

УДК 622.807

© А.А. Юрченко, А.А. Литвиненко, И.М. Чеберячко, О.А. Корж

## ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ В ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ ВЫРАБОТКАХ

© A. Yurchenko, A. Litvinenko, I. Cheberiachko, O. Korzh

## INVESTIGATION OF DYNAMIC PARAMETERS OF COAL DUST IN UNDERGROUND MOUNTAIN PROCESSES

Рассмотрены источники образования и распространения пыли в горных выработках выемочного участка угольной шахты. Установлены диаметры частиц угольной пыли, которые в условиях турбулентного переноса, находятся постоянно во взвешенном состоянии как в лаве, так и на вентиляционном штреке. Определены границы оседания пылевых частиц на вентиляционном штреке. Приведены рекомендации по размещению средств пылеподавления на вентиляционном штреке.

Розглянуто джерела створення і поширення пилу в гірничих виробках виїмкової ділянки вугільної шахти. Встановлені діаметри частинок вугільного пилу, які в умовах турбулентного перенесення, знаходяться постійно в підвішеному стані як в лаві, так і на вентиляційному штреку. Визначені межі осідання пилових частинок на вентиляційному штреку. Наведено рекомендації щодо розміщення засобів пригнічення пилу на вентиляційному штреку.

**Введение.** Опасность угольной пыли в атмосфере горных выработок определяется двумя факторами:

- высокое содержание пыли, превышающее регламентируемые санитарными нормами значения, является причиной профессиональных заболеваний горнорабочих пылевыми бронхитами и пневмокониозами, которые составляют более 70% от их общего числа;

- пыль при определённых условиях может взрываться даже на шахтах с незначительным выделением метана, вызывая при этом большие материальные и тяжёлые социальные последствия.

Практически все технологические процессы при ведении подземных горных работ сопровождаются пылеобразованием. Внедрение высокопроизводительных проходческих и выемочных комбайнов, рост нагрузки на забой и углубление горных работ обуславливает повышение интенсивности пылеобразования.

Наибольшее количество пыли возникает в угольных шахтах при выемке угля и проходке горных выработок, буровых и взрывных работах, а также транспортированию горной массы, сопровождающееся её измельчением и истиранием. Однако основная масса пыли поступает в рудничную атмосферу из очистных забоев в период выемки угля. При работе механизированного очистного комплекса угольной шахты источники пылеобразования по количеству образовавшейся пыли могут быть ориентировочно выражены в процентном от-

ношении следующим образом: выемка угля комбайнами - 50-60, передвижка секций механизированной крепи – 20-30, транспортировка угля конвейерами - 10-15, выемка ниш - 4-6, возведение крепи сопряжений - 2-3, запылённость поступающей струи - 1-2, прочие источники - 3-5 [1].

При исследовании пылевой динамики важнейшим параметром являются размеры частиц пыли, то есть их дисперсность. Дисперсность пылевого аэрозоля влияет на эффективность способов и средств пылеподавления, определяет характер его переноса турбулентной вентиляционной струёй воздуха. Кроме этого, каждый способ пылеподавления в большей или меньшей степени обладает избирательностью по отношению к частицам пыли различных размеров.

**Состояние вопроса.** В настоящее время в ведущих угледобывающих странах разработаны и внедрены компьютерные системы мониторинга уровня запылённости и пылевзрывоопасности горных выработок [2]. Для непрерывного контроля запылённости в угольных шахтах в этих странах выпускаются стационарные датчики: в США - DustTrak, в Германии – FMA-TMS1, в Польше – PL-1, в России – ИКП-2006. Стационарные измерители функционируют в составе локальных ((FMA-TMS) либо общешахтных аппаратно-программных комплексов. При этом используются как гравиметрические, так и оптические приборы, которые контролируют общую запылённость атмосферы без учёта фракций пыли.

С помощью этих приборов нет возможности исследовать миграцию и оседание аэрозольных частиц в турбулентном воздушном потоке в горных выработках. Турбулентный перенос пылевых частиц описывается сложными дифференциальными уравнениями [3], решение которых весьма затруднено из-за большого количества факторов, которые изменяются в пространстве и времени. Для определения размеров пылевых частиц, которые в турбулентном потоке постоянно находятся во взвешенном состоянии, а также скорости оседания более крупных частиц, используют экспериментальные методы исследований. Такие исследования позволили установить, что в условиях турбулентного воздушного потока в горных выработках выемочного участка постоянно во взвешенном состоянии находятся угольные частицы диаметром 5 мкм и менее [4].

