

ТОНКОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ ОКСИДОВ

Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.

Бараковских Дмитрий Сергеевич, Шишкин Алексей Сергеевич, Шишкин Сергей Федорович
Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
Россия. 620062, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19.
E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru, a.s.shishkin@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

Экспериментально показано, что струйная мельница с ударом в преграду обладает высокой степенью измельчения и позволяет получать тонкодисперсные порошки оксидов со средним размером частиц менее 1–2 мкм. Полученные зависимости тонкости продукта от числа ударов позволяют рассчитать циркуляционную нагрузку при измельчении в замкнутом цикле и сделать количественную оценку затрат энергии. Приводятся особенности измельчения диоксида циркония, диоксида титана и кальцинированного глинозема. На основе кинетики измельчения от числа ударов предложен метод расчета замкнутого цикла измельчения. На его основе создана опытно-промышленная установка – струйная мельница с ударом в преграду, работающая в замкнутом цикле с проходным центробежным классификатором.

Ключевые слова: струйная мельница, измельчение оксидов, глинозем, медианный размер частиц, степень измельчения, кратность циркуляции

FINE GRINDING OF OXIDES

Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F.

Barakovskikh Dmitry Sergeyevich, Shishkin Alexey Sergeyevich, Shishkin Sergey Fedorovich
Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Russia. 620062, Yekaterinburg, 28 Mira Street.
E-mail: d.s.barakovskikh@urfu.ru, a.s.shishkin@urfu.ru, shsf@planet-a.ru

It has been experimentally shown that a jet mill with an impact into an obstacle has a high degree of grinding and makes it possible to obtain finely dispersed oxide powders with an average of less than 1-2 microns. The obtained dependences of the fineness of the product on the number of impacts make it possible to calculate the circulation load during grinding in a closed cycle and quantify energy costs. The peculiarities of grinding zirconium dioxide, titanium dioxide and calcined alumina are given. Based on the kinetics of crushing from the number of impacts, a method for calculating a closed grinding cycle is proposed. Based on it, a pilot industrial plant has been created – a jet mill with an impact into an obstacle, operating in a closed cycle with a passing centrifugal classifier.

Keywords: jet mill, crushing of oxides, alumina, median particle size, degree of grinding, multiplicity of circulation

АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

В различных отраслях промышленности растет потребность в тонкодисперсных оксидах с размерами частиц менее 5 мкм. Одним из способов решения данной задачи является тонкое измельчение в струйных мельницах [1–6]. Существует большое многообразие конструкций струйных мельниц [7]. Как показывает опыт эксплуатации промышленных аппаратов, наиболее эффективными по удельным затратам энергии являются

струйные мельницы с ударом в преграду. Для них характерна высокая концентрация энергии в малом объеме взаимодействия высокоскоростной двухфазной струи с преградой. За счет большой скорости потока воздуха очень интенсивно протекает процесс охлаждения частиц, что позволяет измельчать термолабильные материалы, например, пек [8]. Некоторые материалы могут измельчаться до нужной кондиции за 1–2 удара. Однако высокопрочные и твердые материалы, такие как оксиды, измельчаются в замкнутом цикле с ис-

пользованием пневматических классификаторов. Классификатор отделяет по заданной границе разделения готовый тонкий продукт, а крупные частицы возвращает обратно в мельницу на доизмельчение. Вследствие этого, циркуляционная нагрузка по материалу может превышать исходное питание в 3–5 раз.

Чтобы рассчитать циркуляционную нагрузку, необходимо знать, как происходит разрушение частиц разного размера в результате однократного удара. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные по измельчению оксидов в результате удара струи о плоскую преграду.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Экспериментальная установка струйной мельницы с ударом в преграду для измельчения оксидов представлена на схеме (рис. 1) и фотографиях (рис. 2), и включает в себя: бункер исходного материала (1), эжектор с разгонной трубкой (2), помольную камеру (3), сменную плоскую преграду (4), патрубок отвода продукта (5), циклон (6) типа ЦН-15, циклон (7) тонкой очистки типа СДК-ЦН-33, клапан (8) регулировки давления сжатого воздуха перед соплом; ресивер (9), рукавный фильтр (10) для санитарной очистки

воздуха, клапан (11) для регулировки расхода воздуха, водокольцевой вакуум-насос (12) ВВН-12 для создания разрежения воздушного потока, манометр (13) для измерения избыточного давления сжатого воздуха перед соплом.

