

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

MODELLING OF METALLURGICAL PROCESSES

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)
УДК 622.73:004.9
DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155



КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЯЕМОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ РАЗМЕРНОМ ДРОБЛЕНИИ ХРУПКИХ СРЕД

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

¹ Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

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

Аннотация. Статья посвящена реализации процессов селективного разрушения хрупких материалов, в частности горных пород, например, при их обогащении. Показано, что самым важным аспектом при исследовании разрушения хрупкой среды вследствие взаимодействия исполнительных органов дробилок с дробимым материалом является трещинообразование. Показано, что при традиционных способах механического дробления разрушение породы происходит неселективно из-за различия структуры и физико-механических свойств дробимых материалов, а значит, и из-за разнородных сценариев формирования в очаге разрушения геометрии микро- и макротрещин. А поскольку основную массу производителей больше всего интересует вопрос управления качеством фракционного состава готового дробленного продукта, то на первый план у исследователей выходит решение вопросов обеспечения контролируемого раскрытия «дефектов» у различных дробимых пород. Для этого в статье продемонстрирован новый способ размерного измельчения хрупких сред. При этом способе для повышения объемной геометрической однородности получаемой крошки путем одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин в зону разрушения материала вводят комплексное управляемое вибрационное воздействие в виде принудительных амплитудно-модулируемых колебаний рабочего органа молотковой дробилки. Далее на конкретном примере показано, как формируются упомянутые комплексные виброперемещения рабочего органа дробилки и каким образом за счет изменения их параметров можно существенно расширить область трещинообразования в дробимом материале. С использованием компьютерного моделирования на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» в программном комплексе LSTC LS-Dуна наглядно показана эффективность увеличения области трещинообразования при вибродроблении горной породы в сравнении с традиционными способами без применения вибрации. Эффективность нового способа также подтверждена натурными экспериментами, проведенными с использованием экспериментальной дробилки. Такой подход к управлению трещинообразованием позволяет одновременно добиваться квазиоднородности дисперсного продукта.

Ключевые слова: моделирование, трещинообразование, диспергирование, хрупкие материалы, комбинированные виброприводы, управление однородностью

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., Пузанков М.С., 2024

Для цитирования

Компьютерное моделирование нового способа управляемого трещинообразования при размерном дроблении хрупких сред / Сергеев Ю.С., Платов С.И., Гузеев В.И., Сергеев С.В., Пузанков М.С. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 143-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155>



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

COMPUTER MODELING OF A NEW METHOD OF CONTROLLED CRACKING DURING DIMENSIONAL CRUSHING OF BRITTLE MATERIALS

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

¹ South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

² Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. The paper is devoted to processes of selective destruction of brittle materials, in particular rocks, for example, during their beneficiation. It has been shown that the most important aspect in the study on crushing of brittle rocks due to the interaction between crusher actuators and the crushed material is cracking. It has been shown that by applying conventional methods of mechanical crushing, the rock destruction is not selective due to the difference of the structure and physical and mechanical properties of crushed materials, and, therefore, heterogeneous scenarios of forming micro- and macro-crack geometry in the fracture center. Since the majority of production companies are mostly interested in quality control of the fractional composition of finished crushed products, the researchers focus on the solution to providing controlled opening of “defects” in various crushed rocks. For this purpose, the paper demonstrates a new method of the size reduction of brittle materials. When using such method, a complex controlled vibration impact is introduced in the zone of material destruction as forced amplitude-modulated vibrations of the working body of the hammer crusher to increase the geometric bulk homogeneity of the resulting crumbs by simultaneous formation of a branched network of deep and surface cracks. Then the specific example shows how the mentioned complex vibration displacements of the crusher working body are formed and how it is possible to significantly expand the area of crack formation in the crushed material as a result of changing the parameters. Using computer modeling in the LSTC LS-Dyna software complex on the Tornado SUSU supercomputer, the researchers clearly show efficiency of increasing the area of cracking during vibration crushing of rocks in comparison with conventional methods without vibration. Efficiency of the new method is also confirmed by full-scale experiments conducted with an experimental crusher. This approach to cracking control will contribute to achieving quasi-homogeneity of the dispersed product at the same time.

Keywords: modeling, cracking, dispersion, brittle materials, combined vibration drives, homogeneity control

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., Puzankov M.S. Computer Modeling of a New Method of Controlled Cracking During Dimensional Crushing of Brittle Materials. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 143-155. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-143-155>

Введение

Процесс обогащения добытой горной породы неразрывно связан с ее разрушением при поэтапном дроблении, а последующее разделение полученного продукта на фракции по крупности осуществляют грохочением либо просеиванием. При этом для дробления горной породы используют следующие измельчители: раскалывающего и разламывающего действия; истирающе-раздавливающего и раздавливающего действия; ударно-истирающего и ударного действия [1]. Причем в таких машинах разрушение материала происходит либо в результате сдавливающего воздействия на породу рабочими элементами машины (щеками, конусами, валками), либо ударного взаимодействия кусков породы с рабочими органами – молотками в молотковых и роторных дробилках. При дроблении в

молотковых дробилках раскалывание отдельных кусков породы доводится до требуемых размеров конечного продукта. Но при таких механических способах воздействия на породу ее разрушение происходит не селективно из-за различия структуры и физико-механических свойств дробимых минералов, а значит, и из-за разнородных сценариев формирования в очаге разрушения геометрии микро- и макротрещин [2].

С целью повышения эффективности современного горно-перерабатывающего производства минерального сырья целесообразнее применять размерное измельчение для получения требуемой фракции конечной товарной минеральной крошки [3]. Но большинство исследователей [2, 3] больше интересуются практической стороной решения задачи управления качеством фракционного состава готового дробленого продукта, глубоко не вникая в суть физико-механических процессов

разрушения твердых хрупких сред. Приближая понимание реальных процессов хрупкого и квазихрупкого разрушения твердых конденсированных сред к его модельному представлению, целый ряд исследователей [4-12] проанализировали и обобщили научный опыт разных отечественных и зарубежных ученых в области разрушения твердых сред. В результате выяснилось, что механика деформируемого твердого тела в рамках традиционных макроскопических представлений, базирующихся на силовых критериях, оказалась не готовой к решению подобных многомасштабных задач. И если в изучении режимов развития отдельных единичных трещин было получено много важных результатов, то решение проблемы разрушения материала макроскопический подход предложить не смог, поскольку предлагаемые критерии перехода материала к разрушению никак не учитывали время приложения нагрузки, что вообще исключает возможность предсказывать сценарий и время наступления разрушения. Впрочем, огромный накопленный экспериментальный материал позволил сформулировать механикам правильные представления об особенностях неупругого деформирования и последующего разрушения хрупких сред.

Однако удовлетворительных математических моделей описания этих стадий и процесса разрушения в целом как многомасштабного явления традиционная механика не смогла предложить. Для решения этих задач и корректной постановки проблемы прогноза разрушения нужны принципиально новые идеи и подходы, базирующиеся на изучении нелинейной динамики сверхбыстрых критических стадий [4] трещинообразования в очагах разрушения сред.

