

УДК 621.926.22.001 : 622.732

**К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТЕМПЕРАТУРЫ ПРИ УДАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ШАРОВ  
В ВЕРТИКАЛЬНОЙ ВИБРАЦИОННОЙ МЕЛЬНИЦЕ****<sup>1</sup>Франчук В.П., <sup>1</sup>Светкина Е.Ю., <sup>1</sup>Анциферов А.В.**<sup>1</sup>*Национальный технический университет «Днепровская политехника»***ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТЕМПЕРАТУРИ ПРИ УДАРНІЙ ВЗАЄМОДІЇ КУЛЬ У  
ВЕРТИКАЛЬНОМУ ВІБРАЦІЙНОМУ МЛИНІ****<sup>1</sup>Франчук В.П., <sup>1</sup>Светкіна О.Ю., <sup>1</sup>Анциферов О.В.**<sup>1</sup>*Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»***ON THE ISSUE OF CALCULATION OF TEMPERATURE AT THE BALL SHOCK ACTION IN  
VERTICAL VIBRATION MILL****<sup>1</sup>Franchuk V.P., <sup>1</sup>Svietkina O.Yu., <sup>1</sup>Antsiferov A.V.**<sup>1</sup>*National Technical University «Dnipro Polytechnic»*

**Аннотация.** В статье приведена методика определения температуры, развивающейся в зоне удара шаров при измельчении. Данный способ нагружения реализуется в вертикальных вибрационных мельницах и называется виброударным. Одновременно с измельчением имеют место и другие эффекты, называемые механической активацией. Рассматривается конструктивная схема вертикальной вибрационной мельницы. Мелющие тела имеют форму шаров. Определяются основные параметры данной механической системы, влияющие на величину ударного разрушения частиц материала. Разрушение в зоне удара обеспечивает не только поверхностную активацию материала, но и нарушение внутренней структуры частиц. В результате виброударного нагружения происходит объемная ионизация кристаллов измельчаемого материала. Для примера рассматривается уравнение приращения потенциальной энергии атомов в узлах кристаллической решетки, которая деформируется при ударе. Анализ его позволяет предположить, что активационные процессы связаны с некоторой критической температурой. Изучение экспериментальных результатов с использованием вертикальных вибрационных мельниц также указывает на существенное влияние температуры в зоне удара между шарами. Предлагается методика расчета температуры. В качестве исходных данных выбираются режим работы помольной камеры, размеры и свойства шаров. Приводятся графики зависимости температуры в зоне контакта от амплитуды и частоты колебаний мельницы. Также исследуется влияние диаметра шаров. Показано, что увеличение режима работы мельницы и диаметра шаров ведет к повышению температуры. Учет дополнительных факторов снижает температуру в зоне удара. Но и в этом случае влиянием ее пренебрегать нельзя. Эксперименты показали возможность механической активации многих материалов: металлов, минералов, карбидов титана и кремния, угля. Поэтому развитие предложенной методики видится в учете изменения свойств измельчаемого материала.

**Ключевые слова:** вертикальная вибрационная мельница, виброударное нагружение, измельчение, механическая активация, соударение шаров, зона удара, температура

Изменение размера частиц при различных видах измельчения – это не единственный результат механического воздействия на твердые тела. Еще более важно то обстоятельство, что при этом происходят всевозможные изменения: фазовые переходы, энергетическая активация частиц на поверхности и в объеме, деформация, возникновение точечных и протяженных эффектов. Эти изменения в конечном итоге повышают активность порошков твердых материалов в процессах последующего их использования

Теоретические и экспериментальные исследования, проведенные авторами, позволяют сделать вывод, что для проведения некоторых реакций механоакти-

вазии большими возможностями обладают вертикальные вибрационные мельницы (МВВ). Отличительной особенностью их от мельниц других типов является то, что помольные камеры совершают колебательные движения по прямолинейной траектории в вертикальной плоскости. Такие параметры обеспечивают преимущественно виброударное воздействие на разрушаемый материал с проникновением зоны деформации на весь объем частицы. Это обеспечивает не только поверхностную активацию материала, но и нарушение внутренней структуры частиц и, следовательно, проникновение активной зоны на большую глубину. Аналогичные результаты получены и другими авторами, которые исследовали процессы измельчения в активаторах ударного типа [1-4].