Конструктивные параметры мельницы следующие: диаметр разгонной трубки $D_r=11$ мм, диаметр критического сечения сверхзвукового сопла эжектора $d_c=5,5$ мм. Разгонная трубка изготовлена из корунда, а преграда изготовлена из пластин вольфрамокобальтового сплава. Поэтому при измельчении намола железа нет.

Расстояние от среза разгонной трубки до преграды 22 мм. Циклон первой стадии типа ЦН-15 имеет диаметр 100 мм, второй циклон типа СДК-ЦН-33 – 150 мм. Режимные параметры струйной мельницы при измельчении исследуемых оксидов поддерживались постоянными. Избыточное давление перед соплом $P_{из}=3,8$ атм. Производительность эжектора мельницы по твердому материалу $G_t=1,97$ кг/мин или 118,2 кг/ч.

Массовый расход сжатого воздуха можно определить по программе «Сопло-С» [9] или по зависимости Абрамовича Г.Н. [10]:

$$G = m\sigma_c \frac{p}{\sqrt{T}} \frac{F_k}{\sqrt{T}} = 0,0404 \cdot 0,891 \frac{486360 \cdot 2,376 \cdot 10^{-5}}{\sqrt{293,15}} = 0,0243 \text{ кг/с}, \quad (1)$$

где m – параметр зависящий от коэффициента адиабаты, для воздуха $m = 0,0404 \text{ м}^{-1} \cdot \text{с} \cdot \text{К}^{0,5}$ [5]; $\sigma_c=0,891$ – коэффициент потерь в сверхзвуковом коническом сопле; F_k – площадь критического

сечения конического сверхзвукового сопла, м^2 ; T^* – температура заторможенного сжатого газа в ресивере, К; p^* – абсолютное давление перед соплом, Па.

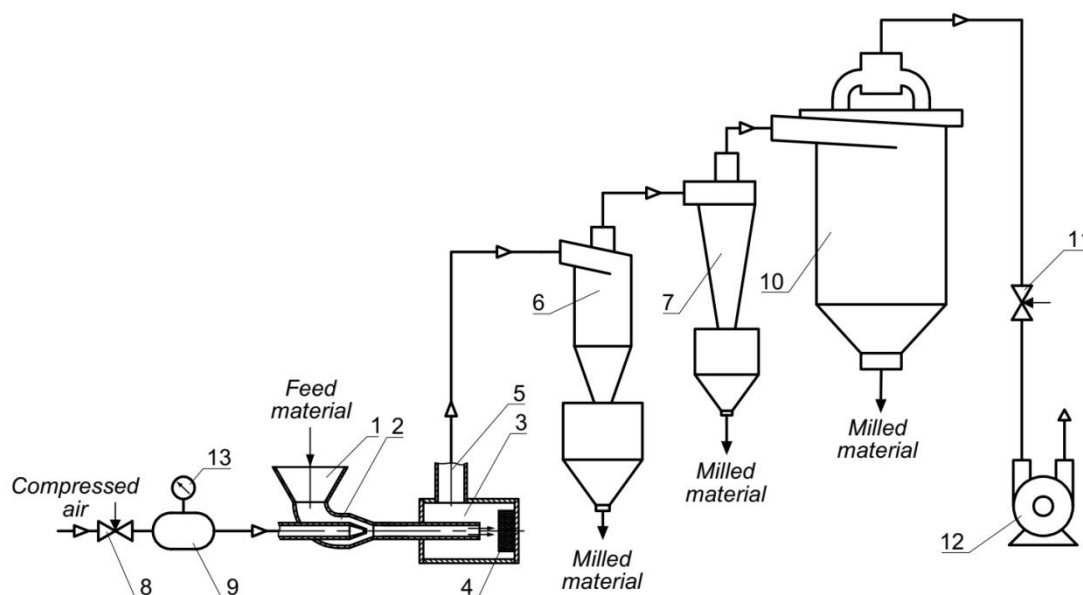


Рис. 1. Схема экспериментальной установки струйной мельницы с ударом в преграду
Fig. 1. Diagram of the experimental installation of a jet mill with impact into an obstacle

