УДК 691.542 DOI: 10.33622/0869-7019.2021.05.19-25

Ударные воздействия при диспергировании минеральных материалов в аппаратах вихревого слоя

Руслан Абдирашитович ИБРАГИМОВ, кандидат технических наук, доцент, e-mail: rusmag007@yandex.ru

Фарид Рашитович ШАКИРЗЯНОВ, кандидат физико-математических наук, доцент, e-mail: faritbox@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет», 420043 Казань, ул. Зеленая, 1

Евгений Валерьевич КОРОЛЕВ, доктор технических наук, профессор, проректор, e-mail: korolev@nocnt.ru

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», 190005 Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Аннотация. *Рассмотрены вопросы ударного взаимодействия частиц диспергируемого материала с мелющими телами. С использованием программного комплекса ANSYS вычислены зависимости максимальных сжимающих напряжений от среднего размера измельчаемых частиц, а также скорости движения мелющих тел от критического диаметра измельчаемых частиц. Показано, что увеличение массы мелющих тел приводит к закономерному увеличению расхода активной мощности аппарата вихревого слоя. При этом количество измельчаемого вещества в аппарате не влияет на расход активной мощности. Отмечено, что удельная энергия измельчения экспоненциально возрастает с уменьшением показателя среднего диаметра частиц, при этом дальнейшее увеличение энергии практически не вызывает образования новых поверхностей. Разработана методика определения предела прочности при сжатии измельчаемого материала и построена модель удара частицы о ферромагнитный стержень. Получены зависимости влияния диаметра частицы на максимальное напряжение и скорости движения ферромагнитных тел на критический диаметр частиц портландцемента. Этот результат можно использовать для определения влияния скорости движения ферромагнитных тел на заданную степень измельчения.*

Ключевые слова: *измельчение, вихревой слой, энергонапряженность, требуемая скорость движения ферромагнитных тел, диаметр частиц.*

IMPACT EFFECTS WHEN DISPERSING MINERAL MATERIALS IN VORTEX LAYER APPARATUSES

Ruslan A. IBRAGIMOV, e-mail: rusmag007@yandex.ru

Farid R. SHAKIRZYANOV, e-mail: faritbox@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Civil Engineering, ul. Zelenaya, 1, Kazan 420043, Russian Federation

Evgenij V. KOROLEV, e-mail: korolev@nocnt.ru

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, ul. 2-ya Krasnoarmeyskaya, 4, St. Petersburg 190005, Russian Federation

Abstract. *The article deals with the issues of impact interaction of particles of a dispersed material with grinding bodies. Using the ANSYS software package, the dependences of the maximum compressive stresses on the average size of the particles to be ground, as well as the speed of movement of the grinding bodies on the critical diameter of the particles to be ground, have been calculated. It is shown that an increase in the mass of grinding bodies leads to a natural increase in the consumption of active power of the apparatus of the vortex layer. At the same time, the amount of the crushed substance in the apparatus does not affect the active power consumption. It is noted that the specific grinding energy exponentially increases with a decrease in the average particle diameter, while a further increase in energy practically does not cause the formation of new surfaces. A method for determining the ultimate compressive strength of the crushed material is developed and a model of the impact of a particle on a ferromagnetic rod is constructed. The dependences of the influence of the particle diameter on the maximum stress and the speed of movement of ferromagnetic bodies on the critical diameter of Portland cement particles are obtained. This result can be used to determine the effect of the speed of movement of ferromagnetic bodies on a set degree of grinding*

Key words: *grinding, vortex layer, energy intensity, required speed of movement of ferromagnetic bodies, particle diameter.*

© ИБРАГИМОВ Р. А., ШАКИРЗЯНОВ Ф. Р., КОРОЛЕВ Е. В., 2021

Введение

Механоактивация — сложный физико-химический процесс, который зависит от большого числа управляющих параметров, оказывающих влияние на прочностные, деформативные, температурные и энергетические параметры состояния активируемого вещества [1]. При этом важным элементом данного процесса является скорость соударения ме-

лющего тела с обрабатываемым веществом [2]. В литературных источниках приводятся сведения о критической скорости мелющих тел для получения в процессе удара дефектов — смещению атомов в кристаллической решетке: для угля — 12, для кварцевого песка — 34, для чугуна — 32 м/с [3], для германия — 123, для кремния — 332, для алмаза — 683 м/с [4]. Эти результаты получены в соответствии с предположением В. В. Болдырева о том, что механические нагрузки приводят к возбуждению колебаний атомов кристаллической решетки.