В настоящей работе поставлена цель разработки инженерной методики исследования динамических параметров распространения угольной пыли на выемочном участке. В частности, определение размеров витающей пыли в лаве и на вентиляционном штреке, а также границ оседания крупнодисперсной пыли на вентиляционном штреке.

**Основная часть.** При исследовании пылевой динамики в горных выработках необходима информация о параметрах воздушного потока и режиме его движения. Режим движения воздуха в горной выработке оценивают по значению критерия Рейнольдса, который определяется из выражения

$$Re = \frac{gvd_z}{\mu},$$

где  $g$ - ускорение земного тяготения,  $\text{м/с}^2$ ;  $v$ - скорость воздушного потока в выработке,  $\text{м/с}$ ;  $d_e = \frac{4S}{P}$  – гидравлический диаметр выработки,  $\text{м}$ , где  $S$  – площадь сечения выработки,  $\text{м}^2$ ;  $P$  - периметр сечения выработки,  $\text{м}$ ;  $\mu = 18,2 \cdot 10^{-6}$   $\text{Па}\cdot\text{с}$  – динамическая вязкость воздуха.

В таблице 1 приведены параметры вентиляционных потоков лав и их вентиляционных штреков, характерных для шахт ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».

Как видно из таблицы, в выработках выемочного участка вентиляционные струи с весьма развитой турбулентностью, так как критерий Рейнольдса значительно больше 2300 [1].

Таблица 1

Параметры воздушных потоков лав и вентиляционных штреков шахт ПАО «ДТЭК Павлоградуголь»

Шахта	Параметры воздушного потока в лаве				Параметры воздушного потока вентиляционного штрека			
	$v, \text{м/с}$	$S, \text{м}^2$	$P, \text{м}$	$Re$	$v, \text{м/с}$	$S, \text{м}^2$	$P, \text{м}$	$Re$
Павлоградская	4,2	2,1	6,1	$3,1 \cdot 10^6$	1,7	12,8	13,9	$3,4 \cdot 10^6$
Терновская	3,3	1,9	5,5	$2,4 \cdot 10^6$	0,9	9,8	10,6	$1,8 \cdot 10^6$
Самарская	3,9	3,2	9,3	$2,9 \cdot 10^6$	2,3	11,2	12,2	$4,5 \cdot 10^6$
Западно Донбасская	3,5	3,0	8,7	$2,6 \cdot 10^6$	1,3	11,7	12,7	$2,7 \cdot 10^6$
Героев Космоса	4,0	2,5	7,3	$3,0 \cdot 10^6$	0,9	11,4	12,4	$1,7 \cdot 10^6$
Благодатная	2,2	2,0	5,8	$1,6 \cdot 10^6$	0,8	8,0	8,7	$1,5 \cdot 10^6$
Степная	3,7	2,4	7,0	$2,8 \cdot 10^6$	1,0	14,4	15,6	$2,0 \cdot 10^6$
Юбилейная	3,2	2,2	6,4	$2,4 \cdot 10^6$	0,6	9,5	10,3	$1,2 \cdot 10^6$
Днепровская	3,4	2,1	6,1	$2,5 \cdot 10^6$	1,3	10,0	10,8	$2,6 \cdot 10^6$
Сташкова	4,2	2,1	6,1	$3,1 \cdot 10^6$	1,7	12,8	13,9	$3,4 \cdot 10^6$

Турбулентный режим движения воздушного потока характеризуется возникновением пульсаций скорости его движения. Причиной возникновения таких пульсаций являются периодически повторяющиеся бурные локальные выбросы массы воздуха из неустойчивых замедленных участков пристеночной области потока, где воздух испытывает сильное торможение и имеет место весьма значительный градиент скорости движения. Выбросы воздуха порождают подковообразные вихри, уходящие вглубь потока и в свою очередь стимулирующие появление новых локальных отрывов потока. Масштаб первичных вихрей сравним с масштабом потока, а скорость – со скоростью потока; частота же соответствующих им пульсаций скорости сравнительно невелика. При математическом описании турбулентного движения мгновенная скорость потока в рассматриваемой точке для каждой из трёх составляющих -продольной (ось  $x$ ), поперечной (ось  $y$ ) и тангенциальной (ось  $z$ ) –представляется в виде суммы осреднённой скорости и скорости пульсаций.