Для приведенного режима давление перед соплом составляет $p^*=486360$ Па и расход сжатого воздуха – $G=0,0243$ кг/с или $Q=1,13$ м³/мин при нормальных условиях (н. у.). Этому давлению и расходу соответствовала скорость воздушного потока на выходе из разгонной трубки $w=198$ м/с. Расходная концентрация материала составляет $\mu=1,75$ кг/м³. Таким образом, скорость воздушного потока ограничена, хотя данная конструкция позволяет увеличить скорость воздушного потока до $w=250$ м/с при увеличении избыточного давления до $P_{из}=5,2$ атм. Дальнейшее увеличение давления приводит к резкому уменьшению производительности эжектора по твердому материалу и к режиму запыления эжектора.

Потребляемую мощность поршневого компрессора можно оценить по формуле:

$$N = \frac{N_{из}}{\eta_{из} \cdot \eta_{м}} = \frac{GRT_1}{\eta_{из} \cdot \eta_{м}} \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (2)$$

где $N_{из}$ – теоретическая мощность изотермического сжатия, Вт; p_1, p_2 – давление во всасывающем и нагнетательном патрубках соответственно, Па; G – массовый расход воздуха, кг/с; R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К); T_1 – температура на входе в компрессор, К; $\eta_{из}, \eta_{м}$ – изотермический и механический КПД соответственно.



Рис. 2. Фотография экспериментальной установки струйной мельницы с ударом в преграду

Fig. 2. Photo of the experimental installation of a jet mill with impact into an obstacle

При условиях измельчения при избыточном давлении $P_{из}=3,8$ атм, массовом расходе сжатого воздуха $G=0,0243$ кг/с и суммарном КПД=0,65 потребляемая мощность компрессора по зависимости (2) составит $N=4600$ Вт. При этом удельные затраты энергии для одного удара составят $N_y=38,9$ кВт/т, а для трех ударов $N_{3y}=116,8$ кВт/т.

Методика проведения эксперимента была следующая. Одинаковая навеска исследуемого оксида подвергалась измельчению одним ударом. Затем измельченный материал повторно подвер-

гался удару и т.д. Измельчение осуществлялось 3–5 раз. После каждого удара определялась масса материала, уловленного в циклонах Ц1 и Ц2. Определялся гранулометрический состав исходного и измельченного после каждого удара материала. Гранулометрический состав определяется на лазерном анализаторе размеров частиц *Shimadzu SALD-2201*. На основании гранулометрического анализа проб определялась степень измельчения по зависимости

$$I = \frac{d_{50и}}{d_{50п}}, \quad (3)$$

где $d_{50и}$ – медианный размер частиц исходного материала, мкм; $d_{50п}$ – медианный размер частиц после n ударов, мкм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В табл. 1–3 представлены результаты измельчения соответственно оксида циркония, оксида титана и глинозема. В таблицах обозначены размеры частиц $d_5, d_{10}, \dots, d_{50}, \dots, d_{95}$, содержание которых менее соответственно 5, 10, ... 50, ... 95 %. Медианный размер частиц имеет обозначение d_{50} . Как следует из представленных таблиц, при измельчении диоксида циркония в результате трех ударов медианный размер частиц уменьшился с $d_{50}=27,314$ мкм до $d_{50}=0,829$ мкм. При этом максимальный размер частиц, содержание которых 95 % уменьшился с размера $d_{95}=372,890$ мкм до $d_{95}=4,766$ мкм, а степень измельчения, рассчитанная по зависимости (3) для трех ударов, составила $I_3=32,95$. При измельчении диоксида титана в результате трех ударов медианный размер частиц уменьшился с $d_{50}=20,614$ мкм до $d_{50}=1,548$ мкм. При этом максимальный размер частиц, содержание которых 95 % уменьшился с размера $d_{95}=44,118$ мкм до $d_{95}=6,675$ мкм, а степень измельчения, рассчитанная по зависимости (3) для трех ударов, составила $I_3=13,32$.