Отсюда сформулированы главные направления этих исследований:

- прочность твердых тел и сред с трещинами;
- геометрия трещин и напряженно-деформированное состояние вблизи трещин;
- динамика трещин.

Отметим, что решение задач о совместном развитии двух или нескольких трещин на основе этих классических подходов встретилось с практически непреодолимыми математическими трудностями и ограничениями усредненного макроскопического подхода. Также было выявлено [4-6, 9, 12], что разные хрупкие материалы имеют различные структуры со своими характерными картинами тензоров напряжений. Поэтому при диспергировании для каждого вида текстуры среды желателен свой конкурирующий механизм разрушения. А поскольку у большинства 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. Следовательно, процесс деформации тела сводится к уве-

личению размеров и количества макро- и микродефектов. Такой подход к размерному диспергированию хрупких сред обоснован повышением объемной геометрической однородности получаемых дисперсных частиц. Это можно достигнуть путем введения в зону разрушения материала комплексного управляемого вибрационного воздействия в виде принудительных комбинированных колебаний рабочего органа, например молотковой дробилки, для одновременного формирования разветвленной сети глубоких и поверхностных трещин [12, 13]. Такой подход к управлению трещинообразованием среды позволит добиваться селективности дисперсных продуктов.

Новый способ измельчения хрупких материалов [13] осуществляется следующим образом (рис. 1): каждому ударному элементу (молотку) рабочего органа задают степень подвижности вокруг собственных осей, а наряду с их совместным вращением со скоростью ω_0 принудительно задают с некоторой амплитудой пульсации скорости вращения величиной $\pm \omega_1$: для перемещения точки удара из ТУ0 в ТУ1 при $\omega_0 - \omega_1$, затем обратно в точку ТУ0 и далее в точку ТУ2 при $\omega_0 + \omega_1$. Такое перемещение осуществляется циклически, поскольку колебания скорости вращения ω_0 осуществляются в течение всего времени работы вентиляльно-индукторного привода вращения [14]. Одновременно с этим колебательным движением принудительно осуществляют виброперемещения точки удара еще и в вертикальном направлении по синусоиде за счет прецессионного движения с нутацией посредством инерционного роторного вибропривода [15], ротор которого жестко связан с молотком в вертикальном направлении. В результате совместного действия таких виброперемещений точка удара находится всегда на синусоиде, крайние положения которой меняются в соответствии с перемещениями точки удара от ТУ0 до ТУ1 и обратно, а затем от ТУ0 до ТУ2.

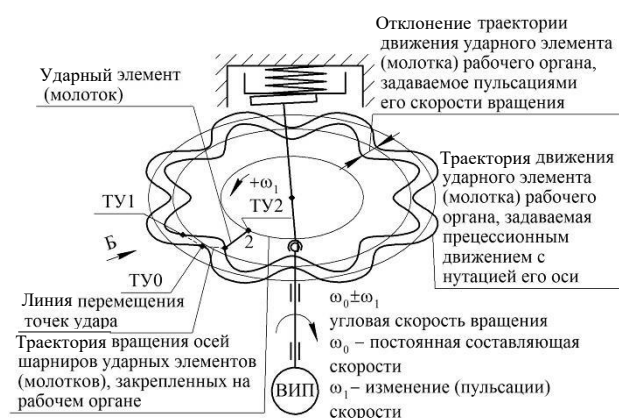


Рис. 1. Схема формирования траектории движения рабочего органа вибрационной молотковой дробилки

Fig. 1. Scheme of forming the trajectory of the working body of the vibrating hammer crusher

При равномерном вращении рабочего органа с молотками, закрепленными шарнирно, с возможностью поворота в горизонтальной плоскости относительно точки закрепления в традиционных молотковых дробилках удар обеспечивают только в одной точке поверхности измельчаемого материала, раскалывая его. По новому же способу, наряду с пульсациями скорости вращения $\omega_0 \pm \omega_1$, принудительно задают каждому молотку вертикальные колебательные перемещения, получая три такие точки (рис. 2): точка удара 1 при среднем положении молотка; точка удара 2 при перемещении молотка вверх; точка удара 3 при перемещении молотка вниз.

По сути, так образуется массив точек, лежащих на линии от точки 2 до точки 3 в вертикальном направлении. В результате такого распределенного удара будет и несколько центров трещинообразования – в точках 1, 2 и 3 соответственно. В горизонтальном направлении виброперемещения положений мгновенных точек приложения силы удара молотка по поверхности измельчаемого тела осуществляются посредством пульсаций скорости вращения оси с частотой $\pm\omega_1$. При горизонтальном перемещении положения точки приложения силы удара (см. рис. 2) в случае $\omega_0 - \omega_1$ получаем точку ТУ1, в которой формируется трещина. Затем при $\omega_1 = 0$ положения точки приложения силы удара перемещаются в точку ТУ0, в которой также формируется трещина, а затем при $\omega_0 + \omega_1$ в точку ТУ2, которая совпадает с точкой ТУ1, обеспечивая дополнительное трещинообразование и разрушение материала.

При этом, как видно из вышеописанного комплекса действий, при изменении параметров колебаний появилась возможность изменять положения точки приложения силы удара (распределять ее по поверхности) и, соответственно, управлять процессом трещинообразования, что приведет к изменению и стабилизации размера откалываемых частиц.

Совместное перемещение положения точки приложения силы удара в вертикальном и горизонтальном направлениях образует область распределения таких точек (см. рис. 2), где обозначены положения точек приложения силы удара при вертикальном перемещении, это точки 1, 2 и 3 соответственно, а положения точек приложения силы удара при горизонтальном перемещении соответственно ТУ0, ТУ1 и ТУ2.

Так формируется расширенная область трещинообразования. Поскольку образуется целый массив точек, обеспечивающих управляемое трещинообразование, процесс измельчения приобретает прогнозируемый характер и, соответственно, происходит стабилизация гранулометрического состава.

В соответствии со способом [13], во время работы дробилки инерционный роторный вибропривод [15] передает виброперемещения рабочему органу, который совершает движение по траектории сложной формы, при этом обеспечивается возможность управлять формой траектории за счет амплитудно-модулируемых колебаний вибропривода. Рассмотрим кинематическую схему (рис. 3), отображающую перемещение молотка 4 (в виде материальной точки 5).

