

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИКОМПОНЕНТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**С.В. Воробьев, М.Ю. Колобов, И.В. Постникова, А.М. Козлов**

Ивановский государственный химико-технологический университет, г. Иваново, Ивановская область, г. Иваново, пр. Шереметевский, 7, 153000

E-mail: ch4rlythec4t@gmail.com, mikhailkolobov@rambler.ru, poirvic@mail.ru, ale3069@yandex.ru

Разработана технология разрушения поликомпонентных материалов апатит-нефелиновой руды Хибинского месторождения с целью увеличения полноты извлечения целевого компонента.

Нагрев частиц апатит-нефелиновой руды до температуры 600 °С и быстрое охлаждение их водой до температуры 105 °С приводит к образованию в них огромной сетки микро- и макротрещин, которые проходят по границам связи компонентов друг с другом, разделяя эти компоненты.

При ударном нагружении поликомпонентного материала в каскадном струйном измельчителе на границах связи отдельных компонентов возникают мощные концентрации напряжений, приводящие к их разрушению именно по границам связи. Данные положения открывают перспективу создания новой технологии сухого обогащения фосфатных руд.

Ключевые слова: технология разрушения, поликомпонентный материал, каскадный струйный измельчитель, избирательное измельчение, апатит-нефелиновая руда

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR DESTRUCTION OF POLYCOMPONENT MATERIALS**S.V. Vorobyov, M.Yu. Kolobov, I.V. Postnikova, A.M. Kozlov**

Ivanovo State University of Chemistry and Technology (ISUCT), Ivanovo, Russia. Ivanovo region, Ivanovo, Sheremetevsky ave., 7, 153000

E-mail: ch4rlythec4t@gmail.com, mikhailkolobov@rambler.ru, poirvic@mail.ru, ale3069@yandex.ru

A technology has been developed for the destruction of polycomponent materials of the apatite-nepheline ore of the Khibiny deposit in order to increase the completeness of the extraction of the target component.

Heating particles of apatite-nepheline ore to a temperature of 600 °C and their rapid cooling with water to a temperature of 105 °C leads to the formation of a huge network of micro- and macrocracks in them, which pass along the boundaries of the connection of the components with each other, separating these components.

Under shock loading of a multicomponent material in a cascade jet mill, powerful stress concentrations arise at the bond boundaries of individual components, leading to their destruction precisely along the bond boundaries. These provisions open up the prospect of creating a new technology for the dry processing of phosphate ores.

Key words: destruction technology, polycomponent material, cascade jet mill, selective grinding, apatite-nepheline ore

Для цитирования:

Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Постникова И.В., Козлов А.М. Разработка технологии разрушения поликомпонентных материалов. *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва)*. 2023. Т. LXVII. № 3. С. 45–50. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.6.

For citation:

Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M. Development of technology for destruction of polycomponent materials. *Ros. Khim. Zh.* 2023. V. 67. N 3. P. 45–50. DOI: 10.6060/RCJ.2023673.6.

ВВЕДЕНИЕ

Снижение себестоимости продуктов химической промышленности, как правило, осуществляется за счет увеличения производительности агрегатов большой единичной мощности при снижении удельных затрат энергии (квт·ч/тонну продукции) и поддержании надежности работы оборудования на определенном уровне.

Наращивание производительности агрегатов большой единичной мощности без реконструкции оборудования приводит к снижению сроков межремонтных пробегов основного оборудования и не всегда учитываемого снижения времени его работы от капитального до капитального ремонтов.

Существенно реже осуществляется второй подход снижения себестоимости продукции – разработка новой технологии производства продукции, либо с сокращением ряда промежуточных стадий, либо с совмещением нескольких процессов в одной единице оборудования, когда последовательно или параллельно протекают несколько взаимно интенсифицирующих друг друга процессов, что позволяет существенно снизить удельные энергозатраты и капитальные затраты.

Поэтому разработка технологии разрушения поликомпонентных материалов с целью увеличения полноты извлечения целевого компонента при использовании сухих способов обогащения фосфатных руд является актуальной научной и технологической проблемой, имеющей важное народно-хозяйственное значение.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Технологический процесс разрушения поликомпонентной апатит-нефелиновой руды Хибинского месторождения по границам связи отдельных компонентов апробирован в лабораториях кафедры технологических машин ИГХТУ. Образцы руды размерами от 40 до 150 мм нагревались в печи до температур в диапазоне 400 - 950 °С и быстро охлаждались водой до температуры 105 - 108 °С.