Также известно, что интенсивность (скорость) измельчения зависит от энергонапряженности аппарата. Чем больше энергонапряженность, тем выше скорость измельчения частиц обрабатываемого вещества. Однако в научной литературе под понятием энергонапряженности встречается либо количество энергии, передаваемое аппарату при помоле, либо количество энергии на единицу объема помольной камеры [5]. В данной статье под энергонапряженностью аппарата понимается количество энергии, передаваемое мелющими телами обрабатываемому веществу в единицу времени (Дж/(кг·с)).

При ударе мелющего тела об обрабатываемый материал кинетическая энергия мелющего тела расходуется на энергию упругой деформации и нагрев при передаче кинетической энергии измельчаемым частицам материала. В случае разрушения частицы кинетическая энергия мелющего тела дополнительно расходуется на энергию образования новой поверхности. При этом часть энергии, переходящая в тепловую с преобразованием параметров структуры, будет являться мерой энтропии обрабатываемого вещества.

В высокоэнергонапряженных аппаратах вихревого слоя (АВС) осуществляют интенсивное измельчение обрабатываемого материала [6]. Именно в вихревом слое происходят изменения обрабатываемого вещества, превышающие эффекты диспергирования в традиционных аппаратах [7]. Измельчение частиц в АВС возможно благодаря свободному удару о ферромагнитный стержень, а также стесненному удару между двумя ферромагнитными элементами.

Для того чтобы частица разрушилась, необходимо приложить к ней определенную кинетическую энергию. Для однократного разрушения частице необходима энергия, превышающая внутренние силы сцепления

$$A \geqslant \frac{\sigma^2 m}{2E\gamma}, \qquad (1)$$

где A — кинетическая энергия частицы; σ — предел прочности частицы при сжатии; m — масса частицы; E — модуль упругости вещества частицы; γ — плотность материала частицы.

Потребляемая электрическая мощность АВС состоит из активной P и реактивной Q мощностей. Именно активная мощность характеризует процесс преобразования электрической энергии в полезную. В данном случае активная мощность расходуется на образование вихревого электромагнитного слоя и движение ферромагнитных частиц, являющихся мелющими телами в аппарате вихревого слоя.

При этом не полностью изучены вопросы зависимости скорости соударения ферромагнитных тел с частицами материала, подвергаемого обработке в АВС, от механических напряжений, возникающих в самих измельчаемых частицах. Определение параметров взаимодействия — важный элемент построения общей модели измельчения материалов в АВС, что имеет очевидные научную новизну и практическую значимость.

Методы, материалы и оборудование, применяемые в исследовании

Материалы и объекты исследования. В качестве модельного материала выбран портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б/ПЦ 500-Д0-Н Новотроицкого цементного завода, соответствующий требованиям ГОСТ 31108—2016 «Цементы общестроительные. Технические условия». Данный портландцемент имеет следующий минералогический состав: C3S — 64...65 %, C2S — 11...13 %, C3A — 5...6 %, C4AF — 14...15 %.

Обработку портландцемента выполняли в АВС модели 297 производства ООО «Регионметтранс». Типовая конструкция такого аппарата показа в работе [6]. Применяемые в АВС ферромагнитные частицы, находящиеся под действием вращающегося магнитного поля, оказывают комплекс воздействий на обрабатываемую среду: интенсивное перемешивание и диспергирование, акустическое и мощное электромагнитное воздействие, трение, высокое локальное давление, ультразвуковое воздействие и др. [8, 9].