При измельчении глинозема в результате трех ударов медианный размер частиц уменьшился с $d_{50}=73,268$ мкм до $d_{50}=15,301$ мкм. В результате пяти ударов медианный размер частиц уменьшился с $d_{50}=73,268$ мкм до $d_{50}=11,681$ мкм. При этом максимальный размер частиц, содержание которых 95 % уменьшился с размера $d_{95}=150,822$ мкм до $d_{95}=9,900$ мкм, а степень измельчения, рассчитанная по зависимости (3) для трех ударов, составила $I_3=14,16$, а для пяти ударов $I_5=19,09$. При измельчении кальцинированного глинозема марки ГНК с содержанием $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ фазы не менее 90% степень измельчения для трех ударов $I_3=14,16$ близка к степени измельчения диоксида титана $I_3=13,32$.

Таблица 1

Изменение гранулометрического состава от числа ударов двухфазной струи в преграду при измельчении диоксида циркония

Table 1. The change in the granulometric composition from the number of impacts of a two-phase jet into an obstacle during the grinding of zirconium dioxide

n	d ₅ , мкм	d ₁₀ , мкм	d ₂₀ , мкм	d ₂₅ , мкм	d ₅₀ , мкм	d ₇₅ , мкм	d ₈₀ , мкм	d ₉₀ , мкм	d ₉₅ , мкм
исходный материал									
0	0,731	1,219	4,419	5,324	27,314	117,316	163,082	277,334	372,890
измельченный материал в циклоне Ц1									
1	0,322	0,415	0,637	0,783	2,282	13,983	19,198	28,751	35,983
2	0,349	0,406	0,515	0,575	1,191	4,771	13,215	26,243	32,026
3	0,335	0,387	0,473	0,829	0,829	1,806	2,179	3,434	4,766
измельченный материал в циклоне Ц2									
3	0,338	0,384	0,458	0,494	0,732	1,479	1,800	2,641	3,277

Таблица 2

Изменение гранулометрического состава от числа ударов двухфазной струи в преграду при измельчении глинозема

Table 2. The change in the granulometric composition from the number of impacts of a two-phase jet into an obstacle during the grinding of alumina

N _y	d ₅ , мкм	d ₁₀ , мкм	d ₂₀ , мкм	d ₂₅ , мкм	d ₅₀ , мкм	d ₇₅ , мкм	d ₈₀ , мкм	d ₉₀ , мкм	d ₉₅ , мкм
исходный материал									
0	7,070	9,192	12,630	13,940	20,614	28,915	31,493	38,435	44,118
измельченный материал в циклоне Ц1									
3	0,365	0,425	0,558	0,643	1,548	3,324	3,882	5,410	6,675
измельченный материал в циклоне Ц2									
3	0,386	0,466	0,637	0,750	1,701	3,438	4,000	5,612	7,002

Таблица 3

Изменение гранулометрического состава от числа ударов двухфазной струи в преграду при измельчении диоксида титана

Table 3. The change in the granulometric composition from the number of impacts of a two-phase jet into an obstacle during the grinding of titanium dioxide

N _y	d ₅ , мкм	d ₁₀ , мкм	d ₂₀ , мкм	d ₂₅ , мкм	d ₅₀ , мкм	d ₇₅ , мкм	d ₈₀ , мкм	d ₉₀ , мкм	d ₉₅ , мкм
исходный материал									
0	30,008	36,504	46,201	50,600	73,268	102,402	110,931	133,321	150,822
измельченный материал в циклоне Ц1									
3	1,06	1,933	3,989	5,176	15,301	32,489	39,108	67,056	95,939
5	0,875	1,551	3,033	3,839	11,681	28,648	35,075	8,405	9,900
измельченный материал в циклоне Ц2									
5	0,611	0,761	1,044	1,187	2,084	3,481	3,880	5,004	5,935

Следует также отметить, что во втором циклоне выход тонкого материала растет с увеличением числа ударов, и, например, для глинозема составляет 21,2 %. Причем тонкость продукта во втором циклоне, меньше $d_{50}=2,084$ мкм и $d_{95}=5,935$ мкм. На рис. 3 приведены графики частных остатков диоксида циркония в зависимости от числа ударов. На рисунке приняты следующие обозначения g_1 – частные остатки исходного материала; g_1 , g_2 , g_3 – частные остатки соответственно после первого, второго и третьего удара; g_2 – частные остатки материала во втором циклоне.

