



Физико-механические свойства горных пород для их разделения во фрикционных сепараторах

А.И. Афанасьев¹, М.В. Архипов¹, В.В. Потапов¹, А.М. Кузнецов¹, Д.С. Корельский²✉

¹ Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

✉ dnk1984@mail.ru

Резюме: Процесс сепарации (разделения) горных пород на фракции опирается на различия в траекториях, скоростях или направлениях движения частиц. Ключевыми параметрами, определяющими разделение, являются коэффициенты трения при столкновении частиц с поверхностью. Различие в коэффициентах трения частиц разделяемой породы положено в основу принципа действия фрикционных сепараторов, повышение эффективности работы которых является актуальной задачей. В статье представлено исследование физико-механических свойств асбестосодержащих продуктов, изменение которых повышает эффективность работы фрикционных сепараторов в процессе сепарации. В рамках исследования применяются анализ и обобщение данных из научно-технической и патентной литературы, а также синтез полученной информации. Дополнительно используются методы физического и математического моделирования, проводятся экспериментальные исследования и осуществляется регрессионный анализ. Представлены данные экспериментальных замеров коэффициентов трения, восстановления (упругости) и мгновенного трения асбеста, перидотита, серпентинита и офита. С использованием программного обеспечения, основанного на модели равновесия действующих сил, выполнен численный эксперимент по анализу траекторий движения частиц асбеста и медно-цинковой руды. Результаты эксперимента показали, что увеличение кинетического коэффициента трения в 1,5 раза приводит к уменьшению дальности полета частиц асбеста для заданной высоты зоны сепарации (0,1 м) также в 1,5 раза. Это позволяет стабильно разделять эти материалы. Дальность полета горных пород, имеющих существенное различие в кинетических коэффициентах трения, пропорционально этому различию. При несущественной разнице в кинетических коэффициентах трения кусков горной массы их разделение должно проводиться с учетом коэффициента восстановления.

Ключевые слова: фрикционный сепаратор, горная порода, разделение горных пород, асбест, коэффициент трения, коэффициент восстановления, пневмотранспортные системы

Для цитирования: Афанасьев А.И., Архипов М.В., Потапов В.В., Кузнецов А.М., Корельский Д.С. Физико-механические свойства горных пород для их разделения во фрикционных сепараторах. *Горная промышленность*. 2026;(4S):40–47. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-40-47>

Physical and mechanical properties of rocks for their separation in friction separators

A.I. Afanasyev¹, M.V. Arkhipov¹, V.V. Potapov¹, A.M. Kuznetsov¹, D.S. Korelskiy²✉

¹ Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation

² Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russian Federation

✉ dnk1984@mail.ru

Abstract: The process of separating rock material into fractions is based on the differences in the paths, velocities, or directions of their particle travel. The key parameters controlling separation are the friction coefficients when particles collide with a surface. Differences in the friction coefficients of the particles in the rock material to be separated serve as the basis for operation of the friction separators, and improving their efficiency is a pressing challenge. This article presents a study of the physical and mechanical properties of asbestos-containing products, which changes increase the efficiency of the friction separators during the separation process. The study analyzes and generalizes data from scientific, technical, and patent literature, and synthesizes the information obtained. Additionally, physical and mathematical modeling methods are employed, experimental studies are conducted, and a regression analysis is performed. The article presents data from experimental measurements of the friction coefficients, recovery (elasticity), and instantaneous friction of asbestos, peridotite, serpentinite, and ophite. A numerical experiment was performed to analyze the travel paths of the asbestos and copper-zinc ore particles using a software based on an equilibrium model of the acting forces. The results of the experiment demonstrated that a 1.5-fold increase in the kinetic friction

coefficient leads to a 1.5-fold reduction in the travel range of asbestos particles for a given separation zone height (0.1 m). This allows for an efficient separation of these materials. The travel distance of the rock particles with a significant difference in their kinetic friction coefficients is proportional to that difference. When the difference in the kinetic friction coefficients of the rock fragments is insignificant, their separation needs to be done with account of their recovery coefficient.

Keywords: friction separator, rock, rock separation, asbestos, friction coefficient, recovery coefficient, transport systems

For citation: Afanasyev A.I., Arkhipov M.V., Potapov V.V., Kuznetsov A.M., Korelskiy D.S. Physical and mechanical properties of rocks for their separation in friction separators. *Russian Mining Industry*. 2026;(4S):40–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2026-4S-40-47>

Введение

Сепараторы с наклонной стальной плитой эффективно разделяют горные породы по их упругим свойствам. При ударе о плиту более упругие частицы отскакивают под большим углом и с большей скоростью, улетая дальше от края плиты. Менее упругие и хрупкие частицы, отражаясь под меньшим углом, остаются ближе к концу плиты и собираются отдельно. Ключевыми параметрами, определяющими это разделение, являются коэффициенты восстановления и мгновенного трения при столкновении с поверхностью. Динамика процесса разделения горных пород напрямую зависит от этих коэффициентов, которые количественно описывают упругое взаимодействие при падении [1–3]. Именно эти различия в упругости при центральном ударе используются в вибрационных сепараторах.

Альтернативный метод основан на сбрасывании частиц с определенной высоты на наклонно установленную плоскость, что позволяет эффективно использовать процесс ударного взаимодействия [4–6]. Существуют сепараторы с неподвижной разделительной плитой или несколькими плитами, расположенными ступенчато [7–9].

