

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ СЕДИМЕНТАЦИИ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЕЕ РАЗМЕРОВ И ФОРМ-ФАКТОРА

С.С. Кубрин¹, А.В. Харченко¹, В.Н. Захаров¹

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН
(ИПКОН РАН), Москва, Россия, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru

Аннотация: Приведено обоснование исследования механизма массопереноса и седиментации угольной пыли в горных выработках шахт. Показаны наиболее часто применяемые для описания скорости осаждения дисперсных систем в широком диапазоне размеров частиц законы Стокса и Ньютона. Сформулированы критерии применимости модифицированных уравнений на основе числа Рейнольдса. Показано, что при расчете скорости седиментации угольной пыли необходимо учитывать, что сопротивление её движению в рудничной атмосфере пропорционально первой и второй степени скорости движения частицы угольной пыли. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц угольной пыли зависит от форм-фактора частицы, то есть соотношения ее длины и толщины. Полученные результаты расчетов и графические зависимости седиментации частиц угольной пыли объясняют распространение в горных выработках крупнодисперсных фракций угольной пыли размером 100 мкм на 50–150 м и практически не осаждающихся мелкодисперсных фракций размером менее 10 мкм, которые выносятся в атмосферу вентиляционной струей. Данные утверждения хорошо согласуются с натурными наблюдениями.

Ключевые слова: рудничная атмосфера, угольная пыль, скорость седиментации пыли, форм-фактор, массоперенос, ламинарное движение, число Рейнольдса, закон Стокса.

Для цитирования: Кубрин С. С., Харченко А. В., Захаров В. Н. Определение скорости седиментации угольной пыли в зависимости от ее размеров и форм-фактора // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2026. – № 10-1. – С. 5–19. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_5.

Determination of sedimentation rate of coal dust depending on its size and form factor

S.S. Kubrin¹, A.V. Kharchenko¹, V.N. Zakharov¹

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru

Abstract: A rationale for studying the mechanism of mass transfer and sedimentation of coal dust in mine workings is presented. The article also describes the Stokes and Newton laws, most commonly used to describe the settling velocity of dispersed systems over a wide range of particle sizes. Criteria for the applicability of modified equations based on the Reynolds number are formulated. It is shown that when calculating the sedimentation velocity of coal

dust, it is necessary to consider that the resistance to its movement in the mine atmosphere is proportional to the first and second powers of the coal dust particle velocity. The change in the vertical component of the coal dust particle velocity depends on the particle form factor, that is, the ratio of its length to thickness. The obtained calculation results and graphical dependences of the sedimentation of coal dust particles explain the spread of coarse coal dust fractions in the mine workings with a size of 100 microns by 50–150 m, and practically non-precipitating fine fractions with a size of less than 10 microns, which are carried into the atmosphere by a ventilation jet. These statements are in good agreement with field observations.

Key words: mine atmosphere, coal dust, dust sedimentation rate, form factor, mass transfer, laminar motion, Reynolds number, Stokes' law.

For citation: Kubrin S. S., Kharchenko A. V., Zakharov V. N. Determination of sedimentation rate of coal dust depending on its size and form factor. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026; (10-1):5-19. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_101_0_5.

Введение

Обеспечение безопасности при добыче угля подземным способом — одна из главнейших задач. Но, к сожалению, аварии на угольных шахтах продолжают происходить. Одна из последних — это авария на шахте «Листвяжная». Известно, что основной причиной групповых несчастных случаев являются взрывы метановоздушной смеси и угольной пыли [1–4]. Механизм развития взрыва сложный и досконально не изучен. Но можно отметить, что после взрыва метановоздушной смеси и даже после простой вспышки метана возникает ударная волна, которая поднимает отложившуюся в горной выработке пыль, переводя ее во взвешенное состояние. Концентрация витающей пыли резко увеличивается. Оставшиеся очаги пламени после вспышки метана поджигают витающие угольные частицы пыли. Сгорая, они выделяют небольшую тепловую энергию. Но из-за малого расстояния между частицами угольной пыли (повышенная концентрация) для прогрева соседней частицы пыли до температуры воспламенения выделенной энергии от сгоревшей частицы вполне достаточно. В результате происходит лавинообразное горение угольной пыли,

которое обусловлено, в том числе, большой удельной площадью поверхности на единицу массы, т.е. происходит взрыв. Таким образом, во взрыв вовлекается не только витающее в рудничной атмосфере мелкодисперсное угольное вещество, но и отложившаяся в горных выработках пыль.

Аварии со взрывами метановоздушной смеси и угольной пыли произошли на шахтах «Северная» (25.02.2016, погибло 36 чел., в том числе горноспасатели), «Распадская» (08.05.2010, 91 чел. погиб, в том числе горноспасатели), «Юбилейная» (24.05.2007, погибло 39 чел.), «Ульяновская» (19.03.2007, погибло 110 чел.). При взрыве метановоздушной смеси и угольной пыли содержание оксида углерода достигает 1–3%, содержание кислорода снижается до 1–10%. При такой высокой концентрации оксида углерода и малой концентрации кислорода люди погибают мгновенно. Таким образом, одной из задач, направленных на обеспечение безопасности шахтеров, является исследование механизма массопереноса и седиментации на почве, бортах горных выработок и на технологическом оборудовании угольной пыли. Данным вопросом занимаются как в России, так и за рубежом [5–9].

Необходимость указанного научного исследования подтверждено подпунктом «ж» пункта 2 перечня поручений Президента Российской Федерации Правительству Российской Федерации по итогам совещания о ситуации в угольной отрасли Кузбасса, состоявшегося 2 декабря 2021 г. (№ ПР-2576 от 3 января 2022 г.); пунктом 3.6 перечня поручений по реализации Послания Президента Российской Федерации Федеральному Собранию Российской Федерации от 20 февраля 2019 г. (№ Пр-294 от 26 февраля 2019 г.); Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 9 июня 2020 г. № 1523-р; Программой развития угольной промышленности России на период до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р; Правилами безопасности в угольных шахтах, утвержденными приказом Ростехнадзора от 8 декабря 2020 г. № 507 «Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах»».

