сила, заставляющая перемещаться дробящий конус 1 при поперечных колебаниях с планетарной обкаткой по внутреннему конусу 2. Причем дробящий конус 1 также приобретает свою центробежную силу. Направление отклонения оси дробящего конуса 1 от оси внутреннего конуса 2 практически совпадает с направлением вектора элемента качения. Поэтому суммарное дробящее усилие развивается не только за счет центробежной силы инерции кинематически неуравновешенных роторов 4 и дебалансов 5, но и за счет центробежной силы, возникающей при прецессионном движении дробящего конуса 1. Параметры данного станка рассчитываются аналогично кинематической модели колебательной системы конусной дробилки с роторными виброприводами [11]:

$$N = \frac{\Sigma P' + \Sigma P'' + P_D}{P_M}, \quad (14)$$

где N – коэффициент увеличения нагрузки; $\Sigma P'$, $\Sigma P''$ – суммарные центробежные силы кинематически неуравновешенных роторов и дебалансов виброприводов (вынуждающие силы виброприводов),

$$\Sigma P' = \Sigma P'' = F_1 + F_2 = m_1 A_1 \omega_1^2 + m_2 A_2 \omega_2^2; \quad (15)$$

P_D – центробежная сила дробящего конуса,

$$P_D = M_D A_K (\omega_1 \pm \omega_2)^2; \quad (16)$$

A_K – амплитуда колебаний центра тяжести дробящего конуса с учетом (11),

$$A_K = A \frac{m_1 + m_2}{M_D + 2(m_1 + m_2)}, \quad (17)$$

где m_1 – масса ротора 1; m_2 – масса дебаланса 5; M_D – масса дробящего конуса;

P_M – сила сопротивления слоя разрушаемого материала,

$$P_M = S_M \sigma_\varepsilon, \quad (18)$$

где σ_ε – предел прочности перерабатываемого материала; S_M – площадь поперечного сечения перерабатываемого материала,

$$S_M = \frac{\pi(D_D + D_B)b_0}{4}, \quad (19)$$

где D_D – диаметр дробящего конуса в среднем сечении; D_B – диаметр внутреннего конуса в среднем сечении; b_0 – размер исходного сырья.

Зависимость между дисперсностью измельчаемых тел и затратами энергии на процесс измельчения принято называть законом измельчения. По закону Кирпичева-Кика [8], энергия, сообщаемая разрушаемому телу

$$\varepsilon = C \ln \left(\frac{S}{S_0} \right), \quad (20)$$

где S_0 и S – удельная поверхность тела до и после измельчения; C – эмпирический коэффициент.

Базируясь на положениях этого закона, принимаем, что формула затрат работы на измельчение

$$A_{\max} = C_1 \lg I_{\text{ст}}^3 + C_2 (I_{\text{ст}} - 1), \quad (21)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты пропорциональности; $I_{\text{ст}}$ – степень измельчения станка, равная

$$I_{\text{ст}} = \frac{b_0}{b_K}, \quad (22)$$

где b_0 и b_K – размеры частиц до и после измельчения.

Поскольку энергия разрушения равна или больше работы A_{\max} деформации при сжатии материала в соответствии с (12), подставляя (21), получаем:

$$\frac{MV_{\max}^2}{2} = C_1 \lg \left(\frac{b_0}{b_K} \right)^3 + C_2 \left(\frac{b_0}{b_K} - 1 \right). \quad (23)$$

Увеличение степени измельчения от увеличения скорости дробления V_{\max} связаны квадратичной зависимостью, а это свидетельствует о значительном повышении эффективности процесса измельчения, поскольку эффективность и определяется, главным образом, степенью измельчения. Из выражения (23) видно, что скорость V_{\max} влияет на размер частиц b_K и зависит от параметров колебаний, а значит, размер частиц измельченного материала регулируется параметрами колебаний, поскольку исходный размер b_0 постоянный.