Далее образцы измельчались в ударно-молотковой дробилке до размеров менее 12 мм и продукты грубого измельчения направлялись в каскадный струйный измельчитель для получения тонкодисперсных продуктов с размерами менее 200 мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследование элементного состава апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений про-

водилось на сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 SBH. На рис. 1 представлена многослойная карта поверхности одного из исследуемых образцов апатит-нефелиновой руды.

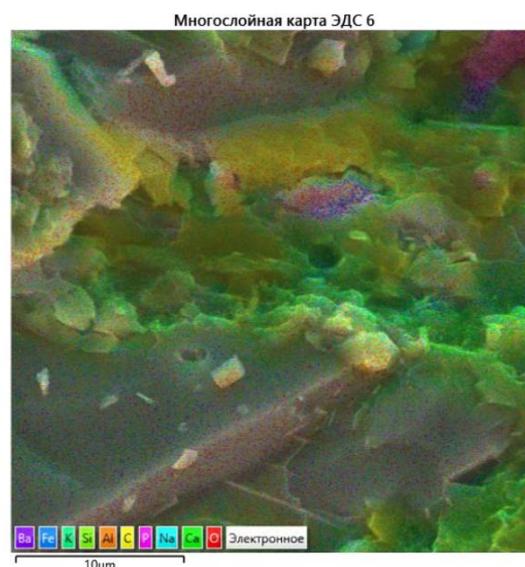


Рис. 1. Многослойная карта поверхности образца апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений

Проведенные исследования показали, что в образцах исследуемой породы в больших количествах присутствуют такие химические элементы, как: кислород O_2 (35,1 - 45,3%), кальций Ca (0,3 - 21,2%) кремний Si (1,4 - 19,3%), углерод C (11,7 - 15,9%), калий K (1,04 - 13,2%).

Результаты исследований сведены в табл. 1.

Полученные данные коррелируют с результатами проведенных ранее исследований элементного состава апатит-нефелиновых руд [1, 2], что позволяет использовать их для проведения рентгеноструктурного фазового анализа руды.

Рентгенофазовые исследования образцов апатит-нефелиновой руды проводились на рентгеновском дифрактометре ДРОН УМ 1. Расшифровка порошковых рентгенограмм осуществлялась с помощью программы Crystal Impact Match! 2 с использованием базы PDF-2 (2004).

На рис. 2. представлена порошковая рентгенограмма одного из исследуемых образцов.

Результаты исследований количественного фазового анализа образцов апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений представлены в табл. 2.

Полученные данные коррелируют с результатами проведенных ранее минералогических исследований [3-6].

Таблица 1

Элементный состав образцов апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений

Элемент	Массовый процент, %						
	Обр. 1	Обр. 2	Обр. 3	Обр. 4	Обр. 5	Обр. 6	Обр. 7
O	38,1	45,3	36,9	37,4	38,3	37,3	35,1
Ca	0,3	0,9	0,4	1,4	5,7	17,8	21,2
Si	19,3	17,3	19,7	21,2	17,3	3,9	1,4
C	15,6	10,6	15,7	15,9	14,6	11,7	13,0
K	11,7	6,1	12,4	13,2	10,5	3,2	1,0
Al	9,0	8,6	7,8	7,2	6,3	2,5	0,8
Ba	1,4	-	3,4	1,3	2,0	7,7	8,6
Na	2,8	5,6	1,6	0,5	1,2	4,8	6,0
Fe	1,2	3,5	1,0	0,6	0,2	0,2	0,2
Mg		1,3	-	-	-	-	-
Ti		0,4	-	-	-	-	-
Yb	-	-	-	-	0,1	0,2	0,1
Mn		0,1	-	-	-	-	-
P	0,3	0,1	0,8	0,9	3,3	10,2	12,3

