

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**В.Н. Блиничев, И.В. Постникова, С.В. Воробьев, М.Ю. Колобов, Г.А. Зуева**

Валерьян Николаевич Блиничев (ORCID 0000-0001-6442-8194), Ирина Викторовна Постникова (ORCID 0000-0001-7363-829X), Сергей Владимирович Воробьев* (ORCID 0000-0001-9280-2657), Михаил Юрьевич Колобов (ORCID 0000-0001-6317-8816), Галина Альбертовна Зуева (ORCID 0000-0003-0696-4460)

Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, просп. Шереметевский, 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: blinich@isuct.ru, poirvic@mail.ru, ch4rlythec4t@gmail.com*, mikhailkolobov@rambler.ru, zueva_galina15@mail.ru

В данной статье показываются особенности структуры поликомпонентных материалов, которые необходимо использовать для интенсификации процесса их разрушения. Исследования интенсификации измельчения поликомпонентной руды проводились на образцах апатит-нефелиновой руды Хибинского месторождения. С использованием рентгеноструктурного анализа показано, что данная руда содержит 6 основных компонентов: фторапатит 36%, нефелин 36,2%, эгирин 12,1%, мусковит 7,4%, альбит 5,9%, титанит 2,4%. Данные компоненты достаточно сильно отличаются друг от друга следующими физико-механическими свойствами: прочностью, плотностью, модулем упругости, коэффициентами линейного теплового расширения и скоростями волн упругой деформации. Показано, что при ударном нагружении поликомпонентных частиц вследствие большой разницы скоростей волн упругой деформации на границах связи отдельных компонентов возникают мощные концентрации напряжений, которые определяют образование там микротрещин и дальнейшее разрушение именно по границам связи отдельных компонентов. Экспериментально подтверждено, что другим фактором интенсификации процесса разрушения поликомпонентных частиц по границам связи компонентов является использование термических напряжений. При нагреве поликомпонентных частиц на примере апатит-нефелиновой руды до температуры 550-650 °С с последующим резким охлаждением их водой частицы покрываются огромной сетью макро и микротрещин, которые далее раскрываются при небольшом ударном нагружении и рассыпаются на отдельные составные компоненты. Доказано с использованием растрового микроскопа VEGA 3 SHB, что образование трещин при термических напряжениях проходит по границам связи отдельных компонентов друг с другом. Используя оба способа создания максимального напряжения по границам связи отдельных компонентов, возможно полностью выделить наиболее ценный компонент.

Ключевые слова: апатит-нефелиновая руда, обогащение, волна упругих деформаций, измельчение, ударное нагружение

INTENSIFICATION OF THE DESTRUCTION PROCESS OF POLY-COMPONENT MATERIALS**V.N. Blinichev, I.V. Postnikova, S.V. Vorobiev, M.Yu. Kolobov, G.A. Zueva**

Valerian N. Blinichev (ORCID 0000-0001-6442-8194), Irina V. Postnikova (ORCID 0000-0001-7363-829X), Sergey V. Vorobiev* (ORCID 0000-0001-9280-2657), Mikhail Yu. Kolobov (ORCID 0000-0001-6317-8816), Galina A. Zueva (ORCID 0000-0003-0696-4460)

Department of Technological Machines and Equipment, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia

E-mail: blinich@isuct.ru, poirvic@mail.ru, ch4rlythec4t@gmail.com*, mikhailkolobov@rambler.ru, zueva_galina15@mail.ru

This article shows the features of the structure of multicomponent materials, which must be used to intensify the process of their destruction. Studies of intensification of grinding of poly-component ore were carried out on samples of apatite-nepheline ore of the Khibiny deposit. Using X-ray diffraction analysis, it was shown that this ore contains 6 main components: fluorapatite