Постановка задачи

В целом рудничная атмосфера представляет собой аэрозоль. То есть некую дисперсную систему, состоящую из смеси различных газов (дисперсная среда) и взвешенных в этой смеси мелких жидких и твердых частиц (дисперсные фазы). В дальнейшем рассматривается аэрозоль, дисперсной средой которой является смесь газов, без учета и анализа их состава и дисперсной фазы, состоящей из мелких частиц угля (угольная пыль) размером от нескольких микрон до тысячи микрон. В Российской Федерации в зависимости от размеров частиц угольную пыль подразделяют на

мелкодисперсную (до 50 мкм) и крупнодисперсную (50–1000 мкм). Особую опасность для здоровья людей представляет мелкодисперсная пыль, проникающая в верхние дыхательные пути (5–10 мкм) и особенно пыль респираторных фракций, которая проникает в нижние дыхательные пути (2–5 мкм) и в альвеолы легких (0,5–2 мкм) [10–12]. Также мелкодисперсная пыль размером менее 120 мкм считается наиболее взрывоопасной, так как чем пыль тоньше, тем быстрее она прогревается и тем меньше надо энергии для инициирования процесса ее горения [13]. Однако Dr.-Ing. W. Garber считает, что

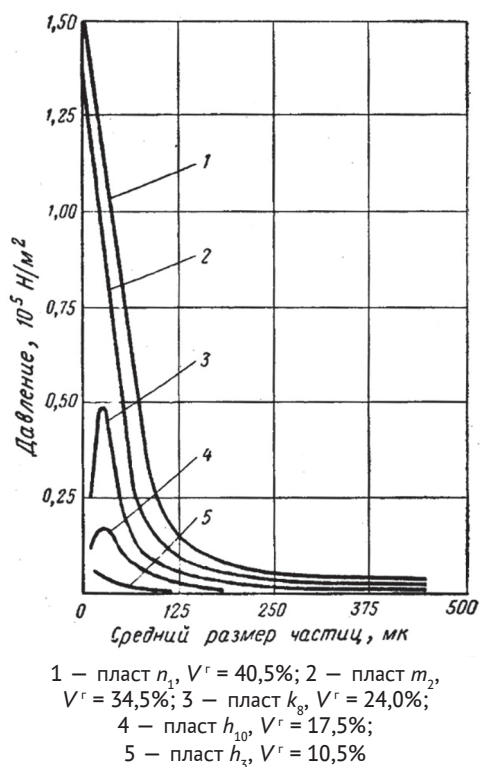


Рис. 1. Зависимость взрывчатости угольной пыли от ее дисперсного состава для различных угольных пластов с различным выходом летучих веществ V^r [15]

Fig. 1. Dependence of coal dust explosibility on its particle size distribution for different coal seams with varying volatile matter content V^r [15]

размеры частиц наиболее взрывоопасной угольной пыли лежат в диапазоне 70–100 мкм [14]. Особый интерес представляют графические зависимости влияния дисперсного состава угольной пыли на давление, которое возникает при ее взрывном сгорании, для углей с различным выходом летучих веществ, полученные МакНИИ (рис. 1), максимальные значения давления достигаются для угольных частиц в диапазоне от 10 до 60 мкм.

Рассматривая движение угольной частицы в воздушном потоке вентиляционной струи, его условно можно разделить на две составляющие: движение по вертикали (падение) и движение вдоль горизонтальной выработки вместе с рудничным воздухом [16–19]. Далее рассмотрим движение угольной частицы пыли по вертикали. На основе второго закона И. Ньютона угольная частица должна двигаться под действием результирующей силы. Так, находясь в поле тяготения Земли, угольная частица испытывает действие силы тяжести — mg (m — масса частицы, g — ускорение свободного падения), выталкивающей силы, силы Архимеда — $V\rho_A g$ (V — объем угольной частицы, ρ_A — плотность рудничной атмосферы), силы сопротивления среды, состоящей из силы сопротивления формы, возникающего из-за давления, оказываемого на угольную частицу при обтекании его потоком воздуха — F_p , определяющейся формой и площадью поперечного сечения тела, силы, вызванной трением поверхности частицы и среды (вязкостное сопротивление) — F_v ; при небольших скоростях движения угольной частицы в форме шара в рудничной атмосфере вязкостное сопротивление определяется выражением, полученным Дж. Габ. Стоксом $F_v = 6\pi\eta rv$ (η — динамическая вязкость рудничной атмосферы, r — радиус шара) и так называемого волнового сопро-

тивления — F_w , которое проявляется при больших скоростях движения тел в среде [20, 21].

Вид движения частицы определяется по безразмерному коэффициенту — числу Рейнольдса: $Re = (\rho v D_r)/\eta$ (D_r — характерный линейный размер угольной частицы). Обычно обтекание тела потоком среды делят на два режима: ламинарный и турбулентный. Ричард Фейнман более дифференцированно определяет режимы обтекания средой тела в потоке. Фундаментальные работы, объясняющие отклонения в поведении мелкодисперсных частиц и предоставляющие математический аппарат для моделирования процессов седиментации, опубликованы за рубежом [22, 23]. Так, в области малых чисел Рейнольдса ($Re < 1$) наблюдается ламинарный режим обтекания воздушным потоком угольной частицы при ее падении. В диапазоне чисел Рейнольдса от 1 до 20 ($1 < Re < 20$) наблюдается стационарный режим обтекания воздушным потоком угольной частицы при ее падении, скорость относительно частицы в обтекаемом потоке не меняется со временем. При числах Рейнольдса от 20 до 100 наблюдается режим обтекания воздушным потоком угольной частицы при ее падении с образованием отрывающихся вихрей (вихревые цепочки Кармана), скорость среды в потоке уже меняется со временем. В диапазоне чисел Рейнольдса от 100 до 1000 начинается формироваться явно выраженный турбулентный режим обтекания воздушным потоком угольной частицы. При числах Рейнольдса более 1 000 000 за телом образуется явно выраженный турбулентный след.

Приблизительно число Рейнольдса при движении угольной частицы можно определить из предположения, что на нее действует только сила гравитации. Тогда максимальная скорость падения частицы определяется из уравнения,

определяющего равноускоренное движение частицы:

$$h = \frac{v_p^2 - v_k^2}{2g}, \quad (1)$$

где h — высота горной выработки, м; v_p — вертикальная составляющая скорости частицы у почвы, м/с; $v_k = 0$ — вертикальная составляющая скорости частицы у кровли.

Из приведенной формулы следует, что частицы угольной пыли, падая в горной выработке высотой 3 м, у почвы будут иметь скорость $v = \sqrt{2gh} \approx 7,67$ м/с. И тогда число Рейнольдса для частиц угольной пыли размерами 10 и 50 мкм (плотность воздуха будет $\rho = 1,29$ кг/м³, динамическая вязкость воздуха $\eta = 18,2$ мкПа·с) равно соответственно 2,72 и 27,18. Следовательно, для угольной частицы пыли при ее падении в горной выработке будет характерен ламинарный режим обтекания воздушным потоком. Время седиментации в этом случае, в приближении, когда учитываются при падении только гравитационные силы, составит

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}} \cdot 0,78 \text{ с.}$$

За это время частица в движущемся со скоростью 8 м/с воздушном потоке пролетит расстояние 6,24 м, что и близко не совпадает с наблюдаемым массопереносом угольной пыли в горных выработках шахт.