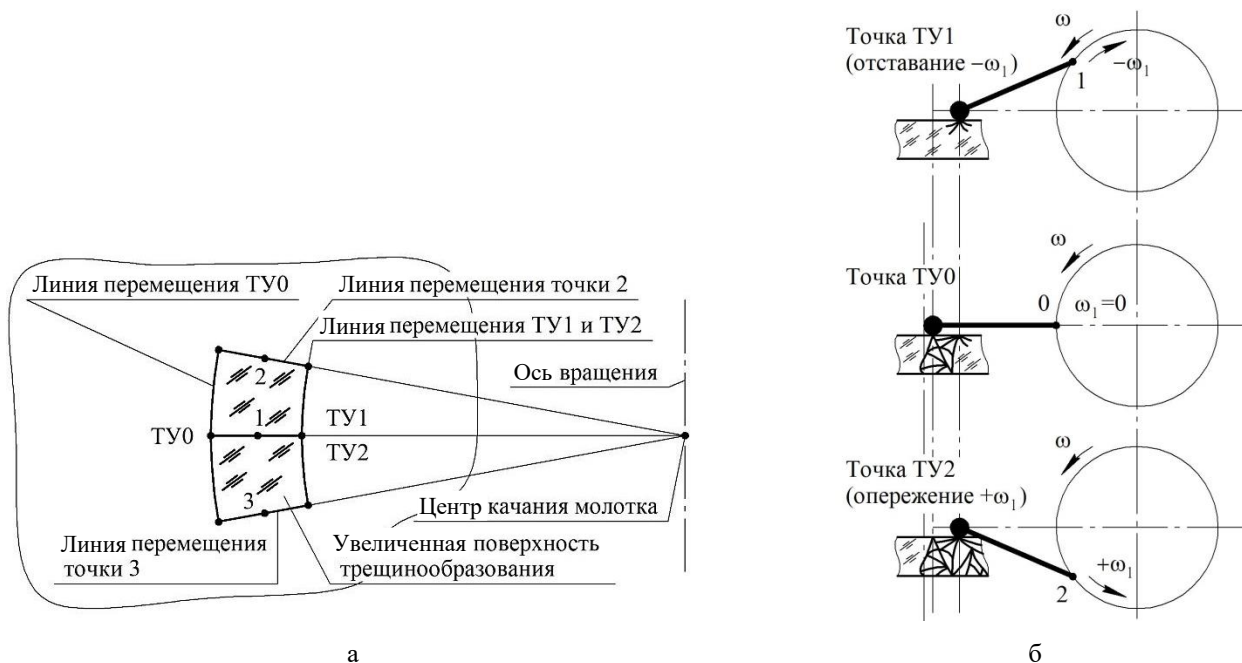


Рис. 2. Формирование увеличенной мгновенной площади поверхности трещинообразования: а – вид сверху; б – фронтальная проекция

Fig. 2. Forming the increased instantaneous area of the cracking surface: a is a top view; б is a frontal projection

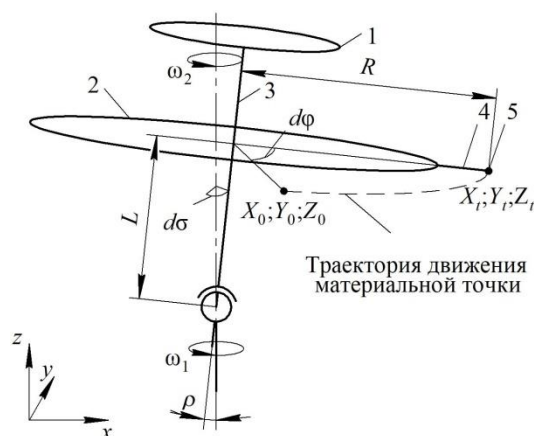


Рис. 3. Кинематическая модель: 1 – вращаемое тело; 2 – диск с расположенными равномерно на периферии дробящими телами – молотками; 3 – ротор; 4 – молоток; 5 – материальная точка
 Fig. 3. A kinematic model: 1 is a rotating body; 2 is a disc with the crushing bodies – hammers located uniformly on the periphery; 3 is a rotor; 4 is a hammer; 5 is a point of impact

Для вывода параметрического уравнения траектории движения материальной точки 5 дополнительно введем некоторые необходимые величины:

- j – радиальная жесткость ротора 3;
- ω_1 – угловая скорость вращения ротора 3;
- ω_2 – переносная угловая скорость вращения тела 1;
- ρ – угол отклонения оси ротора 3;

$d\varphi$ – текущее изменение угла поворота ротора 3 вокруг собственной оси;

$d\sigma$ – текущее изменение угла поворота ротора 3 вокруг оси прецессии;

R – расстояние от центра масс молотка (материальной точки 5) до оси вращения ротора 3;

L – расстояние от шарнирной заделки ротора до центра окружности вращения материальной точки 5;

X_0, Y_0, Z_0 – координаты материальной точки 5 в начальный момент времени t_0 ;

X_t, Y_t, Z_t – координаты материальной точки 5 в расчетный момент времени t .

Найдем угол поворота материальной точки 5 (молотка) относительно оси ротора φ_t в момент времени t :

$$\varphi_t = \varphi_0 + \omega_1 t, \quad (1)$$

где φ_0 – величина угла φ_t в начальный момент времени.

Найдем расчетный угол поворота σ_t материальной точки 5 относительно оси прецессии вращающегося ротора 3:

$$\sigma_t = \omega_2 t. \quad (2)$$

Тогда суммарный расчетный угол поворота γ_t молотка от сложения двух вращательных движений будет

$$\gamma_t = \varphi_t + \sigma_t, \quad (3)$$

а вспомогательные координаты материальной точки 5 при угле γ_t запишем в виде

$$\begin{cases} x_1(t) = R \sin(90 - \gamma_t) \cos(\rho), \\ y_1(t) = R \cos(90 - \gamma_t), \\ z_1(t) = R \sin(90 - \gamma_t) \sin(\rho). \end{cases} \quad (4)$$

Причем вспомогательные координаты материальной точки 5 при повороте системы координат на угол σ_t при $z_2(t) = z_1(t)$ будет в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x_2(t) = x_1(t) \cos \sigma_t + y_1(t) \sin \sigma_t, \\ y_2(t) = -x_1(t) \sin \sigma_t + y_1(t) \cos \sigma_t. \end{cases} \quad (5)$$

Затем определим смещение материальной точки 5 по осям системы координат при отклонении ротора на угол ρ в момент времени t :

$$\begin{cases} \Delta x_t = L \sin(-\rho) \cos \sigma_t, \\ \Delta y_t = L \sin(-\rho) \sin \sigma_t, \\ \Delta z = L \cos(\rho). \end{cases} \quad (6)$$

Тогда координаты материальной точки 5 в момент времени t определим как сумму систем (5) и (6):

$$\begin{cases} X(t) = x_2(t) + \Delta x_t, \\ Y(t) = y_2(t) + \Delta y_t, \\ Z(t) = z_2(t) + \Delta z. \end{cases} \quad (7)$$

Подставим (1)-(6) в систему уравнений (7) и выполним некоторые преобразования, в итоге получим окончательный вид параметрического уравнения траектории движения рабочего органа без учета инерционных эффектов:

$$\begin{cases} X(t) = R \sin(90 - \varphi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos(\rho) \cos \omega_2 t + \\ \quad + R \cos(90 - \varphi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \sin \omega_2 t + \\ \quad + L \sin(-\rho) \cos \omega_2 t; \\ Y(t) = -R \sin(90 - \varphi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos(\rho) \sin \omega_2 t + \\ \quad + R \cos(90 - \varphi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \cos \omega_2 t + \\ \quad + L \sin(-\rho) \sin \omega_2 t, \\ Z(t) = R \sin(90 - \varphi_0 + \omega_1 t + \omega_2 t) \sin(\rho) L \cos(\rho). \end{cases} \quad (8)$$

Из (8) следует, что чтобы определить форму траектории и положение каждого молотка на диске, нужно знать следующие параметры: угловую скорость вращения ротора ω_1 , угловую скорость прецессионного движения ω_2 , угол наклона ротора ρ , конструктивные расстояния R и L , а также задать углы расположения молотков на диске 2 ротора 3. Для проведения компьютерного моделирования и анализа результатов ударного взаимодействия молотков вибродробилки с породой в соответствии со способом [13] в первую очередь

необходимо определить координаты точек ударов молотков на поверхности единичного образца измельчаемого материала, по которому наносятся дробящие удары. Положим, что решаемая задача состоит в измельчении крупнодисперсного фрагмента горной породы за несколько ударов, поскольку максимальная периферийная скорость молотка и соотношение масс этих двух тел не позволяют раздробить его за один удар. Вместе с тем условно примем, что кусок породы лишен всех степеней свободы (рис. 4) и остается неподвижным в процессе дробления. Также положим, что, например, на одном из дисков дробилки по периферии равномерно размещены три молотка с угловым расположением между собой через 40° (рис. 5).