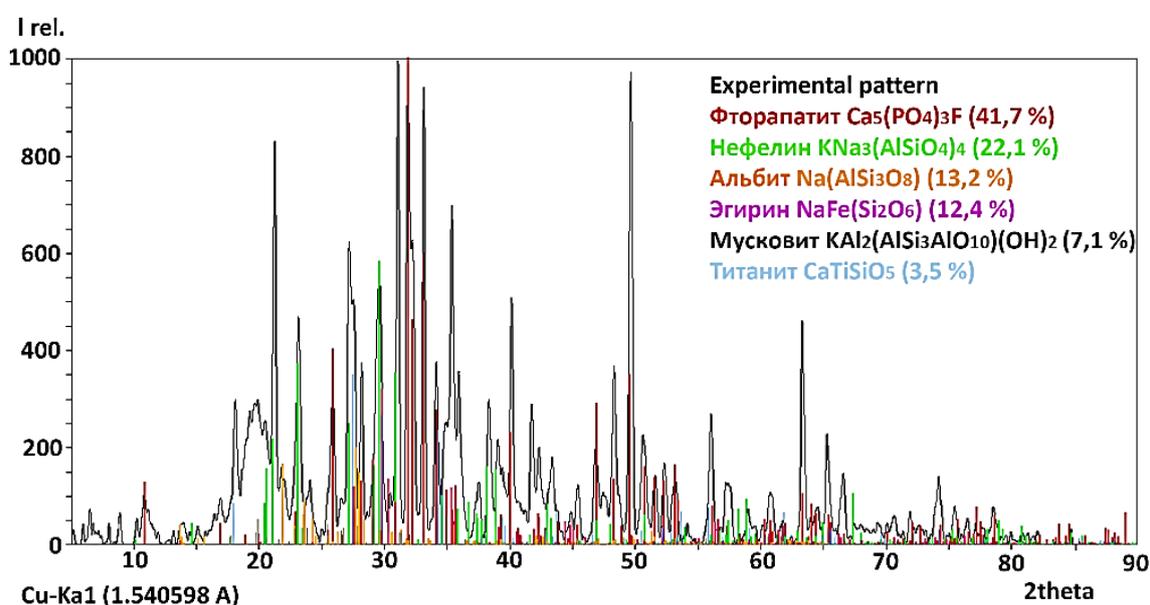


Рис. 2. Порошковая рентгенограмма образца апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений

Таблица 2

Минералогический состав образцов апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений

Минерал	Массовый процент, %						
	Обр. 1	Обр. 2	Обр. 3	Обр. 4	Обр. 5	Обр. 6	Обр. 7
Фторапатит	54,2	27,1	32,8	58,4	7,7	53,9	38,8
Нефелин	22,8	43,1	42,5	21,3	8,5	39,6	18,2
Пироксены (эгирин, авгит, эгирин-авгит)	7,9	14,9	13,6	11,6	31,9	-	14,1
Сфен	7,6	2,9	3,2	3,3	3,6	1,3	-
Полевые шпаты	6,9	8,8	5,0	1,9	40,1	2,4	13,4
Титаномагнетит	0,6	1,6	1,9	-	-	-	-
Слюды (биотит, мусковит)		1,1	1,1	3,4	31,9	2,9	15,5
Натролит	-	-	-	-	8,1	-	-

На основании проведенных исследований можно сделать вывод о том, что образцы относятся к апатит-нефелиновому типу с пятнистой текстурой.

Апатит пятнистой породы имеет плоскую или линейную пространственную ориентацию. Размер отдельных пятен колеблется от 0,5 до 3 - 4 см. Они обычно представлены крупными (1 - 2 см) изометричными пойкилитическими зернами темноцветных минералов (эгирит-авгит, сфен, эгирин, титаномагнетит), включающими массу мелких зернышек апатита и отдельные изометрические индивиды нефелина. Зерна апатита почти всегда меньше зерен нефелина, полевого шпата, пироксенов, сфена и титаномагнетита. Размер мелких зерен варьируется от 0,1 до 1 мм.

Получено усредненное массовое содержание основных компонентов апатит-нефелиновой руды Хибинских месторождений: фторапатит – 36%, нефелин – 36,2%, эгирин – 12,1%, мусковит – 7,4, альбит – 5,9%, титанит – 2,4%.

Из работ [7, 8] известно, что в условиях быстрого нагрева образцов различных горных пород, и, в частности, апатитовых руд, скорость роста количества дефектов начинает преобладать над скоростью процесса релаксации, что существенно снижает прочностные характеристики поликомпонентного материала.

В ходе экспериментальных исследований, проведенных с целью установления взаимосвязи между термическими напряжениями, создаваемыми внутри образца с его динамической прочностью, частицы апатит-нефелиновой руды размерами от 40 до 150 мкм нагревались в печи до температур в диапазоне 400 - 950 °С и быстро охлаждались водой до температуры 105 - 108 °С. Исследования показали, что динамическая прочность частиц чрезвычайно мала, и при ударе о жесткую поверхность частицы разрушаются на мелкие осколки.