Определение скорости седиментации угольной пыли, в предположении, что сопротивление ее движению в рудничной атмосфере пропорционально квадрату скорости

Следовательно, существенную роль в массопереносе угольной пыли в рудничной атмосфере играет сопротивле-

ние среды. С учетом того, что число в первом приближении значительно больше 1, сила сопротивления среды будет пропорциональна квадрату скорости движения частицы угольной пыли. Тогда уравнение движения угольной частицы пыли по вертикальной проекции будет иметь следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - V \rho_A g - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}. \quad (2)$$

С учетом того, что объем частицы (V) определяется соотношением $V = m/\rho_c$ (ρ_c — плотность угля), уравнение можно преобразовать к следующему виду:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{\rho_A}{\rho_c} mg - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}. \quad (3)$$

Вынос за скобки веса частицы угольной пыли (mg) приводит уравнение (3) к виду

$$m \frac{dv}{dt} = mg \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_c} \right) - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}. \quad (4)$$

В дифференциальном уравнении (4) переменные разделяются, и оно решается простым взятием интегралов.

$$m \int \frac{dv}{mg \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_c} \right) - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}} = \int dt. \quad (5)$$

Вынос коэффициента $\frac{\rho_A C_D S v^2}{2}$ за знак интеграла дает

$$\frac{2m}{\rho_A C_D S} \int \frac{dv}{2mg \left(1 - \frac{\rho_A}{\rho_c} \right) - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}} = \int dt. \quad (6)$$

Обозначая величину $\frac{2mg}{\rho_A C_D S}$ через квадрат некоторой скорости — v_p^2 и вводя коэффициент, учитывающий выталкивающую силу среды (силу Архимеда) $k_A = 1 - \frac{\rho_A}{\rho_c}$, имеем

$$v_p^2 \int \frac{dv}{k_A v_p^2 - v^2} = g \int dt. \quad (7)$$

Интегрирование полученного выражения дает

$$\frac{1}{2\sqrt{k_A} v_p} \ln \frac{\sqrt{k_A} v_p - v}{\sqrt{k_A} v_p + v} = \frac{g}{v_p^2} t + C. \quad (8)$$

Исходя из условия, что вертикальная составляющая скорости угольной частицы у кровли выработки равна нулю, постоянная C тоже равна нулю (явно это будет показано ниже).

Тогда величина, стоящая в логарифме, равна

$$\frac{\sqrt{k_A} v_p - v}{\sqrt{k_A} v_p + v} = e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}}, \quad (9)$$

умножая знаменатель левой части на правую часть и группируя искомую скорость (v) в правой части равенства (9), получаем

$$v e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} + v = \sqrt{k_A} v_p e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} - \sqrt{k_A} v_p, \quad (10)$$

откуда скорость движения частицы определяется выражением

$$v = \frac{\sqrt{k_A} v_p e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} - \sqrt{k_A} v_p}{e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} + 1}. \quad (11)$$

Вынесение постоянного произведения $\sqrt{k_A} v_p$ из числителя дает формулу

$$v = \sqrt{k_A} v_p \frac{e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} - 1}{e^{\frac{2\sqrt{k_A} g t}{v_p}} + 1}. \quad (12)$$

По сути дробь, стоящая в правой части, является гиперболическим тангенсом: $\operatorname{th} x = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1}$, тогда окончательно имеем

$$v = \sqrt{k_A} v_p \operatorname{th} \left(\frac{\sqrt{k_A} g t}{v_p} + C \right). \quad (13)$$

На основе полученной формулы легко определить постоянную C из условия, что в начальный момент движения у частицы, находящейся у кровли выработки, скорость оседания равна нулю.

Влияние параметров техногенной среды угольной шахты и плотности угля на результат совместного влияния сил гравитации и сил Архимеда (коэффициент k_A)
The influence of the parameters of the anthropogenic environment of a coal mine and the density of coal on the result of the combined effect of gravitational forces and Archimedes' forces (coefficient k_A)

Температура рудничной атмосферы, °C	Глубина, м	Барометрическое давление ($p = p_0 + h/11,11$), мм рт. ст.	Плотность воздуха $\rho = 0,465 p / (273,15 + t)$, кг/м³	Плотность угля, кг/м³	Коэффициент, учитывающий выталкивающую силу среды $k_A = 1 - \rho_A / \rho_c$
0	500	805	1,370	антрацит, 1700	0,9992
				каменный, 1300	0,9989
	1000	850	1,447	антрацит, 1700	0,9991
				каменный, 1300	0,9989
40	500	805	1,195	антрацит, 1700	0,9993
				каменный, 1300	0,9991
	1000	850	1,262	антрацит, 1700	0,9993
				каменный, 1300	0,9990

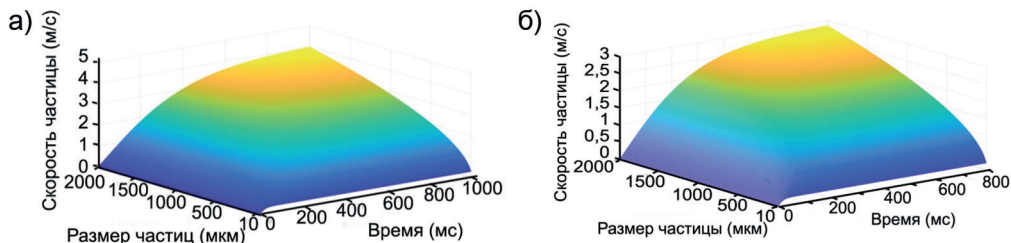


Рис. 2. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц угольной пыли для каменного угля: форм-фактор (диаметр частицы в два раза больше ее толщины) (а); форм-фактор (диаметр частицы в четыре раза больше ее толщины) (б)

Fig. 2. Change in the vertical component of the velocity of coal dust particles for hard coal: form factor (particle diameter is twice its thickness) (a); form factor (particle diameter is four times its thickness) (b)