36%, nepheline 36.2%, aegirine 12.1%, muscovite 7.4%, albite 5.9%, titanite 2.4%. These components are quite different from each other in the following physical and mechanical properties: strength, density, elastic modulus, coefficients of linear thermal expansion and velocities of elastic deformation waves. It is shown that, under shock loading of multicomponent particles, due to the large difference in the velocities of elastic deformation waves, powerful stress concentrations appear at the bond boundaries of individual components, which predetermine the formation of microcracks there and further destruction precisely along the bond boundaries of individual components. It has been experimentally confirmed that the use of thermal stresses is another factor in the intensification of the process of destruction of multicomponent particles along the bond boundaries of components. When multicomponent particles are heated, as exemplified by apatite-nepheline ore, to a temperature of 550 - 650 °C, followed by a sharp cooling of them with water, the particles are covered with a huge network of macro and microcracks, which then open up under small shock loading and disintegrate into individual components. It has been proved using a scanning microscope VEGA 3 SHB that cracking under thermal stresses occurs along the boundaries of the connection of individual components with each other. By using both methods of creating maximum stress along the bond boundaries of individual components, it is possible to completely extract the most valuable component.

Key words: apatite-nepheline ore, enrichment, elastic deformations wave, grinding, impact loading

Для цитирования:

Блиничев В.Н., Постникова И.В., Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Зуева Г.А. Интенсификация процесса разрушения поликомпонентных материалов. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 109–115

For citation:

Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobiev S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A. Intensification of the destruction process of poly-component materials. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 109–115

ВВЕДЕНИЕ

Под интенсификацией процесса разрушения поликомпонентных материалов понимается технология полного извлечения наиболее ценного компонента этого материала при минимизации энергозатрат.

В настоящей статье на примере сухого способа извлечения фторапатита из поликомпонентной апатит-нефелиновой руды Хибинского месторождения рассматриваются способы раскрытия данной руды путем создания максимальных напряжений (больших пределов прочности) на границах связи составляющих компонентов.

Ценным компонентом в данной руде является фторапатит, содержание которого в руде колеблется от 15 до 45%. Размеры кристаллов фторапатита также изменяются в широком диапазоне: от одного до нескольких миллиметров.

Образцы руды представляют собой прочный монолитный материал с прочностью на сжатие 120 МПа. Наши исследования показали, что разрушение образцов руды методом сжатия происходит по стохастическим их дефектам и далеко не по границам связи отдельных компонентов.

Существующая сейчас технология обогащения апатит-нефелиновой руды осуществляется путем дробления методом сжатия и раздавливания

крупных кусков руды в щековых дробилках, а затем также методом раздавливания и истирания в шаровых мельницах, а далее флотационным способом осуществляется извлечение фторапатита из продуктов измельчения.

При такой технологии не удастся полностью извлечь апатит, кроме того, флотационный способ обогащения не везде может быть использован (например, при переработке больших запасов фосфоритных руд возле озера Байкал).

Поэтому нами решалась первая задача нахождения способов раскрытия поликомпонентных материалов по границам связи отдельных компонентов друг с другом с целью разработки в дальнейшем сухого способа обогащения апатита.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Технологический процесс интенсификации процессов разрушения поликомпонентной апатит-содержащей руды по границам связи отдельных компонентов был апробирован в лабораториях нашего университета. Большое количество образцов руды Хибинского месторождения размерами от 50 до 150 мм было нагрето до температуры 600 °C и охлаждено водой до температуры 105 °C с темпом охлаждения примерно 2 °C/с.

Далее они ударно измельчались в лабораторной ударно-молотковой дробилке до размеров

менее 12 мм, и все продукты грубого измельчения направлялись в аппарат комбинированного способа измельчения (ударно-истирающего действия) [1-5] для получения тонкодисперсных продуктов с размерами менее 200 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для разработки технологии энергосберегающего сухого способа обогащения необходимо

сначала наиболее полно выделить фторапатит из окружающих его компонентов, а далее минимизировать затраты на его измельчение.