Конструктивная схема динамически уравновешенной МВВ показана на рис. 1. Она состоит из двух помольных камер 1 и 2, установленных с помощью амортизаторов 3 на общей раме 4. На этой же раме установлен двухвальный кривошипно-шатунный вибровозбудитель 5, валы которого имеют по три шатуна 6. Каждая из помольных камер связана с тремя шатунами (двумя шатунами одного вала и одним – другого).

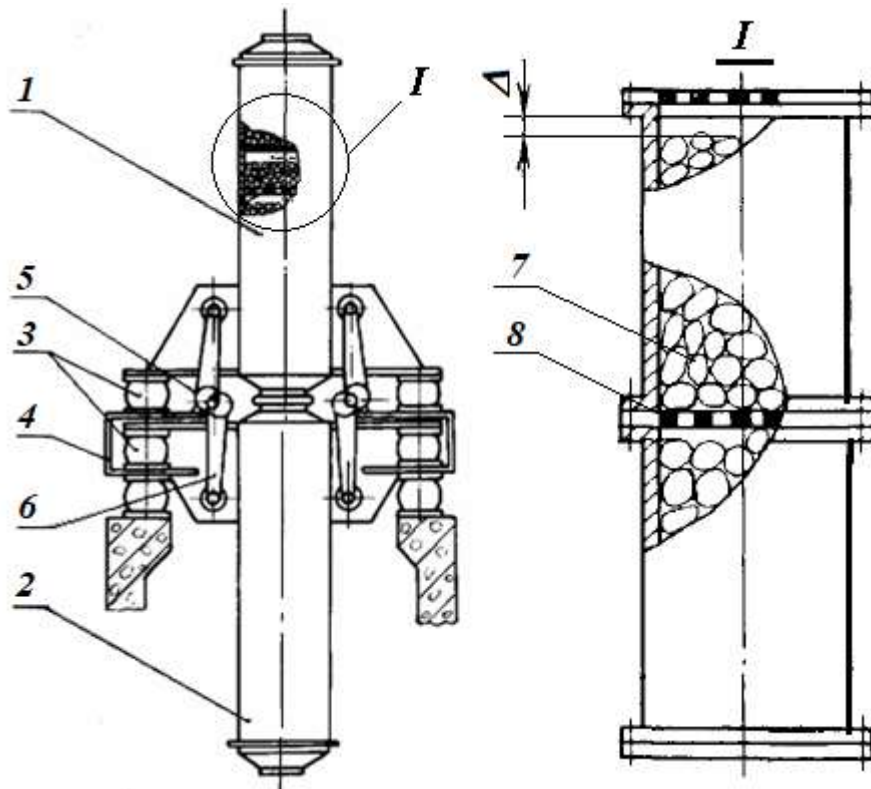


Рисунок 1 – Конструктивная схема вертикальной вибрационной мельницы

Помольные камеры разбиты на ряд секций 7, отделенных друг от друга перфорированными днищами 8. Секции заполнены мелющими телами с некоторым технологическим зазором  $\Delta$ . Режимными параметрами работы мельницы являются амплитуда  $a$  и частота  $\omega$  колебаний. При определенном соотношении между этими параметрами и технологическим зазором  $\Delta$  и осуществляется работа мельницы в виброударном режиме. В этом случае осуществляются периодические соударения технологической загрузки с

нижним и верхним днищами секций помольных камер. При этом, если в один полупериод движения мельницы соударение технологической нагрузки помольной камеры 1 происходит с верхними днищами секций, то в камере 2 – с нижними. В другой полупериод движения мельницы наблюдается обратная картина соударения технологической нагрузки с днищами помольных камер.