Определение прочностных характеристик измельчаемого материала. Вследствие малых размеров обрабатываемых в АВС частиц портландцемента невозможно с помощью стандартных экспериментальных методов определить их прочностные характеристики, а для крупных образцов будут проявляться известные масштабные эффекты. Поэтому проблему решили, используя подход, основанный на определении механических характеристик, методом идентификации. Суть этого метода заключается в том, что из решения прямой задачи (расчет процесса удара частицы о ферромагнитный стер-

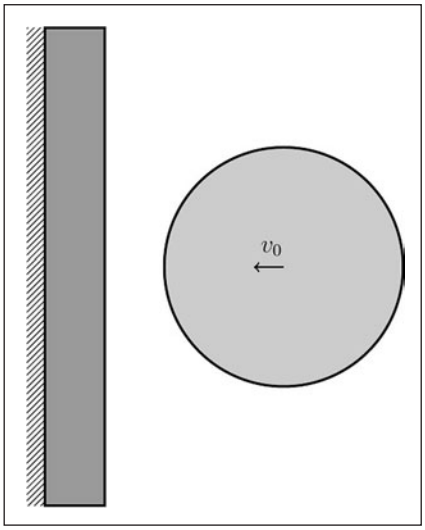

Рис. 1. ***Модель удара частички о ферромагнитный стержень***

1. Экспериментальные и исходные данные для портландцемента

Продолжительность обработки, мин	Средний размер частиц, мкм	Масса, 10^{-18} кг
–	5,15±0,15	33436
1	4,61±0,14	29865
2	4,25±0,14	27593
3	3,89±0,17	25255
4	3,56±0,16	23113
5	3,47±0,16	22528
8	3,17±0,14	20581

Примечание. Для всех значений прочность R составляла 40–60 МПа; модуль упругости E – 30–36 МПа 10^{-3}.

жень) при варьировании определяющих параметров обработки механические характеристики подбираются так, чтобы численные и экспериментальные данные при обработке в АВС были близки. Таким образом, формулируется задача о минимизации функционала квадратичной невязки между расчетными и экспериментальными данными.

В качестве экспериментальных данных рационально использовать зависимость среднего диаметра частиц портландцемента от продолжительности обработки в АВС [9]. Полученные результаты [9], а также расчетные значения массы частиц и начальные значения прочности и модуля упругости портландцемента представлены в *табл. 1*.

Представленные в *табл. 1* экспериментальные величины изменения среднего диаметра частиц от продолжительности обработки в АВС можно выразить зависимостью

$$d(t) = \frac{a}{1 - be^{-ct}}, \qquad (2)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты.

При $t \to \infty$ (продолжительная обработка) зависимость $d = f(t)$ будет равна

$$\lim_{t\to\infty} \frac{a}{1 - be^{-ct}} = a, \qquad (3)$$

что соответствует минимальному среднему диаметру частиц, которые можно получить, т. е. $a = d_{\min}$.

При $t \to 0$ (отсутствие обработки) очевидно, что средний диаметр частиц равен максимальному значению $d = d_{\max}$, а зависимость $d = f(t)$ можно представить в виде:

$$\lim_{t\to 0} \frac{a}{1 - be^{-ct}} = \frac{d_{\min}}{1 + b} = d_{\max}. \qquad (4)$$

Отсюда коэффициент b составит

$$b = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max}} = \frac{\Delta d}{d_{\max}}, \qquad (5)$$

иными словами, он равен относительному изменению среднего диаметра частиц в процессе обработки.

Используя данные *табл. 1*, определим эмпирические коэффициенты, с учетом которых и обоснований из формул (3)–(5) формулу (2) преобразуем к виду

$$d(t) = \frac{2{,}64}{1 - 0{,}49e^{-ct}}, \qquad (6)$$

где c – коэффициент интенсивности (скорости) изменения диаметра частиц при обработке (для данных *табл. 1* c = 0,141 мкм/мин).

Для нахождения прочностных характеристик рассмотрим задачу удара частицы о мелющее тело, функции которого в АВС выполняют ферромагнитные стержни *(рис. 1)*.

Для решения указанной задачи примем, что:

- частицы обрабатываемого материала имеют сферическую форму, материал частицы является хрупким телом;
- размер ферромагнитного стержня значительно больше частицы, поэтому удар о стержень происходит, как о плоскость;
- на первом этапе модуль упругости частицы портландцемента равен модулю упругости тяжелого бетона (это допущение возможно, если считать, что предел прочности частицы в предельном состоянии не зависит от модуля упругости).

