УДК 621.86:531.8 DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-20-28

Кинематика частиц горных пород в горизонтальном воздушном потоке

Афанасьев А. И.[1], Кузнецов А. М.[1], Потапов В. Я.[1]*, Потапов В. В.[1]
[1] Уральский государственный горный университет, г. Екатеринбург, Россия
e-mail: 2c1@inbox.ru

Реферат

Введение. *Существенное загрязнение окружающей среды вызывают мелкофракционные высокозольные угли, доля которых при комбайновой добыче может достигать 80 %. Предварительное разделение этих фракций в шахтах позволяет сократить объемы породных отвалов и хвостохранилищ, расположенных на поверхности, снизить затраты на подъем и транспортировку горной массы и в результате повысить эффективность работы предприятия.*

Цель исследования *– определить рациональные, конструктивные и режимные параметры воздушного сепаратора.*

Порядок проведения исследования. *На сегодняшний день существуют две технологии подземного обогащения – сухое и мокрое (методом флотации). Преимущества сухого обогащения заключаются в простоте технологических схем, отсутствии водно-шламового хозяйства и снижении капитальных и эксплуатационных затрат в 2–3 раза по сравнению с мокрым обогащением. Недостатком сухого обогащения является зависимость от влажности исходного угля и его относительно низкая технологическая эффективность. В связи с этим в последнее время сухое обогащение угля практически не используется. Разработка конструктивных и режимных параметров фрикционно-воздушного сепаратора, которые позволят увеличить выход концентрата в мелкофракционном угле, становится важной задачей. Параметрами сепаратора, определяющими длительность импульса и конечную горизонтальную скорость частицы, являются скорость и высота воздушного потока. Скорость воздушного потока нелинейно уменьшается с увеличением расстояния между частицей горной породы и торцом воздуховода, и соответственно, уменьшается давление воздуха на частицу. Для моделирования движения частицы в воздушном потоке проведены экспериментальные исследования по определению зависимости скорости воздуха от расстояния до воздуховода.*

Результаты. *Получена зависимость скорости воздуха от расстояния до воздуховода, разработана схема и изготовлена физическая модель сепаратора. Установлено, что при подаче в зону сепарации смеси сланца и угля крупностью –10…+5 мм путем сброса с высоты 100 мм на расстоянии 20–30 мм от торца воздуховода практически все частицы падали во второй отсек приемника, т. е. сепарации практически не происходило. При сбрасывании этой же смеси с высоты, близкой к нулю, происходит разделение угля и породы.*

Выводы. *Полученные экспериментальные данные соответствуют результатам расчетов, что свидетельствует об адекватности предложенной имитационной модели и подтверждает ее точность для описания реального процесса.*

Ключевые слова: *плотность угля; горная порода; зольность угля; коэффициент трения угля; коэффициент трения; пустая порода; размер частицы; скорость частицы; скорость воздуха.*

Введение и актуальность. Снижение качества угля, обусловленное ростом его зольности, усложнение горно-геологических условий добычи, ужесточение экологических требований к угольным предприятиям, а также непрерывный рост стоимости электроэнергии являются главными проблемами угольной энергетики.

Значительное загрязнение окружающей среды вызывают мелкофракционные (–13…0 мм) угли с высоким содержанием золы (более 30 %), доля которых при комбайновой добыче может достигать 80 % (см. таблицу 1 в [1]). Предварительное разделение этих фракций в шахтах позволяет сократить объемы породных отвалов и хвостохранилищ, снизить затраты на подъем и транспортировку горной массы, а также повысить эффективность работы предприятия.

На сегодняшний день существуют разные технологии подземного обогащения, включая сухое обогащение в пневматических отсадочных машинах и сортировку на грохотах, а также мокрое обогащение методом флотации. Преимущества сухого обогащения заключаются в простоте технологических схем, отсутствии водно-шламового хозяйства и снижении капитальных и эксплуатационных затрат в 2–3 раза по сравнению с гидравлическим обогащением. Однако у сухого обогащения есть и недостатки: результаты сильно зависят от влажности исходного угля, а технологическая эффективность является неудовлетворительной. В связи с этим в XXI в. сухое обогащение угля практически не используется.

Разработка конструктивных и режимных параметров фрикционно-воздушного сепаратора, которая позволит увеличить выход концентрата в мелкофракционном угле, является важной задачей.