Интенсивность турбулентности является мерой величины пульсационной составляющей скорости потока и определяется для каждой составляющей отношением средней квадратичной скорости пульсаций к средней скорости движения основного потока. В центральной части воздуховода интенсивность турбулентности составляет 3-5%, а в турбулентном пограничном слое – до 30-40%.

Процесс оседания аэрозольных частиц под действием силы тяжести в турбулентном потоке складывается из двух процессов:

- непрерывное оседание частиц книзу внутри несущих их пульсационных молей;

- беспорядочное по направлению, частоте и амплитуде движение частиц со спусками и подъёмами вместе с несущими их пульсационными молями, которое предопределяет появление турбулентной диффузии частиц, интенсивность которой для грубых частиц зависит от силы их тяжести.

Ввиду появления обратного диффузионного потока частиц эффективное значение скорости оседания частиц в турбулентном потоке оказывается всегда ниже, чем в ламинарном потоке, вплоть до нуля.

На рисунке 1 представлены направления векторов пульсационной скорости в воздушном потоке ( $V_{nx}$ ,  $V_{ny}$ ,  $V_{nz}$ ), направление скорости основного потока  $V_0$ , а так же эпюры пульсационной скорости в направлении основного потока.

Пылевые частицы под действием продольной скорости основного потока  $V_0$  и продольных пульсаций скорости переносятся в выработку. Для дальнейших расчётов принимаем среднюю скорость пульсаций по сечению выработки, равной  $0,2 v_{\text{пmax}}$ . Таким образом, скорость движения основного потока составляет  $1,2 V_0$ . В то же время под действием силы тяжести пылевая частица оседает. Но кроме этой силы на частицу в вертикальной плоскости воздействует сила лобового давления пульсаций воздуха. При этом часть пульсаций препятствует оседанию, так как направлена вверх, а другая часть способствует оседанию частицы, так как воздействует по направлению силы тяжести.

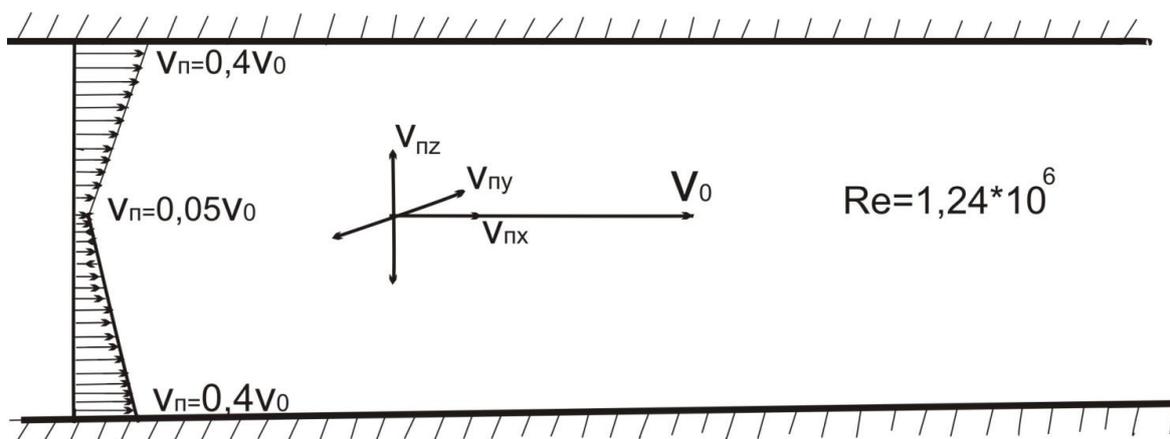


Рис. 1. Направление и параметры пульсационных скоростей в турбулентном потоке

При решении задачи по определению времени оседания пылевой частицы принимаем к рассмотрению пульсации, которые препятствуют оседанию.

Рассмотрим силы, которые действуют на частицу при ее оседании в турбулентном воздушном потоке (рис.2).