Методика определения прочностных характеристик заключается в следующем. Из эксперимента известно, что при заданных параметрах работы АВС через некоторое время $t_{\max}$ частицы обрабатываемого материала больше не измельчаются и достигают минимального размера $d_{\min}$. Это означает, что для дальнейшего измельчения недо-

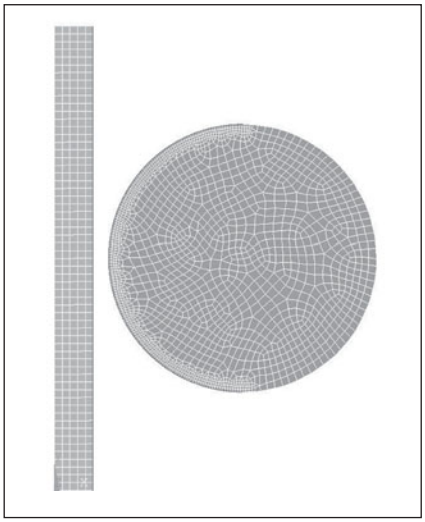

Рис. 2. ***Конечно-элементная модель***

статочно энергии разрушения при данной скорости и массе частицы. Отсюда можно принять, что максимальные напряжения, возникающие в частице, не превышают предел ее прочности при сжатии $\sigma^*_{сж}$

$$\sigma(d_{\min}) \leqslant \sigma^*_{сж}. \quad (7)$$

Тогда это напряжение можно принять равным пределу прочности $\sigma^*_{сж}$.

Для решения прямой задачи удара частицы материала использовали метод конечных элементов. На конечно-элементной схеме (*рис. 2)* слева моделируется часть ферромагнитного стержня, который считается жестко закрепленным, а измельчаемой частице задается начальная скорость движения v_0.

Для определения НДС системы «частица — ферромагнитный стержень» использовался программный комплекс ANSYS, в котором моделировался процесс удара во времени. При этом учитывали геометрическую нелинейность, область удара частицы о ферромагнитный стержень моделировали контактными элементами, соотношения между деформациями и напряжениями в первом приближении принимали линейными.

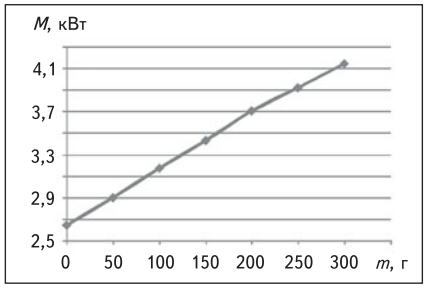

Рис. 3. ***Зависимость расхода M активной мощности АВС от массы ферромагнитных тел m***

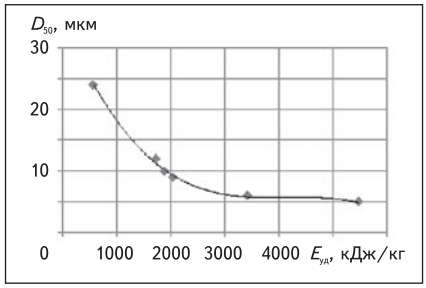

Рис. 4. ***Зависимость удельной энергии измельчения кварцевого порошка $E_{уд}$ от среднего размера частиц D_{50}***

Результаты и обсуждение

Определение зависимости расхода активной мощности от среднего диаметра обрабатываемого материала. Известно, что на расход активной мощности АВС влияют количество и магнитные свойства ферромагнитных элементов в рабочей камере, при этом геометрические размеры ферромагнитных элементов имеют незначительное влияние, а обрабатываемая в рабочей камере дисперсная система не изменяет расход активной мощности [7].

В этой связи научный и практический интерес представляет определение изменения потребляемой активной мощности АВС в зависимости от массы измельчаемого материала *(рис. 3).* В данном случае использовали следующие параметры работы АВС [6]: частота вращения электромагнитного поля — 70 Гц; отношение диаметра ферромагнитных тел к их длине — 0,12; отношение массы ферромагнитных тел к массе измельчаемого материала — 0,4.

Из графика *(см. рис. 3)* видно, что 2,64 кВт активной мощности тратится на создание вихревого слоя, а зависимость расхода активной мощности от массы ферромагнитных тел имеет линейный характер. При этом изменение массы измельчаемого материала не влияет на расход активной мощности.

Мера энергии, сообщаемая обрабатываемому материалу, называется удельной энергией обработки $E_{уд}$ (Дж/кг) и по сути в данном случае является активной мощностью на единицу измельчаемого материала.