Результаты исследований и их обсуждение. В большинстве угольных бассейнов в последнее время наблюдается рост зольности угля [2–5]. В таблице 1 [1] приводятся результаты ситового анализа и содержания золы углей, добываемых в различных регионах, согласно которым основной вклад в зольность угля вносят его сростки с породой крупностью –13…0 мм. Приведенные в таблице значения выхода и содержания золы показывают, что выход угля крупностью –13 мм находится в пределах 32–81 %, а зольность – в пределах 23–38 %. Установлено, что зольность отдельных классов крупности может как возрастать, так и уменьшаться в зависимости от крупности. Это свидетельствует об актуальности сепарации мелких фракций угля с целью снижения его зольности.

В работах [6, 7] подробно исследуются процессы пневматического разделения углесодержащих горных пород в горизонтальном воздушном потоке. Горная масса подается в зону сепарации перпендикулярно направлению воздушного потока (пересекает его), за счет разности плотности угля (1350 кг/м^3) и пустой породы (2650 кг/м^3) происходит их разделение. После схода горной массы с питателя она приобретает определенную скорость в вертикальной плоскости $V_в$ = 1,4 м/с [8, 9] и относительно быстро пересекает воздушный поток. Время пересечения частицами потока толщиной 0,02 м при высоте сбрасывания 0,1 м составляет 0,014 с. За это время при скорости воздуха 5 м/с частицы приобретают горизонтальную скорость: порода $V_{гп}$ = 0,1 м/с, уголь $V_г$ = 0,15 м/с. Таким образом, частицы породы и угля падают в приемники на разном расстоянии.

В Уральском государственном горном университете (УГГУ) разработан фрикционно-пневматический сепаратор, который позволяет использовать для разделения два физико-механических свойства углесодержащих горных пород – кинетический коэффициент трения и плотности, а также коэффициент воздушного сопротивления, зависящий от формы куска.

Физико-механические свойства сростков: размеры кусков, их плотность, коэффициенты трения и воздушного сопротивления – являются случайными величинами, которые распределены по различным законам. В работе [10] приведены

данные о распределении зольности по классам крупности –10 мм. Распределение выхода фракций –10 мм, а также зольности можно без существенной погрешности принять равномерным.

Результаты экспериментальных исследований, приведенных в [10], показывают, что коэффициент трения сростков зависит от зольности и изменяется в следующих пределах: уголь с зольностью до 3 % – коэффициент трения f = 0,43–0,44; уголь с породой (сростки) со средней зольностью 33 % – f = 0,45–0,49; коэффициент воздушного сопротивления 0,30–0,33. Следует отметить, что значение коэффициента воздушного сопротивления не вполне обоснованно занижено.

По данным наших исследований, уголь с зольностью до 3 % (шахта «Коркинская») имеет f = 0,35–0,39, уголь с породой (сростки) при средней зольности 33 % – f = 0,41–0,48.

Коэффициент воздушного сопротивления, зависящий от формы куска, а для лещадных частиц от их положения относительно потока воздуха, является случайной величиной и изменяется от 0,4 (частица сферической формы) до 0,8 (лещадная частица).

Скорость и высота воздушного потока сепаратора определяют длительность импульса и конечную горизонтальную скорость частицы. С удалением частицы горной породы от торца воздуховода скорость воздушного потока нелинейно уменьшается, и соответственно, уменьшается величина силы давления воздуха на частицу. Для моделирования движения частицы в воздушном потоке (при разных формах сечения выходного отверстия трубопровода) проведены экспериментальные исследования по определению зависимости скорости воздуха от расстояния до воздуховода (табл. 1). Выходное сечение первого воздуховода – практически квадратного сечения, площадь воздуховода в точке выхода воздуха S = 5,5 см^2.

Таблица 1. Результаты экспериментальных исследований по определению зависимости скорости воздуха от расстояния до воздуховода

Table 1. Results of experimental research on the dependence between air velocity and the distance to the air duct

Показатель	Скорость движения воздуха, м/с, при расстоянии до точки измерения скорости x, м				
	0,03	0,05	0,10	0,15	0,20
Скорость воздуха V_x, м/с	43	39	32	22	17
Статистическая зависимость скорости воздуха V_{xp}, м/с	44,0	39,0	30,0	22,2	17,2

Статистическая зависимость скорости воздуха V_{xp}, м/с, от расстояния x, м, до воздуховода [10–12]:

$$V_{xp} = 52exp(-5,55x). \quad (1)$$

Относительно большое значение корреляционного отношения (R^2 = 0,98) формулы (1) свидетельствует о наличии существенной связи скорости воздуха и расстояния от точки его выхода из воздуховода. На рис. 1 приведен график зависимости скорости воздуха от расстояния до воздуховода.