Таким образом, при противофазном движении и полном уравнивании сил инерции помольных камер, в этом типе мельниц уравниваются также и силы воздействия технологической нагрузки на рабочие органы (через помольные камеры, шатуны и валы вибровозбудителя), а на внешние конструкции (раму мельницы и основание) эти силы не передаются.

Экспериментальные помолы по изучению процессов механоактивации проводились на лабораторной мельнице с одной помольной камерой и двумя секциями, показанными на рис. 1 крупным планом справа. Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы. Поверхностная активность тесно связана с величиной энергии смещения. Чем больше энергия смещения, тем более активной становится поверхность измельчаемого порошка [Дерягин Б.В., 1973].

Факт протекания реакций, завершающихся образованием фазы продукта, указывает на возможность глубокого, на молекулярном и кластерном уровне, перемешивания компонентов в зонах динамического контакта и последующей кристаллизацией новой фазы. Как известно, реакции в смесях измельчаемых порошков наблюдаются при температуре, значительно более низкой, чем температура плавления реагентов: около  $0,2...0,3 T_{пл}$ . В обычных условиях, даже если термодинамическое равновесие сильно смещено в сторону продуктов, термическая реакция невозможна из-за отсутствия подвижности атомов или молекул. Тепловая подвижность (диффузия) появляется обычно при температуре  $T \geq 0,7T_{пл}$ . Механическая обработка снимает кинетический запрет на перенос массы, и он осуществляется на поверхности контакта, в приповерхностном слое или в объеме.

Особенностью вибрударного нагружения в МВВ является то, что при этом процессе происходит не только поверхностная ионизация, но и объемная, в результате которой осуществляется ионизация узловых атомов и которые благодаря Оже-переходам приобретают положительный заряд. Это приводит к тому, что потенциальная энергия в кристалле возрастает и измельченное вещество оказывается в активированном состоянии.

Активация молекулы сложной структуры при фазовых переходах, приводящих к повышению электропроводности или даже к явлению сверхпроводимости, может осуществляться путем непосредственного накопления энергии, полученной в момент удара, на одной из колебательных мод, соответствующей самой низкой частоте колебания, с последующим быстрым перераспределением энергии по другим модам. При вибрударном нагружении наблюдаются такие фазовые переходы, приводящие к изменению фазового состава и к новым физическим параметрам. Таким образом, при измельчении в МВВ будет важна не сама величина вероятности

перераспределения энергии, а ее зависимость от температуры. Отсюда должна существовать некая критическая температура.

Действительно, температура в момент удара является функцией начальной температуры, энергонапряженности процесса измельчения, теплоты физико-химического превращения и энергетического выхода, который чувствителен к размерам образующихся частиц.

Рассмотрим данный вопрос применительно к объемным кристаллам, находящимся внутри материала до момента нагружения. Можно считать, что потенциальная энергия атома в таких кристаллах определяется в основном кулоновским отталкиванием остовов и обменным взаимодействием валентных электронов. Если один из атомных остовов приобретет дополнительный заряд, то потенциальная энергия атома может возрасти на величину, достаточную для того, чтобы атом оказался над потенциальным барьером

$$\Delta V_i = \sum_k \sum_j \frac{(z_i^* - \sigma_i)(z_j - \sigma_j)e^2}{r_{ij}^k} - \sum_k \sum_j \frac{(z_i - \sigma_i)(z_j - \sigma_j)e^2}{r_{ij}^k} - (z_i^* - z_i)e \int_{r_0}^{\infty} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right) \frac{e}{r^2} dr \quad (1)$$

где  $z_i e$ ,  $z_j e$  – заряды атомных остовов в кристалле;  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  – постоянные экранирования, обусловленного валентными электронами;  $r_{ij}^k$  – расстояние от рассматриваемого  $i$ -го атома до всех  $j$  атомов  $k$ -й координационной сферы;  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $r_0$  – радиус сферы, внутри которой находится дополнительный заряд, показывающий поляризацию среды;  $z_i^* e$  – заряд многократно ионизированного атома остова.