Проведены экспериментальные исследования по помолу кварцевого порошка в зависимости от сообщаемой удельной энергии измельчения, продолжительности измельчения при оптимальных параметрах работы АВС *(рис. 4).* Удельная энергия измельчения варьировалась массой ферромагнитных элементов, масса измельчаемого материала оставалась постоянной

$$E_{уд} = Pt/m, \quad (8)$$

где t — продолжительность измельчения; m — масса измельчаемого материала.

Показатель D_{50} для исходного кварцевого порошка составил 234,6 мкм. Удельная энергия измельчения экспоненциально возрастает с уменьшением показателя D_{50} *(см. рис. 4),* что хорошо согласуется с данными Й. А. Хинта [2], Г. С. Ходакова [10], Г. Хайнике [11], Е. Г. Горлова [12]. Выпрямление участка кривой после достижения значения 3000 кДж/кг свидетельствует, возможно, о существенном увеличении энергии, расходуемой на образование новых поверхностей [13].

Для разрушения частиц нанометрового диапазона в соответствии с работами [14—16] необ-

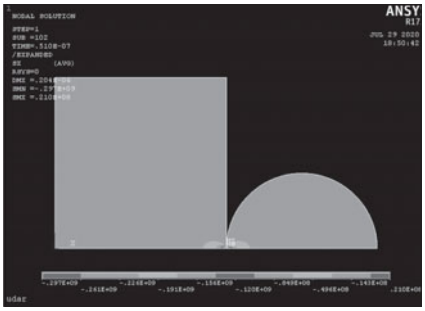

Рис. 5. ***Напряженное состояние в момент удара частички о ферромагнитный стержень (половина области)***

ходимо прикладывать значительную по величине энергию, что не всегда вызывает определенный положительный эффект [17—19].

Результаты численных исследований. При расчете НДС были приняты исходные данные из *табл. 1*. Средний размер частиц после измельчения определяли по данным лазерного анализатора. Зная плотность измельчаемого материала, находили массу частиц. Прочность при сжатии и модуль упругости были приняты из табличных данных по строительным материалам.

При расчете удара частицы измельчаемого материала с разными диаметрами определяли максимальное сжимающее напряжение $\sigma_{сж}$. Напряженное состояние в момент удара частицы о ферромагнитный стержень показано на *рис. 5*, на котором приведена верхняя половина области. Результаты расчетов максимальных напряжений в момент удара частицы о ферромагнитный стержень приведены на *рис. 6*. Таким образом, можно определить предел прочности при сжатии частицы портландцемента R_b, если принять, что при достижении диаметра критической величины $d = d_{\min}$ частица перестает разрушаться. В этом случае предел прочности при сжатии составит 237 МПа.

Кроме того, исследовали влияние размеров ферромагнитного тела на НДС измельчаемой частицы, а также зависимость влияния количества конечных элементов на сходимость полученного решения. Анализ результатов показал, что для сходимости данных расчета НДС минимальная толщина ферромагнитного тела должна быть не менее диаметра измельчаемой частицы.

2. Требуемая скорость движения ферромагнитных тел

Показатель	Эффективность измельчения ε, %				
	1	5	10	15	20
v_c, м/с	28,84	12,93	9,15	7,47	6,47

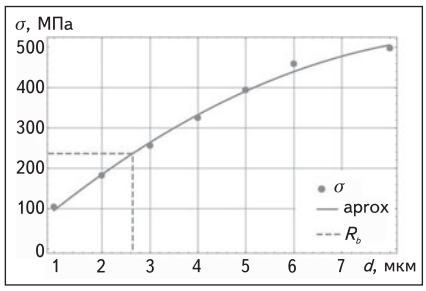

Рис. 6. ***Влияние диаметра частицы d портландцемента на максимальное напряжение при ударе σ***

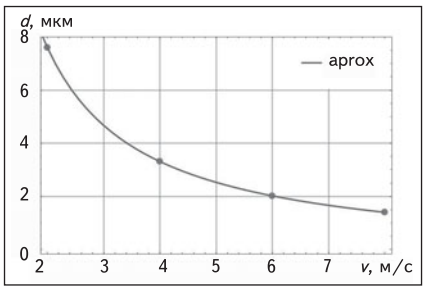

Рис. 7. ***Влияние скорости движения v ферромагнитных тел на критический диаметр d частиц портландцемента***

