

## КАСКАДНЫЙ СТРУЙНЫЙ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬ ДЛЯ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОЙ РУДЫ

С.В. Воробьев<sup>1</sup>, М.Ю. Колобов<sup>2</sup>, И.В. Постникова<sup>2</sup>, А.М. Козлов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кафедра технической кибернетики и автоматизации, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Россия, 153000

E-mail: ch4rlythec4t@gmail.com

<sup>2</sup>Кафедра технологических машин и оборудования, Ивановский государственный химико-технологический университет, пр. Шереметевский, 7, Иваново, Россия, 153000

E-mail: mikhailkolobov@rambler.ru, poirvic@mail.ru, ale3069@yandex.ru

*Разработан каскадный струйный измельчитель в псевдооживленном слое. Исследован процесс избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды, в котором измельчение компонентов осуществляется в различных ступенях соответственно их прочности.*

*Струйный измельчитель каскадного типа с псевдооживленным слоем позволяет получать продукты измельчения апатит-нефелиновой руды заданной дисперсности. Данная конструкция способствует снижению энергозатрат, повышению эффективности тонкого измельчения, исключению загрязнения готового тонкодисперсного материала продуктами намола, «раскрытию» поликомпонентных материалов по границам связи отдельных компонентов и более полному извлечению целевого компонента.*

**Ключевые слова:** каскадный струйный измельчитель, избирательное измельчение, апатит-нефелиновая руда

## CASCADE JET GRINDER FOR SELECTIVE GRINDING APATITE-NEPHELINE ORE

S.V. Vorobyov<sup>1</sup>, M.Yu. Kolobov<sup>2</sup>, I.V. Postnikova<sup>2</sup>, A.M. Kozlov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Technical Cybernetics and Automation, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, Russia. 153000

E-mail: ch4rlythec4t@gmail.com

<sup>2</sup>Department of technological machines and equipment, Ivanovo State University of Chemical Technology, Sheremetevsky ave., 7, Ivanovo, Russia. 153000

E-mail: mikhailkolobov@rambler.ru, poirvic@mail.ru, ale3069@yandex.ru

*A cascade jet grinder in a fluidized bed has been developed. The process of selective grinding of apatite-nepheline ore, in which the grinding of components is carried out in different stages according to their strength, has been studied.*

*A cascade type jet grinder with a fluidized bed makes it possible to obtain grinding products of apatite-nepheline ore of a given fineness. This design helps to reduce energy costs, increase the efficiency of fine grinding, eliminate contamination of the finished fine material with grinding products, “open” polycomponent materials along the boundaries of the connection of individual components and more complete extraction of the target component.*

**Key words:** cascade jet grinder, selective grinding, apatite-nepheline ore

### Для цитирования:

Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Постникова И.В., Козлов А.М. Каскадный струйный измельчитель для избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 2. С. 92–96. DOI: 10.6060/rcj.2023672.11.

### For citation:

Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M. Cascade jet grinder for selective grinding apatite-nepheline ore. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 2. P. 92–96. DOI: 10.6060/RCJ.2023672.11.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для тонкого измельчения твердых материалов применяют различные типы измельчителей: шаровые, вибрационные, пневматические, ударные, кавитационные и т.д. Такое большое разнообразие используемых мельниц обусловлено различием физико-механических свойств измельчаемых материалов, требованием к дисперсности и чистоте готового продукта, особенностям технологии последующей переработки порошков [1-11].

В связи с возросшими требованиями к чистоте измельчаемого материала, долговечности и простоте конструкции все более широкое применение находят струйные мельницы, в том числе и комбинированного типа. Это связано с тем, что в струйных мельницах комбинированного типа время пребывания измельчаемого материала увеличивается по сравнению с обычными струйными

мельницами. Очень важным является то, что возникает возможность проведения нескольких процессов в одном аппарате, что снижает энергоемкость процессов. Преимущества струйных мельниц по сравнению с другими типами измельчителей [5]: возможность получать тонкодисперсный материал с низким, или даже нулевым содержанием продуктов износа, ввиду отсутствия мелющих тел и рабочих органов; высокая дисперсность продуктов измельчения, размер которых может регулироваться в широком диапазоне (от 50 мкм до менее 1 мкм); относительная простота конструкций, малые габариты.

