

Устройство для разрушения материалов сбросом давления

А. М. Липанов¹, Д. К. Жиров²

¹ Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Россия, 125047, Москва, Миусская пл., д. 4

² Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, Россия, 426067, Ижевск, Т. Барамзиной, д. 34

Аннотация. Для измельчения большинства существующих материалов достаточно применения традиционных способов разрушения: удар, истирание, резание, распиливание, раскалывание, раздавливание. Однако не все материалы можно измельчить эффективно с позиции энергозатрат и качества конечного продукта помола указанными выше способами. Например, для измельчения волокнистых материалов более предпочтительно, с позиции затрат энергии, использование иного метода – разрушение "взрывом" или сбросом давления. Этот метод наиболее эффективен для разрушения пористых материалов, способных легко набирать влагу, изменяя при этом требования к разрушению. С успехом может применяться иной способ разрушения, основанный на сжатии кристаллических решеток частиц, дальнейшей резкой разгрузки частиц и их разрыве под действием внутренних напряжений. Представленная в работе конструкция устройства для разрушения материалов природного и техногенного образования сбросом давления может быть с успехом применена для разрушения пористых материалов, способных легко набирать влагу, изменяя при этом требования к разрушению. Коллоидные капиллярно-пористые материалы при изменении влажности окружающей среды могут потребовать для их разрушения до требуемых размеров значительного увеличения затрачиваемой энергии за счет увеличения демпфирующих свойств и сделать совершенно невозможным разрушение их такими способами как стесненный удар, свободный удар, сдавливание. В этом случае разрушение сбросом давления будет возможно без предварительной сушки измельчаемых материалов.

Ключевые слова: разрушение, сброс давления, взрыв, измельчение, частица, загрязняемость.

✉ Дмитрий Жиров, e-mail: zhirov_dmitriy@mail.ru

Device for the Destruction of Materials by Pressure Release

Alexey M. Lipanov¹, Dmitriy K. Zhirov²

¹ Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS (4, Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russian Federation)

² Udmurt Federal Research Center UB RAS (34, T. Baramzina St., Izhevsk, 426067, Russian Federation)

Summary. To grind most of the existing materials, it is sufficient to use traditional methods of destruction: impact, abrasion, cutting, sawing, splitting, and crushing. However, not all materials can be effectively ground by the methods indicated above in terms of the energy consumption and the quality of a final product of grinding. For example, for grinding fibrous materials, from the standpoint of the energy cost it is more preferable to use a different method - destruction by "explosion" or pressure relief. This method is most effective for the destruction of porous materials that can easily absorb moisture changing the requirements for destruction at the same time. Another method of destruction can be successfully used based on the compression of the crystal lattices of particles followed by abrupt unloading of the particles and their rupture under the action of internal stresses. The design of a device for the destruction of natural and technogenic materials by pressure relief presented in the paper can be successfully applied to the destruction of porous materials absorbing moisture. When the humidity of the environment changes, colloid capillary-porous materials may require a significant increase in the energy for their destruction to the required size due to an increase in their damping properties; thus, it becomes completely impossible to destroy them by such methods as constrained impact, free impact or compression. In this case, using the device for destruction by pressure release makes it possible to destruct such materials without preliminary drying.

Keywords: destruction, pressure release, explosion, grinding, particle, contamination.

✉ Dmitriy Zhirov, e-mail: zhirov_dmitriy@mail.ru

ВВЕДЕНИЕ

Для измельчения большинства существующих материалов достаточно применения традиционных способов разрушения: удар, истирание, резание, распиливание, раскалывание, раздавливание [1 – 6]. Однако не все материалы можно измельчить эффективно с позиции энергозатрат и качества конечного продукта помола. Например, для измельчения волокнистых материалов более предпочтительно, с позиции затрат энергии, использование иного метода – разрушение "взрывом" или сбросом давления. Этот метод наиболее эффективен для разрушения пористых материалов, способных легко набирать влагу, изменяя при этом требования к разрушению.

Коллоидные капиллярно-пористые материалы при изменении влажности окружающей среды могут потребовать для их разрушения до требуемых размеров значительного увеличения затрачиваемой энергии и сделать совершенно невозможным дезинтеграцию их такими способами как удар, сдавливание.