Определение влияния скорости измельчения от диаметра частиц. Были проведены численные эксперименты при разных скоростях удара частиц измельчаемого материала о ферромагнитный стержень. Для этого задавали скорость удара и с учетом полученных результатов для предела прочности частиц портландцемента подбирали диаметр частиц таким образом, чтобы выполнялось условие равенства предела прочности частицы и максимального сжимающего напряжения

$$\sigma(d) = R_b. \qquad (9)$$

Численные эксперименты проводили при разных скоростях удара частиц портландцемента и определяли критические диаметры частиц, до которых они будут измельчаться при заданной скорости помола *(рис. 7)*. Под критическим диаметром понимали минимальный диаметр частицы, при котором не происходит ее разрушение при заданной скорости движения.

Полученные результаты хорошо описываются функцией, соответствующей формуле (2), при следующих значениях коэффициентов: $a = 9{,}1 \cdot 10^{-3}$ мкм; $b = 1{,}0$; $c = 8{,}14 \cdot 10^{-4}$ мкм·с/м. В соответствии с физическим обоснованием минимальный диаметр частицы портландцемента, который может быть достигнут, составляет $d_{\min} \cong 9$ нм. Из формулы (2) следует, что эффективность измельчения с увеличением скорости движения ферромагнитных тел снижается

$$\frac{dd(v)}{dv} = -\frac{ace^{-cv}}{(1-e^{-cv})^2}. \qquad (10)$$

При установлении требования по скорости изменения диаметра частиц

$$\frac{dd(v)}{dv} \geqslant \varepsilon > 0 \qquad (11)$$

требуемое значение скорости можно вычислить по формуле

$$v_c = -\frac{1}{c}\ln\left(1 + \frac{ac}{2s}\left(1 - \sqrt{1 + \frac{4s}{ac}}\right)\right). \qquad (12)$$

Отсюда следует, что наиболее

существенные изменения диаметра частиц будут происходить при скоростях менее 6 м/с *(табл. 2)*.

Таким образом, при скоростях движения ферромагнитных частиц менее 6 м/с происходит наиболее эффективное измельчение обрабатываемого материала *(см. табл. 2)*. Однако увеличение скорости движения ферромагнитных частиц повышает их кинетическую энергию, но при этом наблюдается снижение эффективности измельчения. Поэтому поиск оптимальных параметров активации необходимо проводить, используя как скорость движения мелющих тел, так и скорость изменения диаметра измельчаемых частиц.

Выводы

1. Получена зависимость влияния массы ферромагнитных тел на расход активной мощности АВС. Увеличение массы мелющих элементов влечет за собой и повышение активной мощности аппарата, при этом масса измельчаемого материала не влияет на расход активной мощности. На образование вихревого слоя в аппарате тратится 2,64 кВт.

2. Удельная энергия измельчения экспоненциально возрастает с уменьшением показателя D_{50}, при этом выпрямление участка кривой после 3000 кДж/кг *(см. рис. 4)* свидетельствует о существенном увеличении энергии, расходуемой на образование новых поверхностей.