УСЛОВИЯ, МАТЕРИАЛЫ  
И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения процесса избирательного измельчения разработан струйный измельчитель каскадного типа, в котором измельчение компонентов осуществляется в различных ступенях соответственно их прочности (рис. 1) [12-14].

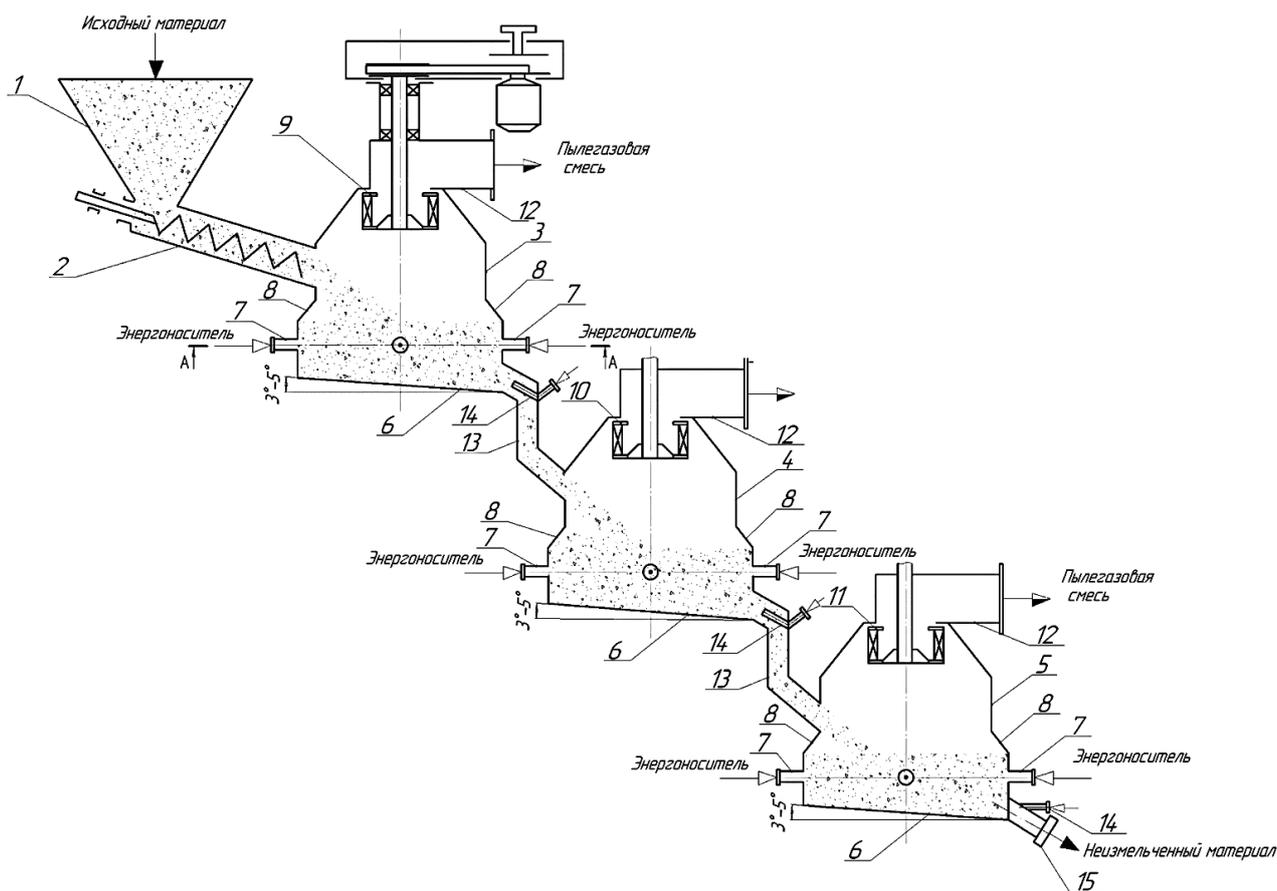


Рис. 1. Каскадный струйный измельчитель для осуществления процесса избирательного измельчения:

1 – бункер исходного материала, 2 – шнековый питатель, 3, 4, 5 – струйные измельчители, 6 – дно, 7 – сопла, 8 – накопительные карманы, 9, 10, 11 – центробежные классификаторы, 12 – патрубки выхода неизмельченного продукта, 13 – патрубки перетока неизмельченных материалов, 14 – патрубки для дополнительной подачи энергоносителя, 15 – патрубков выгрузки неизмельченных материалов