Формула (1) показывает, что при увеличении расстояния до воздуховода с 3 до 20 см скорость воздуха уменьшается практически в 3 раза, а сила давления воздуха на частицу горной породы – в 9 раз. Поэтому подачу горной породы в зону сепарации следует производить в горизонтальном направлении с минимальной

скоростью на расстоянии не более 2–3 см от торца воздуховода. Для подтверждения этого вывода произведен эксперимент по разделению угля и пустой породы (сланец). Куски крупностью –15…+5 мм сбрасывались с высоты 0,100 и 0,005 м. Размеры выходной части второго воздуховода: ширина 75 мм, высота 20 мм. Площадь сечения воздуховода S = 15 см^2, высота зоны сепарации $H_с$ = 120 мм.

Для такого сечения выходного отверстия воздуховода статистическая зависимость [12–14] скорости воздуха V_{xp}, м/с, от расстояния x, м, имеет вид:

$$V_{xp} = 12exp(-7,5x); \qquad R^2 = 0,99.$$

Рис. 1 показывает, что, несмотря на различную конфигурацию выходного сечения воздуховодов, зависимости скоростей воздуха имеют одинаковый экспоненциальный характер.

С использованием второго закона Ньютона и уравнения газодинамики получено уравнение для определения горизонтальной скорости движения V_{1x} частицы, которое записывается на языке Visual Basic в виде:

$$V_{1x} = V_{1x} + 1,5 \cdot \left(-V_{1x} + 12exp\left(-7,5x\right)\right)^2 \cdot \rho_в \cdot c / d / \rho_с \cdot dt,$$

где x – расстояние от сопла до частицы, м; $\rho_в$ – плотность воздуха, кг/м^3; c – коэффициент парусности; d – эквивалентный диаметр частицы, м; $\rho_с$ – плотность сростков, кг/м^3; dt – приращение времени при интегрировании, с.

Используя закон сохранения массы, плотность сростков угля с породой $\rho_с$ можно определить из формулы:

$$\rho_с = \rho_у \rho_п \left[\rho_п \left(1 - A_т\right) + \rho_у A_т\right]^{-1},$$

где $\rho_у$ – плотность угля, кг/м^3; $\rho_п$ – плотность пустой породы, кг/м^3; $A_т$ – зольность угля, %.

Вертикальная скорость полета V_{1y} частицы при плотности воздуха $\rho_в$ = 1,2 кг/м^3 записывается на языке Visual Basic advance в виде:

$$V_{1y} = V_{1y} + \left(9,81 - 1,8\left(V_{1y}\right)^2 \cdot c / d / \rho_c\right) dt.$$

Аналитически определить координату x точки падения куска на горизонтальную плоскость при изменяющихся случайным образом коэффициенте парусности, плотности, эквивалентном диаметре не представляется возможным. Поэтому на языке Visual Basic advance разработана программа расчета горизонтальной координаты x точки падения куска [15, 16].

В расчетах показаны траектории движения и точки падения двух типов материалов в сепараторе:

– куски угля (крупность – от 5 до 12 мм) – плотность 1100 кг/м^3, коэффициент парусности 0,7;

– куски породы (сланца) той же крупности – плотность 2900 кг/м^3, коэффициент парусности в диапазоне 0,6–0,7.

При этом куски начинают движение без горизонтальной и вертикальной начальной скорости. Сепарация происходит в зоне высотой 120 и шириной 50 мм.

В ходе эксперимента в приемных ячейках размещали куски угля и пустой породы – в отсеке 2, а в отсеке 3 находился один кусок угля. Смесь падала с высоты 0,1 м; при входе в воздушную струю вертикальная скорость фрагментов составляла 1,4 м/с, горизонтальная – 0 м/с. Скорость воздушного потока на выходе из воздуховода достигала 12 м/с.