Уравнение движения частицы в соответствии со вторым законом Ньютона запишется в виде

$$ma = \sum F, \quad (1)$$

где  $m$  – масса частицы, кг;  $a$  – ускорение движения частицы, м/с<sup>2</sup>;  $\sum F$  - сумма сил, действующих на частицу, Н.

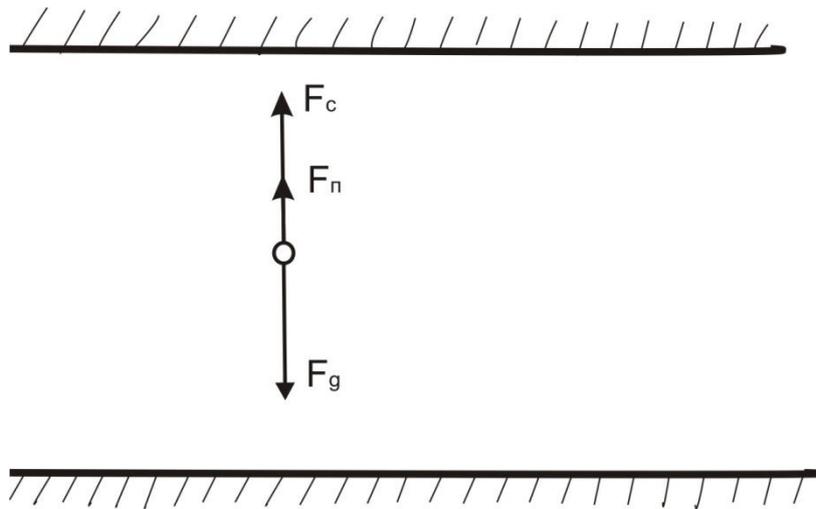


Рис. 2. Схема определения сил, действующих на пылевую частицу

Оседание пылевой частицы в турбулентном воздушном потоке происходит под воздействием следующих сил:

1. Сила аэродинамического сопротивления воздуха обозначена как  $F_c$ , Н. Она определяется из выражения [5]

$$F_c = 0,5\rho_{\Gamma}\xi v_{oc}^2 S_m, \quad (2)$$

где  $S_m$  – площадь поперечного (миделевого) сечения сферической частицы, м<sup>2</sup>;  $\xi$  – коэффициент сопротивления, который зависит от числа Рейнольдса. Для стоксовских частиц  $\xi = \frac{24}{Re}$ ;  $v_{oc}$  – скорость оседания частицы, м/с.

После подстановки значений и преобразований выражение (2) для стоксовских частиц примет вид

$$F_c = 3\pi\mu d_{\text{ч}} v_{oc}.$$

Направлена сила сопротивления противоположно вектору скорости оседания частицы.

2. По направлению вектора ускорения  $g$  на частицу действует сила тяжести

$$F_g = mg = \frac{\rho_c \pi d_c^3}{6} g .$$

3. Сила лобового давления пульсаций воздуха на пылевую частицу, которая равна произведению динамического напора пульсационного потока на площадь сечения частицы и направлена против вектора скорости оседания частицы. С учётом ранее обусловленного значения пульсационной скорости эта сила может быть определена из выражения

$$F_n = \frac{\rho_e v_n^2 \pi d_c^2}{8} = \frac{\rho_e (0,2v_0)^2 \pi d_c^2}{8} .$$

Если пренебречь силами инерции, вызванными изменением скорости воздуха, силами инерции вытесненного газа, силами сопротивления при изменении ускорения движения частицы, электростатическими силами, действием силы Архимеда, поскольку плотность газа на три порядка меньше плотности угольной пыли, то уравнение движения частицы (1) в этом случае запишется в виде:

$$ma = F_g - F_c - F_n .$$

При установившейся скорости оседания частицы выражение (1) примет вид:

$$ma = F_g - F_c - F_n = 0 ,$$

или

$$Fg = F_c + F_n$$

Подставим в него значения сил, определенных выше. Получим

$$\rho \frac{\pi d_c^3}{6} g = 3\pi \mu d_c v_{oc} + \frac{\rho_e (0,2v_0)^2 \pi d_c^2}{8} . \quad (3)$$

Первоначально можно определить диаметры пылевых частиц, которые в турбулентном потоке воздуха в лаве будут находиться во взвешенном состоянии и выносятся из неё

