

**СЕПАРАЦИЯ ПРОДУКТОВ ИЗБИРАТЕЛЬНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ  
АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВОЙ РУДЫ**

**Постникова И.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Колобов М.Ю.**

Постникова Ирина Викторовна, Воробьев Сергей Владимирович, Козлов Александр Михайлович, Колобов Михаил Юрьевич  
Ивановский государственный химико-технологический университет,  
г. Иваново, Россия. 153000, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7.  
E-mail: poirvic@mail.ru, ch4rlythec4t@gmail.com, ale3069@yandex.ru, mikhailkolobov@rambler.ru

*В статье анализируется технология сухого обогащения апатит-содержащей руды на примере руды Хибинского месторождения и выбор заключительной стадии данной технологии: классификации продуктов избирательного измельчения. Рассмотрены два варианта сепарации – электростатический и центробежный, особое внимание уделено центробежной классификации. Приведены данные экспериментальных исследований классификации продуктов избирательного измельчения на центробежном воздушном классификаторе, разработанном и изготовленном на кафедре технологических машин и оборудования ИГХТУ. Проанализированы полученные результаты и предложены варианты дальнейших исследований.*

**Ключевые слова:** обогащение руды, поликомпонентные частицы, сепарация, классификация, измельчение, фракция

**SEPARATION OF PRODUCTS OF SELECTIVE GRINDING OF APATITE-NEPHELINE ORE**

**Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kolobov M.Yu.**

Postnikova Irina Viktorovna, Vorobyov Sergey Vladimirovich, Kozlov Alexander Mikhailovich, Kolobov Mikhail Yurievich  
Ivanovo State University of Chemical Technology,  
Ivanovo, Russia. 153000, Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7.  
E-mail: poirvic@mail.ru, ch4rlythec4t@gmail.com, ale3069@yandex.ru, mikhailkolobov@rambler.ru

*The article analyzes the technology of dry enrichment of apatite-containing ore on the example of the ore of the Khibinsky deposit and the choice of the final stage of this technology: classification of selective grinding products. Two separation options are considered – electrostatic and centrifugal, special attention is paid to the centrifugal classification. Data are presented from experimental studies of the classification of selective grinding products on a centrifugal air classifier, developed and manufactured at the Department of Technological Machines and Equipment of ISU. The results obtained are analyzed and options for further research are proposed.*

**Keywords:** ore enrichment, multicomponent particles, separation, classification, grinding, fraction

**АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ**

Россия является практически единственным поставщиком на мировой рынок высококачественного апатитового концентрата [1]. В настоящее время предложены и реализуются различные технологические схемы обогащения природных руд, содержащих фосфориты и апатиты [2].

В мировой практике обогащения фосфоритовых руд можно выделить три способа: «мокрый», «сухой» и комбинированный.

На сегодняшний день основным способом обогащения фосфоросодержащих руд является «мокрый» способ. В большинстве случаев в промышленности «мокрое» обогащение реализуется методами флотации и гравитации [3-8], которые обладают рядом недостатков:

- экологическая вредность процесса (загрязняют отходами обогащения близлежащие водоемы). Поэтому их невозможно осуществлять вблизи рек и водоемов с чистыми водами;

- относительно высокая стоимость процесса (требует больших капитальных затрат на строительство сложных гидротехнических сооружений).

Разработка технологии сухого обогащения фосфоритных руд с использованием совмещенных процессов избирательного комбинированного измельчения поликомпонентных материалов с селективным выделением из продуктов измельчения чистых фосфоритов, является актуальной задачей, т. к. позволяет более полно выделить фосфориты из руд по сравнению с мокрым способом обогащения.

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Главной задачей исследований является разработка технологии разрушения поликомпонентных рудных материалов с целью увеличения полноты извлечения целевого компонента и разработка сухого способа обогащения фосфатных руд.