Процесс разделения по трению включает две основные стадии: сначала материал контактирует с поверхностью, что приводит к селективному изменению параметров движения частиц; затем частицы с определёнными характеристиками выделяются из общего потока. На второй стадии происходит отделение частиц, обладающих определёнными параметрами движения, от основной массы. Этот процесс сепарации опирается на различия в траекториях, скоростях или направлениях движения частиц и может быть реализован как на контактной поверхности, так и в условиях свободного падения. Для обеспечения индивидуального контакта каждой частицы с поверхностью требуется организация процесса в виде монослойного потока [10; 11].

Взаимодействие может осуществляться как с неподвижной, так и с подвижной (движущейся или вибрирующей) поверхностью [12; 13]. Следовательно, актуальной задачей является повышение эффективности фрикционных сепараторов, чья работа базируется на разнице в коэффициентах трения, включая восстановление и мгновенное трение [14; 15].

Результаты и их обсуждение

Коммерческий хризотил-асбест представляет собой смесь волокон разной длины и их скоплений. Крупные скопления с неповрежденными волокнами диаметром более 2 мм именуются «кусовым асбестом», а более мелкие, до 2 мм, – «иголками» [16; 17]. Хризотиловый асбест также классифицируется по длине волокон на восемь сортов (от 0 до 7) [18; 19]. На рис. 1 представлены характерные образцы

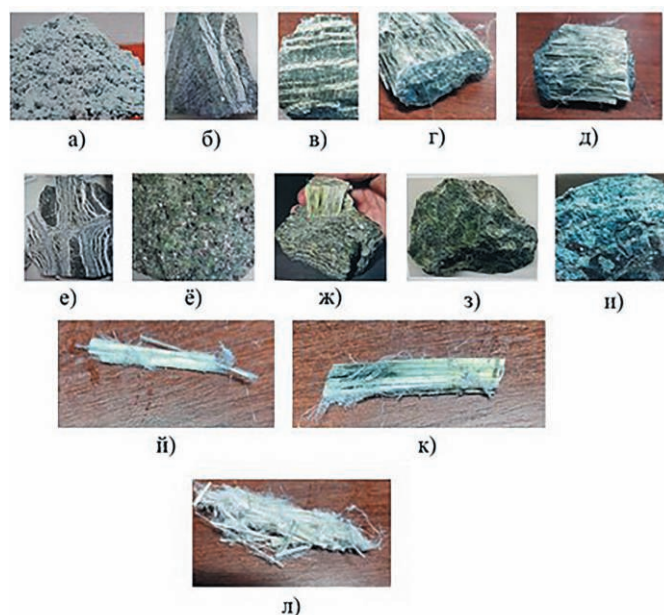


Рис. 1
Образцы асбестосодержащих продуктов:
а – асбестовое волокно;
б – слегка распушенный асбест; в – мелкий прожил с офитом; г – отороченная жила на офите; д – отороченная жила на офите (вид с другой стороны); е – крупная сетка; ё – серпентинит с черным офитом; ж – отороченная жила; з – серпентинит; и – перидотит; й – игла; к – пешка; л – распушенный асбест

Fig. 1
Samples of asbestos-containing products:
a – asbestos fiber;
б – slightly fluffed asbestos;
в – small vein with ophite;
г – edged vein on ophite;
д – edged vein on ophite (view from the other side); е – coarse mesh;
ё – serpentine with black ophite; ж – edged vein;
з – serpentine;
и – peridotite;
й – needle;
к – pawn; л – fluffed asbestos

асбестосодержащих продуктов, которые были исследованы по комплексу физико-механических характеристик.

Коэффициент трения рассчитывается по следующей формуле:

$$f = \operatorname{tg} \alpha, \quad (1)$$

где α – угол наклона плоскости, град.

Скольжение частицы по наклонной плоскости инициируется при превышении определенного порога. Этот порог достигается, когда угол наклона плоскости превосходит угол трения φ , определяемый свойствами частицы и материала плоскости. Математически это условие выражается как: $\alpha \geq \varphi$.



Кинетический коэффициент трения, описывающий сопротивление при поступательном движении, вычисляется путем определения угла наклона скользящей поверхности и замера времени, затраченного частицей на преодоление заданного участка траектории [20–22]. Формула для расчета этого коэффициента выглядит следующим образом:

$$f = \operatorname{tg} \alpha - (2S/gt^2 \cos \alpha), \quad (2)$$

где α – угол наклона плоскости, град; S – длина участка, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время прохождения частицей участка S , с.

Упругость частиц количественно выражается коэффициентом восстановления k . Он равен отношению нормальных скоростей частицы, измеренных непосредственно перед столкновением и сразу после него [23–25]:

$$k = \frac{U \cos \alpha_{\text{от}}}{V_{\text{п}} \cos \alpha_{\text{п}}}, \quad (3)$$

где U – скорость отражения после удара частицы о плоскость, м/с; $V_{\text{п}}$ – скорость падения частицы, м/с; $\alpha_{\text{п}}$ – угол падения; $\alpha_{\text{от}}$ – угол отражения.