3. Получены зависимости влияния диаметра частицы на максимальное напряжение, скорости движения ферромагнитных тел на критический диаметр частиц портландцемента. Этот результат можно использовать для определения заданной степени измельчения в зависимости от скорости движения ферромагнитных тел. На основе проведенных модельных расчетов установлено, что предел прочности при сжатии портландцемента составляет 237 МПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Аввакумов Е. Г.* Механические методы активации химических процессов. Новосибирск : Наука, 1980. 297 с.
2. *Хинт Й. А.* Основы производства силикальцитных изделий. Л. : Госстройиздат, 1962. 642 с.
3. *Logvinenko D. D., Shelyakov O. P., Pol'shchikov G. A.* Determination of the main parameters of vortex bed apparatus [Определение основных параметров аппарата с вихревым слоем] // Chemical and Petroleum Engineering. 1974. Vol. 10. Pp. 15–17.
4. *Urakaev F. Kh., Massalimov I. A.* Energy fluctuations and particle emission in a crack mouth [Колебания энергии и выброс частиц в устье трещины] // Physics of the Solid State. 2005. Vol. 47. No. 9. Pp. 1675–1680.
5. *Севостьянов В. С., Уральский В. И., Севостьянов М. В.* Ресурсо-энергосберегающее оборудование и комплексы для переработки природных и техногенных материалов. Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. 315 с.
6. *Ибрагимов Р. А., Королев Е. В., Дебердеев Т. Р., Лексин В. В.* Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя // Строительные материалы. 2017. № 10. С. 28–31.
7. *Логвиненко Д. Д., Шеляков О. П.* Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем. М. : Техника, 1976. 144 с.
8. *Ibragimov R. A.* et al. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices [Эффективность активации минеральных вяжущих в аппаратах вихревого слоя] // Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 82(6). Pp. 191–198.
9. *Ibragimov R. A., Korolev E. V., Deberdeev T. R., Leksin V. V.* Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine [Эффективная комплексная активация портландцемента при обработке в аппаратах вихревого слоя] // Structural Concrete. 2019. No. 20(2). Pp. 851–859.
10. *Ходаков Г. С.* Физика измельчения. М. : Наука, 1972. 308 с.
11. *Хайнике Г.* Трибохимия / Пер. с англ. М. : Мир, 1987. 584 с.
12. *Горлов Е. Г., Редькина Н. И., Ходаков Г. С.* Новые подходы к определению энергозатрат процесса измельчения // Химия твердого топлива. 2009. № 6. С. 63–71.
13. *Гусев А. И.* Высокоэнергетический размол нестехиометрических соединений // Успехи физических наук. 2020. Т. 190. № 4. С. 371–395.
14. *Mischenko M., Bokov M., Grishaev M.* Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field [Активация технологических процессов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем] // Technical Sciences. 2015. Vol. 2. Pp. 3508–3512.
15. *Павлов А. Н., Гольцов Ю. И.* К теории ударной активации цементной смеси. Часть 1. Влияние на прочность бетона // Научное обозрение. 2017. № 1. С. 6–10.
16. *Федюк Р. С., Мочалов А. В., Лесовик В. С.* Современные способы активации вяжущего и бетонных смесей (обзор) // Вестник Инженерной школы ДФУ. 2018. № 4(37). С. 85–99.
17. *Уваров В. А., Шаптала В. Г., Шаптала В. В., Овчинников Д. А.* Новое направление механоактивации цемента // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 3. С. 68–73.
18. *Lapshin O. V., Boldyrev V. V., Boldyreva E. V.* Mathematical model of the grinding and mixing of powder binary solids in a high-energy mill [Матема-

тическая модель измельчения и смешивания порошкообразных бинарных твердых частиц в мельнице высокой энергии] // Russian Journal of Physical Chemistry A. 2019. Vol. 93. No. 8. Pp. 1592–1597.

19. *Boldyrev V. V.* Mechanochemical processes with the reaction-induced mechanical activation. Chemo-mechanochemical effect [Механохимические процессы с механической активацией, вызванной реакцией. Хемо-механохимический эффект] // Russian Chemical Bulletin. 2018. Vol. 67. No. 6. Pp. 933–948.