Теоретически сформулированы и экспериментально проверены следующие стадии предлагаемой технологии сухого обогащения апатитовой руды Хибинского месторождения [9-11]:

- «раскрытие» поликомпонентных частиц руды путем использования термических напряжений при их нагреве и резком охлаждении водой при темпах охлаждения не менее  $2^{\circ}\text{C}/\text{с}$  по границам связи отдельных компонентов руды;

- дополнительная интенсификация процесса «раскрытия» многокомпонентных материалов по границам связи отдельных компонентов с помощью ударного способа разрушения частиц, при котором осуществляется волновой характер движения деформаций, а, соответственно, и напряжений. Показано, что вследствие большой разницы скоростей движения деформации (волн упругой деформации) у составляющих частицу компонентов (например: у апатита скорость – 6,5 км/с; нефелина – 5,5 км/с; мусковита – 5,6 км/с; альбита – 6,0 км/с; эгирина – 7,25 км/с) на границах связи этих компонентов возникают мощные концентрации напряжений сжатия и растяжения в зависимости от значений скорости волн упругой деформации соседних компонентов;

- избирательное измельчение подготовленных «раскрытых» частиц в аппарате комбинированного измельчения, представляющий собой модифицированную струйную мельницу с псевдооживленным слоем, отличающийся от известных в России и за рубежом более высокими концентрациями частиц в противоточных струях, что позволяет существенно повысить производительность измельчителя по тонкодисперсному продукту

при тех же расходах энергоносителя.

Показано, что при избирательном измельчении смеси компонентов разной прочности апатит содержащей руды возможно уже на стадии измельчения осуществить обогащение апатита. При однократном избирательном измельчении в продуктах наблюдается около 59% фторапатита. Наиболее эффективной конструкцией при проведении избирательного измельчения является струйный измельчитель каскадного типа. Предложенная конструкция и способ измельчения защищены патентом РФ;

- разделение смеси продуктов избирательного измельчения предварительно термически обработанных частиц руды в струйной мельнице с псевдооживленным слоем на специально разработанном и изготовленном классификаторе [12].

Для эффективного разделения продуктов измельчения были проанализированы различные способы сепарации [13] и в дальнейшем рассматривались два наиболее перспективных: электростатический и воздушно-динамический.

*Электрическая сепарация* применяется для классификации, обеспыливания и обогащения многих руд. Наиболее распространены электрические сепараторы со свободным падением (электростатические сепараторы) с предварительной электризацией дисперсного материала.

Фосфоритовые руды многих месторождений состоят в основном из кварца и фосфата. Первый обладает свойствами диэлектрика, второй – полупроводника.

Процесс осуществляется в трибоэлектрическом барабанном сепараторе (рис.1.). Он имеет зарядное устройство (3), отделенное от сепарирующей части. Зарядка минералов производится путем электризации трением в результате контакта минералов друг с другом.

Разделение происходило в электростатическом неоднородном поле постоянной полярности напряженностью 2-4 кВ/см, создаваемой между металлическим заземленным барабаном (2) и цилиндрическим отклоняющим электродом (4), на который подавалось высокое напряжение (15-50 кВ). Знак напряжения подбирается с учетом знака заряда, приобретаемого минералами при электризации [3,5,14-19].

При экспериментальной проверке данного способа сепарации продуктов избирательного измельчения удовлетворительных результатов получить не удалось, но выявились следующие *недостатки*:

- эффективность процесса и качество продуктов сепарации ухудшаются при увеличении содержания пылевидных частиц в исходном материале.

- возникают большие проблемы при разделе-

нии руд широкого фракционного состава.

- при увеличении скорости вращения барабана можно повысить производительность сепаратора, однако качество продуктов сепарации при этом ухудшается.