Для определения коэффициента восстановления скорости применяется метод, основанный на падении частиц на наклонную поверхность. Измеряется расстояние, которое проходят частицы после отскока, при варьировании угла наклона плиты. При этом угол падения совпадает с углом наклона плиты $\alpha_{\text{п}} = \gamma$, а угол отражения обозначается как $\alpha_{\text{от}} = 45^\circ - \gamma$. Коэффициент восстановления вычисляется по следующей формуле:

$$k = \frac{\sqrt{l_{\text{max}} g \cos(45^\circ - \gamma)}}{\sqrt{2hg \cos \gamma}}, \quad (4)$$

где h – высота сбрасывания частиц; l_{max} – максимальная горизонтальная дальность полета частицы; g – ускорение силы тяжести.

Данные экспериментальных замеров коэффициентов трения, восстановления и мгновенного трения представлены в табл. 1 и 2. Эти результаты наглядно демонстрируют существенные отличия указанных параметров в зависимости от типа исследуемого минерала.

Значение коэффициента трения при движении (кинетического) примерно на 15% ниже, чем при отсутствии

движения (статического) [26]. При оценке возможности разделения асбестосодержащих материалов на основе коэффициента трения именно кинетический коэффициент является ключевым параметром [27]. Коэффициент трения в момент начала движения определяется нами с использованием следующей формулы:

$$\lambda = 1 - k \frac{\operatorname{tg} \alpha_{\text{от}}}{\operatorname{tg} \alpha_{\text{п}}}. \quad (5)$$

Таблица 2
Параметры, характеризующие взаимодействие: коэффициент кинетического трения, коэффициент восстановления (упругости) и коэффициент мгновенного трения

Table 2
Parameters characterizing the interaction: coefficient of kinetic friction, coefficient of recovery (elasticity) and coefficient of instantaneous friction

Породные частицы крупностью, мм	f	k	λ
+40	0,212	0,440	0,656
–40+35	0,23	0,397	0,690
–35+20	0,223	0,414	0,677
–20+12	0,238	0,318	0,702
–12+8	0,234	0,390	0,695
–8+6	0,213	0,440	0,656
–6+4	0,226	0,408	0,680
–4+2,5	0,224	0,414	0,677
–2,5+1,2	0,209	0,449	0,649
–1,2+0,63	0,207	0,569	0,637
Нераспушенные агрегаты асбеста	0,243	0,388	0,697
Частично распушенные агрегаты асбеста	0,408	0,249	0,884
Полностью распушенное волокно		0	–

Анализ коэффициентов трения для частиц разного размера и формы показал (рис. 2), что для крупных частиц их морфология не является определяющим фактором. Однако при уменьшении размера наблюдается дифференцированное поведение: лещадные частицы демонстрируют увеличение коэффициента трения, в то время как кубические

Таблица 1
Данные о значениях коэффициентов статического $f_{\text{ст}}$ и кинетического $f_{\text{к}}$ трения, характеризующих взаимодействие частиц асбеста с вмещающей породой

Table 1
Data on the values of the coefficients of static ($f_{\text{ст}}$) and kinetic ($f_{\text{к}}$) friction, characterizing the interaction of the asbestos particles with the host rock

Материал	Крупность, мм	Средние значения коэффициентов трения покоя		Время движения куска, с	Средние значения коэффициентов трения движения	
		$f_{\text{ст}}$	Коэффициент вариации, %		$f_{\text{к}}$	Коэффициент вариации, %
1	2	4	5	6	7	8
Асбест	13	0,55	18–47	1,19	0,45	45
	6	0,57		1,23	0,48	38
	3	0,75		1,27	0,62	36
	1,4	0,79		1,25	0,61	14
Перидотит	25–1,4	0,50–0,59	23–60	0,93–1,33	0,37–0,47	15–60
Серпентинит	25–1,4	0,49–0,52	22–30	0,86–1,23	0,29–0,40	13–25
Офит	25–1,4	0,49–0,59	19–47	0,93–1,35	0,41–0,49	13–20

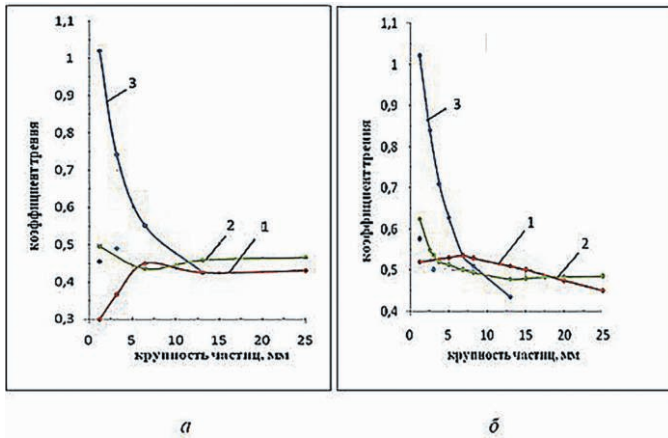


Рис. 2
Зависимость кинетического коэффициента трения от размера частиц для различных материалов при прохождении через мелкую сетку:
а – трение о стальную поверхность:
1 – серпентинит,
2 – перидотит,
3 – асбест;
б – трение о резиновую поверхность:
1 – перидотит,
2 – серпентинит,
3 – асбест