Для экспериментальной проверки эффективности бесстадийного размерного диспергирования минералов за счет интенсификации трещинообразования путем комплексного низко- и высокочастотного разрушающего воздействия разработан экспериментальный станок (рис. 5), обеспечивающий контроль и управление технологическими параметрами процесса.

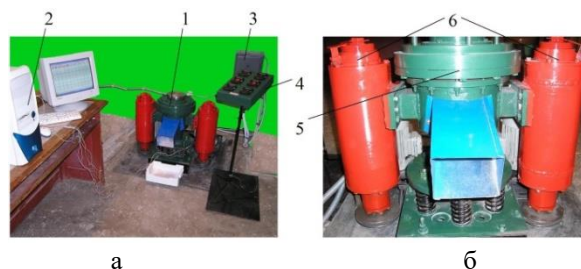


Рис. 5. Станок с компьютерным управлением для размерного диспергирования хрупких материалов: а – общий вид; б – конусная дробилка

Fig. 5. A computer-controlled machine for dimensional dispersion of brittle materials: a is a general view; б is a cone crusher

Станок 1 оснащен компьютером 2, силовым электропитанием 3 и пультом управления 4 (см. рис. 5, а). Исполнительный орган станка 5 связан с роторно-дебалансными виброприводами 6 (см. рис. 5, б). Во внутренней и внешней связях экспериментальной установки предусмотрены органы управления технологическими параметрами, а также автоматизированная система мониторинга (АСМ) самосинхронизирующихся виброприводов [13]. Для обеспечения стабильного функционирования самосинхронизирующихся виброприводов АСМ через бесконтактные датчики обеспечивает сбор у них параметрической информации, ее автоматическую обработку и подстройку синхронной работы системы посредством интегрированной в нее электрической обратной связи.

На первом этапе экспериментальных исследований определяли частоты и амплитуды колебаний, а

также формы возможных траекторий движений рабочего органа (рис. 6) путем совместной обработки осциллограмм с учетом сдвига фаз.

Геометрия сложных траекторий движения дробящего конуса, полученных при компьютерном (см. рис. 3) и натурном (см. рис. 6) экспериментах, доказывают адекватность математических моделей реальным процессам получения их на станке. Для проверки теоретических предположений экспериментально исследовали колебательный процесс при изменении параметров роторно-дебалансного вибропривода. Сравнение зависимостей частоты (ω_1 и ω_2) и амплитуды (ρ_1 и ρ_2) колебаний роторов от регулируемых параметров вибропривода с соответствующими им теоретическими зависимостями (ω_T и ρ_T) (рис. 7) показало хорошую сходимость результатов – не менее 90%.