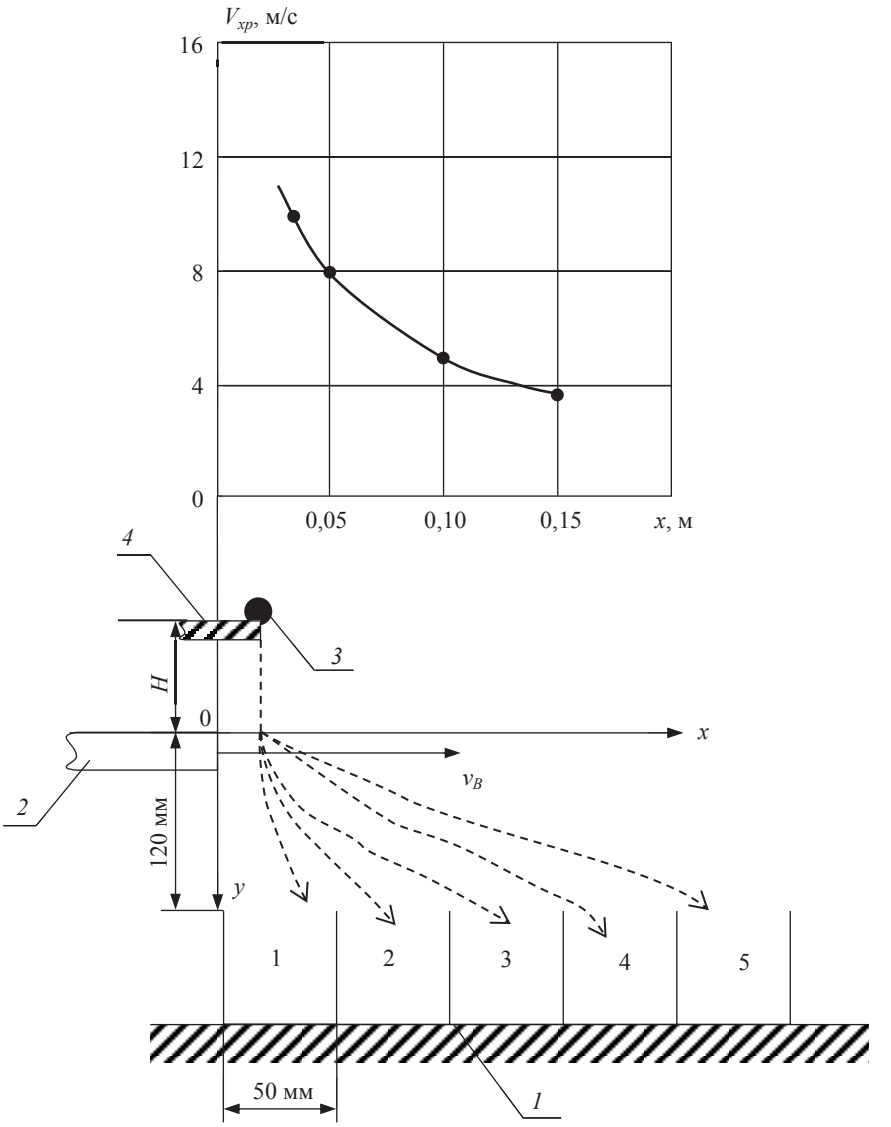

Рисунок 1. Зависимость скорости воздуха $V_{хр}$ от расстояния x до воздуховода прямоугольного сечения и схема физической модели сепаратора: *1* – приемник горной породы; *2* – воздуховод; *3* – частица горной породы; *4* – питатель

Figure 1. Relationship between the air velocity $V_{хр}$ and the distance x to a rectangular air duct and a scheme of the separator's physical model: *1* – rock receiver; *2* – air duct; *3* – rock particle; *4* – feeder

Выводы. При сбрасывании смеси сланца и угля крупностью –10…+5 мм с высоты 100 мм на расстоянии 20–30 мм от торца воздуховода почти все частицы падали во второй отсек приемника, т. е. сепарации практически не происходило [17, 18].

При сбрасывании этой же смеси с высоты, близкой к нулю, в отсек 1 упало 20 % породы, в отсек 2 – 80 % породы, в отсек 3 – 50 % угля, в отсек 4 – 30 % угля, в отсек 5 – 20 % угля. Таким образом, при постоянной высоте сепарации произошло полное разделение угля и породы [19, 20].

Экспериментальные данные совпадают с результатами расчетов, что свидетельствует об адекватности предложенной имитационной модели реальному процессу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А. И., Кузнецов А. М., Потапов В. Я., Потапов В. В., Чиркова А. А. Математическая модель фрикционно-воздушного сепаратора // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 2. С. 40–48. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-2-40-48

2. Фоменко Т. Г., Бутовицкий В. С., Почарцева Е. М. Технология обогащения углей. М.: Недра, 1985. 367 с.