Fig. 2
Dependence of the kinetic coefficient of friction on the particle size for various materials passing through a fine mesh:
а – friction against a steel surface:
1 – serpentinite,
2 – peridotite,
3 – asbestos;
б – friction against a rubber surface:
1 – peridotite,
2 – serpentinite,
3 – asbestos

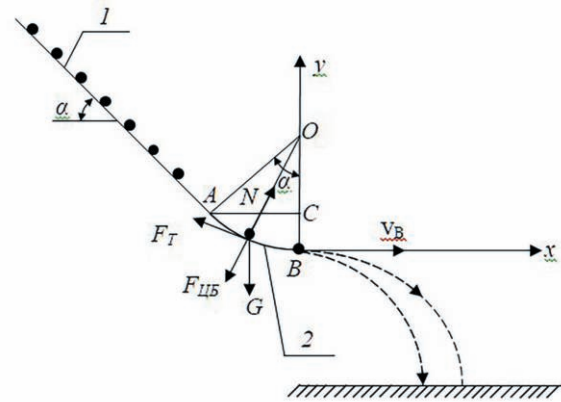


Рис. 3
Схема сил действующих на кусок горной породы:
1 – наклонная плоскость;
2 – криволинейный трамплин;
 α – угол наклона наклонной плоскости;
 r – радиус ($AO = OB = r$) трамплина, м;
 $CB = r(1 - \cos \alpha)$;
 F_T – сила трения, Н;
 $F_{цб}$ – центробежная сила, Н;
 G – сила тяжести, Н;
 N – нормальная реакция трамплина, Н

Fig. 3
A diagram of the forces acting on a piece of rock:
1 – inclined plane,
2 – curved launching ramp,
 α – angle of the inclined plane,
 r – radius ($AO = OB = r$) of the launching ramp, m;
 $CB = r(1 - \cos \alpha)$;
 F_T – friction force, N;
 $F_{цб}$ – centrifugal force, N;
 G – gravity force, N;
 N – normal reaction of the launching ramp, N

частицы благодаря своей способности к перекачиванию показывают его снижение. Следует отметить, что кинетический коэффициент трения, как правило, уступает статическому примерно на 15% [28–30].

При разделении материала будет полностью использовано различие отдельных кусков в коэффициентах трения [31–33]. На рис. 3 показана схема сил, действующих на кусок горной породы, движущийся по криволинейному трамплину разделительного аппарата.

Используя закон сохранения энергии, определим кинетическую энергию куска в точке В:

$$E_B = E_A - E_{тр} + E_{пн} \quad (6)$$

где E_A – кинетическая энергия куска в точке А, Дж; $E_{пн}$ – потенциальная энергия куска в точке А, Дж; $E_{тр}$ – потери энергии на трение при движении куска по трамплину, Дж.

Полная энергия куска в точке А равна:

$$E_A = \frac{mv_A^2}{2} + mgr(1 - \cos \alpha), \quad (7)$$

где m – масса куска, кг; α – угол дуги трамплина; g – ускорение свободного падения, м/с².

Кинетическая энергия куска в точке В:

$$E_B = \frac{mv_B^2}{2}.$$

(Центробежная сила существенно больше силы тяжести, поэтому потери энергии на трение при движении куска по трамплину с приемлемой для инженерных расчетов точностью может быть определена из формулы:

$$A_{TP} = 0,5mfr\alpha \left[\frac{v_A^2}{r} + \frac{v_B^2}{r} + g(1 + \cos \alpha) \right], \quad (9)$$

где f – кинетический коэффициент трения куска горной породы о поверхность трамплина.

Скорость кусков при сходе их с трамплина можно без существенной погрешности определять из формулы:

$$v_B = \sqrt{\frac{v_A^2 + 2gr(1 - \cos \alpha) - f\alpha[v_A^2 + rg(1 + \cos \alpha)]}{1 + f\alpha}}. \quad (10)$$

Скорость куска горной породы в точке А находится из формулы:

$$V_a = [2Lg(\sin \alpha - f \cos \alpha)]^{0.5}, \quad (11)$$

где L – длина наклонной плоскости, м; α – угол наклона разгонной плоскости (равный углу дуги трамплина), град

Потенциальная энергия (отсчет производится от уровня точки В куска в точке А, Дж:

$$E_n = mgr(1 - \cos \alpha). \quad (12)$$

Анализ формул (6)–(12) показал, что скорость кусков при сходе их с трамплина можно без существенной погрешности определять из формулы:

$$V_B = V_a \left[\frac{(1 - f \cdot \alpha)}{(1 + f \cdot \alpha)} \right]^{0.5}. \quad (13)$$