Таким образом, экспериментальными исследованиями [9-11] найдено, что, нагрев частиц апатит-нефелиновой руды до температуры 600 °С и быстрое охлаждение их водой до температуры 105 °С приводит к образованию в них огромной сетки микро- и макротрещин, что подтверждается исследованиями на электронном сканирующем микроскопе VEGA 3 SHB (рис. 3). При этом трещины проходят по границам связи компонентов друг с другом, разделяя эти компоненты.

Современные технологии рудоподготовки апатит-нефелиновой руды включают в себя грубое измельчение породы в щековых дробилках с последующим тонким измельчением (помолом) в шаровых мельницах. И в первом, и во втором случаях

энергия для разрушения подводится к разрушаемому материалу с небольшой скоростью деформаций методами сжатия и сдвига [12].

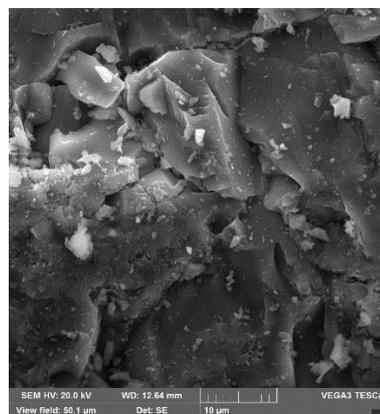


Рис. 3. Образец апатит-нефелиновой руды Хибинского месторождения после нагрева до температуры более 600 °С и охлаждения в воде до 105 °С

Как заметил Дмитриев А.П. [13], способ разрушения с небольшой скоростью нагружения малоэффективен для активации механизмов неупругой деформации в образце поликомпонентного материала, приводящих к образованию нарушений сплошности по границам связи компонентов. Кроме того, подобное механическое воздействие всегда сопряжено с неупругим поведением минерального вещества, вызывающим значительные энергозатраты.

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

Таким образом, вышеописанные исследования показывают, что ударный способ измельчения поликомпонентных материалов - наиболее целесообразный способ как с экономической, так и с технологической точек зрения, т.к. при ударе и движении с большими скоростями волн деформации на границах связи отдельных компонентов возникают мощные концентрации напряжений в несколько раз превышающих средние напряжения в объеме разрушаемых частиц, которые и определяют разрушение именно по этим границам.

Большим преимуществом ударного способа разрушения поликомпонентных частиц является разрушение их по границам связи отдельных компонентов, где накапливаются максимальные напряжения и, в первую очередь, образуются макротрещины даже при малых ударных нагрузках [14, 15].

На основании проведенного анализа конструкций струйных противоточных измельчителей [16–18], можно сделать вывод, что струйные мельницы с псевдооживленным слоем имеют эффективность выше, чем у других известных струйных мельниц из-за высокой нагрузки струи на материал.

С учетом устранения недостатков известных струйных измельчителей предлагаемая конструкция [19] отличается тем, что имеет в зонах подачи энергоносителя накопительные карманы, в которых концентрация твердых частиц в 1,5 - 1,7 раза выше концентрации твердых частиц в объеме псевдооживленного слоя, что приводит к увеличению концентрации твердых частиц в противоточных струях и к увеличению производительности струйного измельчителя по тонкодисперсному продукту при тех же расходах энергоносителя.

Процесс тонкого измельчения предлагается осуществлять путем непрерывного или импульсного ударного нагружения при столкновении противоточных двухфазных потоков, образованных струями сжатого воздуха и эжектированными в струи поликомпонентными частицами, разогнанными до критических скоростей соударения наименее прочных частиц целевого компонента с целью их измельчения и «дораскрытия» по границам связи поликомпонентных частиц [20–24].

Разработанная конструкция решает следующие задачи:

- а) проведение процесса избирательного измельчения наименее прочного целевого компонента;
- б) создание более высокой концентрацией твердой фазы в противоточных двухфазных струях;
- в) исключение износа стенок измельчителя

противоточными струями и предотвращение загрязнения тонкодисперсного продукта продуктами намола металла.