3. Справочник по обогащению углей / под ред. И. С. Благова, А. М. Коткина, Л. С. Зарубина. М.: Недра, 1984. 614 с.

4. Бойко Д. Ю. Повышение эффективности пневматического обогащения углей на основе применения сепарации в горизонтальном воздушном потоке: автореф. дис. … канд. техн. наук. Москва, 2009. 20 с.

5. Бойко Д. А., Адов В. А. Исследование процесса пневматического обогащения углей шахты «Восточная» // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: матер. междунар. конф., Екатеринбург, 21–24 апреля 2009 г. Екатеринбург, 2009. С. 193–196.

6. Способ сухого обогащения угля: пат. 2282503 Рос. Федерация, заявл. 03.11.2005; опубл. 27.08.2006. Бюл. № 24.

7. Способ сухого обогащения рядового угля: пат. 2268787 Рос. Федерация; заявл. 05.05.2006; опубл. 27.01.2006. Бюл. № 03.

8. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента. М.: Наука, 1971. 176 с.

9. Зельдович Я. Б., Мышкис А. Д. Элементы прикладной математики. М.: Наука, 1967. 646 с.

10. Хартман К. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов. М.: Мир, 1977. 552 с.

11. Лебедев И. Ф. Обогащение полезных ископаемых с использованием аппаратов пневмосепарации // Международный научно-исследовательский журнал. 2019. № 4(82). С. 65–68. DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.012

12. Волков П. С. Возможности использования пневматической сепарации в схеме подготовки проб, содержащих недробимые включения // ГИАБ. 2024. № 1-1. С. 128–139.

13. Дринча В. М., Филатов А. С. Обоснование параметров пневмосепаратора с горизонтальным воздушным каналом // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 1(68). С. 18–26.

14. Степаненко А. И., Степаненко А. А. Практические результаты и перспективы сухого обогащения некондиционных руд и техногенных отходов методом пневмосепарации // Цветные металлы и минералы–2024: сб. тез. докл. двенадцатого междунар. конгр. Красноярск, 2024. С. 96–101.

15. Gavrilieva U., Vasilyeva M., Chung E. Generalized multiscale finite element method for elastic wave propagation in the frequency domain // Computation. 2020. Vol. 8. Iss. 3. Art. 63. DOI: 10.3390/computation8030063

16. Osipov D. A., Lebedev I. F., Pavlov A. Y. Development of perspective schemes of centrifugal pneumatic separators due to intensification of centrifugal forces at separation of minerals of different density and coarseness // International Research Journal. 2024. No. 1(139). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.88

17. Chung E., Sai-Mang Pun. Computational multiscale methods for first-order wave equation using mixed CEM-GMsFEM // Journal of Computational Physics. 2020. Art. 109359.

18. Shodiyev A., Turobov S., Abdullayev Z., Eshonqulov U. An'anaviy nikel eritish jarayonida past darajadagi nikel shteyni temirni oksidlash va uni silikatli shlaklar sifatida olib tashlash uchun yuqori haroratli eritish yo 'li bilan yuqori sifatli nikel shteyniga aylantirish // ZDIFT. 2023. No. 2(18). P. 39–42.

19. Particle technology and applications / Sunggyu Lee, Kimberly H. Henthorn (eds.). Boca Raton: CRC Press, 2016. 342 p.

20. Босиков И. И., Клюев Р. В., Хетагуров В. Н., Силаев И. В. Комплексная оценка гидродинамических процессов на карьерах Клинского месторождения с помощью методов управления ими в массивах горных пород // Устойчивое развитие горных территорий. 2023. Т. 15. № 2. С. 284–297. DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297

Поступила в редакцию 21 апреля 2026 года

Сведения об авторах:

Афанасьев Анатолий Ильич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технической механики Уральского государственного горного университета. E-mail: anatoly.afanasiev1948@yandex.ru; http://orcid.org/0000-0002-7869-9208

Кузнецов Андрей Михайлович – старший преподаватель кафедры безопасности горного производства Уральского государственного горного университета. E-mail: andrey-mixal@mail.ru; https://orcid.org/0009-0003-9690-1881

Потапов Валентин Яковлевич – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры горной механики Уральского государственного горного университета. E-mail: 2c1@inbox.ru; http://orcid.org/0009-0003-0305-5349

Потапов Владимир Валентинович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры горного дела Уральского государственного горного университета. E-mail: vladimir.potapov@m.ursmu.ru; https://orcid.org/0000-0003-4862-523X

DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-20-28

Kinematics of rock particles in a horizontal airflow

Anatolii I. Afanasiev[1], Andrei M. Kuznetsov[1], Valentin Ia. Potapov[1], Vladimir V. Potapov[1]
[1] Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia.