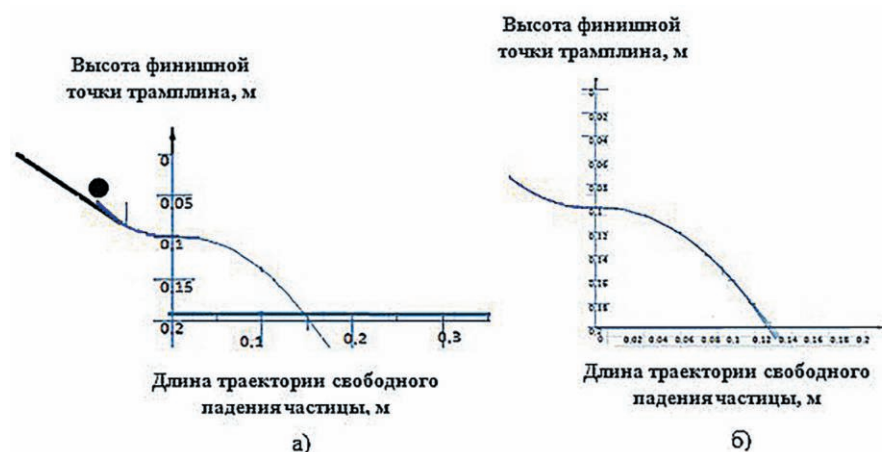


Рис. 4.
Анализ траекторий движения частиц асбеста и медно-цинковой руды:
а – траектория движения куска асбеста, $f = 0,45–0,61$;
б – траектория движения куска серпентинита, $f = 0,29–0,4$

Fig. 4
Analysis of the travel paths of asbestos and copper-zinc ore particles:
а – a travel path of a piece of asbestos, $f = 0.45–0.61$;
б – a travel path of a piece of serpentine, $f = 0.29–0.4$

Анализ траекторий движения частиц асбеста и медно-цинковой руды, представленных на рис. 4, был выполнен с использованием программного обеспечения, основанного на модели равновесия действующих сил. На рис. 4 видна существенная разница в дальности полета частиц асбеста (7–9 см) и частиц серпентинита (13–14 см).

Заключение

Результаты численного эксперимента (см. рис. 4) показывают, что увеличение кинетического коэффициента трения в 1,5 раза приводит к уменьшению дальности полета частиц асбеста для заданной высоты зоны сепарации (0,1 м) также

в 1,5 раза. Это позволяет стабильно разделять эти материалы. Дальность полета горных пород, имеющих существенное различие в кинетических коэффициентах трения, пропорционально этому различию. При незначительной разнице в кинетических коэффициентах трения кусков горной массы их разделение должно проводиться с учетом коэффициента восстановления, т.е. в две стадии.

Вклад авторов

А.И. Афанасьев – экспериментальное определение зависимости кинетического коэффициента трения от размера частиц для руд различной текстуры (мелко- и крупнозернистые) и структуры (включая отороченные жилы после просеивания через мелкую сетку).

М.В. Архипов – построение модели силового воздействия на фрагмент горной породы. На основе разработанной модели выполнены расчеты, подтверждающие применимость формулы (13) для определения скорости отрыва кусков от трамплина с допустимой погрешностью. Дополнительно проведен эксперимент по визуализации траекторий движения частиц асбеста и медно-цинковой руды.

В.В. Потапов – проведение всестороннего анализа экспериментальных данных и последующее графическое представление корреляции между кинетическим коэффициентом трения и размером частиц для различных материалов, просеянных через мелкоячеистую сетку. Выполнение анализа результатов эксперимента и построение графических представлений, демонстрирующих пути перемещения частиц асбеста и медно-цинковой руды.

А.М. Кузнецов – проведены анализ и последующая классификация асбестосодержащих продуктов, чьи физико-механические характеристики были всесторонне изучены.

Д.С. Корельский – верификация полученных данных и результатов исследований.

Author's Contribution

Anatoliy I. Afanasyev – experimental determination of the dependence of the kinetic friction coefficient on the particle size for ores of different textures (fine- and coarse-grained) and structures (including edged veins upon screening with a fine mesh).

Maxim V. Arkhipov – development of a model of the force acting on a rock fragment. Calculations were performed based on the developed model that confirm applicability of Formula 13 for determining the velocity at which fragments are ejected from the launching ramp with an acceptable margin of error. Additionally, an experiment was conducted to visualize the travel paths of asbestos and copper-zinc ore particles.

Vladimir V. Potapov – comprehensive analysis of the experimental data and subsequently plotting the correlation between the kinetic coefficient of friction and the particle size for various materials sieved through a fine-mesh screen. Analysis of the experimental results and creation of graphical materials demonstrating the travel paths of asbestos and copper-zinc ore particles.

Andrey M. Kuznetsov – analysis and subsequent classification of the asbestos-containing products, which physical and mechanical properties were comprehensively studied.

Denis S. Korelskiy – verification of the obtained data and research results.