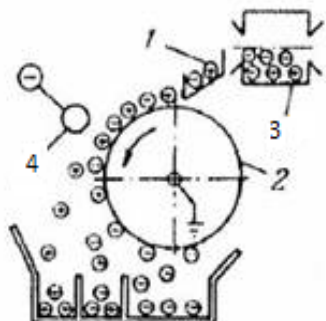


Рис. 1. Трибоэлектрический барабанный сепаратор: 1 – питатель, 2 – барабан (осадительный электрод), 3 – зарядное устройство, 4 – отклоняющий электрод

Fig. 1. Triboelectric drum separator: 1 – feeder, 2 – drum (precipitation electrode), 3 – charger, 4 – deflecting electrode

С увеличением крупности частиц возрастает центробежная сила, отрывающая их от поверхности барабана. Это затрудняет четкое разделение зерен при сепарации материала широкого диапазона крупности. Крупная непроводящая частица при этом может оторваться от барабана одновременно с более мелкой проводящей частицей и, наоборот, очень тонкие проводящие частицы попадут в непроводящую фракцию.

#### Воздушно-динамическая сепарация

Сущность пневматической (воздушной) классификации заключается в разделении сыпучего материала за счет различных скоростей движения крупных и мелких частиц в воздушном потоке. Регулированием скорости и траектории движения воздушного потока можно варьировать крупность разделяемых частиц. В химической промышленности преимущественное применение имеют проходные и циркуляционные сепараторы. Проходной сепаратор представляет собой статический аппарат, в котором материал разделяется только за счет энергии сжатого воздуха. Более компактными и экономичными являются циркуляционные сепараторы с собственными генераторами воздушного потока.

Авторами использовался центробежный воздушный классификатор, разработанный и изготовленный на кафедре технологических машин и оборудования ИГХТУ (рис.2) [12].

Классификатор работает следующим образом, в патрубок 1 с воздушным потоком подается исходный продукт, далее смесь проходя через рас-

пределительный конус 2 и направляющие лопатки 3, находящиеся под определенным углом к горизонту, вовлекается в центробежное завихрение, в результате чего более крупные частицы ударяясь о стенки и отбойник классификатора, падают на дно рабочей камеры и выгружаются через патрубок 5, а более мелкие частицы уносятся с воздушным потоком в циклон через патрубок 6.

#### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследования дисперсионного состава проводились на лазерном анализаторе частиц Analisette 22. Рентгенофазовый структурный анализ апатит-нефелиновой руды проводился на рентгеновском дифрактометре ДРОН УМ 1.

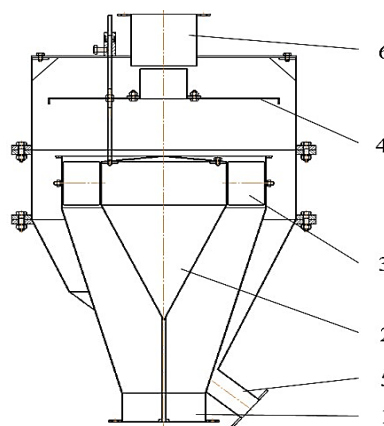


Рис. 2 Центробежный воздушный классификатор: 1 – загрузочный патрубок; 2 – распределительный конус; 3 – направляющие лопатки; 4 – отбойник; 5 – разгрузочный патрубок крупной фракции; 6 – разгрузочный патрубок мелкой фракции.  
Fig. 2 Centrifugal air classifier: 1 – loading nozzle; 2 – distribution cone; 3 – guide vanes; 4 – bump; 5 – discharge pipe of a large fraction; 6 – discharge pipe of fine fraction.

Классификатор (рис.2) работает в следующей технологической цепочке (рис.3): исходный материал из бункера 12, посредством шнекового питателя 11, вовлекаясь в воздушный поток, нагнетаемый вентилятором 10, подается в классификатор 1. Скорость потока воздуха и скорость подачи материала имеют регулировки благодаря векторным преобразователям частоты 9,14. Проходя через классификатор, исходная смесь делится на две фракции: крупную, которая собирается в емкости 16 и мелкую, которая, в свою очередь, увлекается вместе с воздушным потоком в циклон 2, а далее осаждается в емкость 4. Отработанный воздух очищается с помощью рукавного фильтра 6 и выбрасывается в атмосферу.