Приведенные данные свидетельствуют, что степень измельчения при одинаковом режиме измельчения определяется свойствами материала – его прочностью и исходной крупностью. Максимальная степень измельчения в результате трех ударов $I_3=32,95$ получилась для диоксида циркония, который в отличие от глинозема был получен химическим путем. Таким образом, если стоит задача измельчения до заданной тонкости частиц, то можно опытным путем определить необходимое число ударов, которое будет соответствовать циркуляционной нагрузке.

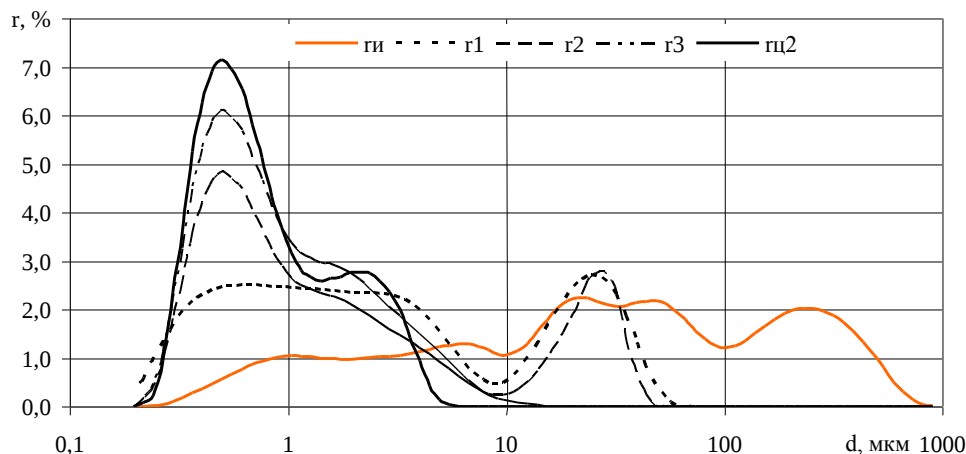


Рис. 3. Изменение частных остатков от числа ударов
Fig. 3. The change in partial balances from the number of strokes

Далее все конструктивные и режимные параметры мельницы, включая эжектор, сопло, разгонную трубку и классификатор замкнутого цикла измельчения должны быть рассчитаны с учетом циркуляционной нагрузки. При этом может быть использована методика изложенная, например, в [7, 10]. С учетом такого подхода была разработана опытно-промышленная установка замкнутого цикла измельчения на базе струйной мельницы с ударом в преграду для измельчения фритты производительностью 150 кг/ч. На рис. 4 представлена схема промышленной установки струйной мельницы с габаритными размерами. На рис. 5 приведена ее фотография.

В настоящее время распространение получили так называемые струйные мельницы кипящего слоя. Измельчение в данных мельницах осуществляется при истечении сверхзвуковых струй воздуха в слой дисперсного материала. Однако скорость воздушной струи, вытекающей из сверхзвукового сопла в слой материала, очень быстро падает, и частицы материала не успевают разогнаться до высоких скоростей. Поэтому измельчение в данных мельницах происходит в основном за счет трения слоев частиц в области взаимодействия струй. Удельные затраты энергии в таких мельницах достигают 600 кВт/т [11-14].