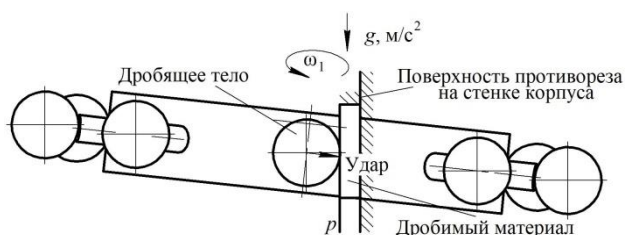


Рис. 4. Схема взаимодействия молотка с куском породы

Fig. 4. Diagram of interaction between the hammer and a piece of rock

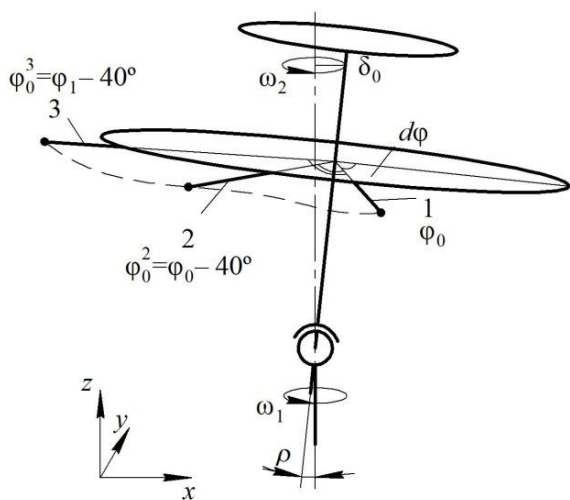


Рис. 5. Схема расположения молотков на одном из дисков вибродробилки

Fig. 5. Schematic arrangement of hammers on one of the vibrating crusher discs

Допустим, что в процессе помола эти молотки оказывают ударное воздействие на тело в момент времени t_y^i , где i – порядковый номер молотка, начиная с 1-го молотка с угловым расположением φ_0 (см. рис. 5). Причем за время $t_y^i - t_0$ первый молоток переместится в точку удара о кусок породы. Поскольку нами принято, что дробимое тело неподвижно, то необходимо определить область поверхности, в которой будут совер-

шаться удары. Затем вычислим координаты каждого молотка при его прохождении через эти координаты после контакта с поверхностью дробимого тела. Координатное расположение этих точек удара для каждого из молотков обозначает область формирования концентраторов напряжений. Величина разброса этих точек, в частности, будет зависеть от того, насколько разнесены между собой молотки по периферии диска.

В зависимости от предварительных размеров кусков измельчаемого материала и площади поверхности соударения, изменением параметров колебаний вентильно-индукторного электропривода достигают максимально большую область поверхности распределения ударов. А это непосредственно оказывает влияние на характер зарождения и распространения трещин в дробимой породе, поскольку каждая новая точка удара будет дополнительно являться концентратором напряжения на хрупком теле. А по мере увеличения области поверхности периодического воздействия комбинированных низко- и высокочастотных колебаний в соответствии с просчитанной матрицей распределения точек удара будет обеспечиваться соответствующий рост трещин и формирование грансостава для конкретных заданных параметров колебаний. Настройку параметров комбинированных колебаний (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ №2023613203 «Симулятор для моделирования сложнопрофильных вибрационных полей роторно-дебалансных виброприводов с модулирующими свойствами») производят до достижения максимальной эффективности в зависимости от размеров дробимого материала, его физико-механических свойств и требуемого конечного грансостава готового продукта.

Рассмотрим конкретный пример моделирования способа. Отметим, что в соответствии с [15] соотношение частот f вращения ротора ω_1 и его колебаний ω_2 вибропривода молотковой дробилки в зависимости от конструктивного исполнения находится в пределах от 5 до 100 (было подтверждено экспериментально). Поэтому, задав отношение частот при соответствующей угловой скорости ротора, определим угловую скорость прецессионного движения. Условимся, что молоток снабжен ударным элементом в форме шара с радиусом r . Тогда координата точки удара будет смещаться на величину проекции этой величины на соответствующую ось.

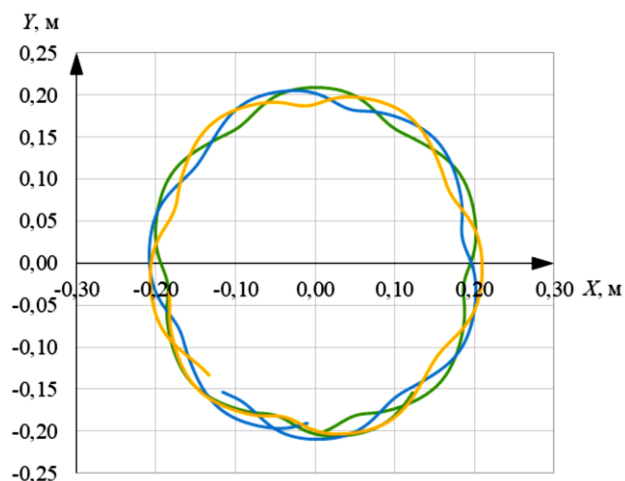
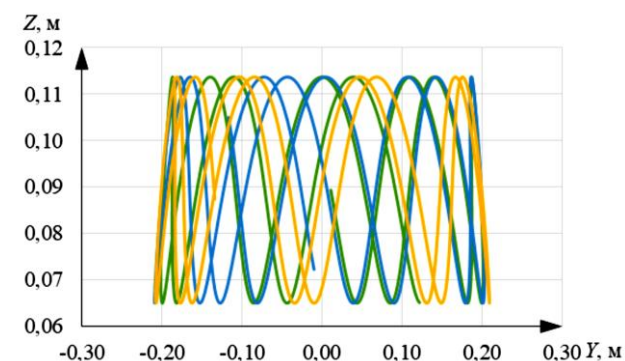
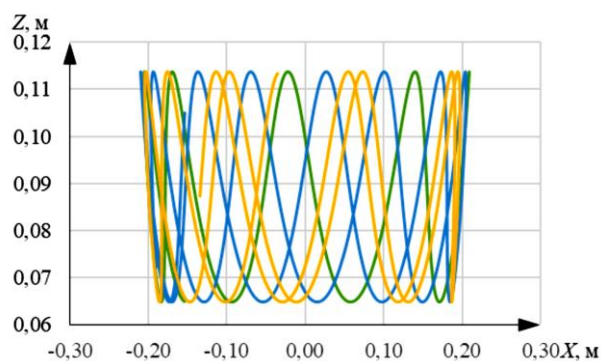
В приближении к реальной экспериментальной установке занесем исходные параметры в табл. 1.