Анализ физико-механических свойств основных компонентов апатит-нефелиновой руды показывает, что они имеют различные коэффициенты теплового расширения β_p , модули упругости E и механическую прочность (таблица).

Таблица

Физико-механические свойства основных компонентов апатит-нефелиновой руды
Table. Physical and mechanical properties of the main components of apatite-nepheline ore

Минерал	Химическая формула	Коэффициент линейного теплового расширения $\beta_p \cdot 10^5, 1/^\circ\text{C}$	Содержание в руде, масс. %	Модуль упругости $E \cdot 10^{-4}, \text{МПа}$	Коэффициент Пуассона, ν
Фторапатит	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$	1,72	36,0	13,0	0,25
Нефелин	$\text{KNa}_3(\text{AlSiO}_4)_4$	1,75	36,2	7,4	0,24
Эгирин	$\text{NaFe}(\text{Si}_2\text{O}_6)$	0,75	12,1	14,7	0,28
Мусковит	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1,95	7,4	8,3	0,3
Альбит	$\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$	4,3	5,9	7,3	0,3
Титанит	CaTiSiO_5	1,3	2,4	-	-

Апатит-нефелиновая руда обладает большой механической прочностью 120 МПа [6], а прочность составляющих ее компонентов отличается друг от друга в несколько раз. Наименьшую прочность на сжатие имеет фторапатит – 55 МПа, а наибольшую мусковит – 400 МПа. Прочность второго компонента, который, как правило, окружает частицы фторапатита, нефелина, составляет 110 МПа.

Поэтому для раскрытия фторапатита, как наименее прочного компонента руды, было предложено использовать термические напряжения [7-9], которые возникают на границах связи компонентов при нагреве образцов руды достаточно больших размеров 120-150 мм.

Термические напряжения сжатия внутренних компонентов руды, жестко зажатых со всех сторон, возникающие при нагреве образцов, могут быть рассчитаны по известному уравнению (1):

$$\sigma_{\text{сж}}^i = E^i \beta_p^i (T_n - T_0), \quad (1)$$

где β_p^i – коэффициент линейного теплового расширения, $1/^\circ\text{C}$; E^i – модуль упругости, МПа; T_n – температура нагрева, $^\circ\text{C}$; T_0 – начальная температура образца, $^\circ\text{C}$.

Как видно из уравнения (1), термические напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}^i$ не зависят от размеров отдельных компонентов руды, но абсолютно различные на границах их связей.

Они являются постоянными по всему объему компонента и скачком изменяются по границам контакта с другими компонентами.

Расчеты по данному уравнению (1) напряжения сжатия $\sigma_{\text{сж}}^i$ показывают, что разница напряжений на границе связи компонентов при нагреве образцов руды до температуры 250-300 $^\circ\text{C}$ существенно больше прочности основных ее компонентов и должна бы привести к их разрушению.

Однако экспериментальные исследования, проведенные нами при нагреве большого количества образцов руды разных размеров до различных температур при дальнейшем охлаждении на воздухе, показывают, что видимые глазом макротрещины в образцах появляются только при их нагреве до температур $T_n = 800$ $^\circ\text{C}$ и более (рис. 1).



Рис. 1. Образец апатит-нефелиновой руды после нагрева до температуры 800 $^\circ\text{C}$ и охлаждения на воздухе

Fig. 1. A sample of apatite-nepheline ore after heating to a temperature of 800 $^\circ\text{C}$ and cooling in air

Этот факт свидетельствует о том, что действительные напряжения сжатия $\sigma_{сж}^i$ на границах связи компонентов существенно меньше вследствие некоторой свободы деформаций всех компонентов и низком темпе их нагрева и охлаждения.

При появлении макротрещин в образцах их стохастическая прочность, определяемая методом сжатия, снижается лишь в 5-7 раз, и показано, что макротрещины идут по сложным траекториям границ связи компонентов друг с другом. Поэтому образцы руды даже при нагреве их до больших температур и охлаждении на воздухе представляют собой как бы спрессованный кирпич из компонентов сложной формы.