Исходный материал, состоящий из многокомпонентной смеси твердых частиц, из бункера 1 шнековым питателем 2 непрерывно подается в аппарат 3, где подхватывается и разгоняется во встречных потоках энергоносителя, истекающего из четырех сопел 7. При соударении в зонах струйного ударного измельчения материал измельчается и выбрасывается фонтаном энергоносителя в псевдооживленный слой. Измельчается наименее прочный компонент смеси, для чего рассчитывают скорость подачи энергоносителя  $v_1$  в первом аппарате 3 каскада. Измельченные частицы поступают в центробежный классификатор 9. Тонкодисперсный материал удаляют через патрубок выхода 12. Неизмельченные частицы возвращаются в накопительные карманы 8 секции измельчения, где снова подхватываются потоком энергоносителя для повторного столкновения во встречных потоках. Использование накопительных карманов 8 позволяет увеличить концентрацию измельчаемых частиц во встречных струях энергоносителя и повысить вероятность измельчения при столкновении. Более прочные компоненты смеси не измельчаются в первом аппарате 3 каскада, и направляются по наклонному под углом  $3^0-5^0$  к вертикальной оси аппарата плоскому днищу 6 через патрубок перетока 13 в аппарат 4. Для предотвращения зависания материала в патрубке перетока 13 установлен патрубок 14 для дополнительной подачи энергоносителя. Процессы измельчения и классификации происходят аналогично процессам в первом аппарате 3. Во втором аппарате 4 будет избирательно измельчаться следующий по прочности компонент смеси. Более прочные компоненты смеси не измельчаются во втором аппарате каскада и направляются по наклонному под углом  $3^0-5^0$  к вертикальной оси аппарата плоскому днищу 6 через патрубок перетока 13 в аппарат 5. Процессы измельчения и классификации происходят аналогично процессам в первом и втором аппаратах 3, 4. Неизмельченные частицы удаляют через выгрузочный патрубок 15.

Процесс избирательного измельчения целевого компонента поликомпонентной смеси исследован на примере апатит-нефелиновой руды путем ударного нагружения в противоточных струях и мягкого избирательного истирания в псевдооживленном слое.

Параметром, в значительной степени, определяющим технологический режим переработки апатитового концентрата является гранулометрический состав измельченного сырья [15].

Экспериментальные исследования дисперсионного состава частиц измельченных материалов проводились на лазерном анализаторе частиц Analysette 22.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Проведенные исследования [16-17] показали, что наиболее эффективной конструкцией при проведении процесса избирательного измельчения является струйный измельчитель каскадного типа, в котором измельчение компонентов будет осуществляться в различных ступенях соответственно их прочности.

На рис. 2 приведено сравнение интегральных гранулометрических характеристик продуктов истирания апатит-нефелиновой руды в псевдооживленном слое при различных числах  $K_w$  псевдооживления с продуктами измельчения в сталкивающихся струях струйного измельчителя.

В соответствии с ГОСТ 22275–90 [18] апатитовый концентрат должен удовлетворять требованиям не более 13,5% частиц размером более 160 мкм. Данным требованиям придерживаются основные производители апатитового концентрата в России.

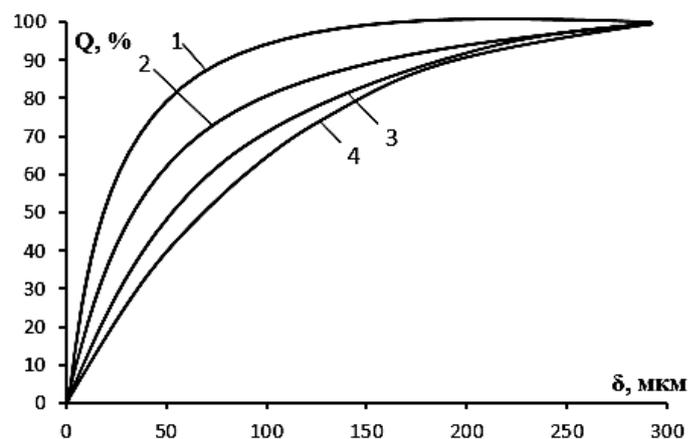


Рис. 2. Интегральные гранулометрические характеристики апатитовых концентратов: 1 – продукт истирания при  $K_w = 1,5$ ; 2 – продукт истирания в при  $K_w = 1,75$ ; 3 – продукт истирания в при  $K_w = 2$ ; 4 – продукт измельчения в противоточных струях