Список литературы / References

1. Жабко А.В. Теоретические и экспериментальные аспекты пластического деформирования и разрушения горных пород. *Известия Уральского государственного горного университета*. 2018;(1):68–79. Режим доступа: <https://iuggu.ru/download/2018-1-Jabko.pdf> (дата обращения: 19.04.2026).
Zhabko A.V. Theoretical and experimental aspects of plastic deformation and destruction of rocks. *News of the Ural State Mining University*. 2018;(1):68–79. (In Russ.) Available at: <https://iuggu.ru/download/2018-1-Jabko.pdf> (accessed: 19.04.2026).
2. Линник Ю.Н., Линник В.Ю. Взаимосвязь показателя дробимости горных пород при ударном приложении нагрузки с физико-механическими свойствами горных пород. *Уголь*. 2025;(3):121–125. Режим доступа: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2503121.pdf> (дата обращения: 19.04.2026).
Linnik Yu.N., Linnik V.Yu. Relationship of rock crushability index under impact loading with physical and mechanical properties of rocks. *Ugol'*. 2025;(3):121–125. (In Russ.) Available at: <https://ugolinfo.ru/artpdf/RU2503121.pdf> (accessed: 19.04.2026).
3. Фалько А.Л., Фалько А.Л. Сепарация пищевых смесей с мелкодисперсными фракциями. *Современная наука и инновации*. 2019;(4):165–172. Режим доступа: <https://msi.elpub.ru/jour/article/view/160> (дата обращения: 19.04.2026).
Falko A.L., Falko A.L. The separation of food mixtures with finely divided fractions. *Modern Science and Innovations*. 2019;(4):165–172. (In Russ.) Available at: <https://msi.elpub.ru/jour/article/view/160> (accessed: 19.04.2026).
4. Сирота Д.Ю., Бедарев К.Р. Способ определения основных механических характеристик горных пород в натуральных условиях. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2024;(1):73–81. <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2024-1-73-81>
Sirota D.Yu., Bedarev K.R. The method for determining basic mechanical characteristics of rocks in natural conditions. *Bulletin of the Kuzbass State Technical University*. 2024;(1):73–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1999-4125-2024-1-73-81>
5. Пугачёв В.В., Петько В.Г., Шахов В.А., Рахимжанова И.А., Пушко В.А., Байков А.С. Методика и результаты исследования щелевого сепаратора сыпучих материалов. *Аграрный научный журнал*. 2024;(5):137–146. <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i5pp137-146>
Pugachev V.V., Petko V.G., Shakhov V.A., Rakhimzhanova I.A., Pushko V.A., Baikov A.S. Method and research results of a slot separator for bulk materials. *Agrarian Scientific Journal*. 2024;(5):137–146. (In Russ.) <https://doi.org/10.28983/asj.y2024i5pp137-146>
6. Жиров Д.К., Королева М.Р. Математическое исследование движения сыпучих материалов в ударно-отражательном измельчителе. *Химическая физика и мезоскопия*. 2016;18(3):361–369. Режим доступа: <https://www.mathnet.ru/rus/chphm287> (дата обращения: 19.04.2026).
Zhiron D.K., Koroleva M.R. Mathematical investigation of granular material movement at the impact mill. *Chemical Physics and Mesoscopics*. 2016;18(3):361–369. (In Russ.) Available at: <https://www.mathnet.ru/rus/chphm287> (accessed: 19.04.2026).
7. Кухтина П.А. Извлечение ценных компонентов из золотшлакового сырья с использованием магнитной сепарации. В кн.: *Моя специальность: тезисы докладов конкурса научных работ обучающихся, г. Санкт-Петербург, 15–17 октября 2025 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II; 2026. С. 184–185.
8. Бондарев А.В., Шванкин М.В., Василенко Т.А., Прекин Е.А., Мороз Д.И., Спорный А.И. Особенности деформаций и разрушений подстилающих пород газоносного пласта с попутным газовыделением при его разработке. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(5):124–138. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_124-138.pdf (дата обращения: 19.04.2026).
Bondarev A.V., Shvankin M.V., Vasilenko T.A., Prekin E.A., Moroz D.I., Spornyi A.I. Features of deformations and fractures of the underlying rocks of a gas-bearing reservoir with associated gas release during its development. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(5):124–138. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_124-138.pdf (accessed: 19.04.2026).
9. Королев Н.А. Инструмент оценки технического состояния электротехнических горнодобывающих комплексов на основе диагностической кривой в узлах нагрузки. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2025;(11-1):166–182. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/166.pdf> (дата обращения: 19.04.2026).
Korolev N.A. Ensuring safety and energy efficiency of electrical mining complexes based on the diagnostic curve in load nodes. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2025;(11-1):166–182. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2025/11-1/166.pdf> (accessed: 19.04.2026).
10. Алтынников Н.А., Плащинский В.А., Иванов С.Л. Классификация футеровок шаровых барабанных мельниц. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2026;(5):5–19. Режим доступа: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_5-19.pdf (дата обращения: 19.04.2026).
Altynnikov N.A., Plashchinsky V.A., Ivanov S.L. Classification of ball drum mill lining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2026;(5):5–19. (In Russ.) Available at: https://giab-online.ru/files/Data/2026/5/05_2026_5-19.pdf (accessed: 19.04.2026).
11. Кусков В.Б., Ильин Е.С. Влияние углов конусности фильер, количества связующего и его вида на прочностные характеристики экструзионных брикетов. *Черные металлы*. 2025;(1):4–9. <https://doi.org/10.17580/chm.2025.01.01>
Kuskov V.B., Iliin E.S. Effect of die taper angles, binder amount and type on strength characteristics of extrusion briquettes. *Chernye Metally*. 2025;(1):4–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.17580/chm.2025.01.01>