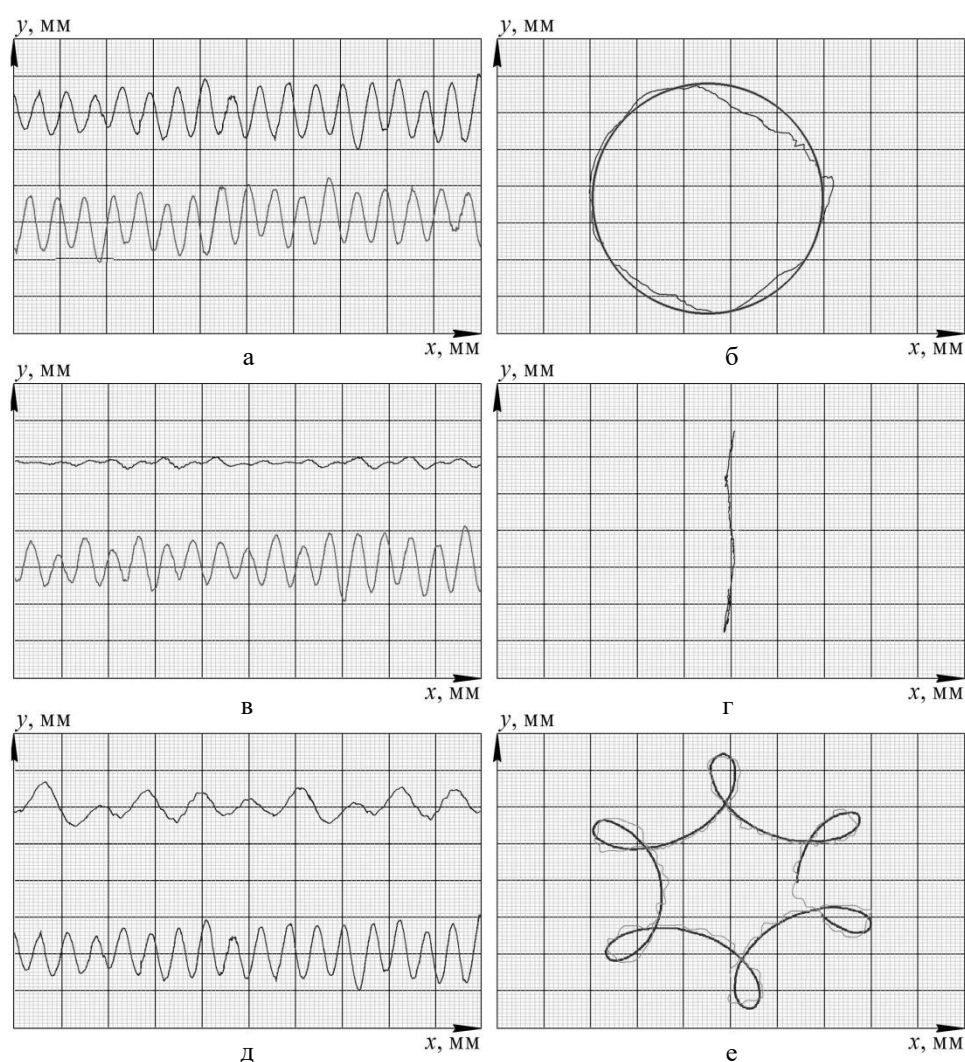


Рис. 6. Осциллограммы и траектории колебательных движений дробящего конуса круговой (а, б), прямолинейной (в, г) и многоугольной (д, е) форм (цена одного деления 0,1 мм)

Fig. 6. Oscillograms and trajectories of vibration motions of the crushing cone: circular (а, б), rectilinear (в, г) and polygonal (д, е) shapes (value of a division is 0.1 mm)

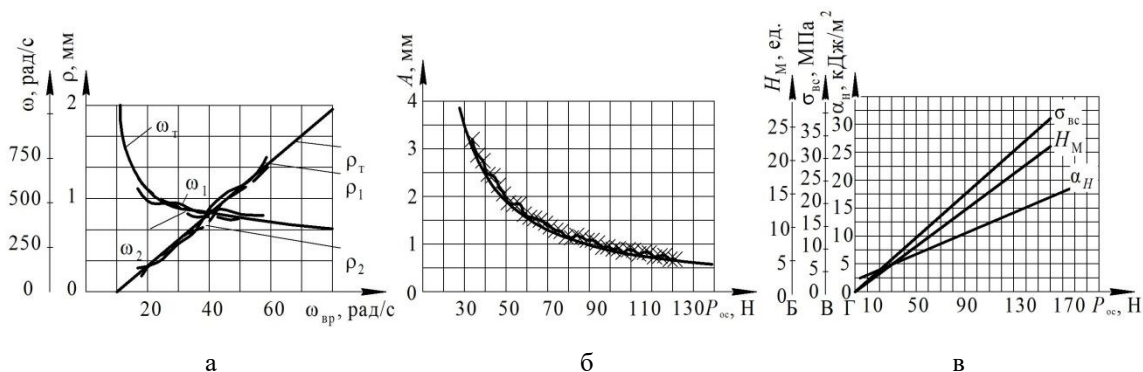


Рис. 7. Экспериментальные и теоретические зависимости амплитуд ρ и частот ω колебаний роторов от изменяемых параметров вибропривода (а), зависимость амплитуды A колебаний дробящего конуса от осевой силы $P_{ос}$ (б) и настроенный график (в)