Для определения диаметра таких частиц, для которых скорость оседания равна нулю, из выражения (3) найдём значение скорости оседания и приравняем его нулю:

$$g_{oc} = \frac{\rho_c d_c^2 g}{18\mu} - \frac{\rho_e (0,2v_0)^2 d_c}{24\mu} = 0 . \quad (4)$$

После преобразований и сокращений получим

$$d_c = \frac{3\rho_e (0,2g_0)^2}{4\rho_c g} . \quad (5)$$

Установим диаметры таких частиц для граничных значений скоростей основного потока воздуха в лаве для шахт Западного Донбасса, равной 2,2 и 4.2 м/с.

Расчёты показали, что при скорости движения воздуха 2,2 м/с во взвешенном состоянии в лаве постоянно будут находиться частицы диаметром 12,7 мкм и менее, а при скорости 4,2 м/с – 47,25 мкм и менее. Эти частицы воздушным потоком выносятся на вентиляционный штрек.

Исследования дисперсности пыли в исходящей струе лавы [1] показали, что около 90% пылевых частиц имеют размеры до 10 мкм, а частицы с диаметром 5 мкм и менее при скорости струи 1,3 м/с находятся постоянно во взвешенном состоянии. В таблице 2 приведены результаты этих исследований для условий шахт Западного Донбасса.

При этом принимаем среднее значение пульсационной скорости по сечению горной выработки, равной 0,2 *v*<sub>0</sub>. Таким образом, в турбулентном потоке из-за воздействия пульсаций площадь осаждения пылевых частиц увеличивается, так как скорость осаждения части пылинки увеличивается, а другой части – снижается.

При установлении границы осаждения пылевых частиц различных фракций принимаем во внимание только пульсации, которые препятствуют осаждению пылевых частиц.

Таблица 2

Концентрация пыли на исходящей струе очистного участка

Количество частиц, %	Диаметр пылевых частиц, мкм				
	<2	2-5	5-10	10-25	>25
Счётная	46,2	26,0	18,0	8,7	2,1
Массовая	0,12	1,06	6,52	44,2	48,1

Прежде всего, из формулы (4) находим скорости оседания пылевых частиц диаметром 10; 25 и 50 мкм. При известной скорости оседания этих частиц можно найти время их оседания от кровли выработки. Эти данные позволяют найти границы их оседания в вентиляционном штреке при скорости движения воздушного потока, равным 1,3 м/с. Результаты расчётов представлены в таблице 3.

Далее установим из выражения (5) диаметр пылевых частиц, для которых скорость оседания равна нулю. Проведенные расчёты показали, что в турбулентном потоке на вентиляционном штреке при скорости движения воздуха 1,3 м/с, пылевые частицы угля диаметром 4,3 мкм будут постоянно находиться во взвешенном состоянии из-за наличия пульсаций воздушного потока. Расчёты показали хорошую сходимость с экспериментальными исследованиями и адекватность полученной математической модели процесса осаждения частиц в турбулентном потоке.

Границы оседания пылевых частиц в вентиляционном штреке

Диаметр пылевых частиц, мкм	10	25	50
Скорость оседания, м/с	0,0022	0,021	0,096
Время оседания, с	1136	119	26
Граница оседания, м	1476	154	34

На рисунке 3 схематично представлены границы оседания на вентиляционном штреке пылевых частиц различных фракций.

Полученные результаты являются исходной информацией при принятии решения по вопросам пылеподавления на выходе из лавы.