Abstract

Introduction. *Fine-grained high-ash coals cause significant environmental pollution. Their proportion can reach 80% during continuous mining. Preliminary separation of these fractions in mines makes it possible to reduce rock dumps and tailings storage facilities on the surface, as well as the cost of rock hoisting and transportation, and thus improve the enterprise's performance.*

The research objective *is to determine rational, design, and operating parameters of the air separator.*

Methods of research. *There are currently two technologies for underground beneficiation: dry and wet (flotation). The advantages of dry beneficiation include simple process flows, no water-slurry handling systems, and capital and operating costs 2–3 times lower than those of wet beneficiation. A disadvantage of dry beneficiation is its dependence on the moisture content of the raw coal and its relatively low processing efficiency. For that reason, dry coal beneficiation has scarcely been used recently. The development of the friction-air separator design and operational parameters that would increase the concentrate yield from fine-fraction coal has become an important task. The separator parameters that determine pulse duration and the particle's final horizontal velocity are the airflow velocity and height. Airflow velocity decreases non-linearly as the distance between the rock particle and the air duct outlet increases. Consequently, the magnitude of the air pressure force acting on the particle decreases. To simulate particle motion within the airflow, experimental studies were conducted to determine the relationship between air velocity and the distance from the air duct.*

Results. *This relationship was obtained, a scheme was developed, and a physical model of the separator was produced. It was found that when a mixture of –10…+5 mm shale and coal was fed into the separation zone by dropping it from a height of 100 mm at a distance of 20–30 mm from the air duct outlet, almost all particles fell into the second compartment of the receiver, i.e., practically no separation occurred. However, when the same mixture was dropped from a height close to zero, separation of the coal and rock occurred.*

Conclusions. *The experimental data obtained agree with the calculation results, which indicated the validity of the proposed simulation model, confirming its accuracy in describing the actual process.*

Keywords: *coal density; rock; coal ash content; coal friction coefficient; friction coefficient; waste rock; particle size; particle velocity; air velocity.*

REFERENCES

1. Afanasiev A. I., Kuznetsov A. M., Potapov V. Ia., Potapov V. V., Chirkova A. A. Mathematical model of a friction-air separator. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2026; 1: 40–48. (In Russ.) DOI: 10.21440/0536-1028-2026-1-40-48

2. Fomenko T. G., Butovitskii V. S., Pochartseva E. M. *Coal beneficiation technology.* Moscow: Nedra Publishing; 1985. (In Russ.)

3. Blagov I. S., Kotkin A. M., Zarubin L. S. (eds.) *A reference guide on coal beneficiation.* Moscow: Nedra Publishing; 1984. (In Russ.)

4. Boiko D. Iu. *Improving the efficiency of pneumatic beneficiation of coal based on separation in a horizontal airflow. PhD in Eng. abstract of a diss.* Moscow; 2009. (In Russ.)

5. Boiko D. A., Adov V. A. Studying the process of pneumatic beneficiation of coal at the Vostochnaya mine. In: *Scientific fundamentals and practice of processing ore and technogenic raw material: Proceedings of Internat. conf., Ekaterinburg, 21–24 April 2009.* Ekaterinburg; 2009. (In Russ.)

6. Kuzmin A. V., Liulenkov V. I., Kachurov K. V., Kardakov A. L., Boiko D. Iu. *A method of dry beneficiation of coal.* Patent RF no. 2282503; 2006. (In Russ.)

7. Kuzmin A. V., Liulenkov V. I., Kachurov K. V., Kardakov A. L., Boiko D. Iu. *Method of a run-of-mine coal dry beneficiation.* Patent RF no. 2268787; 2006. (In Russ.)