Используя (8) и параметры в табл. 1, построим графики перемещения расчетных материальных точек (удара). Проекции траекторий движений молотков обозначены зеленым, синим и желтым цветами соответственно для каждого молотка с порядковым номером. Рассматриваемый временной интервал 110 мс. Каждая пространственная кривая является одной из форм кривой Лиссажу. Ее проекции представлены на графиках в соответствии с рис. 6-8.

Таблица 1. Исходные параметры для нахождения вибрационных полей исполнительного органа дробилки

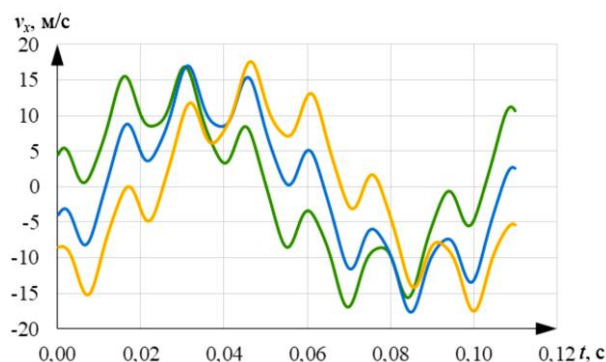
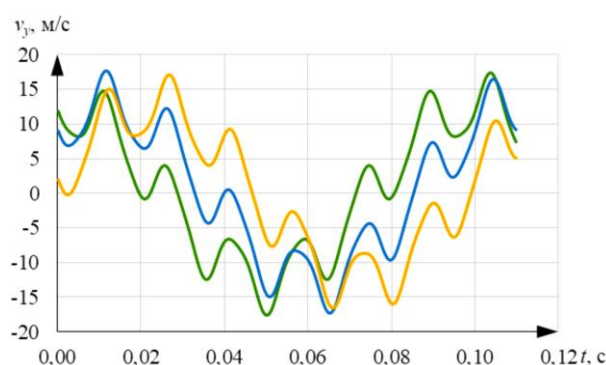
Table 1. Initial parameters for finding the vibration fields of the crusher operating body

Параметр	Величины параметров		
	Молоток 1	Молоток 2	Молоток 3
R , м	0,2	0,2	0,2
L , м	0,09	0,09	0,09
ρ , град	-7	-7	-7
ω_1 , рад/с	62,8	62,8	62,8
f	6,5	6,5	6,5
ω_2 , рад/с	408,2	408,2	408,2
φ_0 , град	-90	-130	-170
r , м	0,025	0,025	0,025

Рис. 6. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость XoY Fig. 6. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the XoY planeРис. 7. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость YoZ Fig. 7. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the YoZ planeРис. 8. График проекции траекторий виброперемещений расчетных материальных точек на плоскость XoZ Fig. 8. Projected trajectories of vibration displacements of calculated points of impact on the XoZ plane

Используя графики скоростей на **рис. 9-11**, определим результирующую скорость виброперемещений расчетных материальных точек (удара) (**рис. 12**):

$$v_i(t) = \sqrt{v_{ix}(t)^2 + v_{iy}(t)^2 + v_{iz}(t)^2}.$$

Рис. 9. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси X Fig. 9. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the X axisРис. 10. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси Y Fig. 10. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the Y axis

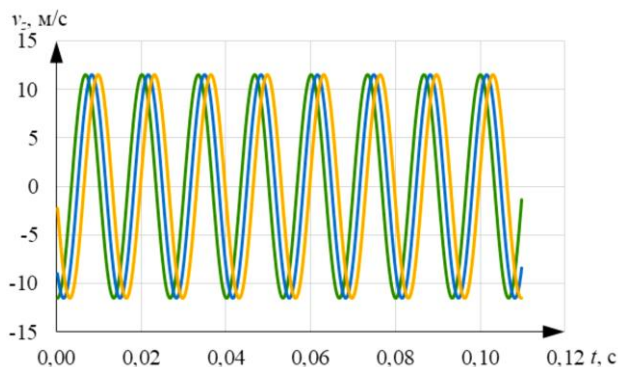


Рис. 11. График скоростей виброперемещений расчетных материальных точек по оси Z
Fig. 11. Velocities of vibration displacement of calculated points of impact along the Z axis

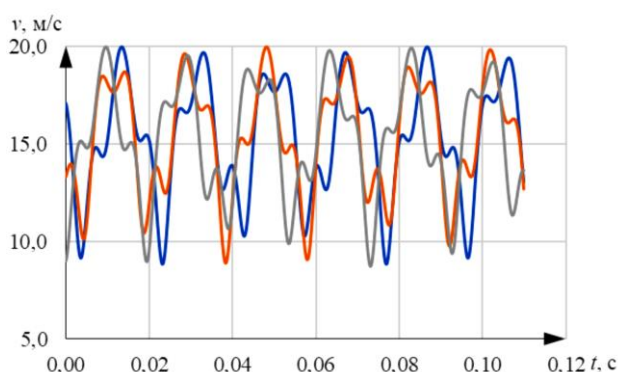


Рис. 12. График результирующих скоростей виброперемещений расчетных материальных точек
Fig. 12. Resulting velocities of vibration displacements of calculated points of impact

На графиках нетрудно заметить, что каждая материальная точка на молотке перемещается по траектории, которая имеет сдвиг по фазе относительно траектории такой же точки на предшествующем молотке на угол между ними в 40° .

В направлении Z модуль скорости будет меньше минимального модуля скорости по осям X и Y – в данном случае 19,9 м/с. Поверхность удара на дробилом теле в соответствии со схемой закрепления (см. рис. 4) будет параллельна плоскости Yoz с абсциссой, равной

$$p = x_{\varphi_0}^1 + r \cos \rho = 10,97 + 25 \cos(-7) = 35,78 \text{ мм},$$

где $x_{\varphi_0}^1$ – абсцисса первой материальной точки, определяющая положение плоскости удара.

За счет шарнирного соединения молотков посредством осей (условно не показаны) на периферии диска после соударения первый молоток с куском дробилом материала по инерции переместится и даст возможность совершить удар по куску дробило-

го материала следующему молотку. Далее, зная координаты всех точек соударения, определим временные параметры t_y всех соударений (табл. 2).

Пульсации угловой скорости вращения ω_1 можно представить в виде

$$\omega_t = \omega_1 \pm A_{\omega},$$

где A_{ω} – амплитуда колебаний угловой скорости.

Зададим для примера колебания угловой скорости ω_1 по линейному закону с частотой 2 Гц, а амплитуду колебаний примерно равной 10% от номинальной угловой скорости, получим матрицу точек, приведенную в табл. 3.