Важно отметить, что струйный измельчитель каскадного типа с псевдооживленным слоем позволяет получать продукты измельчения апатит-нефелиновой руды заданной дисперсности путем регулирования подачи воздуха. Так, при более низких числах псевдооживления  $K_w$ , увеличивается дисперсность пылевидного продукта, его однородность, что соответствует требованиям ГОСТ 22275–90 (рис. 2, кривая 1). Это объясняется тем,

что в данном случае процесс измельчения поликомпонентных частиц неправильной формы осуществляется в большей степени за счет их абразивного истирания. В то же время средняя скорость потока по сечению измельчителя не достигает скорости  $u_{\text{ун}}$  уноса частиц повышенной крупности (более 160 мкм).

При увеличении числа  $K_w$  псевдооживления и при измельчении в противоточных струях увеличивается кинетическая энергия струй воздуха. Таким образом, в процессе измельчения частицы подвергаются не только истиранию, но также дроблению в надрешеточной области измельчителя.

Данная конструкция способствует снижению энергозатрат, повышению эффективности тонкого измельчения, исключению загрязнения готового тонкодисперсного материала продуктами намола, «раскрытию» поликомпонентных материалов по границам связи отдельных компонентов и

более полному извлечению целевого компонента.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 22–29–01368.*

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

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

*This work was supported by the Russian Science Foundation grant N 22–29–01368. The studies were 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).*

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

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сиденко П.М. Измельчение в химической промышленности. Высшая школа, 1986. 286 с.
2. Колобов М.Ю., Колобова В.В. Дезинтеграторная обработка фосфорсодержащих руд. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново, 2023. № 1. С. 42–46. DOI: 10.6060/snt.20237301.0006
3. Постникова И.В., Блиничев В.Н., Кравчик Я. Струйные мельницы. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново, 2015. № 2(42). С. 144–151.
4. Андреев С.Е., Петров В.А., Зверев В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. Москва: Недра, 1980. 416 с.
5. Гущина Т.В., Гущина Е.А., Колобов М.Ю., Блиничев В.Н. Исследование мельницы ударно-отражательного действия. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново, 2020. № 3. С. 54–59.
6. Колобов М.Ю., Воробьев С.В., Миронов Е.В., Куваева Е.Ю., Сахаров С.Е., Колобова В.В. Влияние режимных параметров оборудования на интенсивность изнашивания конструкционных материалов. Рос. хим. ж. 2023. Т. 67. № 1. С. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9
7. Уваров В.А., Шарпов Р.Р. Струйные мельницы. Белгород: БГТУ. 2012. 144 с.
8. Колобов М.Ю., Афонин С.Б., Гаврилин В.М. Шаровая мельница. Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 15 апреля 2021. С. 252–255.
9. Филлин В.Я., Акимов М.В. Современное оборудование для тонкого и сверхтонкого измельчения. М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1991. 47 с.
10. Серебряник И.А., Золотухина Д.А. Развитие струйного измельчения. Развитие информационно-ресурсного обеспечения образования и науки в горно-металлургической отрасли и транспорте. Днепр: НГУ, 2014. С. 22–30.
11. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. Предварительная активация цементно-песчаной смеси с целью повышения прочности бетона. Изв. вузов. Химия и хим.