Известно, что рудные породы [10] имеют практически на порядок меньшие значения пределов прочности на растяжение $\sigma_{раст}^B$ по сравнению с пределами прочности на сжатие $\sigma_{сж}^B$, поэтому было решено создать в образцах большие напряжения растяжения путем нагрева образцов руды до различных температур и быстром охлаждении их водой до температур поверхности порядка 105 °С.

Уже первые опыты по нагреву образцов до температур 400 °С и более и быстрым охлаждением их водой путем ее разбрызгивания показали, что после такой термической обработки образцы руды покрывались большой сеткой микро-и макротрещин. При этом статическая прочность их падала в сотни раз.

Все образцы после создания в них термических напряжений таким образом испытывались на динамическую прочность. Динамическая прочность определялась путем сбрасывания образцов руды с разной высоты и определения скорости удара, при которой наступило разрушение образца.

Использовалось уравнение количества движения (2), из которого рассчитывалась динамическая сила $P_{дин}$, достаточная для ударного разрушения [11]:

$$m_{ч}v_{уд} = P_{дин}\Delta\tau_{к}, \quad (2)$$

где $m_{ч}$ – масса образца, кг; $v_{уд}$ – скорость удара, м/с; $P_{дин}$ – динамическая сила, при которой происходит ударное разрушение образца, Н; $\Delta\tau_{к}$ – время контакта образца с поверхностью ударного нагружения, с.

В результате проведенных исследований процессов нагрева образцов до различных температур от 300 до 900 °С и быстрого охлаждения водой с темпом охлаждения 2-3 °С/с был найден оптимальный диапазон температур (550-650 °С), при котором при минимальном значении динамической силы возникла 100% вероятность их ударного разрушения.

После нагрева образцов до этой температуры и охлаждения водой прочность их настолько снижалась, что большинство из них легко разрушались руками по полученным микро-и макротрещинам.

Сканирование поверхностей раскрытых макротрещин частиц на электронном сканирующем микроскопе VEGA 3 SHB показывает, что макротрещины действительно проходят по границам связи отдельных компонентов.

При этом сростки кристаллов фторапатита размерами 1-1,5 мкм (рис. 2) остаются на поверхности нефелина – компонента, который наиболее часто граничит с фторапатитом, и по сравнению с ним имеет в 2 раза большую прочность.

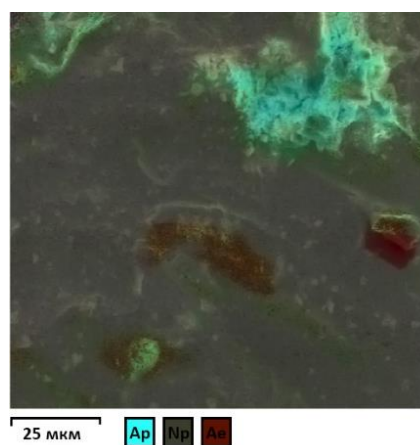


Рис. 2. Карта поверхности раскрытого образца апатит-нефелиновой руды: Ap – фторапатит, Np – нефелин, Ae – эгирин
Fig. 2. Surface map of an open apatite-nepheline ore sample: Ap - fluorapatite, Np - nepheline, Ae - aegirine

Значения критической динамической силы при этих температурах составляют очень маленькую величину 0,3-0,5 кН, свидетельствующую о том, что при последующем ударном разрушении поликомпонентных частиц будет затрачено небольшое количество подводимой к измельчаемым частицам энергии для полного раскрытия на компоненты сложного состава частиц.