Fig. 7. Experimental and theoretical dependences between amplitudes ρ and frequencies ω of rotor vibrations and variable parameters of the vibration drive (а), dependence between amplitude A of vibrations of the crushing cone and axial force $P_{ос}$ (б); and an adjusting chart (в)

На втором этапе исследований проверялась эффективность применения роторно-дебалансного вибропривода в станке. При этом оценивались технологические возможности, такие как дробящее усилие и влияние задаваемой формы траектории движения дробящего конуса на производительность и степень измельчения минералов с различными физико-механическими свойствами и актуальных при изготовлении авторских картин из каменной крошки. Одним из самых основных свойств минералов, в том числе и горных пород, является твердость. Для определения относительной твердости минералов применяют минералогическую шкалу твердости Мооса [10].

Но поскольку относительная твердость является только качественно оцениваемой величиной, то она не может быть использована для определения дробящего усилия. Поэтому в качестве механической характеристики минералов были использованы предел прочности при сжатии и ударная вязкость, величины которых были получены путем механических испытаний образцов минералов на разрывной машине и маятниковом копре.

Затем каждый испытуемый минерал измельчали при генерировании круговой (см. рис. 6), прямолинейной и многоугольной траекторий движения исполнительного органа станка. Партию образцов каждого из минералов доводили до начала разрушения, постепенно увеличивая дробящее усилие P_d . При этом фиксировалось минимально необходимое и достаточное значение P_d , а по осциллограмме определяли значения ω и A , соответствующие $P_{ос}$. Затем рассчитывали суммарную дробящую силу $\Sigma P'$ по формуле (15) и строили графические зависимости $\Sigma P'$ от $P_{ос}$ (на рис. 7 условно не показаны).

Эксперименты показали, что дробление изотропных материалов будет более эффективным, если дробящему конусу задавать квазикруговую траекторию колебательных движений. При помолу минералов с

неявно выраженной анизотропной текстурой целесообразнее всего настраивать эллиптическую траекторию колебательных движений конуса. Для минералов с ярко выраженными анизотропными свойствами, прочность которых в одном из направлений значительно превышает этот показатель в других направлениях, лучше всего обеспечить прямолинейную траекторию ударно-колебательных движений дробящего конуса. Важно отметить, что для дробления любых анизотропных материалов наиболее универсальный и эффективный режим работы данного станка будет при сообщении дробящему конусу более сложной траектории виброперемещений, например многоугольной или даже фигуры Лиссажу. Такая траектория высокочастотных виброперемещений рабочего органа станка в сочетании с низкочастотными позволит наиболее полно реализовать высокоскоростное ударное дробление (80-150 м/с) с дроблением за счет трения (см. рис. 1, в).

На основе сопоставления полученных показателей физико-механических свойств измельченных минералов (твердость H_M по Моосу, предел прочности $\sigma_{вс}$ при сжатии, ударная вязкость α_H) с выявленными зависимостями удалось построить график для настройки станка (рис. 7, в). Этот график позволяет технологу назначать оптимальную дробящую силу для определенного минерала исходя из требуемой осевой силы $P_{ос}$.

Особый интерес возник у художников-технологов, занимающихся народным художественным промыслом – картинками из каменной крошки. По их заказу на нашей экспериментальной установке были переработаны отходы ценных поделочных камней, полученных из карьеров близлежащего государственного Ильменского заповедника в г. Миассе Челябинской области. По заданию заказчика представленные минералы (10 видов) были переработаны в каменную крошку пофракционно от 0,1 до 8 мм, из

которой и были изготовлены художественные изделия (рис. 8).



Рис. 8. Художественные изделия: а – панно на срезе ствола березы; б – панно из камня

Fig. 8. Products of art: a is an art panel on a cut of a birch tree trunk; б is an art panel made of stone

Заключение

Установлено, что в результате комплексного низко- и высокочастотного вибрационного ударного воздействия на хрупкий материал значительно повышается производительность дробления, а при увеличении дробящей силы – степень дробления материалов. Управление формой траектории движения рабочего органа станка (от простой до сложной кривой) позволяет учитывать физико-механические свойства и текстуру перерабатываемых материалов.