12. Опалев А.С., Алексеева С.А. Методическое обоснование выбора оптимальных режимов работы оборудования схемы стадийного вывода концентрата при обогащении железных руд. *Записки Горного института*. 2022;256:593–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>
Opalev A.S., Alekseeva S.A. Methodological substantiation of the choice for optimal modes of equipment operation during the stage-wise concentrate removal in iron ores beneficiation. *Journal of Mining Institute*. 2022;256:593–602. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.80>
13. Холодильов А.Н., Истомин Р.С., Кириленко В.И. Совершенствование метода изготовления эквивалентных материалов для моделирования нелинейных геомеханических процессов при подземной разработке полезных ископаемых. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2024;(10):108–122. Режим доступа: <https://giab-online.ru/files/Data/2024/10/Kholodilov-108-122.pdf> (дата обращения: 07.02.2026).
Kholodilov A.N., Istomin R.S., Kirilenko V.I. Improvement technique for manufacturing equivalent materials for modeling nonlinear geomechanical processes in underground mineral mining. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2024;(10):108–122. (In Russ.) Available at: <https://giab-online.ru/files/Data/2024/10/Kholodilov-108-122.pdf> (accessed: 07.02.2026).
14. Лутов Д.А. Пример рационального подбора пар трения механизма. В кн.: Максаров В.В. (ред.) *Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2021. Сб. тезисов 8-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 22–23 апреля 2021 г.* СПб.: Санкт-Петербургский горный университет; 2021. С. 50–54.
15. Пашкевич М.А., Куликова Ю.А. Мониторинг и оценка негативного воздействия техногенных массивов минерально-сырьевого комплекса. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2023;(9-1):231–247. https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_231
Pashkevich M.A., Kulikova Yu.A. Monitoring and assessment of the negative impact of technogenic massives of the mineral and raw complex. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2023;(9-1):231–247. (In Russ.) https://doi.org/10.25018/0236_1493_2023_91_0_231
16. Okamoto A.S., Verberne B.A., Niemeijer A.R., Takahashi M., Shimizu I., Ueda T., Spiers C.J. Frictional properties of simulated chlorite gouge at hydrothermal conditions: implications for subduction megathrusts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019;124(5):4545–4565. <https://doi.org/10.1029/2018jb017205>
17. Morozov Yu.A., Matveev M.A., Skublov S.G., Smulskaya A.I., Terekhov E.N., Larkov A.S. Geochemical aspects of the frictional melting of metapsammites during seismic slips (with reference to pseudotachylytes of the Ladoga region). *Doklady Earth Sciences*. 2023;509(1):118–132. <https://doi.org/10.1134/S1028334X22601833>
18. Barbot S. The normal stress dependence of rock friction. *Seismica*. 2026;5(1):1–18. <https://doi.org/10.26443/seismica.v5i1.2027>
19. Tesei T., Harbord C.W.A., De Paola N., Colletti C., Viti C. Friction of mineralogically controlled serpentinites and implications for fault weakness. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018;123(8):6976–6991. <https://doi.org/10.1029/2018jb016058>
20. Исмаатов И.А. Оценка коэффициента трения качения в зависимости от механических характеристик материала. *Политехнический вестник. Серия: Инженерные исследования*. 2025;(1):65–67.
Ismatov I.A. Assessment of the rolling friction coefficient depending on the mechanical characteristics of the material. *Polytechnic Bulletin. Series Engineering Studies*. 2025;(1):65–67. (In Russ.)
21. Яхимович В.А., Токарев В.О., Виноградов Д.А., Нагхави Я. Экспериментальное определение коэффициентов трения покоя и скольжения пары трения «ПКМ-Сталь». В кн.: Скотникова М.А., Попович А.А. (ред.) *Интеллектуальная трибология в машиностроении: BAL TRIBO 2024: материалы 1-й Междунар. науч.-практ. конф., г. Санкт-Петербург, 21–22 июня 2024 г.* СПб.: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; 2024. С. 358–365. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/id24-270>
22. Потапов В.Я., Симисинов Д.И., Архипов М.В., Потапов В.В. Обоснование параметров пневмотрубопровода загрузочно-го устройства. *Горное оборудование и электромеханика*. 2025;(6):51–57. <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2025-6-51-57>
Potapov V.Ya., Simisinov D.I., Arkhipov M.V., Potapov V.V. Justification of parameters of the pneumatic pipeline of the loading device. *Mining Equipment and Electromechanics*. 2025;(6):51–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.26730/1816-4528-2025-6-51-57>
23. Сугак Е.В. Равновесные траектории аэрозольных частиц в турбулентном потоке. *Фундаментальные основы механики*. 2019;(4):149–155. <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-149-155>
Sugak E.V. Equilibrium trajectories of aerosol particles in turbulent flow. *Fundamentalnye Osnovy Mekhaniki*. 2019;(4):149–155. (In Russ.) <https://doi.org/10.26160/2542-0127-2019-4-149-155>
24. Михайлов Г.А., Лотова Г.З., Рогазинский С.В. Исследование смещения N -частичных оценок метода Монте-Карло в задачах со взаимодействием частиц. Доклады Российской академии наук. *Математика, информатика, процессы управления*. 2024;519(1):33–38. <https://doi.org/10.31857/S2686954324050076>
Mikhailov G.A., Lotova G.Z., Rogasinsky S.V. Study of the bias of n -particle estimates of the monte carlo method in problems with particle interaction. *Doklady Mathematics*. 2024;519(1):33–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S2686954324050076>
25. Иванова А.А., Ростовщикова О.С., Пономарев В.Б. Погрешности вычисления коэффициентов сопротивления движущихся частиц в газовой среде. В кн.: Балдин В.Ю., Никитина Г.И., Селезнева И.С. (ред.) *Энерго- и ресурсосбережение. энергообеспечение. нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. атомная энергетика: материалы Междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых, посвящ. памяти проф. Н.И. Данилова (1945–2015) – Даниловских чтений, г. Екатеринбург, 9–13 декабря 2019 г.* Екатеринбург: УрФУ; 2019. С. 174–177. Режим доступа: <https://elar.urfu.ru/handle/10995/88243> (дата обращения: 07.02.2026).