Исходный материал, представляющий собой поликомпонентную смесь из частиц фторапатита, нефелина, эгирина, альбита, титаномагнетита и мускавита, полученных при каскадном избирательном измельчении, помещался в бункер для

подачи на питатель. После проведения опыта отбирались пробы из соответствующих емкостей и производился замер грансостава каждой пробы. Скорость потока воздуха регулировалась с помощью частотного преобразователя. В классификаторе направляющие лопатки устанавливались под определенным углом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты эксперимента (при изменении угла наклона лопаток) приведены в таблицах 1, 2 и на рис. 4, 5.

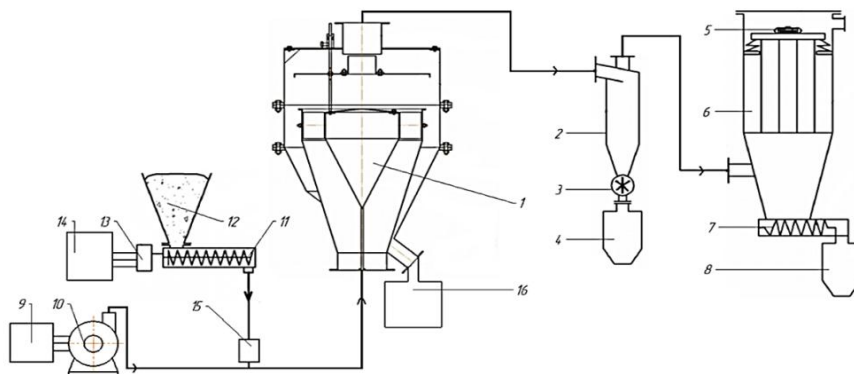


Рис. 3. Технологическая схема экспериментальной установки: 1 - классификатор; 2 - циклон; 3 - секторный затвор питатель; 4 - емкость сбора готового продукта; 5 - вибратор; 6 - рукавный фильтр; 7 - шнековый питатель; 8 - емкость для сбора тонкодисперсных фракций; 9,14 - векторный преобразователь частоты; 10 - вентилятор; 11 - питатель шнековый; 12 - бункер исходного материала; 13 - тиристорный частотный преобразователь; 15 - загрузочный патрубок; 16 - емкость для крупной фракции  
 Fig. 3. Technological scheme of the experimental installation: 1 - classifier; 2 - cyclone; 3 - sector gate feeder; 4 - finished product collection tank; 5 - vibrator; 6 - bag filter; 7 - screw feeder; 8 - container for collecting fine fractions; 9,14 - vector frequency converter; 10 - fan; 11 - screw feeder; 12 - the hopper of the source material; 13 - thyristor frequency converter; 15 - loading pipe; 16 - capacity for a large fraction

Таблица 1

Результаты экспериментов при угле наклона лопаток 45°, 70°, 90° (мелкая фракция)  
 Table 1. Experimental results at blade angles of 45°, 70°, 90° (fine fraction)

Размер фракции, мм	Угол наклона лопаток, α°		
	45	70	90
0,08-0,1	2	2,8	6,3
0,1-0,125	5,7	10,4	11,1
0,125-0,14	0,8	2,7	3
0,14-0,16	1,5	2,4	2,8
0,16-0,2	1	4	4,4
0,2-0,25	0	1,2	4,4
0,25-0,4	0	0	7,3
0,4-0,5	0	0	0
0,5>	0	0	0

Таблица 2

Результаты экспериментов при угле наклона лопаток 45°, 70°, 90° (крупная фракция)  
 Table 2. Experimental results at blade angles of 45°, 70°, 90° (large fraction)