С учетом работы [9] предложено уравнение для расчета напряжений растяжения, возникающих в частице после нагрева и быстрого охлаждения водой:

$$\sigma_{раст}^i = \frac{kE^i\beta_p^i\Delta T}{1-\nu^i}, \quad (3)$$

где k – коэффициент, зависящий от темпов охлаждения, б/р; $\sigma_{раст}^i$ – напряжение растяжения, возникающее в нагретых и быстро охлаждаемых частицах, МПа; ν^i – коэффициент Пуассона компонента руды.

Принимая, что напряжения растяжения будут равны пределам их прочности на растяжение,

можно определить минимальную разность температур ΔT , при которой у компонентов руды на границах связи будут возникать напряжения, равные или большие пределов прочности.

Вторым способом дораскрытия поликомпонентного материала апатит-нефелиновой руды с целью выделения из нее наиболее непрочного и сравнительно мягкого компонента - апатита является ударный способ подвода к нему энергии.

При ударном способе подвода энергии к разрушаемым даже монокомпонентным частицам в их объеме наблюдается достаточно сложное напряженное состояние, связанное с волновым характером упругих продольных и поперечных деформаций, проходящих по частице после ударного нагружения.

Даже при статическом представлении напряженное состояние в момент удара частицы достаточно сложное [12-15]. В момент удара и далее по частице проходят волны продольных и поперечных упругих деформаций со скоростью $v_{упр}$, которые быстро достигают противоположных поверхностей частицы и отражаются от них. Скорости волн упругих деформаций $v_{упр}$ пропорциональны квадратному корню из отношения модуля упругости E и плотности материала ρ . Первичные и вторичные отраженные волны встречаются, и происходит интерференция волн, соответственно, и напряжений [16].

Рассмотрим, какие особенности напряженного состояния наблюдаются при ударном нагружении поликомпонентной частицы. Поскольку основной разрушения твердых материалов при ударном их нагружении является волновой характер деформаций, а, соответственно, и напряжений, то основной особенностью напряженного состояния поликомпонентных частиц при ударе является различная скорость деформаций при переходе от одного к другому компоненту.

Волна упругих деформаций, перемещаясь вдоль частицы и переходя от одного компонента к другому, «натывает» на границу связи одного с другим, как на преграду, вызывая всплеск напряжений и без того сложного напряженного состояния. В этом случае границы перехода от одного компонента к другому представляют собой макродефект, около которого возникает мощная концентрация напряжений [17, 18].

Показанная в справочнике [19] скорость упругих деформации $v_{упр}$ основных компонентов апатит-нефелиновой руды имеет следующие значения: фторапатит – 4,0 км/с, нефелин – 5,9 км/с, эгирин – 7,25 км/с, мусковит – 5,63 км/с, альбит – 6,1 км/с. Как видно из представленных данных,

разница абсолютных значений скоростей деформации компонентов огромна.

Когда волны упругой деформации переходят от компонента с меньшей скоростью к компоненту с большей скоростью деформации, на границе их контакта появляются дополнительные мощные напряжения растяжения, которые стремятся оторвать второй компонент от первого.

При движении упругой волны от компонента с большей скоростью деформации к компоненту с меньшей скоростью, происходит всплеск напряжений сжатия.

Ранее нами было показано [20], что при многократном ударном нагружении твердых и прочных ($\sigma_B = 180-190$ МПа) монокомпонентных частиц речного песка возможно осуществить их стопроцентное разрушение даже при скоростях удара, существенно меньших критических скоростей, если интервал между последующими ударами менее 1 с.

Учитывая эту способность твердых материалов накапливать именно при ударах подведенную к ним энергию, появляется возможность разрушения поликомпонентных частиц по границам связи компонентов при ударных нагрузках, даже когда максимальные напряжения при единичном ударе меньше предела прочности частицы.

Большим преимуществом ударного способа разрушения поликомпонентных частиц является разрушение их по границам связи отдельных компонентов, где накапливаются максимальные напряжения и, в первую очередь, образуются микротрещины даже при малых ударных нагрузках [20]. Разрушение поликомпонентных частиц по границам связи компонентов друг с другом чрезвычайно важно для разработки технологии обогащения руд, например, апатит-нефелиновой руды.