На основе теоретических и экспериментальных исследований процесса разрушения поликомпонентных материалов на примере апатит-нефелиновой руды предложена технология разрушения поликомпонентных частиц по границам связи составляющих компонентов:

а) найдено, что нагрев поликомпонентного материала на примере апатит-нефелиновой руды до температуры 550 - 650 °С и быстрое охлаждение водой приводят к резкому снижению динамической (ударной) прочности вследствие больших термических напряжений растяжения в объеме материала;

б) показано, что при нагреве с последующим быстрым охлаждением водой и ударном нагружении поликомпонентного материала на примере апатит-нефелиновой руды на границах связи отдельных компонентов возникают мощные концентрации напряжений, приводящие к их разрушению именно по границам связи. Данные положения открывают перспективу создания новой технологии сухого обогащения фосфатных руд.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 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.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Дудкин О.Б., Козырева Л.В., Померанцева Н.Г. Минералогия апатитовых месторождений Хибинских тундр. Москва: Наука, 1964. 236 с.
2. Каменев Е.А., Сунгатуллин Р.Х., Хазиев М.И., Боровский М.Я. Георесурсы. 2003. № 1(13). С. 18–23.
3. Павлов К.В., Селин И.В. Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2012. № 3. С. 2–8.
4. Коробов Б.Л., Томчук Н.П. Горный журнал. 1999. № 9. С. 63–69.
5. Лавриненко А.А., Шрадер Э.А., Харчиков А.Н., Кунилова И.В. Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2013. № 5. С. 157–165.
6. Щитцов В.В. Результаты фундаментальных и прикладных исследований по разработке методик технологической оценки руд металлов и промышленных минералов на ранних стадиях геологоразведочных работ. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2006. 166 с.
7. Нерадовский Ю.Н., Компанченко А.А., Мирошникова Я.А. Твердость главных минералов апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений. Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. Апатиты: Геологический институт КНЦ РАН, 2019. С. 408–412.

REFERENCES

1. Dudkin O.B., Kozyreva L.V., Pomerantseva N.G. Mineralogy of apatite deposits of the Khibiny tundra. Moscow: Nauka, 1964. 236 p.
2. Kamenev E.A., Sungatullin R.Kh., Khaziev M.I., Borovsky M.Ya. Georesources. 2003. N 1(13). P. 18–23.
3. Pavlov K.V., Selin I.V. National interests: priorities and security. 2012. N 3. P. 2–8.
4. Korobov B.L., Tomchuk N.P. Mining magazine. 1999. N 9. P. 63–69.
5. Lavrinenko A.A., Shrader E.A., Kharchikov A.N., Kunilova I.V. Physical and technical problems of mineral development. 2013. N 5. P. 157–165.
6. Shchiptsov V.V. Results of fundamental and applied research on the development of methods for the technological evaluation of metal ores and industrial minerals at the early stages of exploration. Petrozavodsk: KarNTs RAN, 2006. 166 p.
7. Neradovsky Yu.N., Kompanchenko A.A., Miroshnikova Ya.A. Hardness of the main minerals of apatite-nepheline ores of the Khibiny deposits. Proceedings of the Fersman Scientific Session of the GI KSC RAS. Apatity: Geological Institute KSC RAS, 2019. P. 408–412.