Таблица 2. Координаты материальных точек (удара) на плоскости дробилом материала (для сценария дробления без пульсаций ω_1)
Table 2. Coordinates of points of impact on the plane of the crushed material (for the scenario of crushing without pulsations ω_1)

Номер молотка i	Время t_y , мс	Координата точки удара, мм		
		X_y	Y_y	Z_y
1	0,0	10,97	-200,00	89,33
2	11,9		-209,15	113,23
3	24,0		-202,53	100,77

Таблица 3. Координаты материальных точек (удара) на плоскости дробилом материала (для сценария дробления с пульсациями ω_1)
Table 3. Coordinates of points of impact on the plane of the crushed material (for the scenario of crushing with pulsations ω_1)

Номер молотка i	Время t_y , мс	Координата точки удара, мм		
		X_t	Y_t	Z_t
1	0,0	10,97	-200,00	89,33
2	11,8		-207,62	99,91
3	24,1		-204,08	105,10

Как видно из табл. 3, такие пульсации несущественно влияют на координаты точек удара в момент времени t_y^i . Координаты точек удара в случае отсутствия колебаний и пульсаций скорости (традиционный способ) будут одинаковы для трех молотков.

Построим диаграмму координат точек удара в плоскости Yoz (рис. 13).

Моделирование разрушения горной породы, сопровождающееся распространением трещин в измельчаемом материале при взаимодействии его с рабочим органом молотковой дробилки, на сегодня возможно только с использованием численных методов. Однако для решения данной нелинейной задачи требуется специальное программное обеспечение, способное реализовать конечно-элементный анализ в явной динамической постановке процесса разрушения [16].

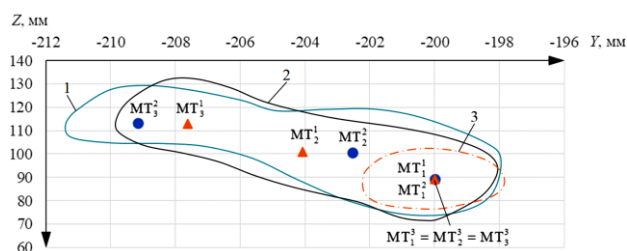


Рис. 13. Точечная диаграмма координат моментов удара на плоскость YoZ : верхний индекс: 1 – колебания, 2 – радиально-осевые колебания и пульсации скорости вращения, 3 – без колебаний и пульсаций; нижний индекс – порядковый номер молотка

Fig. 13. A point chart of coordinates of moments of impact on plane YoZ : upper index: 1 is vibrations, 2 is radial-axial vibrations and pulsations of rotation speed, 3 is without vibrations and pulsations; lower index is a serial number of the hammer

Моделирование процесса измельчения выполнялось на суперкомпьютере «Торнадо ЮУрГУ» в программном комплексе LSTC LS-Dуна. Для численного моделирования процесса дробления был выбран метод конечных элементов по Лагранжу, который позволяет с достаточной точностью показать прогрессирующее раскрытие «дефектов» в материале в виде трещин как на поверхности, так и внутри материала путем удаления дискретных элементов из расчета по достижении критерия разрушения. Так как хрупкому разрушению предшествует зарождение трещины, для которого необходима пластическая деформация, то и критерий разрушения был выбран именно по достижении критического значения пластической деформации. Создание конечно-элементных моделей молотка и фрагмента хрупкой породы выполнено в трехмерной среде LS-PrePost v.4.9.7 (рис. 14). Модель дробимого тела представляет собой параллелепипед с размерами $70 \times 70 \times 15$ мм, модель молотка – сферическая твердая оболочка с радиусом $r = 25$ мм. Размер дискретного элемента конечно-элементной сетки равен 0,75 мм.

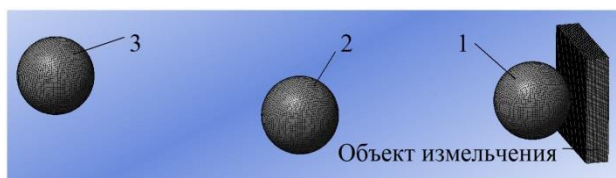


Рис. 14. Трехмерная модель для реализации процесса измельчения: 1, 2, 3 – порядковые номера молотков

Fig. 14. A three-dimensional model for the crushing process: 1, 2, 3 are serial numbers of hammers

Параметры хрупкой среды, используемые в модели, заимствованы из исследования [16] и показаны в табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические параметры дробимой хрупкой среды
Table 4. Physical and mechanical parameters of crushed brittle materials

Плотность материала ρ_0	$2,7 \cdot 10^{-6}$ кг/мм ³
Модуль сдвига G	21,1 ГПа
Эталонная скорость деформации $EPSI$	$2,59 \cdot 10^{-11}$ с ⁻¹
Предельная прочность T	0,054 ГПа
Параметр прочности при разрушении M	0,88
Параметр прочности неповрежденной породы N	0,82
Объемный модуль упругости $K1$	45,8 ГПа

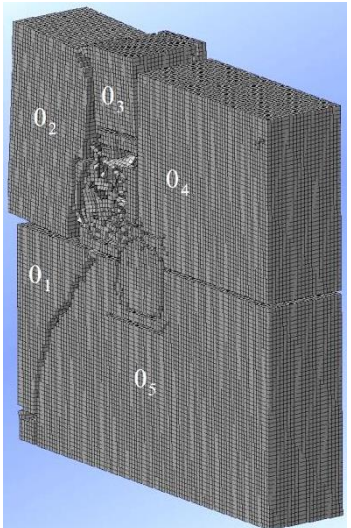
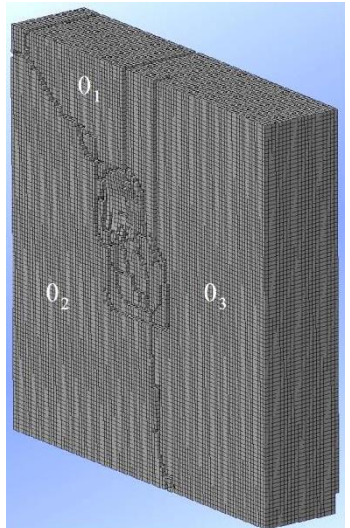
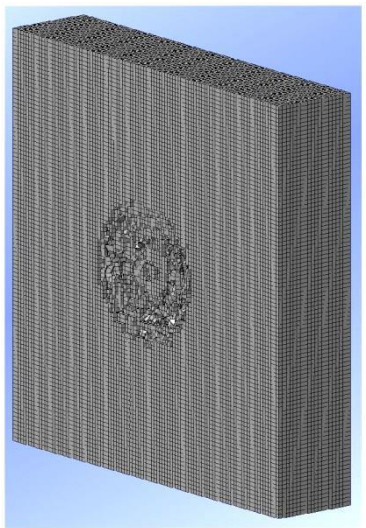
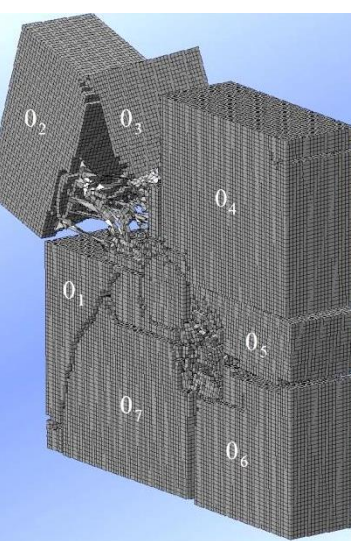
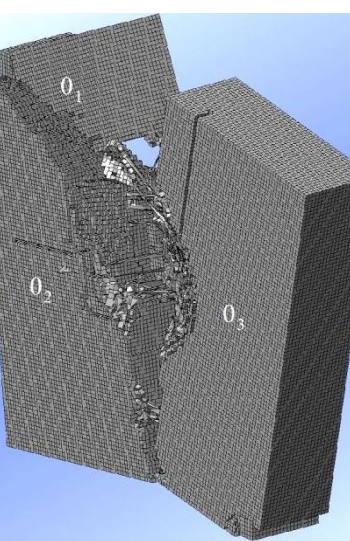
В соответствии с (8) и найденными координатами точек в массиве удара провели серию компьютерных экспериментов ударного воздействия молотков на объект измельчения тремя разными способами: с пульсациями угловой скорости вращения ротора и без них, а также в случае, когда отсутствуют виброперемещения рабочего органа, то есть без каких-либо колебаний. Результаты представлены в табл. 5.