Анализ тонкодисперсных частиц продуктов измельчения в аппарате комбинированного принципа действия с помощью сканирующего микроскопа показал, что частицы – это монокомпонентные материалы. Рентгеноструктурный анализ подтвердил, что максимальное количество частиц в продуктах комбинированного способа измельчения – это фторапатит, как наименее прочный и полностью «раскрытый» в предыдущих процессах интенсификации компонент. Вторым компонентом по массовому содержанию был нефелин.

Эти исследования показали, что еще на стадии измельчения возможно обогащение целевого компонента.

ВЫВОДЫ

Экспериментальными исследованиями найдено, что нагрев частиц апатит-нефелиновой руды до температуры 600 °С и быстрое охлаждение их водой до температуры 105 °С приводит к образованию в них огромной сетки микро- и макротрещин и к снижению как статической, так и динамической прочности более чем в 100 раз. Доказано с помощью растрового микроскопа, что трещины проходят по границам связи компонентов друг с другом, разделяя эти компоненты.

Исследованиями показано, что ударный способ измельчения поликомпонентных материалов наиболее целесообразен как с экономической, так и с технологической точек зрения, так как при ударе и движении с большими скоростями волн деформации на границах связи отдельных компонентов возникают мощные концентрации напряжений, в несколько раз превышающих средние напряжения в объеме разрушаемых частиц, которые и предопределяют разрушение именно по этим границам.

Предложено уравнение для расчета максимальных термических напряжений растяжения, возникающих при нагреве и быстром охлаждении поликомпонентных материалов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-29-01368.

Исследование проведено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение № 075-15-2021-671).

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

This work was carried out with the financial support of the RSF grant No. 22-29-01368.

The study was carried out using the resources of the Center for Shared Use of Scientific Equipment of the ISUCT (with the support of the Ministry of Science and Higher Education of Russia, grant No. 075-15-2021-671).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков В.П., Осипов Д.А., Мизонов В.Е., Wylecial T. Моделирование и расчет измельчения и классификации смеси разнородных компонентов в замкнутом цикле измельчения. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 69. Вып. 9. С. 102-109. DOI: 10.6060/ivkkt.20196209.5934.
2. Benz M., Herold H., Ulfik B. Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters. *Int. J. Mineral Proc.* 1996. V. 44–45. P. 507-519. DOI: 10.1016/0301-7516(95)00062-3.
3. Vorob'ev S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Outflow of free turbulent jet in a fluidized bed. *Fibre Chem.* 2019. V. 51. N 4. P. 318-324. DOI: 10.1007/s10692-020-10105-w.
4. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Определение скорости и концентрации частиц твердой фазы в турбулентной струе газа, погруженной в псевдоожиженный слой. *Рос. хим. журн.* 2019. Т. 63. № 3. С. 31-41. DOI: 10.6060/rcj.2019633.4.
5. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Расчет рациональных режимов работы противочастичных струйных измельчителей для интенсивного ударного разрушения материала. *Совр. наукоем. технол. Рег. прилож.* 2020. Т. 64. № 2. С. 97-102.
6. Козырев С.А. Влияние обводненности на прочностные и динамические характеристики апатит-нефелиновых руд Коашвинского месторождения. *Горн. информ.-аналит. бюлл.* 2015. № 56. С. 404-412.
7. Sygala A., Bukowska M., Janoszek T. High Temperature Versus Geomechanical Parameters of Selected Rocks – The Present State of Research. *J. Sust. Mining.* 2013 V. 12. N 4. P. 45-51. DOI: 10.7424/jism130407.
8. Xiao Y., Zhao1 R., Huang O, Deng1 J., Lu J. Numerical tests on thermal cracking characteristics of rocks with different scales. *Adv. Mechan. Eng.* 2018. V. 10. N 8. P. 2-11. DOI: 10.1177/1687814018792142.