Классические способы измельчения не всегда можно эффективно применять для разрушения волокнистых, гигроскопичных материалов [1 – 6]. Например, руды с пористой структурой, древесина, уголь, зерновые культуры при увеличении влажности будут требовать гораздо больших затрат на их разрушения до требуемых размеров способами свободного удара, стесненного удара, истирания, раздавливания и при достижении определенного значения сделают этот процесс невозможным. Наличие пор и способность материалов впитывать влагу с позиции энергоэффективности при измельчении традиционными способами дезинтеграции являются большими недостатками при высокой влажности, но при использовании способа разрушения сбросом давления - огромным преимуществом.

Проводились исследования по успешному использованию метода разрушения "взрывом" для измельчения руды, зерна, древесины, угля [7, 8].

Отличительной особенностью данного метода является разлом частиц по имеющимся дефектам – областям с наименьшим сопротивлением разрушению. В этом заключается большое преимущество данного способа перед методами: распиливанием, раздавливанием, истиранием, где происходит значительное, зачастую ненужное, переизмельчение материала, влекущее за собой перерасход затрачиваемой энергии и дополнительный износ рабочих органов измельчающей установки. Как было указано ранее, для разрушения большинства пористых материалов, набравших влагу, требуются большие затраты энергии и предварительно такие материалы подвергают сушке.

Если провести аналогию метода разрушения "взрывом" и свободным ударом [8 – 12], то в первом случае определяющим параметром будет соотношение первоначального и конечного давлений, а во втором – скорость удара частицы о преграду.

Так, например, условие измельчения "взрывом" древесины в работе [8] представлено следующим образом:

$$(p_n - p)2\pi RH > \sigma_p \Sigma S_{\text{пер}},$$

где p_n – давление в разрушаемом образце перед сбросом давления, Па; p – атмосферное давление, Па; $2\pi RH$ – площадь боковой поверхности капилляра древесины, м²; σ_p – напряжение разрушения, Па; $S_{\text{пер}}$ – площадь поверхности перемычек между капиллярами древесины, м².

Приведенное условие устанавливает равенство между разрывным усилием, обусловленным внутренним избыточным давлением в капиллярах, и сопротивлением разрыву материала.

Разрушение древесины происходит в несколько этапов [8]:

- 1) обработка насыщенным паром в течение 30 с под давлением 2 МПа (220 °С);
- 2) увеличение давления до 7 МПа (280 °С);
- 3) резкий сброс давления до атмосферного.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ

Традиционные способы измельчения (удар, истирание, резание, распиливание, раскалывание, раздавливание) не всегда могут быть с успехом применены для разрушения материалов. Однако с успехом может применяться иной способ разрушения, основанный на сжатии кристаллических решеток частиц и дальнейшей резкой разгрузки частиц и их разрыв под действием внутренних напряжений.

В работе представлена конструкция устройства для разрушения материалов природного и техногенного образования сбросом давления.

На рисунке представлена схема устройства, которое состоит из сжимающего мультипликатора, камеры разрушения, клапанов, ворот и вакуумного насоса. Мультипликатор состоит из поршня 1 и стержня 2. Мультипликатор движется вниз под действием давления P_1 в объеме 3.

Как известно, увеличение давления за счет мультипликатора может быть огромным, например, при соотношении $F_1/F_2 = 100$, требуется начальное давление 50 атм. Для разрушения большинства твердосыпучих материалов природного и техногенного образования достаточно давления порядка E_x 5000 атм.

Мультипликатором сжимается объем 4, в котором находятся измельчаемые частицы. Внутри частиц происходит сжатие их кристаллических решеток и насыщение средой под давлением. При резком открытии ворот 5 под действием давления в объеме 4 частицы и среда, в которой они находятся, выбрасываются в объем 7. При этом происходит резкая разгрузка частиц, и они под действием внутренних напряжений рвутся. Одновременно поршень 1 движется налево, пока не упрется в нижнюю границу объема 6. Тем самым, поршень практически достигает ворот 5 и выталкивает в объем 7 ту часть частиц, которая раздробилась на стенках объема 4. В объеме 7 необходимо перед началом работы эвакуировать воздух. Объем 7 каналом 8 с сеткой 9 сообщается с атмосферой, но перекрывается клапаном 10. Кроме того, объем 7 может перекрываться воротами 11, которые в исходном положении открыты. Заканчивается объем 7 воротами 12. После открытия ворот 5 частицы улетают до ворот 12, а среда (газ) будет истекать через отверстие 8. Чтобы не дать частицам вытечь наружу используется сетка 9. В конечном счете, в объеме 7 установится давление в 1 атм.