#### REFERENCES

1. Sidenko P.M. Grinding in the chemical industry. Higher school, 1986. 286 p.
2. Kolobov M.Yu., Kolobova V.V. Disintegrator treatment of phosphorus-containing ores. Modern science-intensive technologies. Regional application. Ivanovo, 2023. N 1. P. 42–46. DOI: 10.6060/snt.20237301.0006
3. Postnikova I.V., Blinichev V.N., Kravchik Ya. Jet mills. Modern science-intensive technologies. Regional application. Ivanovo, 2015. N 2(42). P. 144–151.
4. Andreev S.E., Petrov V.A., Zverev V.V. Crushing, grinding and screening of minerals. Moscow: Nedra, 1980. 416 p.
5. Gushchina T.V., Gushchina E.A., Kolobov M.Yu., Blinichev V.N. Research of a mill of shock-reflective action. Modern science-intensive technologies. Regional application. Ivanovo. 2020. N 3. P. 54–59.
6. Kolobov M.Yu., Vorobiev S.V., Mironov E.V., Kuvaeva E.Yu., Sakharov S.E., Kolobova V.V. Influence of regime parameters of equipment on the intensity of wear of structural materials. Russian chemical journal. Ivanovo, 2023. V. 67. N 1. P. 64–69. DOI: 10.6060/rcj.2023671.9
7. Uvarov V.A., Sharapov R.R. Jet mills. Belgorod: BSTU. 2012. 144 p.
8. Kolobov M.Yu., Afonin S.B., Gavrilin V.M. Ball mill. Reliability and durability of machines and mechanisms. Collection of materials of the XII All-Russian scientific-practical conference. Ivanovo, April 15, 2021. P. 252–255.
9. Filin V.Ya., Akimov M.V. Modern equipment for fine and ultra-fine grinding. M.: TsINTIKhimneftemash, 1991. 47 p.
10. Serebryanik I.A., Zolotukhina D.A. Development of jet grinding. Development of information and resource support for education and science in the mining and metallurgical industry and transport. Dnepr: NGU, 2014. P. 22–30.
11. Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A. Preliminary activation of cement-sand mixture in order to increase the strength of concrete. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 8. P. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6595.

- технология. 2022. Т. 65. Вып. 8. С. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6595.
12. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Определение скорости и концентрации частиц твердой фазы в турбулентной струе газа, погруженной в псевдооживленный слой. Рос. хим. ж. 2019. № 3–4. Т. LXIII. С. 31–41.
  13. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Расчет рациональных режимов работы противоточных струйных измельчителей для интенсивного ударного разрушения материала. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2020. № 2 (64). С. 97–102.
  14. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Определение скорости и концентрации частиц твердой фазы в турбулентной струе газа, истекающей в псевдооживленный слой в противоточном струйном измельчителе. Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XI Всероссийской научно-практической конференции. Иваново: ФГБОУ ВО Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2020. С. 159–163.
  15. Левин Б.В., Ангелов А.И., Голованов В.Г. Перспективы получения и переработки кольского апатитового концентрата повышенной крупности. Мир серы, N, P и K. 2005. № 1. С. 7–13.
  16. Блиничев В.Н., Постникова И.В., Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Зуева Г.А. Интенсификация процесса разрушения поликомпонентных материалов. Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357
  17. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Кинетика истирания зернистых материалов в псевдооживленном слое. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2021. № 1 (65). С. 72–77.
  18. ГОСТ 22275–90. Концентрат апатитовый. Технические условия. Москва: Изд-во стандартов, 1991. 19 с.
  12. Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Determination of the velocity and concentration of solid particles in a turbulent gas jet immersed in a fluidized bed. Russian chemical journal. 2019. N 3–4, Vol. LXIII. P. 31–41.
  13. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Calculation of rational modes of operation of countercurrent jet grinders for intensive impact destruction of the material. Modern science-intensive technologies. Regional application. 2020. N 2 (64). P. 97–102.
  14. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Determination of the velocity and concentration of solid particles in a turbulent gas jet flowing into a fluidized bed in a countercurrent jet grinder. Reliability and durability of machines and mechanisms. Collection of materials of the XI All-Russian scientific-practical conference. Ivanovo: Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2020. P. 159–163.
  15. Levin B.V., Angelov A.I., Golovanov V.G. Prospects for obtaining and processing the Kola apatite concentrate of increased size. The world of sulfur, N, R and K. 2005. N 1. P. 7–13.
  16. Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A. Intensification of the process of destruction of polycomponent materials. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 1. P. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.
  17. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Kinetics of attrition of granular materials in a fluidized bed. Modern science-intensive technologies. Regional application. 2021. N 1 (65). P. 72–77.
  18. GOST 22275–90. apatite concentrate. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards, 1991. 19 p.

Поступила в редакцию 26.04.2023  
Принята к опубликованию 18.05.2023

Received 26.04.2023  
Accepted 18.05.2023