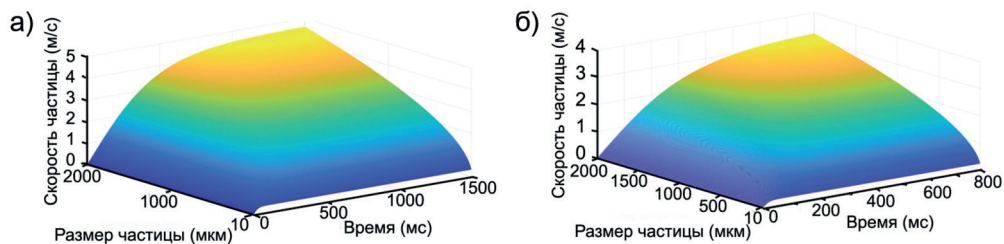


Рис. 3. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц угольной пыли для антрацита: форм-фактор (диаметр частицы в два раза больше ее толщины) (а); форм-фактор (диаметр частицы в четыре раза больше ее толщины) (б)

Fig. 3. Change in the vertical component of the velocity of coal dust particles for anthracite: form factor (particle diameter is twice its thickness) (a); form factor (particle diameter is four times its thickness) (b)

То есть условие $th(C) = 0$ однозначно определяет, что $C = 0$.

Интерес представляет возможная вариация коэффициента. Она представлена в таблице, из которой видно, что изменение коэффициента k_A незначительное.

Изменение скорости седиментации частицы угольной пыли в рудничной

атмосфере по полученной формуле (15) просчитано для частиц каменного угля (рис. 2) и антрацита (рис. 3) размером от 10 мкм до 2 мм для плотности воздуха $1,2 \text{ кг/м}^3$.

$$\text{Величина } v_{p=} \sqrt{\frac{2mg}{\rho_A C_D S}} \text{ является}$$

максимальной скоростью, которую мо-

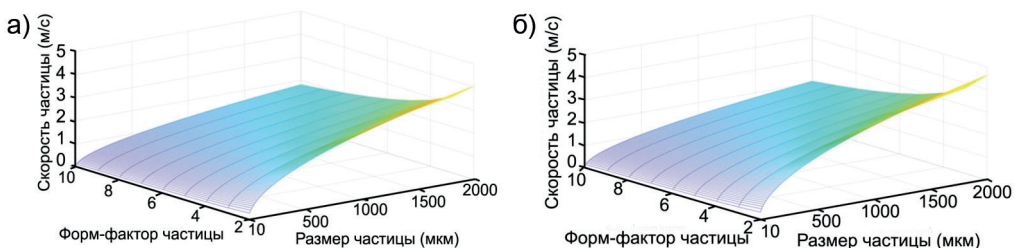


Рис. 4. Предельная вертикальная составляющая скорости (v_p) частиц пыли: каменный уголь (а); антрацит (б)

Fig. 4. Maximum vertical component of velocity (v_p) of dust particles: coal (a); anthracite (b)

жет достичь частица, двигаясь в рудничной атмосфере без учета ее плотности, то есть некоего коэффициента, равного $\sqrt{k_A}$, а значит, это предельная скорость.

Графики предельной скорости для частиц каменного угля и антрацита в зависимости от их размера и форм-фактора (отношение габаритного, наибольшего размера к толщине частицы) представлены на рис. 4, а, б соответственно.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие выводы.

Во-первых, чем крупнее частицы пыли, тем больше времени им требуется для набора максимальной скорости.

Во-вторых, более крупные частицы пыли, при установившемся движении, двигаются с большей скоростью, чем мелкие частицы.

В-третьих, форм-фактор частиц пыли существенно влияет на ее скорость движения. Увеличение отношения поперечного размера к толщине частицы пыли с 2 до 4 снижает ее скорость на 25–40%.

В-четвертых, переходный период — набор предельной скорости частицы антрацита размером 2 мм — не превышает 1,5 с. Для меньших частиц пыли и для частиц пыли из каменного угля переходный период меньше.

В-пятых, предельные скорости седиментации крупных (2 мм) частиц пыли с форм-фактором 2 не превышают 5 м/с. С уменьшением размера частиц угольной пыли и возрастанием форм-фактора скорость осаждения снижается. Для частиц респереабельных фракций (менее 50 мкм) скорость их осаждения примерно равна 1 м/с.

В-шестых, зная предельную скорость седиментации угольной пыли, можно определить примерное расстояние, которое она пролетит по горной выработке.

Определение скорости седиментации угольной пыли, в предположении, что сопротивление ее движению в рудничной атмосфере (падению) пропорционально скорости

Обращает на себя внимание изменение числа Рейнольдса в зависимости от размера частиц угольной пыли. Для мелких частиц размером менее 10–20 мкм число Рейнольдса будет близко или меньше 1. Тогда для случая, когда число Рейнольдса мало (меньше 1), сила сопротивления среды будет пропорциональна первой скорости движения частицы угольной пыли.

В этом случае используется формула Стокса ($F_{mp} = 6\pi\eta r v$). Следовательно, уравнение движения угольной частицы пыли по вертикальной проекции примет вид

$$m \frac{dv}{dt} = mg - V \rho_A g - 6\pi\eta r v. \quad (14)$$

С использованием введенного выше коэффициента, определяющего совместное влияние сил гравитации и сил Архимеда (k_A), выражение (14) примет следующий вид:

$$m \frac{dv}{dt} = k_A mg - 6\pi\eta r v, \quad (15)$$

из которого простым интегрированием получим

$$m \int \frac{dv}{k_A mg - 6\pi\eta r v} = \int dt. \quad (16)$$

Находится закономерность изменения скорости частиц угольной пыли при ее движении вниз:

$$-\frac{m}{6\pi\eta r} \ln(k_A mg + 6\pi\eta r v) = t + C. \quad (17)$$

Как ранее было сказано, исходя из условия, что вертикальная составляющая скорости частицы угольной пыли у кровли выработки равна нулю в началь-

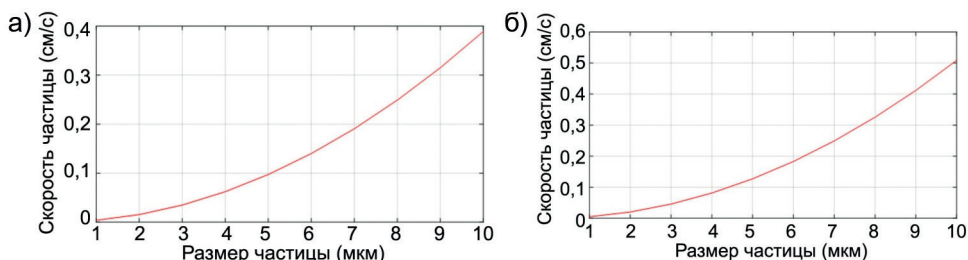


Рис. 5. Предельная вертикальная составляющая скорости частиц пыли каменного угля: каменный уголь (а); антрацит (б)