После прохождения всех перечисленных выше этапов процедура может быть повторена во втором мультипликаторе – второй ступени измельчения. Конструктивно она может быть аналогична первой ступени и должна заканчиваться своими воротами 12, 11 и объемом 13. Ворота 11 следует закрыть, и раздробившиеся частицы окажутся в образовавшемся объеме 13 под давлением в 1 атм. К воротам 12 слева примыкает объем 14. В нем необходимо обеспечить вакуум. Когда процессы в объеме 7 стабилизируются и будет образован объем 13, ворота 12 следует резко открыть и тогда под действием перепада давления почти все частицы из объема 13 вылетят.

Можно поднять давление до некоторого давления E_x с помощью баллона 15, сначала открыв, а потом закрыв вентиль 16. Если среда обитания частиц – газ, то в объеме 14 он будет находиться под давлением средним для объемов 14 и 13. Если среда обитания частиц – жидкость, то ворота 12 следует герметично закрывать, а газ из объема 14 эвакуировать, в объем 14 закачивать требуемое количество жидкости.

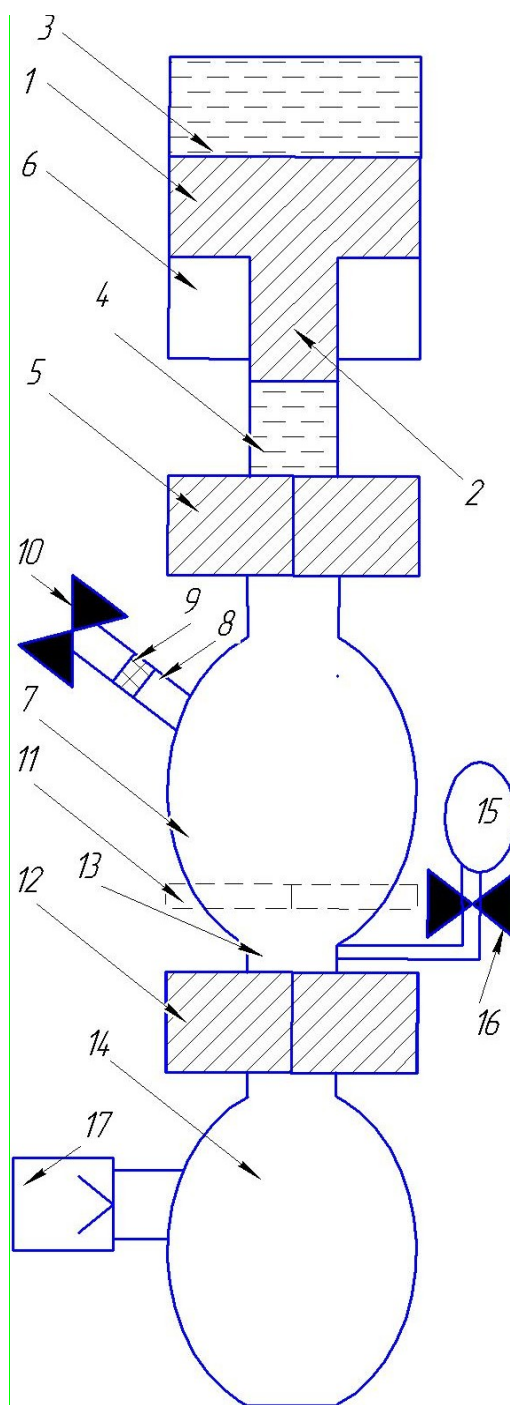


Рисунок – Схема устройства для разрушения материалов природного и техногенного образования сбросом давления:

1 – поршень, 2 – стержень поршня, 3 – объем с первоначальным давлением, 4 – объем высокого давления, 5 – ворота, 6 – объем перед поршнем, 7 – камера разрушения, 8 – канал в камере разрушения, 9 – сетка, 10 – вентиль, 11 – ворота, 12 – ворота, 13 – объем между воротами 11 и 12, 14 – объем вакуумного насоса, 15 – баллон, 16 – вентиль, 17 – вакуумный насос

Figure – The design of a device for the destruction of materials of natural and technogenic formation by pressure relief:

1 – piston, 2 – piston rod, 3 – volume with initial pressure, 4 – high pressure volume, 5 – gate, 6 – volume in front of the piston, 7 – destruction chamber, 8 – channel in the destruction chamber, 9 – mesh, 10 – valve, 11 – gate, 12 – gate, 13 – volume between gates 11 and 12, 14 – volume of the vacuum pump, 15 – cylinder, 16 – valve, 17 – vacuum pump

ВЫВОДЫ

Представленная в работе конструкция устройства для разрушения материалов природного и техногенного образования сбросом давления может быть с успехом применена для разрушения пористых материалов, способных легко набирать влагу, изменяя при этом требования к разрушению. Коллоидные капиллярно-пористые материалы при изменении влажности окружающей среды могут потребовать для их разрушения до требуемых размеров значительного увеличения затрачиваемой энергии за счет увеличения демпфирующих свойств и сделать совершенно невозможным разрушение их такими способами как стесненный удар, свободный удар, сдавливание. В этом случае разрушение сбросом давления будет возможно без предварительной сушки измельчаемых материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nied R. CHAPTER 5 Rotor Impact Mills // Handbook of Powder Technology, 2007, vol. 12, pp. 229-249.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12008-X](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12008-X)
2. Tavares L. M., Diniz R. R. Analysis of self-breakage for modelling media competence in autogenous mills // Proceedings VI Southern Hemisphere Meeting on Minerals Technology, Rio de Janeiro, 2001, vol. 1, pp. 47-52.
3. Ballantyne G. R., Bonfils B., Powell M. S. Evolution of impact breakage characterisation: Re-defining t-family relationship // International Journal of Mineral Processing, 2017, vol. 168, pp. 126-135.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.001>
4. Chau K. T., Wu S. Chapter 2 Impact Breakage of Single Particles: Double Impact Test // Handbook of Powder Technology, 2007, vol. 12, pp. 69-85.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12005-4](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12005-4)
5. Fuerstenau D. W., Abouzeid A.-Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution // International Journal of Mineral Processing, 2002, vol. 67, iss. 1-4, pp. 161-185.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00039-X)
6. Tavares L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static // Handbook of Powder Technology, 2007, vol. 12, pp. 3-68.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12004-2)
7. Борисенко А. А. Диспергирование углей при внезапных выбросах. М.: Наука, 1985. 96 с.
8. Сафин Р. Г., Иванова В. Г. Актуальные проблемы технологических процессов лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 408 с.

REFERENCES

1. Nied R. CHAPTER 5 Rotor Impact Mills. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 229-249.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12008-X](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12008-X)
2. Tavares L. M., Diniz R. R. Analysis of self-breakage for modelling media competence in autogenous mills. *Proceedings VI Southern Hemisphere Meeting on Minerals Technology*, Rio de Janeiro, 2001, vol. 1, pp. 47-52.
3. Ballantyne G. R., Bonfils B., Powell M. S. Evolution of impact breakage characterisation: Re-defining t-family relationship. *International Journal of Mineral Processing*, 2017, vol. 168, pp. 126-135.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.10.001>
4. Chau K. T., Wu S. Chapter 2 Impact Breakage of Single Particles: Double Impact Test. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 69-85.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12005-4](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12005-4)
5. Fuerstenau D. W., Abouzeid A.-Z. M. The energy efficiency of ball milling in comminution. *International Journal of Mineral Processing*, 2002, vol. 67, iss. 1-4, pp. 161-185.
[https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(02\)00039-X](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(02)00039-X)
6. Tavares L. M. Chapter 1 Breakage of Single Particles: Quasi-Static. *Handbook of Powder Technology*, 2007, vol. 12, pp. 3-68.
[https://doi.org/10.1016/S0167-3785\(07\)12004-2](https://doi.org/10.1016/S0167-3785(07)12004-2)
7. Borisenko A. A. *Dispergirovaniye ugley pri vnezapnykh vybrosakh* [Dispersion of coals during sudden outbursts]. Moscow: Nauka Publ., 1985. 96 p.
8. Safin R. G., Ivanova V. G. *Aktual'nye problemy tekhnologicheskikh protsessov lesozagotovitel'nykh i derevopererabatyvayushchikh proizvodstv* [Actual problems of technological processes of logging and wood processing industries]. Kazan: KNITU Publ., 2016. 408 p.