R E F E R E N C E S

1. Avvakumov E. G. *Mekhanicheskie metody aktivatsii khimicheskikh protsessov* [Mechanical methods for activating chemical processes]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1980. 297 p. (In Russian).
2. Hint J. A. *Osnovy proizvodstva silikal'tsitnykh izdeliy* [Fundamentals of the production of silicalcite products]. Leningrad, Gosstroyizdat Publ., 1962. 642 p. (In Russian).
3. Logvinenko D. D., Shelyakov O. P., Pol'shchikov G. A. Determination of the main parameters of vortex bed apparatus. *Chemical and Petroleum Engineering*, 1974, vol. 10, pp. 15–17.
4. Urakaev F. Kh., Massalimov I. A. Energy fluctuations and particle emission in a crack mouth. *Physics of the Solid State*, 2005, vol. 47, no. 9, pp. 1675–1680.
5. Sevostyanov V. S., Ural'skiy V. I., Sevost'yanov M. V. *Resurso-energosberegayushchee oborudovanie i kompleksy dlya pererabotki prirodnykh i tekhnogennykh materialov* [Resource-saving equipment and complexes for processing natural and man-made materials]. Belgorod, BGTU Publ., 2017. 315 p. (In Russian).
6. Ibragimov R. A., Korolev E. V., Deberdeev T. R., Leksin V. V. Strength of heavy concrete on Portland cement treated in a vortex layer machine. *Stroitel'nye materialy*, 2017, no. 10, pp. 28–31. (In Russian).
7. Logvinenko D. D., Shelyakov O. P. *Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem* [Intensification of technological processes in devices with a vortex layer]. Moscow, Tekhnika Publ., 1976. 144 p. (In Russian).
8. Ibragimov R. A. et al. Efficiency of activation of mineral binders in vortex-layer devices. *Magazine of Civil Engineering*, 2018, no. 82(6), pp. 191–198.
9. Ibragimov R. A., Korolev E. V., Deberdeev T. R., Leksin V. V. Efficient complex activation of Portland cement through processing it in the vortex layer machine. *Structural Concrete*, 2019, no. 20(2), pp. 851–859.
10. Khodakov G. S. *Fizika izmel'cheniya* [Physics of grinding]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 308 p. (In Russian).
11. Khaynike G. *Tribokhimiya* [Tribochemistry]. Moscow, Mir Publ., 1987. 584 p. (In Russian).
12. Gorlov E. G., Red'kina N. I., Khodakov G. S. New approaches to determining the energy consumption of the grinding process. *Khimiya tverdogo topliva*, 2009, no. 6, pp. 63–71. (In Russian).
13. Gusev A. I. High-energy grinding of non-stoichiometric compounds. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2020, vol. 190, no. 4, pp. 371–395. (In Russian).
14. Mischenko M., Bokov M., Grishaev M. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field. *Technical Sciences*, 2015, vol. 2, pp. 3508–3512.
15. Pavlov A. N., Gol'tsov Yu. I. On the theory of shock activation of cement mixture. Part 1. Impact on the strength of concrete. *Nauchnoe obozrenie*, 2017, no. 1, pp. 6–10. (In Russian).
16. Fedyuk R. S., Mochalov A. V., Lesovik V. S. Modern methods of activation of binder and concrete mixtures (review). *Vestnik Inzhenernoy shkoly DFU*, 2018, no. 4(37), pp. 85–99. (In Russian).
17. Uvarov V. A., Shaptala V. G., Shaptala V. V., Ovchinnikov D. A. New direction of mechanical activation of cement. *Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova*, 2013, no. 3, pp. 68–73. (In Russian).
18. Lapshin O. V., Boldyrev V. V., Boldyreva E. V. Mathematical model of the grinding and mixing of powder binary solids in a high-energy mill. *Russian Journal of Physical Chemistry A*, 2019, vol. 93, no. 8, pp. 1592–1597.
19. Boldyrev V. V. Mechanochemical processes with the reaction-induced mechanical activation. *Chemo-mechanochemical effect. Russian Chemical Bulletin*, 2018, vol. 67, no. 6, pp. 933–948.

Для цитирования: *Ибрагимов Р. А., Шакирзянов Ф. Р., Королев Е. В.* Ударные воздействия при диспергировании минеральных материалов в аппаратах вихревого слоя // Промышленное и гражданское строительство. 2021. № 5. С. 19–25. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.05.19-25.

For citation: Ibragimov R. A., Shakirzyanov F. R., Korolev E. V. Impact Effects when Dispersing Mineral Materials in Vortex Layer Apparatuses. *Promyshlennoe i grazhdanskoe* stroitel'stvo [Industrial and Civil Engineering], 2021, no. 5, pp. 19–25. (In Russian). DOI: 10.33622/0869-7019.2021.05.19-25.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!
ПРЕЖДЕ ЧЕМ ОТПРАВИТЬ СТАТЬЮ В РЕДАКЦИЮ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ,
ВНИМАТЕЛЬНО ОЗНАКОМЬТЕСЬ С ТРЕБОВАНИЯМИ К СТАТЬЯМ,
КОТОРЫЕ ПРИВЕДЕНЫ НА САЙТЕ ЖУРНАЛА (**www.pgs1923.ru**) В РАЗДЕЛЕ «АВТОРАМ».