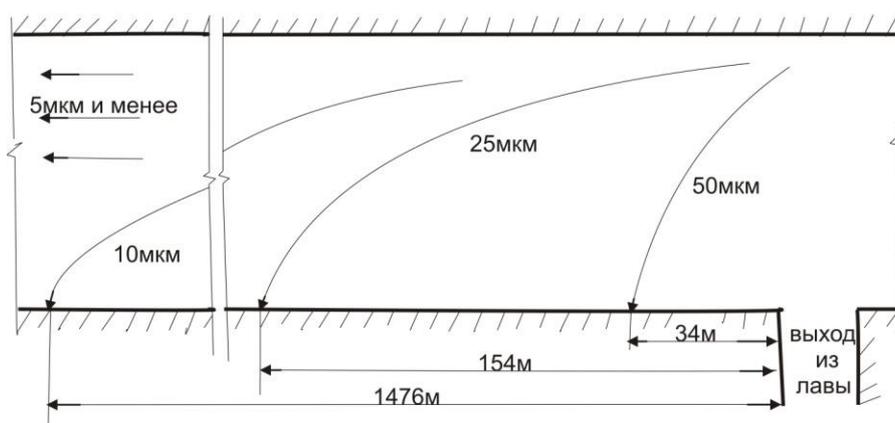


Рис.3. Процесс оседания пылевых частиц после выхода из лавы

В соответствии с «Инструкцией по предупреждению и локализации взрывов угольной пыли» средства пылеподавления должны устанавливаться как в лаве во всех местах пылеобразования, так и на вентиляционном штреке не далее 20м от выхода из лавы. При этом рекомендуется для повышения эффективности подавления мелкодисперсных фракций взвешенной пыли установка трёх туманообразующих секций, оборудованных форсунками низкого давления TEFEN (Израиль).

#### Выводы.

1. Воздушный поток в горных выработках очистного участка характеризуется развитой турбулентностью (число Рейнольдса составляет порядка  $1,24 \cdot 10^6$ ), что вызывает возникновения пульсаций скорости потока во всех направлениях.

2. Пульсационные потоки (моли) переносят пылевые частицы и вызывают появление турбулентной диффузии, при которой крупные частицы оседают по сложной траектории, а мелкие постоянно находятся во взвешенном состоянии.

3. Разработана инженерная методика расчёта динамических параметров переноса угольной пыли на выемочном участке.

4. Получена аналітична залежність швидкості осідання пилових частинок від швидкості руху повітряного потоку в горній вироботці, щільності пилових частинок і їх діаметра, а також в'язкості середовища осідання.

5. Розрахунки показали, що для умов шахт Західного Донбасу в лаві в постійно взвешеному стані знаходяться частинки пилу від 47 мкм і менше, а на вентиляційному штреку – близько 5 мкм і менше. С вентиляційного штреку ці фракції виносяться вихідною струєю шахти і погіршують екологічну обстановку на прилеглих територіях.

6. Встановлені межі осідання на вентиляційному штреку від виходу з лави різних фракцій вугільної пилу: для частинок діаметром 50 мкм – 34 м; 25 мкм – 154 м; 10 мкм – 1476 м.

#### Перечень ссылок

1. Zhuravlev, V., Demisheva, E, Spirin, L. (1988). Aerodynamic methods of combating coal dust. Rostov: From Rostov University.
2. Romanenko, S. (2007). Hardware-software complex for controlling dust levels based on the new generation of sensors. Mining Information and Analytical Bulletin, 273-279.
3. Mednikov, E. (1981). Turbulent transport and deposition of aerosols. Moskva: Nauka.
4. Grodel, G., Gubsky, Yu., Krivokhizha, B., Shpak, A. (1983). Struggle against dust at coal mining. Kiev: Technika.
5. Belousov, V. (1988). Theoretical bases of gas cleaning processes. Moskva: Metallurgy.

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of an engineering technique for calculating the parameters of dust dynamics in mining excavations.

**The research methodology** consists in analyzing literature sources on the turbulent transfer of suspended dust particles, justifying assumptions and simplifications, and on this basis in developing an engineering technique for calculating the dynamic parameters of settling and transfer of coal dust.

**Results of the research.** Calculations showed that for the conditions of the mines of the Western Donbass in the lava in a constantly suspended state there are dust particles from 47  $\mu\text{m}$  or less, and on the ventilation drift - about 5  $\mu\text{m}$  or less. The boundaries of settling on the ventilation passage from the outlet from the lava of various fractions of coal dust are established: for particles with a diameter of 50  $\mu\text{m}$ , 34 m; 25 microns - 154m; 10 microns - 1476m.

**Scientific novelty.** An analytical dependence is established that allows calculating the sedimentation rate of dust particles in the mine workings

**Practical significance.** The developed technique allows to determine the diameters of dust particles constantly in suspension for specific aerodynamic parameters of the mine workings, as well as the boundary of the settling of various dust fractions on the soil

**Keywords:** coal mine. cutting site. dustiness of air, subsidence of particles, suspended state. border distribution