Размер фракции, мм	Угол наклона лопаток, α°		
	45	70	90
0,08-0,1	5,9	5,1	1,6
0,1-0,125	8,1	3,4	2,7
0,125-0,14	3,9	2	1,7
0,14-0,16	4,3	3,4	3
0,16-0,2	17	14	13,6
0,2-0,25	12,4	11,2	8
0,25-0,4	29	29	21,7
0,4-0,5	5,5	5,5	5,5
0,5>	2,9	2,9	2,9

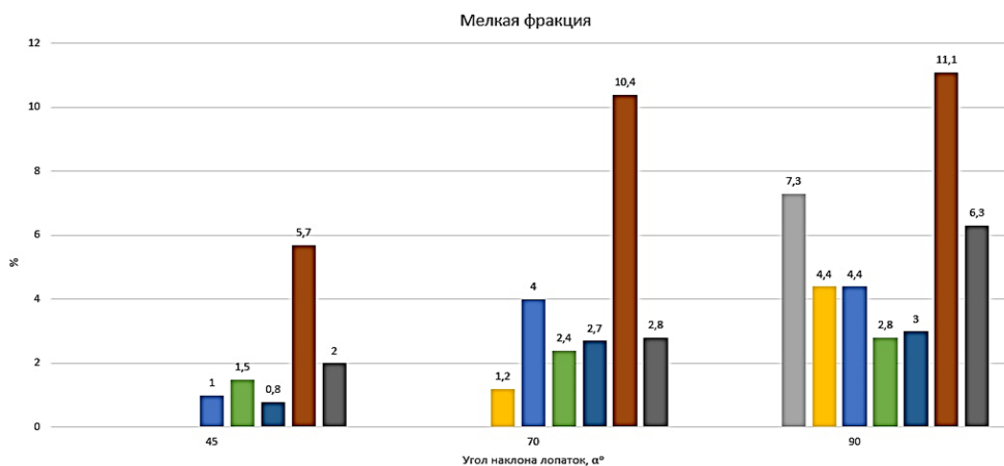


Рис. 4. Гистограммы результатов эксперимента  
Fig. 4. Histograms of experimental results

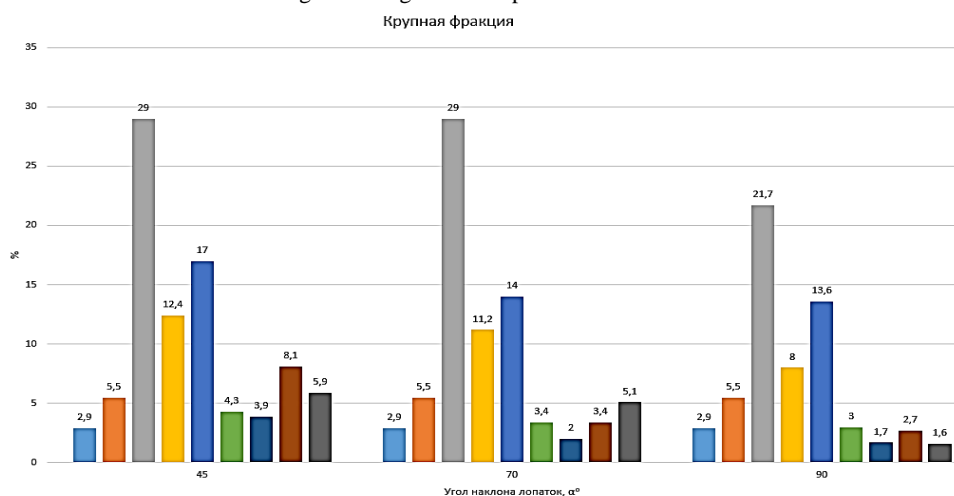


Рис. 5. Гистограммы результатов эксперимента  
Fig. 5. Histograms of experimental results

Компонентный состав продуктов разделения представлен на рис. 6 и 7.