9. Жиров Д. К., Терентьев Е. И. Методика предварительной оценки размолоспособности материалов, параметров конструкции и режимов работы центробежной мельницы // Химическая физика и мезоскопия. 2017. Т. 19, № 1. С. 31-38.
10. Жиров Д. К. Многоступенчатая центробежно-ударная мельница // Патент РФ № 153992, 2015.
11. Липанов А. М., Жиров Д. К. Математическое моделирование динамики движения частиц в установках по измельчению центробежно-ударного типа. Часть 1 Математическая модель // Химическая физика и мезоскопия. 2014. Т. 16, № 1. С. 82-87.
12. Липанов А. М., Денисов В. А., Братухина Ю. В., Жиров Д. К. Энергоэффективность в технологиях переработки минерального сырья // Химическая физика и мезоскопия. 2010. Т. 12, № 2. С. 188-191.
13. Жиров Д. К. Многоступенчатая центробежно-ударная мельница // Патент РФ № 197356, 2020.
14. Жиров Д. К. Исследование влияния энергозатрат при механоактивации в центробежной мельнице на характеристики порошков оксида меди // Химическая физика и мезоскопия. 2020. Т. 22, № 3. С. 317-322.
<https://doi.org/10.15350/17270529.2020.3.31>

9. Zhiron D. K., Terent'ev E. I. Metodika predvaritel'noy otsenki razmolosposobnosti materialov, parametrov konstruktсии i rezhimov raboty tsentrobezhnoy mel'nitsy [The preliminary evaluation methodology of materials dissolvency, parameters of design and operating modes of centrifugal mill]. *Khimicheskaya fizika i mesoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2017, vol. 19, no. 1, pp. 31-48. (In Russian).
10. Zhiron D. K. Mnogostupenchataya tsentrobezhno-udarnaya mel'nitsa [Multistage centrifugal impact mill]. *Patent RU 153992*, 2015.
11. Lipanov A. M., Zhiron D. K. Matematicheskoe modelirovanie dinamiki dvizheniya chastits v ustanovkakh po izmel'cheniyu tsentrobezhno-udarnogo tipa. Chast' 1. Matematicheskaya model' [Modeling particles dynamic motion on centrifugal shock mill blades. Part 1. Mathematical model]. *Khimicheskaya fizika i mesoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2014, vol. 16, no. 1, pp. 82-87. (In Russian).
12. Lipanov A. M., Denisov V. A., Bratuhina Y. V. Jenergoeffektivnost' v tehnologiyah pererabotki mineral'nogo syr'ja [Energy Efficiency in Mineral Processing Technologies]. *Khimicheskaya fizika i mesoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2010, vol. 12, no. 2, pp. 188-191. (In Russian).
13. Zhiron D. K. Mnogostupenchataya tsentrobezhno-udarnaya mel'nitsa [Multistage centrifugal impact mill]. *Patent RU 197356*, 2020.
14. Zhiron D. K. Issledovanie vliyaniya energozatrat pri mekhanoaktivatsii v tsentrobezhnoy mel'nitse na kharakteristiki poroshkov oksida medi [Study of the Effect of Energy Costs During Mechanoactivation in a Centrifugal Mill on the Copper Oxide Powders Characteristics]. *Khimicheskaya fizika i mesoskopiya* [Chemical Physics and Mesoscopy], 2020, vol. 22, no. 3, pp. 317-322. (In Russian).
<https://doi.org/10.15350/17270529.2020.3.31>

Поступила 02.08.2022; после доработки 05.10.2022; принята к опубликованию 18.10.2022
Received August 2, 2022; received in revised form October 5, 2022; accepted October 18, 2022

Информация об авторах

Липанов Алексей Матвеевич, академик РАН, главный научный сотрудник, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Российская Федерация

Жиров Дмитрий Константинович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, УдмФИЦ УрО РАН, Ижевск, Российская Федерация, e-mail: zhiron_dmitriy@mail.ru

Information about the authors

Alexey M. Lipanov, Academician of RAS, Chief Researcher, Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow, Russian Federation

Dmitriy K. Zhiron, Cand. Sci. (Ing.), Senior Researcher, Udmurt Federal Research Center UB RAS, Izhevsk, Russian Federation, e-mail: zhiron_dmitriy@mail.ru