8. Rumshinskii L. Z. *Mathematical processing of experimental results.* Moscow: Nauka Publishing; 1971. (In Russ.)

9. Zeldovich Ia. B., Myshkis A. D. *Elements of applied mathematics.* Moscow: Nauka Publishing; 1967. (In Russ.)

10. Hartmann K. *Designing experiments in the study of technological processes.* Moscow: Mir Publishing; 1977. (In Russ.)

11. Lebedev I. F. Mineral processing with the use of air separation devices. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatelskii zhurnal = International Research Journal.* 2019; 4(82): 65–68. (In Russ.) DOI: 10.23670/IRJ.2019.82.4.012

12. Volkov P. S. Possibilities of using pneumatic separation in the preparation of samples containing individual inclusions. *Gornyi informatsionno-analiticheskii biulleten (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) = Mining Informational and Analytical Bulletin (scientific and technical journal)*. 2024; 1-1: 128–139. (In Russ.)

13. Drincha V. M., Filatov A. S. Substantiation of the parameters of a pneumatic separator with a horizontal air channel. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of Voronezh State Agrarian University.* 2021; 14 (1(68)): 18–26. (In Russ.)

14. Stepanenko A. I., Stepanenko A. A. Practical results and perspectives for dry beneficiation of substandard ores and technogenic wastes by pneumatic separation method. In: *Non-ferrous metals and minerals – 2024: Book of Abstracts of the 12th International Congress*. Krasnoyarsk; 2024. (In Russ.)

15. Gavrilieva U., Vasilyeva M., Chung E. Generalized multiscale finite element method for elastic wave propagation in the frequency domain. *Computation.* 2020; 8(3): 63. DOI: 10.3390/computation8030063

16. Osipov D. A., Lebedev I. F., Pavlov A. Y. Development of perspective schemes of centrifugal pneumatic separators due to intensification of centrifugal forces at separation of minerals of different density and coarseness. *International Research Journal*. 2024; 1(139). DOI: 10.23670/IRJ.2024.139.88

17. Chung E., Sai-Mang Pun. Computational multiscale methods for first-order wave equation using mixed CEM-GMsFEM. *Journal of Computational Physics*. 2020: 109359.

18. Shodiyev A., Turobov S., Abdullayev Z., Eshonqulov U. An'anaviy nikel eritish jarayonida past darajadagi nikel shteyni temirni oksidlash va uni silikatli shlaklar sifatida olib tashlash uchun yuqori haroratli eritish yo 'li bilan yuqori sifatli nikel shteyniga aylantirish. *ZDIFT.* 2023; 2(18): 39–42.

19. Sunggyu Lee, Kimberly H. Henthorn (eds.) *Particle technology and applications.* Boca Raton: CRC Press. 2016.

20. Bosikov I. I., Kliuev R. V., Khetagurov V. N., Silaev I. V. Comprehensive assessment of hydrodynamic processes in the Klinskoye quarry with the use of their control methods in rock masses. *Ustoichivoe razvitie gornykh territorii = Sustainable Development of Mountain Territories.* 2023; 15(2): 284–297. (In Russ.) DOI: 10.21177/1998-4502-2023-15-2-284-297

Received 21 April 2026

Information about the authors:

Anatolii I. Afanasiev – DSc (Engineering), Professor, professor of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: anatoly.afanasiev1948@yandex.ru; http://orcid.org/0000-0002-7869-9208

Andrei M. Kuznetsov – senior lecturer of the Department of Mining Safety, Ural State Mining University. E-mail: andrey-mixal@mail.ru; https://orcid.org/0009-0003-9690-1881

Valentin Ia. Potapov – DSc (Engineering), Associate Professor, professor of the Department of Engineering Mechanics, Ural State Mining University. E-mail: 2c1@inbox.ru; http://orcid.org/0009-0003-0305-5349
Vladimir V. Potapov – PhD (Engineering), Associate Professor, associate professor of the Department of Mining, Ural State Mining University. E-mail: vladimir.potapov@m.ursmu.ru; https://orcid.org/0000-0003-4862-523X

Для цитирования: Афанасьев А. И., Кузнецов А. М., Потапов В. Я., Потапов В. В. Кинематика частиц горных пород в горизонтальном воздушном потоке // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. 2026. № 5. С. 20–28. DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-20-28
For citation: Afanasiev A. I., Kuznetsov A. M., Potapov V. Ia., Potapov V. V. Kinematics of rock particles in horizontal airflow. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = Minerals and Mining Engineering.* 2026; 5: 20–28 (In Russ.). DOI: 10.21440/0536-1028-2026-5-20-28