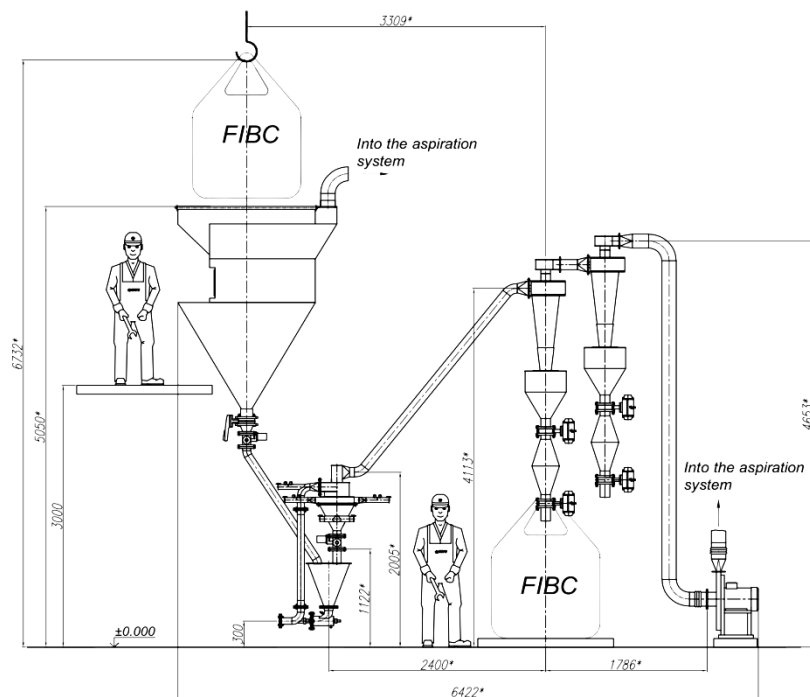


Рис. 4. Схема промышленной установки струйной мельницы с габаритными размерами
Fig. 4. The diagram of an industrial jet mill unit with overall dimensions



Рис. 5. Опытно промышленная установка эжекторной струйной мельницы с ударом в преграду производительностью 150 кг/ч
Fig. 5. Pilot industrial installation of an ejector jet mill with an impact into an obstacle with a capacity of 150 kg/h

В струйных эжекторных мельницах с ударом в преграду частицы разгоняются в разгонной трубке до скоростей 150–200 м/с и, при ударе в преграду, происходит их эффективное измельчение. Полученные в настоящей работе экспериментальные данные, показывают, что у мельниц с ударом в преграду удельные затраты энергии при измельчении оксидов до медианного размера 1–4 мкм не превышают 120 кВт/т. Таким образом, струйные мельницы с ударом в преграду позво-

ляют получать тонкие оксиды с медианным размером частиц 1–4 мкм. Показана возможность создания замкнутого цикла измельчения на примере опытно промышленной установки производительностью 150 кг/ч.

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. Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф. Повышение эффективности измельчения в эжекторной струйной мельнице. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2022. № 1. С. 54-60. DOI: 10.6060/snt.20226901.0007.
2. Постникова И.В., Воробьев С.В., Козлов А.М., Колобов М.Ю. Сепарация продуктов избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды. *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2023. № 4. С. 96-102. DOI: 10.6060/snt.20237604.00013.
3. Блиничев В.Н., Лабути 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. 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.
4. 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.202265 01.6357j.
5. Воробьев С.В., Колобов М.Ю., Постникова И.В., Козлов А.М. Каскадный струйный измельчитель для избирательного измельчения апатит-нефелиновой руды. *Российский химический журнал*. 2023. Т.LXVII. №2. С. 92-96.

REFERENCES

1. Barakovskikh D.S., Shishkin S.F. Improving the efficiency of grinding in an ejector jet mill. *Modern high technology. Regional application*. 2022. N 1. P. 54-60. DOI: 10.6060/snt.20226901.0007.
2. Postnikova I.V., Vorobyov S.V., Kozlov A.M., Kolobov M.Yu. Separation of products of selective grinding of apatite-nepheline ore. *Modern high technology. Regional application*. 2023. N 4. P. 96-102. DOI: 10.6060/snt.20237604.00013.
3. 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., Natareev S.V., Nevinityn V.Yu., Ponomareva Yu, N., Postnikova I.V., Sakharov S.E., Chagin O.V. Problems of developing energy- and resource-saving processes, reactor systems and intensive equipment, modeling and optimal control. *ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2023. T. 66. Issue. 7. P. 185-202. DOI: 10.6060/ivkkt.20236607.6845j.
4. Blinichev V.N., Postnikova I.V., Vorobyev S.V., Kolobov M.Yu., Zueva G.A. Intensification of the process of destruction of polycomponent materials. *ChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 1. P. 109-115. DOI:10.6060/ivkkt.20226501.6357j.
5. Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M. Cascade jet shredder for selective crushing of apatite-nepheline ore. *Ros. Khim. Zh.* 2023. T.LXVII. N 2. P. 92-96. DOI:10.6060/rcj.2023672.11
6. Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M. Developing Technology for the Destruction of Polycomponent Materials. *Russian Journal of General Chemistry*. 2024. V. 94, N 6. P. 1507-1511. DOI: 10.1134 S10703632 24060288