8. Дмитриев А.П., Кузьяев Л.С., Протасов Ю.И., Ямщиков В.С. Физические свойства горных пород при высоких температурах. Москва: Недра, 1969. 160 с.
9. Беляев И.А., Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Анализ способов сухого обогащения фосфоритовых руд. Международный научно-технический форум: первые международные Косыгинские чтения. 2017. Москва: ФГБОУ ВО «РГУ им. А.Н. Косыгина», 2017. С. 28–34.
10. Беляев И.А., Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Предпосылки в разработке новых энерго- и ресурсосберегающих технологий в обогащении. Экология, ресурсосбережение и охрана окружающей среды на предприятиях нефтехимии и нефтепереработки. Нижнекамск: Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», 2017. С. 12–15.
11. Блиничев В.Н., Постникова И.В., Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Зуева Г.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 1. С. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.
12. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород. Москва: МГГУ, 2009. 453 с.
13. Дмитриев А.П., Гончаров С.А. Современные проблемы избирательного и ресурсосберегающего разрушения горных пород. М: информационно-аналитический бюллетень. 2011. № S1. С. 169–184.
14. Мельников А.А., Гордина Н.Е., Тюканова К.А., Гусев Г.И., Гуцин А.А., Румянцев Р.Н. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. Вып. 8. С. 63–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422.
15. Лотов В.А., Сударев Е.А., Кутугин В.А. // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2022. Т. 65. Вып. 8. С. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6595.
16. Постникова И.В., Блиничев В.Н., Кравчик Я. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2015. № 2(42). С. 144–151.
17. Уваров В.А., Шарпов Р.Р. Струйные мельницы. Белгород: БГТУ. 2012. 144 с.
18. 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.
19. Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Постникова И.В., Козлов А.М. Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2023. Т. LXVII. № 2. С. 92–96. DOI: 10.6060/rcj.2023672.11.
20. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Российский химический журнал (Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева). 2019. № 3–4. Т. LXIII. С. 31–41. DOI: 10.6060/rcj.2019633.4.
21. Воробьев С.В., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Химические волокна. 2019. № 4. С. 96–102.
22. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2020. № 2 (64). С. 97–102.
23. Воробьев С.В., Козлов А.М., Постникова И.В., Блиничев В.Н. Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2021. № 1 (65). С. 72–77. DOI: 10.6060/snt.20216501.0009.
24. Блиничев В.Н., Лабутин А.Н., Зуева Г.А., Колобов М.Ю., Алексеев Е.А., Волкова Г.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Кокурина Г.Н., Лысова М.А., Миронов Е.В., Натарева С.В., Невиницын В.Ю. Пономарева Ю.Н., Постникова И.В., Сахаров С.Е., Чагин О.В. Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2023. Т. 66. Вып. 7. С. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845.
8. Dmitriev A.P., Kuzyaev L.S., Protasov Yu.I., Yamschikov V.S. Physical properties of rocks at high temperatures. Moscow: Nedra, 1969. 160 p.
9. Belyaev I.A., Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Analysis of methods of dry enrichment of phosphorite ores. International Scientific and Technical Forum: First International Kosygin Readings. 2017. Moscow: FGBOU VO "RGU im. A.N. Kosygin", 2017. P. 28–34.
10. Belyaev I.A., Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Prerequisites for the development of new energy and resource-saving technologies in enrichment. Ecology, resource saving and environmental protection at petrochemical and oil refining enterprises. Nizhnekamsk: Nizhnekamsk Institute of Chemical Technology (branch) FGBOU VO "Kazan National Research Technological University", 2017. P. 12–15.
11. Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 1. P. 109–115. DOI: 10.6060/ivkkt.20226501.6357.
12. Protasov Yu.I. Destruction of rocks. Moscow: MGGU, 2009. 453 p.
13. Dmitriev A.P., Goncharov S.A. Modern problems of selective and resource-saving destruction of rocks. M: information and analytical bulletin. 2011. N S1. P. 169–184.
14. Melnikov A.A., Gordina N.E., Tyukanova K.A., Gusev G.I., Gushchin A.A., Rumyantsev R.N. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2021. V. 64. N 8. P. 63–71. DOI: 10.6060/ivkkt.20216408.6422.
15. Lotov V.A., Sudarev E.A., Kutugin V.A. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2022. V. 65. N 8. P. 94–101. DOI: 10.6060/ivkkt.20226508.6595.
16. Postnikova I.V., Blinichev V.N., Kravchik Ya. Modern science-intensive technologies. Regional application. 2015. N 2(42). P. 144–151.
17. Uvarov V.A., Sharapov R.R. Jet mills. Belgorod: BSTU. 2012. 144 p.
18. 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.: NSU, 2014. P. 22–30.
19. Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M. Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev). 2023. T. LXVII. N 2. P. 92–96. DOI: 10.6060/rcj.2023672.11.
20. Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Russian Chemical Journal (Journal of the Russian Chemical Society named after D.I. Mendeleev). 2019. V. LXIII. N 3–4. P. 31–41. DOI: 10.6060/rcj.2019633.4.
21. Vorobyov S.V., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Chemical fibers. 2019. N 4. P. 96–102.
22. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Modern science-intensive technologies. Regional application. 2020. N 2 (64). P. 97–102.
23. Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Postnikova I.V., Blinichev V.N. Modern science-intensive technologies. Regional application. 2021. N 1 (65). P. 72–77. DOI: 10.6060/snt.20216501.0009.
24. Blinichev V.N., Labutin A.N., Zueva G.A., Kolobov M.Yu., Alekseev E.A., Volkova G.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kokurina G.N., Lysova M.A., Mironov E.V., Natarayev S.V., Nevinitsyn V.Yu. Ponomareva Yu.N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. ChemChemTech [Izv. Vyssh. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]. 2023. V. 66. N 7. P. 185–202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845.

Поступила в редакцию (Received) 29.04.2023

Принята к опубликованию (Accepted) 17.09.2023