Преимущество конусных инерционных дробилок с роторно-дебалансными виброприводами состоит в том, что они позволяют изменять гранулометрический состав получаемого сырья, поскольку и размер частиц после измельчения и степень измельчения пропорциональны квадрату скорости измельчающего органа. Скорость перемещения последнего пропорциональна частоте и амплитуде колебаний виброприводов, которыми, в свою очередь, и управляют, а сложная форма колебаний исполнительного органа станка позволит совершать ударное разрушающее воздействие на анизотропную среду случайным образом, то есть под разными углами к ее текстуре, как бы стремясь приблизиться к наиболее благоприятной комбинации нормальных и сдвиговых напряжений. Тем самым повышается вероятность более быстрого разрушения среды по опасным слоям и, соответственно, КПД процесса.

За счет совмещения высокочастотных и низкочастотных колебаний в роторно-дебалансных виброприводах сила воздействия измельчающего органа на материал увеличивается пропорционально квадрату суммы частот этих колебаний. За счет этого расширя-

ется область применения такой конусной дробилки, так как такие виброприводы позволяют увеличить степень измельчения материала $I_{ст}$. По этой же причине применение двух самосинхронизирующихся роторно-дебалансных виброприводов увеличивает производительность примерно в 4 раза по сравнению с традиционной конусной дробилкой с одним виброприводом.

Увеличение степени измельчения материала $I_{ст}$ позволяет объединить несколько стадий измельчения материала, так как предыдущие конструкции конусных дробилок применялись только для определенной стадии измельчения – крупной, средней или мелкой.

Список источников

1. Сагдеева Г.С., Патракова Г.Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. №6. С. 194-198.
2. Ivanova I.A., Kolodyazhny S.A., Manokhin M.V. The Problem of Analysis of Environmental Threat Criteria on Asphalt Concrete Plants // Scientific Israel-Technological Advantages. 2012, no. 2, pp. 44-50.
3. Энергетический метод расчета производительности алмазно-канатных машин при добыче облицовочного камня / Г.Д. Першин, М.С. Уляков, Е.Г. Пшеничная, Б.М. Габбасов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2016. Т. 14. №2. С. 18-24. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-18-24
4. Song T.-H., Lee S.-H., Kim B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silica powder in extruded cement panels // Construction and Building Materials, 2014, vol. 52, pp. 105-115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.060
5. Блехман И.И. Что может вибрация?: О «вибрационной механике» и вибрационной технике. М.: Наука, 1988. 208 с.
6. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., D'yakonov A.A. Increasing geometric homogeneity of dispersed particles of plastic materials produced by vibration assisted micro-cutting // Espacios. 2017, vol. 38, no. 48, p. 36.
7. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks / M. Singh, N.K. Samadhiya, A. Kumar, V. Kurnar, B. Singh // Rock Mechanics and Rock Engineering. 2015, vol. 48, no. 4, pp. 1387-1405. DOI: 10.1007/s00603-015-0708-z
8. Ребиндер П.А., Шукин Е.Д. Поверхностные явления в твердых телах в процессах их деформации и разрушения // Успехи физических наук. 1972. Т. 108. № 9. С. 3-42.
9. Кузбаков Ж.И., Першин Г.Д., Кольга А.Д. Исследование колебаний приводного устройства щековой дробилки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2017. Т. 15. №4. С. 73-80. DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-4-73-80

10. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972. 307 с.
11. Sergeev S.V., Zakirov R.G. Inertial rotary vibrational drives for crushers of brittle materials // Russian Engineering Research, 2012, vol. 32, no. 2, pp. 130-134. DOI: 10.3103/S1068798X1202027X
12. Пат. 2533743 Российская Федерация, МПК7 В 06 В 1/00. Способ возбуждения колебаний / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев и др.; заявитель и патентообладатель ООО «Гранулятор». № 2013121307/28; заявл. 07.05.13; опубл. 23.09.14, Бюл. №32. 11 с.
13. Automated monitoring system for self-synchronizing vibration drives / Yu.S. Sergeev, S.V. Sergeev, A.A. D'yakonov, A.V. Kononistov, G.E. Karpov, A.A. Mikryukov // Russian Engineering Research. 2018, vol. 38, iss. 2, pp. 86-90. DOI: 10.3103/S1068798X18020168