Предположим, что активационные процессы связаны с некоторой критической температурой. Тогда необходимо рассматривать вопрос о передаче энергии, поглощенной твердым телом, молекулам, находящимся на его поверхности с учетом влияния температуры, а также влияние объемной и поверхностной ионизации на скорость активационных процессов. В результате создаются локальные повышения плотности возбужденных состояний, которые будут характеризоваться локальной температурой. При виброударном нагружении образуется новая поверхность, монослою которой передается энергия от твердого тела. Таким образом, локальная температура в зоне соударения – это важный параметр, отвечающий за процесс механоактивации твердых веществ.

Для оценки точечного температурного режима, реализуемого в МВВ рассмотрим взаимодействие мелющих тел (стальных шаров).

При работе мельницы в установившемся виброударном режиме укладка шаров технологической нагрузки близка к тетраэдрической, т. е. в период совместного движения каждый шар одного слоя всегда контактирует с тремя шарами соседнего слоя шаровой нагрузки. При действии на шар силы  $P$  (рис. 2), последний будет воздействовать при отсутствии сил трения на каждый из

последующих шаров силой [5]

$$Q = \frac{1}{3} \frac{P}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha = 0,614$  для шаров одинакового диаметра.

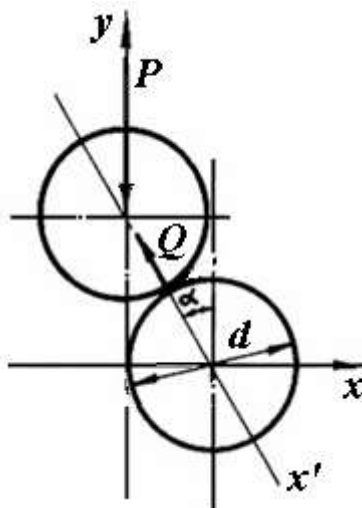


Рисунок 2 – Расчетная схема для определения сил упругости при взаимодействии шаров технологической нагрузки

Деформация вдоль оси взаимодействия одинаковых шаров в месте контакта при центральном ударе [Горное дело. Энциклопедический справочник. Т. 1. 1957, С. 248]

$$f = 1,04 \sqrt[3]{4 \frac{Q^2}{d} \left( \frac{1 - \mu^2}{E} \right)^2}, \quad (3)$$

где  $d$  – диаметр шара;  $E$ ,  $\mu$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона его материала.

С учетом тетраэдрической укладки шаров из рис. 2 для проекции их деформации на ось взаимодействия двух шаров получим

$$x' = \frac{f}{\cos \alpha}. \quad (4)$$

Режим работы мельницы, высота секции помольной камеры и величина зазора между слоем мелющих тел и крышкой секции таковы, что соударение шаров между собой и с перегородками помольной камеры при максимальной встречной скорости их движения, т. е. максимальная скорость соударения

$$v = 2 A \omega, \quad (5)$$

где  $A$ ,  $\omega$  – амплитуда и частота колебаний помольной камеры.

Эти величины являются основными режимными параметрами МВВ.

Принимаем, что на промежутке времени от начала соударения до момента полной взаимной остановки шаров их взаимное ускорение (замедление) постоянно, время до максимального сжатия шаров

$$\Delta t = \frac{2 x'}{v}. \quad (6)$$

Приравняем количества движения шара импульсу силы

$$m v = Q \Delta t, \quad (7)$$

где  $m = \frac{\pi d^3 \gamma}{6}$  – масса шара.