Результаты проведенной серии компьютерных экспериментов показали, что распределение многократных ударов по площади измельчаемого материала существенно ускоряет процесс дробления горной породы и, как следствие, снижает время на формирование конечного гранулометрического состава. Увеличение количества пульсаций скорости влечет к изменению формы траектории движения молотков, что, в свою очередь, увеличивает массив точек ударов. Стоит отметить, что смена координат точек удара меняет также и ориентировку роста трещин, так как каждый последующий удар усиливает рост трещин в своем секторе удара. Каждый удар создает собственный очаг трещин, а в совокупности множество ударов будет образовывать сеть трещин в объеме измельчаемого тела с узлами в этих очагах, от которых появляются вторичные трещины. Вблизи такого узла густота трещин будет максимальна. В свою очередь, это означает, что для этого требуется управлять положением узлов – концентраторов трещин, а значит, необходимо управлять траекториями движений каждого из молотков, осуществляющих удар. При этом, соответственно, будут изменяться и параметры конечного продукта дробления. Так, например, во втором случае при сравнении с первым смещение точек ударов в результате увеличения количества пульсаций скорости вращения ротора привело к существенному изменению грансостава по завершении процесса дробления. Количество осколков в первом случае составляет 7 шт., что на 4 больше, чем во втором – без радиально-осевых колебаний рабочего органа. Однако стоит отметить, что при другом соотношении параметров радиально-осевых колебаний и пульсаций скорости вращения молотков результат может быть и хуже.

Отсюда следует, что существуют такие оптимальные режимы комплексных колебаний рабочего органа, при которых будет достигаться требуемая однородность получаемой крошки. Дальнейшее, более глубокое изучение взаимосвязи между параметрами комплексных колебаний рабочего органа, трещинообразованием и конечным продуктом позволит существенно изменить практическую технологию селективного дробления и повысить культуру производства.

Способ был реализован в конструкции дробилки для измельчения минералов, которая испытана в лабораторных условиях. Задачей испытаний было сравнение производительности и определение степени измельчения различных горных пород посредством устройства при наличии только вращательного движения молотков и при сообщении им дополнительно пульсаций скорости вращения и прецессионного движения с нутацией оси вращения.

Таблица 5. Иллюстрации поэтапного формирования трещин (молотки условно не показаны)
Table 5. Figures of step-by-step crack formation (hammers are not shown for clarity)

С прецессионным движением молотков	С прецессионным движением и пульсациями скорости вращения молотков	Традиционный способ
Момент удара второго молотка		Момент удара третьего молотка
		
Момент удара третьего молотка		<p>Примечание: ударное воздействие трех молотков в одну точку не повлекло зарождения магистральных трещин в силу недостаточно развитой сетки трещин в объеме материала</p>
		

Для создания такого движения дробилка (рис. 15) оборудована планетарным инерционным вибровозбудителем [15], который обеспечивает плавное изменение параметров колебаний, а для обеспечения пульсации скорости применен вентильно-индукторный электропривод [14].

Пульсациями скорости $\omega_0 \pm \omega_1$ управляют за счет электронной системы управления в соответствии с требуемым законом. Регулирование параметров пульсаций частоты вращения осуществляется изменением угла включения и выключения соответствующей обмотки электродвигателя и применяется позиционная коммутация с использованием ШИМ-регулирования, что позволяет не только задавать требуемые законы пульсаций, но и полностью отключать их.

Радиально-осевые колебания (прецессия) рабочего органа, как и пульсации скорости, могут отключаться. По параметрам дробящего усилия, производительности и степени измельчения определялась эффективность применения вышеизложенного способа (рис. 16).

Заключение

Выполненное компьютерное моделирование с использованием численных методов показало повышенную эффективность нового способа дробления хрупких сред, где за счет применения комплексной принудительной вибрации рабочего органа обеспечивается расширенная область трещинообразования в измельчаемой хрупкой среде. Разработанная методика позволяет учитывать топологию структуры и физико-механические свойства дробимой породы.

Более глубокое понимание физической сущности процесса разрушения хрупкой среды и наглядность методики помогут при проектировании дробилок, функционирующих по новому способу, а компьютерное моделирование позволит реально оценить эффективность дробления и сравнить его с традиционными способами.

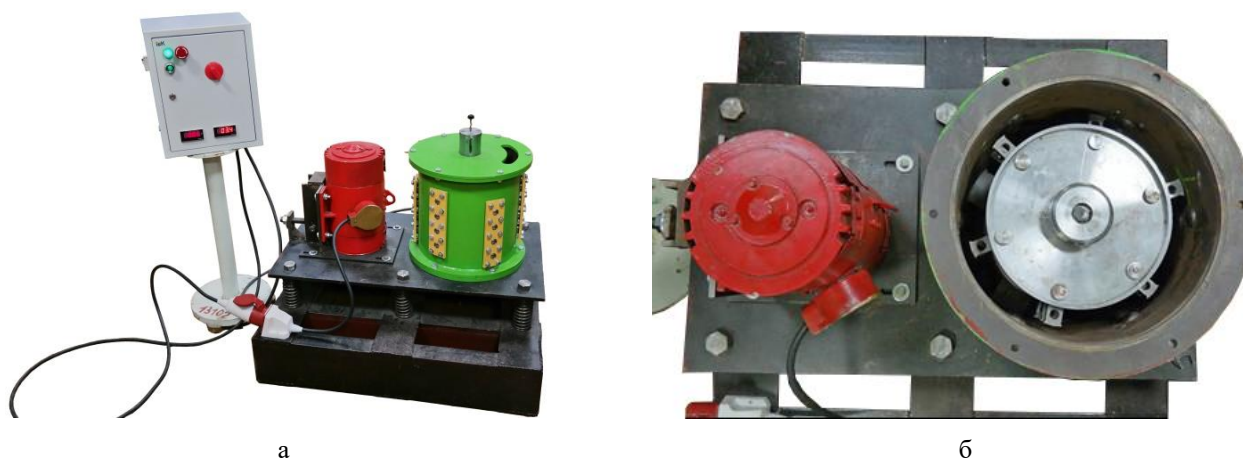


Рис. 15. Экспериментальная молотковая дробилка для управляемого размерного диспергирования хрупких сред: а – общий вид; б – вид сверху на рабочий орган