Fig. 5. The maximum vertical component of the velocity of dust particles of coal: coal (a); anthracite (b)

ный момент времени ($t = 0$), то постоянная C равна

$$C = -\frac{m}{6\pi\eta r} \ln(k_A mg), \quad (18)$$

тогда выражение (17) принимает вид

$$-\frac{m}{6\pi\eta r} [\ln(k_A mg + 6\pi\eta r v) - \ln(k_A mg)] = t \quad (19)$$

или

$$-\frac{m}{6\pi\eta r} \ln \frac{k_A mg + 6\pi\eta r v}{k_A mg} = t. \quad (20)$$

Откуда в явном виде изменение скорости движения частицы записывается формулой:

$$v = \frac{k_A mg}{6\pi\eta r} \left(1 - e^{-\frac{6\pi\eta r}{m} t} \right). \quad (21)$$

Результаты расчетов по формуле (21), изменения скорости движения частицы приведены на рис. 5, 6. Легко видеть,

что коэффициент, стоящий перед скобкой ($k_A mg / 6\pi\eta r$), есть предельная скорость, которую может достичь частица. Графики ее зависимости от размера слоя каменного угля и антрацита представлены на рис. 5.

Мелкие частицы пыли размером менее 20 мкм (для которых число Рейнольдса равно или меньше единицы) движутся совсем иначе, чем крупные частицы. Это связано с изменением характера сил сопротивления среды. Для более крупных они пропорциональны квадрату скорости, а для мелких пропорциональны первой степени скорости движения. Это привело к следующему:

- во-первых, переходной период набора предельной скорости частицы сократился до нескольких мкс;
- во-вторых, предельные скорости седиментации частиц существенно уменьшились и не превышают 0,5 см/с.

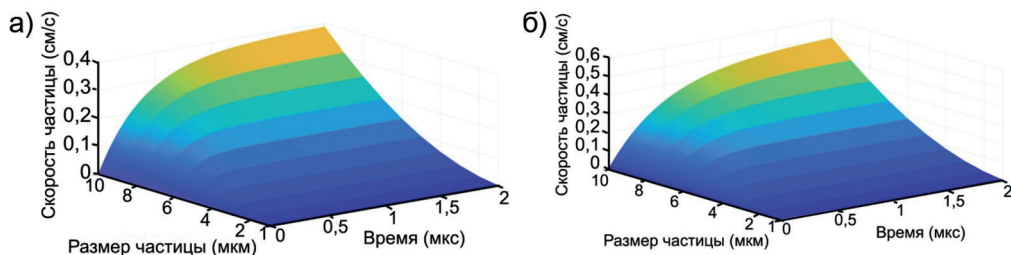


Рис. 6. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц пыли каменного угля: форм-фактор (диаметр частицы в два раза больше ее толщины) (а); форм-фактор (диаметр частицы в четыре раза больше ее толщины) (б)

Fig. 6. Change in the vertical component of the velocity of coal dust particles: form factor (particle diameter is twice its thickness) (a); form factor (particle diameter is four times its thickness) (b)

Таким образом, примерное время, за которое угольная пыль, витающая у кровли выработки, осядет, возросло на порядок.

Определение скорости седиментации угольной пыли в общем случае, когда сопротивление ее движению в рудничной атмосфере (падению) пропорционально первой и второй степени скорости

По всей видимости, при описании движения частиц пыли в рудничной атмосфере необходимо учитывать обе составляющие сопротивления среды (пропорциональная квадрату и первой степени скорости). Тогда обобщенное уравнение движения частицы угольной пыли примет вид

$$m \frac{dv}{dt} = mg - V\rho_A g - 6\pi\eta r v - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2} \quad (22)$$

Введя ранее определенный коэффициент, определяющий совместное влияние сил гравитации и сил Архимеда (k_A), выражение (22) примет вид

$$m \frac{dv}{dt} = k_A mg - 6\pi\eta r v - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2} \quad (23)$$

По-прежнему рассматриваемый процесс описывается дифференциальным уравнением с разделяющимися переменными:

$$m \frac{dv}{k_A mg - 6\pi\eta r v - \frac{\rho_A C_D S v^2}{2}} = dt \quad (24)$$

Умножение левой и правой части полученного соотношения на ускорение свободного падения (g) и вынесение сомножителя ($\frac{\rho_A C_D S}{2}$) у квадрата скорости из дроби приводит выражение (24) к следующему виду:

$$\frac{2mg}{\rho_A C_D S} \frac{dv}{k_A \frac{2mg}{\rho_A C_D S} - \frac{12\pi\eta r}{\rho_A C_D S} v - v^2} = gdt \quad (25)$$

С учетом того, что корень квадратный из отношения $2mg/\rho_A C_D S$ есть некоторая предельная скорость движения пылевой частицы — v_p и ввод вместо отношения $mg/3\pi\eta r$ некоторого параметра (v_s), имеющего размерность скорости, соотношение (25) трансформируется в форму

$$v_p^2 \frac{dv}{k_A v_p^2 - 2 \frac{v_p^2}{v_s} v - v^2} = gdt \quad (26)$$

В знаменателе выражение

$$2 \frac{v_p^2}{v_s} v + v^2$$

по сути является неполной формулой квадрата суммы. Дополнение знаменателя двумя переменными $\left(\frac{v_p^2}{v_s}\right)^2$ с различными знаками (в сумме дает ноль) и перенос параметра, определяющего предельную скорость (v_p^2), в правую часть, с учетом операции суммирования (интегрирования), приводит соотношение к виду

$$\int \frac{dv}{k_A v_p^2 - 2 \frac{v_p^2}{v_s} v - v^2 - \left(\frac{v_p^2}{v_s}\right)^2 + \left(\frac{v_p^2}{v_s}\right)^2} = \frac{g}{v_p^2} \int dt \quad (27)$$

Тогда с учетом формулы, определяющей квадрат суммы, выражение (27) трансформируется следующим образом:

$$\int \frac{dv}{v_p^2 \left[k_A + \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2 \right] - \left(v + \frac{v_p^2}{v_s} \right)^2} = \frac{g}{v_p^2} \int dt \quad (28)$$

Выражение $v_p \sqrt{k_A + \left(\frac{v_p}{v_s}\right)^2}$

в рассматриваемом случае является, по сути, скорректированной предельной скоростью v_{sp} , тогда подынтегральные выражения становятся компактными:

$$\int \frac{dv}{v_{sp}^2 - \left(v + \frac{v_p^2}{v_s}\right)^2} = \frac{g}{v_p^2} \int dt. \quad (29)$$