Из выражения (7) с учетом (3)-(6) определяем силу взаимодействия шаров

$$Q = 0,171 d^2 \sqrt[5]{\gamma^3 v^6 \left( \frac{E}{1 - \mu^2} \right)^2}. \quad (8)$$

Относительное удлинение  $\varepsilon$  стального стержня при его нагреве на температуру  $\Delta T$  (эквивалент изменения температуры  $T$  при деформации  $\varepsilon$ )

$$\varepsilon = \alpha' \Delta T, \quad (9)$$

где  $\alpha'$  – коэффициент линейного расширения.

Напряжения при деформации упругого элемента

$$\sigma = E \varepsilon. \quad (10)$$

Максимальная величина напряжений при контакте двух шаров

$$\sigma_{\max} = 0,918 \sqrt[3]{\frac{Q E^2}{d^2 (1 - \mu^2)^2}}. \quad (11)$$

Из (9) с учетом (10) и (11) определим температура нагрева в точке контакта

$$\Delta T = \frac{\varepsilon}{\alpha'} = \frac{\sigma_{\max}}{E \alpha'} = \frac{0,918}{\alpha'} \sqrt[3]{\frac{Q}{d^2 E (1 - \mu^2)^2}}. \quad (12)$$

Подставим в (12) значение  $Q$  из (8) и получим

$$\Delta T = \frac{0,497}{\alpha'} \sqrt[3]{\frac{\sqrt[5]{\gamma^3 v^6 \left( \frac{E}{1 - \mu^2} \right)^2}}{E (1 - \mu^2)^4}}. \quad (13)$$

Анализ формулы (13) показывает, что в идеальных условиях при ударном

взаимодействии шаров с абсолютно гладкими поверхностями мгновенная максимальная температура в точке контакта зависит от материала шаров и режима работы мельницы (скорости их соударения) и не зависит от диаметра шаров.

Динамический режим работы вертикальной вибрационной мельницы принято характеризовать коэффициентом режима

$$\Gamma = \frac{A \omega^2}{g}. \quad (14)$$

Задаваясь двумя величинами в формуле (14) можно определить третий параметр и вычислить скорость соударения  $v$ .

На рис. 3 представлены графики температуры в зависимости от частоты и амплитуды колебаний помольной камеры при различных коэффициентах режима работы мельницы. Амплитуда и частота колебаний соответствуют выбранному режиму. Как видно из рисунка, с ростом частоты колебаний имеет место уменьшение температуры, и соответственно, с ростом амплитуды колебаний, при одном и том же режиме, ее увеличение.

В реальных условиях на взаимодействие шаров будет влиять также возможное нарушение укладки шаров, наличие, количество, качество и крупность измельчаемого материала.

Динамический режим работы вертикальной работы мельницы обычно характеризуется коэффициентом режима

$$\Gamma = \frac{A \omega^2}{g}. \quad (14)$$

С учетом этого рассмотрим другой предельный случай – мгновенное взаимодействие шаров в безударном режиме. При этом режиме усилие взаимодействия шаров будет

$$Q_1 = 0,427 d^2 \gamma \Gamma g .. \quad (15)$$

Тогда температура в точке контакта из уравнения (12) и с учетом (15)

$$\Delta T_1 = \frac{0,691}{\alpha'} \sqrt[3]{\frac{d \gamma \Gamma g}{E (1 - \mu^2)^2}}. \quad (16)$$

Анализ выражения показывает, что температура в этом случае, хоть и слабо, но зависит от диаметра шаров.

Влияние различных факторов, о которых указывалось выше, приводит к снижению температуры. В этом случае предлагается использовать формулу (16). Минимальное значение температуры в точке контакта при вибрационном взаимодействии шаров при различных режимах работы МВВ показано на рис. 4. Как видим, здесь с увеличением диаметра шаров температура

повышается, равно как и с интенсификацией режима работы мельницы.