References

1. Sagdeeva G.S., Patrakova G.R. Processing of production and consumption waste using their resource potential. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University]. 2014;17(6):194-198. (In Russ.)
2. Ivanova I.A., Kolodyazhny S.A., Manokhin M.V. The problem of analysis of environmental threat criteria on asphalt concrete plants. *Scientific Israel – Technological Advantages*. 2012;(2):44-50.
3. Pershin G.D., Ulyakov M.S., Pshenichnaya E.G., Gabbasov B.M. An energy method for calculating performance of diamond wire machines used for excavating facing stone. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2016;14(2):18-24. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-2-18-24
4. Song T.-H., Lee S.-H., Kim B. Recycling of crushed stone powder as a partial replacement for silica powder in extruded cement panels. *Construction and Building Materials*. 2014;52:105-115. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.060
5. Blekhman I.I. *Chto mozhet vibratsiya? O «vibratsionnoy mekhanike» i vibratsionnoy tekhnike* [What can vibration do? “Vibration mechanics” and vibration technology]. Moscow: Nauka, 1988, 208 p. (In Russ.)
6. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Dyakonov A.A. Increasing geometric homogeneity of dispersed particles of plastic materials produced by vibration assisted micro-cutting. *Espacios*. 2017;38(48):36.
7. Singh M., Samadhiya N.K., Kumar A., Kurnar V., Singh B. A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. 2015;48(4):1387-1405. DOI: 10.1007/s00603-015-0708-z
8. Rebinder P.A., Shchukin E.D. Surface phenomena in solids in the processes of their deformation and destruction. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Advances in Physical Sciences]. 1972;108(9):3-42. (In Russ.)
9. Kuzbakov Zh.I., Pershin G.D., Kolga A.D. Study on vibrations of the drive device of a jaw crusher. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2017;15(4):73-80. (In Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2017-15-4-73-80
10. Khodakov G.S. *Fizika izmelcheniya* [Physics of grinding]. Moscow: Nauka, 1972, 307 p. (In Russ.)
11. Sergeev S.V., Zakirov R.G. Inertial rotary vibrational drives for crushers of brittle materials. *Russian Engineering Research*. 2012;32(2):130-134. DOI: 10.3103/S1068798X1202027X
12. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., et al. *Sposob возбуждения колебаний* [Method of excitation of vibrations]. Patent RU, no. 2533743, 2014.
13. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Dyakonov A.A., Kononistov A.V., Karpov G.E., Mikryukov A.A. Automated monitoring system for self-synchronizing vibration drives. *Russian Engineering Research*. 2018;38(2):86-90. DOI: 10.3103/S1068798X18020168

Поступила 02.11.2023; принята к публикации 23.11.2023; опубликована 25.12.2023
Submitted 02/11/2023; revised 23/11/2023; published 25/12/2023

Сергеев Юрий Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электрооборудования и автоматизации производственных процессов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Платов Сергей Иосифович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машин и технологий обработки давлением и машиностроения, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Гузеев Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии автоматизированного машиностроения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Сергеев Сергей Васильевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры технологии машиностроения, станки и инструменты, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Industrial Process Automation, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevys@susu.ru. ORCID 0000-0003-1028-8346

Sergey I. Platov – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Machines and Technologies of Metal Forming and Mechanical Engineering,
Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: mitodim@magtu.ru. ORCID 0000-0002-4868-4881

Viktor I. Guzeev – DrSc (Eng.), Professor, Head of the Department of Automated Mechanical Engineering Technologies, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: guzeevvi@susu.ru. ORCID 0000-0002-8277-1217

Sergey V. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Machines and Tools,
South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295