6. **Vorobyov S.V., Kolobov M.Yu., Postnikova I.V., Kozlov A.M.** Developing Technology for the Destruction of Polycrystalline Materials. *Russian Journal of General Chemistry*. 2024. V. 94, N 6. P. 1507-1511. DOI: 10.1134/S1070363224060288
7. **Бараковских Д.С., Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.** Технологии измельчения твердых дисперсных материалов: процессы и оборудование: учебник. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2025. 236 с. ISBN 978-5-7996-3975-4.
8. **Шишкин С.Ф., Бараковских Д.С.** Струйная мельница для измельчения пека. *Цветные металлы*. 2013. № 8. С. 37–40.
9. **Абрамович Г.Н.** Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1. 5-е изд. Москва: Наука, 1991. 600 с. ISBN 5-02-014015-5.
10. **Шишкин А.С., Шишкин С.Ф.** Примеры расчетов аэродинамических процессов переработки сыпучих материалов в Excel. Учебное электронное текстовое издание. Екатеринбург: Информационный портал УрФУ, 2016. 409 с.
11. **Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф.** Движение частиц в разгонной трубке струйной мельницы при малых концентрациях. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2016. № 4. С. 121–128.
12. **Бараковских Д.С., Шишкин С.Ф.** Движение двухфазного потока в разгонной трубке струйной мельницы. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*. 2017. № 5. С. 82–88.
13. **Kleiv R.A.** Value enhancement of olivine process dust through air classification. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2012. V. 19, Iss. 3. P. 185–191.
14. **Felk A.** Fine-Milling and Air Classification of Ceramic Materials by the Dry Method. *Glass and Ceramics*. 2014. V. 71, Iss. 3. P. 92–95.
7. **Barakovskikh D.S., Shishkin A.S., Shishkin S.F.** Grinding Technologies for Solid Dispersed Materials: Processes and Equipment. Yekaterinburg: Ural University Press, 2025. 236 p. ISBN 978-5-7996-3975-4.
8. **Shishkin S.F., Barakovskikh D.S.** Jet Mill for Pitch Grinding. *Nonferrous metals*. 2013. N 8. P. 37–40.
9. **Abramovich G.N.** Applied gas dynamics. In 2 hours. Part 1. 5th ed. Moscow: Nauka, 1991. 600 p. – ISBN 5-02-014015-5.
10. **Shishkin A.S., Shishkin S.F.** Examples of Calculations for Aerodynamic Processes in Bulk Material Processing Using Excel: Electronic Educational Text Edition. Yekaterinburg: Ural Federal University Information Portal, 2016. 409 p.
11. **Barakovskikh D.S., Shishkin S.F.** Particle Motion in the Acceleration Tube of a Jet Mill at Low Concentrations. *Bulletin of BSTU Named After V. G. Shukhov*. 2016. N 4. P. 121–128.
12. **Barakovskikh D.S., Shishkin S.F.** Two-Phase Flow Motion in the Acceleration Tube of a Jet Mill. *Bulletin of BSTU Named After V. G. Shukhov*. 2017. N 5. P. 82–88.
13. **Kleiv R.A.** Value enhancement of olivine process dust through air classification. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2012. V. 19, Iss. 3. P. 185–191.
14. **Felk A.** Fine-Milling and Air Classification of Ceramic Materials by the Dry Method. *Glass and Ceramics*. 2014. V. 71, Iss. 3. P. 92–95.

Поступила в редакцию(Received) 27.05.2025
Принята к опубликованию (Accepted) 29.06.2025