REFERENCES

1. Zhukov V.P., Osipov D.A., Mizonov V.E., Wylecial T. Modeling and calculation of grinding and classification of a mixture of dissimilar components in a closed grinding cycle. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 69. N 9. P. 102-109 (in Russian). DOI: ivkkt.20196209.5934.
2. Benz M., Herold H., Ulfik B. Performance of a fluidized bed jet mill as a function of operating parameters. *Int. J. Mineral Proc.* 1996. V. 44–45. P. 507-519. DOI: 10.1016/0301-7516(95)00062-3.
3. Vorob'ev S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Outflow of free turbulent jet in a fluidized bed. *Fibre Chem.* 2019. V. 51. N 4. P. 318-324. DOI: 10.1007/s10692-020-10105-w.
4. Vorob'ev S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Determination of the speed and concentration of solid particles in a turbulent gas jet immersed in a fluidized bed. *Ros. Khim. Zhurn.* 2019. V. 63. N 3. P. 31-41 (in Russian). DOI: 10.6060/rcj.2019633.4.
5. Vorob'ev S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Calculation of rational modes of operation of counter-current jet grinders for intensive impact destruction of material. *Sovr. Naukoem. Tehnol. Reg. Prilozh.* 2020. V. 64. N 2. P. 97-102 (in Russian).
6. Kozyrev S.A. Influence of water cut on the strength and dynamic characteristics of apatite-nepheline ores of the Koashvinskoye deposit. *Gorn. Informats.-Analit. Byull.* 2015. N 56. P. 404-412 (in Russian).
7. Sygala A., Bukowska M., Janoszek T. High Temperature Versus Geomechanical Parameters of Selected Rocks – The Present State of Research. *J. Sust. Mining.* 2013 V. 12. N 4. P. 45-51. DOI: 10.7424/jism130407.
8. Xiao Y., Zhao1 R., Huang O, Deng1 J., Lu J. Numerical tests on thermal cracking characteristics of rocks with different scales. *Adv. Mechan. Eng.* 2018. V. 10. N 8. P. 2-11. DOI: 10.1177/1687814018792142.