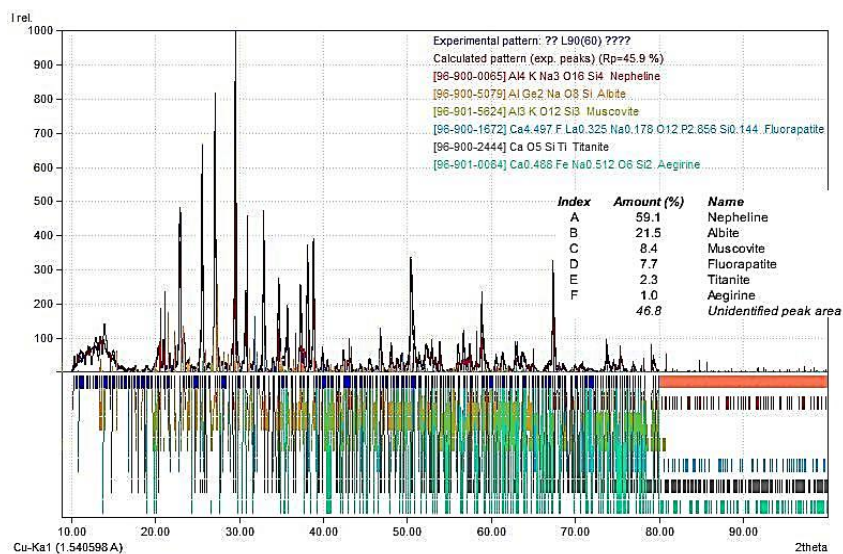


Рис. 6. Порошковая рентгенограмма мелкой фракции продуктов разделения при угле поворота лопаток 90°  
Fig. 6. Powder radiograph of the fine fraction of separation products at the angle of rotation of the blades 90°



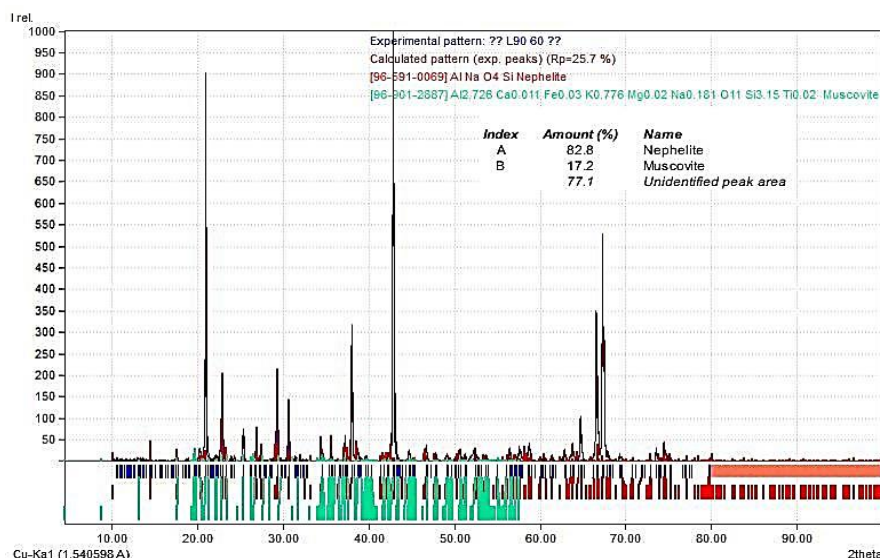


Рис. 7. Порошковая рентгенограмма крупной фракции продуктов разделения при угле поворота лопаток 90°  
 Fig. 7. Powder radiograph of a large fraction of separation products at the angle of rotation of the blades 90°

По представленным таблицам и рисункам видно:

- оптимальным для эффективного разделения продуктов измельчения апатит-содержащей руды является наклон направляющих лопаток 90° к горизонту;
- в сепараторе отделяется наибольшее количество нефелина и мусковита;
- в циклонной (мелкой) фракции содержание фтор-apatита составляет 7,7% от общего количества частиц.