По форме выражения (8) и (29) совпадают, что свидетельствует об общности полученной (29) зависимости. Тогда интегрирование дает

$$\frac{1}{2v_{sp}} \ln \left[\frac{v_{sp} - v - \frac{v_p^2}{v_s}}{v_{sp} + v + \frac{v_p^2}{v_s}} \right] = \frac{g}{v_p^2} t + C. \quad (30)$$

Перенос множителя у логарифма в правую часть соотношения и корректировка постоянной C позволяет получить выражение

$$\ln \left[\frac{v_{sp} - v - \frac{v_p^2}{v_s}}{v_{sp} + v + \frac{v_p^2}{v_s}} \right] = \frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C. \quad (31)$$

Откуда значение, стоящее в логарифме, будет равно экспоненциальной функции:

$$\frac{v_{sp} - v - \frac{v_p^2}{v_s}}{v_{sp} + v + \frac{v_p^2}{v_s}} = e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C}. \quad (32)$$

Выполнение простых алгебраических преобразований (умножение знаменателя на правую часть) дает формулу

$$v_{sp} - \left(v + \frac{v_p^2}{v_s}\right) = e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C} \left[v_{sp} + \left(v + \frac{v_p^2}{v_s}\right)\right] \quad (33)$$

Группировка в правой части слагаемых с искомой переменной (скоростью оседания пылевой частицы v) позволяет получить зависимость

$$\left(v + \frac{v_p^2}{v_s}\right) \left(e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C} + 1\right) = v_{sp} \left(e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C} - 1\right) \quad (34)$$

Откуда в явном виде скорость седиментации пылевой частицы примет вид

$$v = v_{sp} \frac{\left(e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C} - 1\right)}{\left(e^{\frac{2v_{sp}gt}{v_p^2} + C} + 1\right)} - \frac{v_p^2}{v_s}. \quad (35)$$

Очевидно, что первый член правой части есть гиперболический тангенс с аргументом $\frac{v_{sp}gt}{v_p^2} + C$, тогда скорость движения пылевой частицы определяется формулой

$$v = v_{sp} \operatorname{th} \left[\frac{v_{sp}gt}{v_p^2} + C \right] - \frac{v_p^2}{v_s}, \quad (36)$$

где $C = \operatorname{arth} \left(\frac{v_p^2}{v_s v_{sp}} \right)$, так как в началь-

ный момент движения пылевая частица, находящаяся на поверхности, имеет нулевую скорость оседания.

Результаты расчетов по формуле (36), изменения скорости движения частицы приведены на рис. 7–9.

Закключение

Проведено численное моделирование движения частиц угольной пыли в ламинарном потоке, учитывающее сопротив-

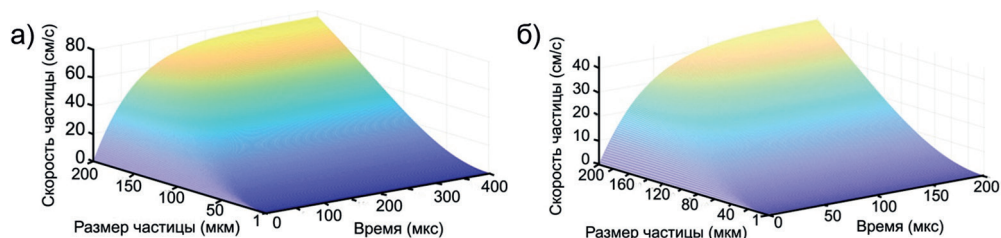


Рис. 7. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц угольной пыли для каменного угля: форм-фактор (диаметр частицы в два раза больше ее толщины) (а); форм-фактор (диаметр частицы в четыре раза больше ее толщины) (б)

Fig. 7. Change in the vertical component of the velocity of coal dust particles for hard coal: form factor (particle diameter is twice its thickness) (a); form factor (particle diameter is four times its thickness) (b)

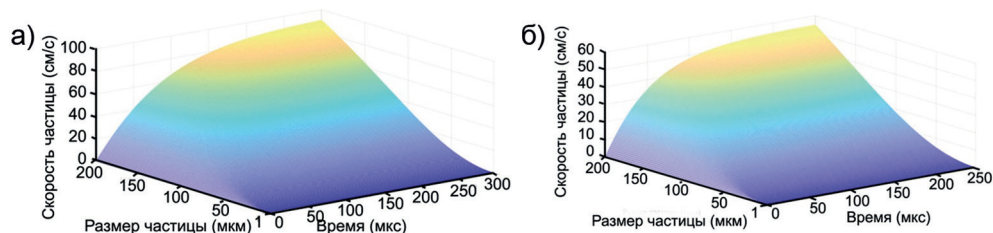


Рис. 8. Изменение вертикальной составляющей скорости частиц угольной пыли для антрацита: форм-фактор (диаметр частицы в два раза больше ее толщины) (а); форм-фактор (диаметр частицы в четыре раза больше ее толщины) (б)

Fig. 8. Change in the vertical component of the velocity of coal dust particles for anthracite: form factor (particle diameter is twice its thickness) (a); form factor (particle diameter is four times its thickness) (b)

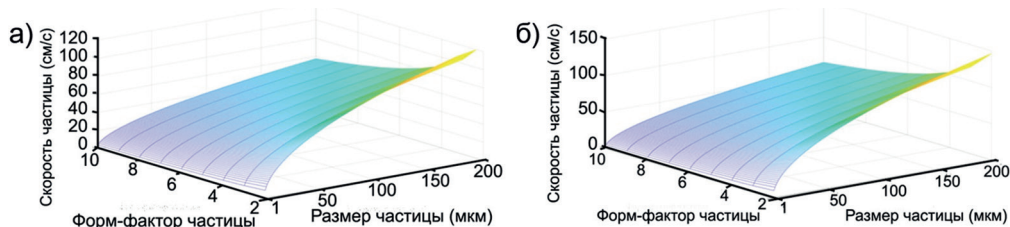


Рис. 9. Предельная вертикальная составляющая скорости (v_p) частиц пыли: каменный уголь (а); антрацит (б)

Fig. 9. Maximum vertical component of velocity (v_p) of dust particles: coal (a); anthracite (b)

ление воздушной среды (линейную и квадратическую составляющую), которое позволило определить время седиментации частиц угольной пыли в горных выработках высотой 3 м: для частиц размером 100 мкм с форм-фактором 2 (длина частицы в два раза больше ее толщины) оно равно 11,3 с; размером 10 мкм с таким же форм-фактором — 17 мин и 27 с; для частиц тех же размеров, но с форм-фактором 4 (длина частицы в четыре раза больше ее толщи-