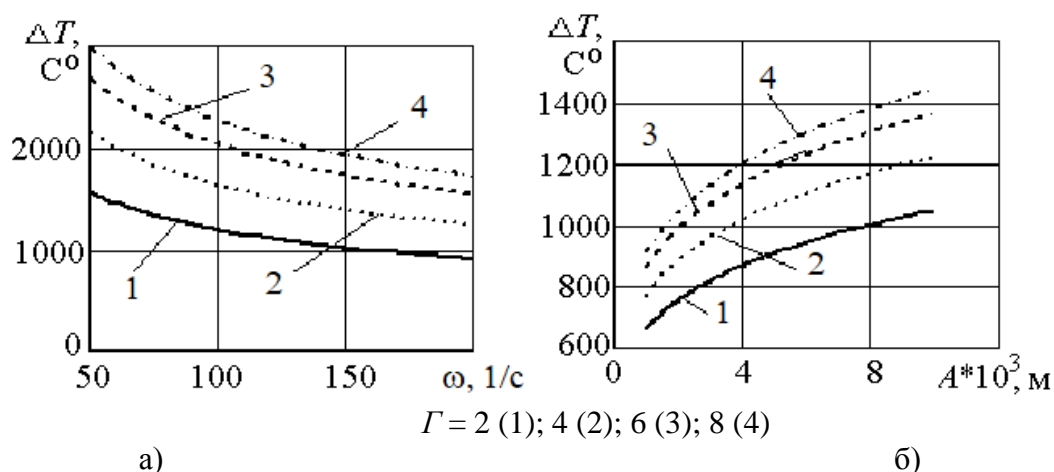


Рисунок 3 – Зависимость максимального приращения температуры от частоты и амплитуды колебаний при разных режимах работы мельницы

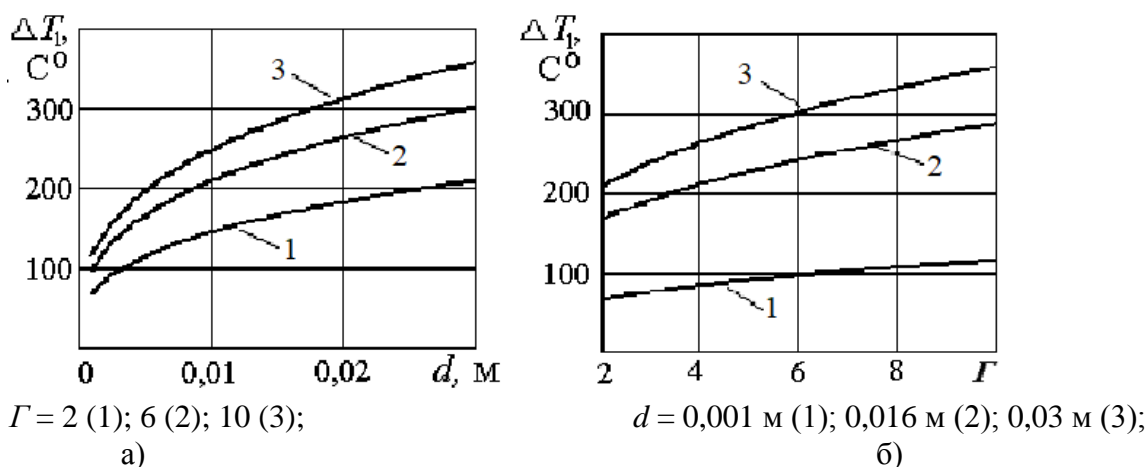


Рисунок 4 – Минимальное значение приращения температуры в точке контакта шаров при различных их диаметрах и режимах работы мельницы