Таким образом, можно сделать вывод, что при каскадном (многоступенчатом) измельчении, наиболее легко измельчаемый компонент смеси – фтор-apatит попадает в мелкий продукт, поэтому его отделение от общей массы частиц возможно при сложной сепарации: центробежный классификатор + циклон + фильтр. Возможно, также, дальнейшее исследование с поиском сепаратора, работающего при ламинарном режиме движения

энергоносителя – сепарация отдувом более легкой (тонкой) фракции.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ N 22–29–01368.*

*Исследования проведены с использованием ресурсов Центра коллективного пользования научным оборудованием ИГХТУ (при поддержке Минобрнауки России, соглашение N 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 N 075-15-2021-671).*

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

ЛИТЕРАТУРА

1. **Козловский Е.А.** Экономический кризис в стране и значимость минерально-сырьевого сектора в его ликвидации. *Промышленные ведомости*. 2009. №3-4.
2. **Авдохин В.М.** Основы обогащения полезных ископаемых: учеб. для вузов: в 2 т. М.: Изд-во ММГУ, 2006. Т.2: Технология обогащения полезных ископаемых. 310 с.
3. **Авдохин В.М.** Основы обогащения полезных ископаемых: учеб. для вузов: в 2 т. М.: Изд - во ММГУ, 2006. Т. 1: Обогащительные процессы. 417 с.
4. **Абрамов А.А.** Флотационные методы обогащения. М.: МГУ. 2008. 710 с.
5. **Абрамов А.А.** Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. М.: Изд-во МГТУ, 2001. 472 с.

REFERENECES

1. **Kozlovsky E.A.** The economic crisis in the country and the importance of the mineral resource sector in its liquidation. *Industrial statements*. 2009. №3-4. <http://www.promved.ru>
2. **Avdokhin V.M.** Fundamentals of mineral enrichment: textbook. for universities: in 2 t. M.: Publishing House of Moscow State University, 2006. Vol. 2: Technology of mineral enrichment. 310 p.
3. **Avdokhin V.M.** Fundamentals of mineral enrichment: textbook. for universities: in 2 volumes. M.: Publishing House of MMSU, 2006. Vol. 1: Enrichment processes. 417 p.
4. **Abramov A.A.** Flotation methods of enrichment. M.: MGSU. 2008. 710 p.
5. **Abramov A.A.** Processing, enrichment and complex use of solid minerals. M.: MSTU Publishing House, 2001. 472 p.