26. Акрамов Б.Н., Аминов Ф.М., Исмаев И.А. Взгляд на трение скольжения с точки зрения механических характеристик материала. *Вестник Технологического университета Таджикистана*. 2020;(1):8–12.
Akramov B.N., Aminov F.M., Ismatov I.A. Look on friction of slipping from the point of view of the mechanical characteristics of the material. *Bulletin of the Technological University of Tajikistan*. 2020;(1):8–12. (In Russ.)
27. Легаев В.П., Генералов Л.К., Галковский О.А. Аналитический обзор существующих гипотез о природе трения. *Вестник Московского авиационного института*. 2019;26(1):174–181. Режим доступа: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=103839> (дата обращения: 07.02.2026).
Legayev V.P., Generalov L.K., Galkovskii O.A. An analytical review of existing hypotheses about the physics of friction. *Aerospace MAI Journal*. 2019;26(1):174–181. (In Russ.) Available at: <https://vestnikmai.ru/publications.php?ID=103839> (accessed: 07.02.2026).
28. Филипп А.Р., Жолнеревич И.И., Гуринович В.В. Установка для изучения трения качения. *Физическое образование в вузах*. 2016;22(3):120–132.
Filipp A.R., Jolnerevich I.I., Gurinovich V.V. New installation for the study of rolling friction. *Physics in Higher Education*. 2016;22(3):120–132. (In Russ.)
29. Ведищев С.М., Прохоров А.В., Глазков А.Ю., Шемонаев И.А., Прохорова В.О. Устройства оценки коэффициентов трения сыпучих материалов. *Наука и образование*. 2020;3(4):30. Режим доступа: <https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2464> (дата обращения: 07.02.2026).
Vedishchev S.M., Prokhorov A.V., Glazkov A.Yu., Shemonaev I.A., Prokhorova V.O. Devices for estimating the friction coefficients of bulk materials. *Nauka i Obrazovanie*. 2020;3(4):30. (In Russ.) Available at: <https://opusmgau.ru/index.php/see/article/view/2464> (accessed: 07.02.2026).
30. Славянский А.А., Семенов Е.В. Анализ процесса фракционирования сыпучих смесей. Технология и товароведение инновационных пищевых продуктов. 2016;(1):3–8.
Slavjanskij A.A., Semenov E.V. Analysis of the process of fractionating loose blends. *Technology and Merchandising of the Innovative Foodstuff*. 2016;(1):3–8. (In Russ.)
31. Fedorova E., Pupyshcheva E., Morgunov V. Modeling of particle size distribution in the presence of flocculant. *Symmetry*. 2024;16(1):114. <https://doi.org/10.3390/sym16010114>
32. Gloukhov D.V., Suchkov D.V., Altukhova A.P., Smirnov D.R. Modeling of dust content control system for industrial enterprises in the mineral resource sector. *International Journal of Engineering, Transactions B: Applications*. 2026;39(8):1802–1811. <https://doi.org/10.5829/ije.2026.39.08b.02>
33. Губейдуллин Х.Х., Исаев Ю.М., Шигапов И.И., Семашкин Н.М. Распределение скоростей при перемещении сыпучих материалов. *Сельский механизатор*. 2018;(6):22–23.
Gubeidullin H.H., Isaev Yu.M., Shigapov I.I., Semashkin N.M. Velocity distribution when moving bulk materials. *Selskiy Mechanizator*. 2018;(6):22–23. (In Russ.)

Информация об авторах

Афанасьев Анатолий Ильич – доктор технических наук, профессор кафедры технической механики, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0002-7869-9208>

Архипов Максим Владимирович – старший преподаватель кафедры геологии и защиты в чрезвычайных ситуациях, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-1689-6262>

Потапов Владимир Валентинович – кандидат технических наук, доцент кафедры горного дела, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0003-4862-523X>

Кузнецов Андрей Михайлович – старший преподаватель кафедры безопасности горного производства, Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0009-0003-9690-1881>

Корельский Денис Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры геоэкологии, Санкт-Петербургский государственный горный университет императрицы Екатерины II, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация; <https://orcid.org/0000-0001-6467-095X>; e-mail: dnk1984@mail.ru

Information about the authors

Anatoliy I. Afanasyev – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of Technical Mechanics, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0002-7869-9208>

Maxim V. Arkhipov – Senior Lecturer of the Department of Geology and Emergency Protection, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-1689-6262>

Vladimir V. Potapov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Mining Department, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0003-4862-523X>

Andrey M. Kuznetsov – Senior Lecturer of the Department of Mining Safety, Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0009-0003-9690-1881>

Denis S. Korelskiy – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Geoecology Department, Empress Catherine II St. Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russian Federation; <https://orcid.org/0000-0001-6467-095X>; e-mail: dnk1984@mail.ru

Article info

Received: 10.06.2026

Revised: 29.07.2026

Accepted: 06.08.2026

Информация о статье

Поступила в редакцию: 10.06.2026

Поступила после рецензирования: 29.07.2026

Принята к публикации: 06.08.2026