В работе рассмотрены вопросы объемной активации материалов при ударном нагружении материалов и влияния температуры, возникающей в зоне контакта мелющих тел. Предложена методика для оценки температурного режима в точке контакта, реализуемого в результате ударного взаимодействия шаров в вертикальной вибрационной мельнице. Показано, что мгновенная температура может достигать довольно больших величин, способных менять кристаллическую структуру измельчаемого материала и сообщать ему новые свойства.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kovacheva P. G., Todorovsky D. S. Mechanochemically induced phase transformation and leaching of decay products from u (iv, vi) oxide // Scientific proceedings ii international scientific conference "Material science nonequilibrium phase transformations". – YEAR XXIV – 2016, pp. 7-10. ISSN 1310-3946.
2. Беззубцева М.М. К вопросу исследования кинетики измельчения материалов в электромагнитных механоактиваторах (ЭММА) // Международный журнал экспериментального образования. – 2016. – № 9-1. – С. 81-82.
3. Muktepavel F., Bakradze G., Stolyarova S. Effect of Mechanoactivation on Interfacial Interaction in metal/Oxide Systems // Defect and Diffusion Forum. – Switzerland: Trans Tech Publications. – 2006. – Vol. 249, pp 263-268, doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.249.263.



4. Kulczycki A., Kajdas C., Hong Liang. On the mechanism of catalysis induced by mechano-activation of solid body. – Materials Science-Poland, 2014, Vol. 32(4), pp. 583-591, doi:10.2478/s13536-014-0228-7.

5. Франчук В.П. Исследование динамики насыпного материала на рабочих поверхностях вибрационных технологических машин / В.П. Франчук // В кн.: Динамика и прочность горных и транспортных машин. – К.: Наукова думка, 1981. – С. 120-135.

#### REFERENCES

1. Kovacheva P. G., Todorovsky D. S. (2016), "Mechanochemically induced phase transformation and leaching of decay products from u (iv, vi) oxide", *Scientific proceedings ii international scientific conference "Material science nonequilibrium phase transformations"*, pp. 7-10. ISSN 1310-3946.

2. Bezzubtseva M.M. (2016), "On the study of the kinetics of grinding materials in electromagnetic mechanoactivators (EMMA)", *Mezhdunarodnii zhurnal eksperimentalnogo obrazovaniia*, no. 9-1, pp. 81-82.

3. Muktepavel F., Bakradze G., Stolyarova S. (2006), "Effect of Mechanoactivation on Interfacial Interaction in metal /Oxide Systems// *Defect and Diffusion Forum.* – Switzerland: *Trans Tech Publications*, vol. 249, pp 263-268.

4. Kulczycki A., Kajdas C., Hong Liang. (2014), "On the mechanism of catalysis induced by mechano-activation of solid body", *Materials Science-Poland*, vol. 32(4), pp. 583-591.

5. Franchuk V.P. (1981), "Investigation of the dynamics of bulk material on the working surfaces of vibration technological machines", *Dinamika i prochnost gornykh i transportnykh mashin* [Dynamics and strength of mining and transport machines], *Naukova dumka*, Kiev, Ukraine, pp. 120-135.

#### Об авторах

**Франчук Всеволод Петрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры горных машин и инжиниринга, Национальный технический университет «Днепровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина, [vpfranchuk@gmail.com](mailto:vpfranchuk@gmail.com)

**Светкина Елена Юрьевна**, доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой химии, Национальный технический университет «Днепровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина, [Svetkina.Yelena@gmail.com](mailto:Svetkina.Yelena@gmail.com)

**Анциферов Александр Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горных машин и инжиниринга, Национальный технический университет «Днепровская политехника» (НТУ «ДП»), Днепр, Украина, [antsiferovo@nmu.org.ua](mailto:antsiferovo@nmu.org.ua)

#### About the authors

**Franchuk Vsevolod Petrovich**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Professor, Professor in the Department of Mining Machines and Engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «Dnipro Polytechnic»), Dnegr, Ukraine, [vpfranchuk@gmail.com](mailto:vpfranchuk@gmail.com)

**Svietkina Olena Yuriivna**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc), Associate Professor, Head of Department of Chemistry, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «Dnipro Polytechnic»), Dnegr, Ukraine, [Svetkina.Yelena@gmail.com](mailto:Svetkina.Yelena@gmail.com)

**Antsyferov Alexandr Vladimirovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in the Department of Mining Machines and Engineering, National Technical University «Dnipro Polytechnic» (NTU «Dnipro Polytechnic»), Dnegr, Ukraine, [antsiferovo@nmu.org.ua](mailto:antsiferovo@nmu.org.ua)