6. **Глембоцкий В.А., Классен В.И.** Флотационные методы обогащения. Учебник для вузов. 2-е изд. перераб. и доп. М, Недра, 1961. 304 с.
7. **Шохин В.Н., Лопатин А.Г.** Гравитационные методы обогащения. М.: Недра, 1994. 350 с.
8. **Богданов О.С.** Справочник по обогащению руд. Том 2. Основные процессы. М.: Недра, 1983. 387с.
9. **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. DOI:10.6060/ivkkt.20226501.6357.
10. **Блиничев В.Н., Лабутин А.Н. и др.** Проблемы разработки энерго- и ресурсосберегающих процессов, реакторных систем и оборудования интенсивного действия, моделирования и оптимального управления. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j
11. **Воробьев С.В., Колобов М.Ю. и др.** Каскадный струйный измельчитель для избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды. *Российский химический журнал.* 2023. Т. LXVII. №2. С. 92-96. DOI:10.6060/rcj.2023672.11.
12. **Колобов М.Ю., Блиничев В.Н., Чагин О.В., Сахаров С.Е., Бойцова В.В., Грименицкий П.Н., Колобова В.В.** Повышение эффективности процесса классификации частиц материала. Надежность и долговечность машин и механизмов. Сборник материалов XIII Всероссийской научно-практической конференции. Иваново, 14 апреля 2022. С. 362–365.
13. **Беляев И.А., Постникова И.В.** Полусухие и сухие способы обогащения бедных фосфоритовых руд. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение.* Иваново, 2017. №3 (51). С. 67-74.
14. **Брагина В.И., Брагин В.И.** Технология обогащения горно-химического сырья. ГАЦМиЗ. Красноярск, 1995. 195 с.
15. **Лагов Б.С.** Система информационной рудоподготовки на базе радиометрических процессов - путь в XXI век. Развитие идей И.М. Плаксина в области обогащения полезных ископаемых и гидromеталлургии: тез. докл. юбил. плаксинских чтений (10-14 октября 2000 г.). М.: 2000. С. 82-84.
16. **Самойлик В.Г.** Специальные и комбинированные методы обогащения полезных ископаемых: учебное пособие. Донецк, 2015. 164 с.
17. **Турсбекова Г.Ж.** Исследование процесса обжига фосфоросодержащего сырья. *Вестник КРСУ.* 2012. Том 12. № 6. С.133-137.
18. **Кармазин В.В., Кармазин В.И.** Магнитные, электрические и специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: МГГУ, 2005. 669 с.
19. **Пелевин А.Е.** Магнитные и электрические методы обогащения: Учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во УГГ-ГА, 2003. 157 с.
6. **Glembotsky V.A., Klassen V.I.** Flotation methods of enrichment. Textbook for universities. 2nd ed. reprint. and additional M, Nedra, 1961. 304 p.
7. **Shokhin V.N., Lopatin A.G.** Gravitational methods of enrichment. M.: Nedra, 1994. 350 p.
8. **Bogdanov O.S.** Handbook of ore enrichment. Volume 2. Basic processes. M.: Nedra, 1983. 387 p.
9. **Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyev 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.
10. **Blinichev V.N., Labutin A.N. et al.** Problems of development of energy- and resource-saving processes, reactor systems and equipment of intensive action, modeling and optimal control. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.].* 2023. V. 66. N 7. P. 185-202. DOI:10.6060/ivkkt.20236607.6845j
11. **Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu. et al.** Cascade jet shredder for selective crushing of apatite-nepheline ore. *Russian Chemical Plant.* 2023. Т. LXVII. N 2. P. 92-96. DOI:10.6060/rcj.202367.11.
12. **Kolobov M.Yu., Blinichev V.N., Chagin O.V., Sakharov S.E., Boytsova V.V., Grimenitsky P.N., Kolobova V.V.** Improving the efficiency of the material particle classification process. Reliability and durability of machines and mechanisms. Collection of materials from the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference. Ivanovo, April 14, 2022. P. 362–365.
13. **Belyaev I.A., Postnikova I.V.** Semi-dry and dry methods of enrichment of poor phosphorite ores. *Modern high-tech technologies. Regional application.* Ivanovo, 2017. N 3 (51). P.67-74.
14. **Bragina V.I., Bragin V.I.** Technology of enrichment of mining and chemical raw materials. Gatsmiz. Krasnoyarsk, 1995. 195 p.
15. **Lagov B.S.** System of information ore preparation based on radiometric processes - the way to the XXI century. Development of I.M. Plaksin's ideas in the field of mineral enrichment and hydrometallurgy: tez. dokl. yubil. Plaksin readings (October 10-14, 2000). Moscow: 2000. P. 82-84.
16. **Samoylik V.G.** Special and combined methods of mineral enrichment: a textbook. Donetsk, 2015. 164 p.
17. **Tursbekova G.Zh.** Investigation of the roasting process of phosphorus-containing raw materials. *Bulletin of the KRSU.* 2012. Volume 12. N 6. P. 133-137.
18. **Karmazin V.V., Karmazin V.I.** Magnetic, electrical and special methods of mineral enrichment. Moscow: MGSU, 2005. 669 p.
19. **Pelevin A.E.** Magnetic and electrical methods of enrichment: A textbook. Yekaterinburg: UGGA Publishing House, 2003.157 p.

Поступила в редакцию 18.09.2023  
Принята к опубликованию 11.10.2023

Received 18.09.2023  
Accepted 11.10.2023