9. **Карташов Э.М.** Модельные представления теплового удара в динамической термоупругости. *Рос. технол. журн.* 2020. № 8(2). С. 85-108. DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108.
10. **Tsoi P.A., Usol'tseva O.M.** Analysis of Protodyakonov's Correlation Relationships between Indices of Strength Properties. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 459. N 3. P. 1-6. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042008.
11. **Бобков С.П., Полищук И.В.** Сравнение различных подходов к определению продолжительности удара твердых тел при измельчении. *Вестн. ИГЭУ.* 2016. № 6. С. 66-70. DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.066-070.
12. **Pineau A.** Development of the Local Approach to Fracture over the Past 25 years: Theory and Applications. *Int. J. Fract.* 2006. V. 14. P. 139–166. DOI: 10.1007/s10704-006-0035-1.
13. **Лапшин В.В., Юрин Е.А.** Нелинейная модель коллинеарного удара. *Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана.* 2016. Т. 1. С. 90–99. DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-90-99.
14. **Протасов Ю.И.** Разрушение горных пород. М.: МГТУ. 2009. 453 с.
15. **Voloshyn O., Riabtsev O.** Some important aspects of rock mechanics and geomechanics. *Essays Mining Sci Pract.* 2019. V. 109. DOI: 10.1051/e3sconf/201910900114.
16. **Бобков С.П., Полищук И.В.** Моделирование и визуализация деформирования твердого тела при ударе. *Вестн. ИГЭУ.* 2020. № 2. С. 51-57. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.051-057.
17. **Požar T., Laloš J., Babnik A.** Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light. *Nat Commun.* 2018. V. 9. N 3340. P. 1-11. DOI: 10.1038/s41467-018-05706-3.
18. **Liu H., Zhang Q., Zhang K, Hu G., Duan H.** Designing 3D Digital Metamaterial for Elastic Waves: From Elastic Wave Polarizer to Vibration Control. *Adv. Sci.* 2019. V. 8. N 12. P. 1900401. DOI: 10.1002/advs.201900401.
19. **Воларович М.П., Баяк Е.А., Томашевская И.С., Добрынин В.М.** Физические свойства минералов горных пород при высоких термодинамических параметрах. М.: Недра. 1988. 255 с.
20. **Гущина Т.В., Гущина Е.А., Колобов М.Ю., Блиничев В.Н.** Исследование мельницы ударно-отражательного действия. *Совр. наукоем. технол. Рег. прилож.* 2020. Т. 3. № 63. С. 54-59.
9. **Kartashov E.M.** Model representations of heat shock in terms of dynamic thermal elasticity. *Ros. Tekhnol. Zhurn.* 2020. N 8(2). P. 85-108 (in Russian). DOI: 10.32362/2500-316X-2020-8-2-85-108.
10. **Tsoi P.A., Usol'tseva O.M.** Analysis of Protodyakonov's Correlation Relationships between Indices of Strength Properties. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 2020. V. 459. N 3. P. 1-6. DOI: 10.1088/1755-1315/459/4/042008.
11. **Bobkov S.P., Polishchuk I.V.** Comparison of different approaches to determining the duration of the impact of solids during grinding. *Vestn. IGEU.* 2016. N 6. P. 66-70 (in Russian). DOI: 10.17588 / 2072-2672.2016.6.066-070.
12. **Pineau A.** Development of the Local Approach to Fracture over the Past 25 years: Theory and Applications. *Int. J. Fract.* 2006. V. 14. P. 139–166. DOI: 10.1007/s10704-006-0035-1.
13. **Lapshin V.V., Jurin E.A.** Nelinejnaja model' kollinearnogo udara. *Vestn. MGTU im. N.E. Bauman.* 2016. V. 1. P. 90–99 (in Russian). DOI: 10.18698/1812-3368-2016-1-90-99.
14. **Protasov Ju.I.** Destruction of rocks. M.: MGGU. 2009. 453 p. (in Russian).
15. **Voloshyn O., Riabtsev O.** Some important aspects of rock mechanics and geomechanics. *Essays Mining Sci. Pract.* 2019. V. 109. DOI: 10.1051/e3sconf/201910900114.
16. **Bobkov S.P., Polishchuk I.V.** Modeling and visualization of solid body deformation upon impact. *Vestn. IGEU.* 2020. N 2. P. 51-57 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2020.2.051-057.
17. **Požar T., Laloš J., Babnik A.** Isolated detection of elastic waves driven by the momentum of light. *Nat Commun.* 2018. V. 9. N 3340. P. 1-11. DOI: 10.1038/s41467-018-05706-3.
18. **Liu H., Zhang Q., Zhang K, Hu G., Duan H.** Designing 3D Digital Metamaterial for Elastic Waves: From Elastic Wave Polarizer to Vibration Control. *Adv. Sci.* 2019. V. 8. N 12. P. 1900401. DOI: 10.1002/advs.201900401.
19. **Volarovich M.P., Bajuk E.A., Tomashevskaja I.S., Dobrynin V.M.** Physical properties of minerals in rocks at high thermodynamic parameters. M.: Nedra. 1988. 255 p. (in Russian).
20. **Gushhina T.V., Gushhina E.A., Kolobov M.Ju., Blinichev V.N.** Impact mill research. *Sovr. Naukoem. Tekhnol. Reg. Prilozh.* 2020. V. 3. N 63. P. 54-59 (in Russian).

Поступила в редакцию 11.01.2021
Принята к опубликованию 28.10.2021

Received 11.01.2021
Accepted 28.10.2021