ны) — соответственно 21,6 с и 34 мин и 18 с. Полученные теоретические зависимости седиментации частиц угольной пыли и результаты расчетов фракции угольной пыли размером 100 мкм распространяются на 50–150 м, а мелкодисперсные фракции размером менее 10 мкм практически не осаждаются и выносятся в атмосферу вентиляционной струей, что хорошо согласуется с натурными наблюдениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хлудов Д. С., Оленников С. В., Мусинов С. Н., Неведров А. В., Субботин С. П. К вопросу о методике определения участия угольной пыли во взрыве метановоздушной смеси // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2014. — № 2. — С. 150–155.
2. Васильев А. А., Пинаев А. В., Трубицын А. А., Грачев А. Ю., Троцюк А. В., Фомин П. А., Трилис А. В. Что горит в шахте: метан или угольная пыль? // Физика горения и взрыва. — 2017. — Т. 53. — № 1. — С. 11–18. DOI: 10.15372/FGV20170102.
3. Хорошилова Л. С., Тараканов А. В., Хорошилов А. В. Причины взрывов метана и угольной пыли в шахтах Кузбасса // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2012. — № 2. — С. 187–191.
4. Корнев А. В., Спицын А. А., Коршунов Г. И., Баженова В. А. Обеспечение пылевзрывобезопасности подземных горных выработок в угольных шахтах: методы и современные тенденции // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2023. — № 3. — С. 133–149. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.
5. Смирняков В. В., Родионов В. А., Смирнякова В. В., Орлов Ф. А. Влияние формы и размеров пылевых фракций на их распределение и накопление в горных выработках при изменении структуры воздушного потока // Записки Горного института. — 2022. — Т. 253. — С. 71–81. DOI: 10.31897/PMI.2022.12
6. Филин А. Э., Тертычная С. В., Курносов И. Ю., Колесникова Л. А. Математическое моделирование массопереноса в коллоидных системах // Уголь. — 2023. — № 5. — С. 72–76. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.
7. Mandal C., Prusty B. K., Pathak K., Patra A. K. Investigation of the settling dynamics and behaviour of PM2.5 and PM1.0 present in coal dusts in controlled environmental conditions // Atmospheric Pollution Research. 2026, vol. 17, article 102711. DOI: 10.1016/j.apr.2025.102711.
8. Li Yibo, Chen Xiangjun, Du Yunfei, Li Lin, Zuo Peiqi, Liu Mengke Research on the distribution law of air flow and dust in multi-process operations of coal mine fully mechanized caving face // Energy Science & Engineering. 2025, vol. 13, no. 11, pp. 5247–5267. DOI: 10.1002/ese3.70236.
9. Hongjie Z., Shaocheng G., Tian Z., Deji J., Xi C., Xingyu C. Study on mechanism of air distribution volume's influence on airflow, dust migration and spray dust reduction in fully mechanized caving face // Scientific Reports. 2026, vol. 16, no. 1, article 17780. DOI: 10.1038/s41598-026-49120-y.
10. Кудряшов В. В., Викторов С. Д., Качанов А. Н. О распределении минеральных частиц по размерам при разрушении горных пород // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2006. — № 6. — С. 68–72.
11. Поздняков Г. А., Голоскоков С. И., Голоскоков Е. И., Закутский Е. Л. Проблемы и перспективы развития систем мониторинга взрывобезопасности горных выработок // Горная промышленность. — 2016. — № 4(128). — С. 66.
12. Подображин С. Н. Исследование составов для предотвращения пыления открытых поверхностей при добыче угля // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2022. — № 1. — С. 67–74.
13. Скопинцева О. В., Баловцев С. В., Рыбичев А. А. Исследование взрывопожароопасности угольной пыли пластов средней стадии метаморфизма // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2026. — № 5. — С. 80–94. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_80.
14. Garber W. Empfehlungen für die Auslegung von sicheren Kohletrocknungsanlagen. Ausrüstung. Beispiele. Fehleranalyse. Düsseldorf, 2021, 148 p.
15. Петрухин П. М., Нецепляев М. И., Качан В. Н., Сергеев В. С. Предупреждение взрывов пыли в угольных и сланцевых шахтах. — М.: Недра, 1974. — 304 с.
16. Laryea A. E. N., Oluwasegun O. O., Anamor S. K., Nkansah B. O. Dust sources and impact: A review // North American Academic Research. 2022, vol. 5, no. 9, pp. 17–37. DOI: 10.5281/zenodo.7068922.
17. Галкин А. В., Радионова С. А. Моделирование переноса и седиментации мелкодисперсной пыли при проветривании тупиковых выработок рудников // Горный журнал. — 2021. — № 5. — С. 84–89. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.12.
18. Романченко С. Б., Костеренко В. Н., Трубицын А. А., Кубрин С. С. Процессы седиментации взрывоопасных аэрозолей при современных технологиях добычи угля // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2018. — № 2. — С. 6–15.

19. Исаевич А. Г., Семин Е. А. Исследование динамики осаждения витающей пыли в калийных рудниках численными методами // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2023. — № 2. — С. 143—152. DOI: 10.15372/FTPRPI20230214.
20. Ferguson R. I., Church M. A simple universal equation for grain settling velocity // Journal of Sedimentary Research. 2004, vol. 74, no. 6, pp. 933—937. DOI: 10.1306/051204740933.
21. Goossens D. The settling velocity of atmospheric dust particles in calm air and in turbulent environments // Powder Technology. 2019, vol. 356, pp. 235—247.
22. Wang L.-P., Maxey M. R. Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence // Journal of Fluid Mechanics. 1993, vol. 256, pp. 27—68. DOI: 10.1017/S002211209300269X.
23. Maxey M. R. The gravitational settling of aerosol particles in homogeneous, isotropic turbulence with zero mean flow // Journal of Fluid Mechanics. 1987, vol. 174, pp. 441—465. DOI: 10.1017/S002211208700022X. **МАБ**