Fig. 15. An experimental hammer crusher for controlled dimensional dispersion of brittle materials: a is a general view; б is a top view of the working body



Рис. 16. Примеры образцов дробленных минералов, полученных селективным дроблением:

а – офиокальцит; б – мрамор; в – лемезит

Fig. 16. Examples of samples of crushed minerals obtained by selective crushing: a is ophiocalcite; б is marble; в is lemezite

Список источников

1. Горлов И.В., Митусов П.Е., Беляев А.М. Анализ процесса измельчения слабых горных пород // Уголь. 2022. №6. С. 44-47. DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47
2. Оценка селективности измельчения минеральных комплексов / Г.Д. Краснов, Е.В. Копорулина, А.Н. Краснов, В.В. Чихладзе // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. №2. С. 86-97.
3. Басыров И.И., Бардовский А.Д. Инновационный способ дробления и конструкция вертикальной валковой дробилки для дробления горной массы // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. №2. С. 121-129. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-121-129
4. Макаров П.В., Еремин М.О. Модель разрушения хрупких и квазихрупких материалов и геосред // Физическая мезомеханика. 2013. Т.16. №1. С. 5-26. DOI: 10.24411/1683-805X-2013-00032
5. Стефанов Ю. П. Некоторые особенности численного моделирования поведения упруго-хрупкопластичных материалов // Физическая мезомеханика. 2005. Т. 8. №3. С. 129-142.
6. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2020. №1. С. 71-79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79
7. Альтшуль Г.М., Гуськов А.М., Пановко Г.Я. Моделирование взаимодействия обрабатываемой породы с вибрационной щековой дробилкой // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2021. №1. С. 33. DOI: 10.31857/S0235711921010053
8. Бартоломей М.Л., Труфанов Н.А. О применение пакета Ansys для исследования деформирования здания с учетом трещинообразования // Вестник Пермского государственного технического университета. 2009. №1. С. 15-20.
9. Бураго Н.Г. Моделирование разрушения упругопластических тел // Вычислительная механика сплошных сред. 2008. Т. 4. №4. С. 5-20.
10. 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
11. 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
12. Improving geometric homogeneity of particles crushed using vibrational drive with modulating properties in machine for crushing brittle materials / S.V. Sergeev, Yu.S. Sergeev, A.A. Dyakonov, E.N. Gordeev // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2018, 10(13), pp. 2411-2422.
13. Пат. 2732619 Российская Федерация, МПК7 В 02 С 13/00. Способ измельчения хрупких материалов / Ю.С. Сергеев, С.В. Сергеев, Е.Н. Гордеев, А.В. Кононистов, Г.Е. Карпов; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)». №2019113183; заявл. 26.04.2019; опубл. 21.09.2020, Бюл. №27. 11 с.
14. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of switched reluctance electric vibration drive with adaptive control // 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501749
15. 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.
16. Shah Q.H., Hamdani A. The damage of unconfined granite edge due to the impact of varying stiffness projectiles // International Journal of Impact Engineering. 2013, vol. 59, pp. 11-17. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.004

References

1. Gorlov I.V., Mitusov P.E., Belyaev A.M. Analysis of the soft rock crushing process. *Ugol [Coal]*. 2022;(6):44-47. (In Russ.) DOI: 10.18796/0041-5790-2022-6-44-47
2. Krasnov G.D., Koporulina E.V., Krasnov A.N., Chikhladze V.V. Assessment of selectivity of mineral complex crushing. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2013;(2):86-97. (In Russ.)
3. Basyrov I.I., Bardovskiy A.D. An innovative crushing method and design of the vertical roll crusher for crushing rock masses. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2020;(2):121-129. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-121-129
4. Makarov P.V., Eremin M.O. A model of fracture of brittle and quasi-brittle materials and geological environment. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2013;16(1):5-26. (In Russ.) DOI: 10.24411/1683-805X-2013-00032
5. Stefanov Yu.P. Some features of numerical modeling of elastic-brittle-plastic materials behavior. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2005;8(3):129-142. (In Russ.)
6. Simonov P.S. Experimental study on rock crushing by a single impact. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten [Mining Informational and Analytical Bulletin]*. 2020;(1):71-79. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79
7. Altshul G.M., Guskov A.M., Panovko G.Ya. Modeling of interaction between processed rocks and a vibrating jaw crusher. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin [Problems of Mechanical Engineering and Reliability of Machines]*. 2021;(1):33. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0235711921010053

8. Bartolomey M.L., Trufanov N.A. Applying the Ansys package for studying a building deformation factoring into cracking. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Perm State Technical University]. 2009;(1):15-20. (In Russ.)
9. Burago N.G. Modeling of elastoplastic body fracture. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred* [Computational Mechanics of Continuous Media]. 2008;4(4):5-20. (In Russ.)
10. Pershin G.D., Ulyakov M.S., Pshenichnaya E.G., Gabbasov B.M. An energy method for calculating the productivity of diamond wire saws in the extraction of facing stones. *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
11. 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
12. Sergeev S.V., Sergeev Yu.S., Dyakonov A.A., Gordeev E.N. Improving geometric homogeneity of particles crushed using vibrational drive with modulating properties in machine for crushing brittle materials. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*. 2018;10(13):2411-2422
13. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V., Gordeev E.N., Kononistov A.V., Karpov G.E. *Sposob izmelcheniya khrupkikh materialov* [Method of crushing brittle materials]. Patent RU, no. 2732619, 2020.
14. Sergeev Yu.S., Sandalov V.M., Karpov G.E. Modeling of switched reluctance electric vibration drive with adaptive control. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. Sochi, 2018. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501749
15. Sergeev Yu.S., Sergeev S.V. et al. *Sposob возбуждения колебаний* [Method of vibration excitation]. Patent RU, no. 2533743, 2014.
16. Shah Q.H., Hamdani A. The damage of unconfined granite edge due to the impact of varying stiffness projectiles. *International Journal of Impact Engineering*. 2013;59:11-17. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2013.03.004

Поступила 08.11.2023; принята к публикации 19.12.2023; опубликована 28.03.2024
Submitted 08/11/2023; revised 19/12/2023; published 28/03/2024

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 технологий 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, станков и инструментов, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия. Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Пузанков Максим Сергеевич – магистрант, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976

Yury S. Sergeev – PhD (Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Electrical Equipment and Automation of Production Processes, 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 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 Technology, Machines and Tools, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: sergeevsv@susu.ru. ORCID 0000-0001-7868-4295

Maksim S. Puzankov – master's student, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia.
Email: mr.maks.134@gmail.com. ORCID 0009-0002-1886-0976