**Анотація.** У статті наведено методику визначення температури, яка розвивається у зоні удару куль під час подрібнення. Даний спосіб навантаження реалізується у вертикальних вібраційних млинах і називається віброударним. Одночасно з подрібненням мають місце й інші ефекти, що об'єднуються назвою механічна активація. Розглядається конструктивна схема вертикального вібраційного млина. Молольні тіла мають форму куль. Визначаються основні параметри даної механічної системи, що впливають на величину ударного руйнування частинок матеріалу. Руйнування у зоні удару забезпечує як поверхневу активацію матеріалу, так і порушення внутрішньої структури частинок. У результаті віброударного навантаження відбувається об'ємна іонізація кристалів матеріалу, що подрібнюється. Для прикладу розглядається рівняння збільшення потенційної енергії атомів у вузлах кристалічної решітки, яка деформується під час удару. Аналіз його дозволяє припустити, що активаційні процеси пов'язані з якоюсь критичною температурою. Вивчення експериментальних результатів з використанням вертикальних вібраційних млинів також показує на істотний вплив температури, що реалізується у зоні удару між кулями. Пропонується методика розрахунку температури. Вихідними даними вибираються режим роботи помольної камери, розміри і властивості куль. Наводяться графіки залежності температури від амплітуди і частоти коливальних млина. Також досліджується вплив діаметру куль. Показано, що збільшення режиму роботи млина і діаметру куль викликає підвищення температури. Урахування додаткових факторів знижує температуру у зоні удару. Але і в цьому випадку впливом її нехтувати не можна. Експерименти показали можливість механічної активації багатьох матеріалів: металів, мінералів, карбиду титану і кремнію, вугілля. Тому розвиток запропонованої методики бачиться в урахуванні властивостей матеріалу, що подрібнюється.

**Ключові слова:** вертикальний вібраційний млин, віброударне навантаження, подрібнення, механічна активація, зіткнення куль, зона удару, температура

**Annotation.** The article presents a method for determining temperature developed in zone of ball impact during the grinding operations. This method of loading is implemented in vertical vibratory mills and is called vibratory impact. Simultaneously with the grinding, there are also other effects that are called mechanical activation. These processes were investigated by the authors for a long period of time during which a great amount of theoretical and experimental results was obtained. In this paper, the constructive scheme of vertical vibration mill is considered. Grinding bodies have a shape of balls. Main parameters of this mechanical system, which effect disintegration of material particles under the impact action, are determined. Theoretical analysis shows that disintegration in the impact zone provides not only the material surface activation, but also a destruction of the particle internal structure. As a result of vibratory-impact loading, volume ionization of crystals of the material being ground occurs. As an example is consideration of equation for the increment of potential energy of atoms in the nodes of the crystal lattice, which is deformed upon impact. Its analysis allows concluding that activation processes are associated with a certain critical temperature. Results of experiments with vertical vibratory mills also indicate a significant effect of temperature in the impact zone between the balls. A method is proposed for temperature calculation. Mode of grinding chamber operation and the ball size and properties are used as initial data. Diagrams of dependence between temperature in contact zone and amplitude and frequency of the mill vibration are presented. Effect of the ball diameter was also studied. It is shown that with more intensive mode of the mill operation and greater diameter of the balls, temperature is also increased. Additional factors taken into account reduce temperature in the impact zone. However, even in this case, effect of temperature cannot be ignored. The conducted experiments showed the possibility of mechanical activation of many materials: metals, minerals, titanium and silicon carbides, coal. Therefore, further development of the proposed technology should assume taking into account changes in the ground material properties.

**Keywords:** vertical vibration mill, vibration impact loading, grinding, mechanical activation, collision of balls, impact zone, temperature

*Стаття надійшла до редакції 18.05. 2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Надутим В.П.*