REFERENCES

1. Khlodov D. S., Olennikov S. V., Musinov S. N., Nevedrov A. V., Subbotin S. P. On the methodology for determining the participation of coal dust in a methane-air mixture explosion. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2014, no. 2, pp. 150—155. [In Russ].
2. Vasiliev A. A., Pinaev A. V., Trubitsyn A. A., Grachev A. Yu., Trotsyuk A. V., Fomin P. A., Trilis A. V. What burns in a mine: methane or coal dust? *Fizika goreniya i vzryva*. 2017, vol. 53, no. 1, pp. 11—18. [In Russ]. DOI: 10.15372/FGV20170102.
3. Khoroshilova L. S., Tarakanov A. V., Khoroshilov A. V. Causes of methane and coal dust explosions in Kuzbass mines. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2012, no. 2, pp. 187—191. [In Russ].
4. Kornev A. V., Spitsyn A. A., Korshunov G. I., Bazhenova V. A. Preventing dust explosions in coal mines: Methods and current trends. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2023, no. 3, pp. 133—149. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2023_3_0_133.
5. Smirnyakov V. V., Rodionov V. A., Smirnyakova V. V., Orlov F. A. The influence of the shape and size of dust fractions on their distribution and accumulation in mine workings when the structure of the air flow changes. *Journal of Mining Institute*. 2022, vol. 253, pp. 71—81. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2022.12
6. Filin A. E., Tertychnaya S. V., Kurnosov I. Yu., Kolesnikova L. A. Mathematical modeling of mass transfer in colloidal systems. *Ugol'*. 2023, no. 5, pp. 72—76. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-5-72-76.
7. Mandal C., Prusty B. K., Pathak K., Patra A. K. Investigation of the settling dynamics and behaviour of PM2.5 and PM1.0 present in coal dusts in controlled environmental conditions. *Atmospheric Pollution Research*. 2026, vol. 17, article 102711. DOI: 10.1016/j.apr.2025.102711.
8. Li Yibo, Chen Xiangjun, Du Yunfei, Li Lin, Zuo Peiqi, Liu Mengke Research on the distribution law of air flow and dust in multi-process operations of coal mine fully mechanized caving face. *Energy Science & Engineering*. 2025, vol. 13, no. 11, pp. 5247—5267. DOI: 10.1002/ese3.70236.
9. Hongjie Z., Shaoheng G., Tian Z., Deji J., Xi C., Xingyu C. Study on mechanism of air distribution volume's influence on airflow, dust migration and spray dust reduction in fully mechanized caving face. *Scientific Reports*. 2026, vol. 16, no. 1, article 17780. DOI: 10.1038/s41598-026-49120-y.
10. Kudryashov V. V., Viktorov S. D., Kachanov A. N. On the distribution of mineral particles by size during the destruction of rock formations. *Journal of Mining Sciences*. 2006, no. 6, pp. 68—72. [In Russ].
11. Pozdnyakov G. A., Goloskokov S. I., Goloskokov E. I., Zakutsky E. L. Problems and prospects of developing mine explosion safety monitoring systems. *Russian Mining Industry Journal*. 2016, no. 4(128), pp. 66. [In Russ].
12. Podobrazhin S. N. Study of compositions to prevent dusting of open surfaces during coal mining. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2022, no. 1, pp. 67—74. [In Russ].
13. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V., Rybichev A. A. Investigation of the explosion and fire hazard of coal dust in formations of the middle stage of metamorphism. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2026, no. 5, pp. 80—94. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2026_5_0_80.
14. Garber W. *Empfehlungen für die Auslegung von sicheren Kohletrocknungsanlagen*. Ausrüstung. Beispiele. Fehleranalyse. Düsseldorf, 2021, 148 p.

15. Petrukhin P. M., Netseplyaev M. I., Kachan V. N., Sergeev V. S. *Preduprezhdenie vzryvov pyli v ugol'nykh i slantsevykh shakhtakh* [Prevention of dust explosions in coal and shale mines], Moscow, Nedra, 1974, 304 p.
16. Laryea A. E. N., Oluwasegun O. O., Anamor S. K., Nkansah B. O. Dust sources and impact: A review. *North American Academic Research*. 2022, vol. 5, no. 9, pp. 17 – 37. [In Russ]. DOI: 10.5281/zenodo.7068922.
17. Galkin A. V., Radionova S. A. Modeling the transport and sedimentation of fine dust during ventilation of dead-end mine workings. *Gornyi Zhurnal*. 2021, no. 5, pp. 84 – 89. [In Russ]. DOI: 10.17580/gzh.2021.05.12.
18. Romanchenko S. B., Kosterenko V. N., Trubitsin A. A., Kubrin S. S. Sedimentation processes of explosive aerosols under modern coal mining technologies. *Vestnik of safety in coal mining scientific center*. 2018, no. 2, pp. 6 – 15. [In Russ].
19. Isaevich A. G., Semin E. A. Study of the dynamics of suspended dust deposition in potash mines using numerical methods. *Journal of Mining Sciences*. 2023, no. 2, pp. 143 – 152. [In Russ]. DOI: 10.15372/FTPRPI20230214.
20. Ferguson R. I., Church M. A simple universal equation for grain settling velocity. *Journal of Sedimentary Research*. 2004, vol. 74, no. 6, pp. 933 – 937. DOI: 10.1306/051204740933.
21. Goossens D. The settling velocity of atmospheric dust particles in calm air and in turbulent environments. *Powder Technology*. 2019, vol. 356, pp. 235 – 247.
22. Wang L.-P., Maxey M. R. Settling velocity and concentration distribution of heavy particles in homogeneous isotropic turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*. 1993, vol. 256, pp. 27 – 68. DOI: 10.1017/S002211209300269X.
23. Maxey M. R. The gravitational settling of aerosol particles in homogeneous, isotropic turbulence with zero mean flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 1987, vol. 174, pp. 441 – 465. DOI: 10.1017/S002211208700022X.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кубрин Сергей Сергеевич¹ — д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, зав. лабораторией, e-mail: s_kubrin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0490-9065,
Харченко Анна Викторовна¹ — канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3036-6663,

Захаров Валерий Николаевич¹ — академик РАН, д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, научный руководитель Института, e-mail: val_zakharov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9309-2391,

¹ Институт проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН.
Для контактов: Харченко А.В., e-mail: av-kharchenko@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

S.S. Kubrin¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Head of Laboratory, e-mail: s_kubrin@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0490-9065,

A.V. Kharchenko¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Senior Researcher, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0003-3036-6663,

V.N. Zakharov¹, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Chief Researcher, Scientific Advisor of the Institute, e-mail: val_zakharov@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-9309-2391,

¹ Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources, Russian Academy of Sciences, 111020, Moscow, Russia.

Corresponding author: A.V. Kharchenko, e-mail: av-kharchenko@yandex.ru.

Получена редакцией 31.07.2026; получена после рецензии 10.09.2026; принята к печати 20.09.2026.
Received by the editors 31.07.2026; received after the review 10.09.2026; accepted for printing 20.09.2026.