

*М.С. Горобей, Ю.Ф. Булгаков, д-р техн. наук, профессор,
Т.В. Костенко, канд. техн. наук, доцент, Д.А. Журбинский, канд. техн. наук
(ДонНТУ, Донецк)
(ЧИПБ имени Героев Чернобыля, Черкассы)*

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО И ГРАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УГЛЕВОЗДУШНЫЕ АЭРОВЗВЕСИ ДЛЯ ПРОФИЛАКТИКИ ВЗРЫВОВ

В статье приведены результаты исследований процесса пылеподавления взвешенной в воздухе угольной пыли с помощью распыленной воды, с учетом действия гравитационных и электростатических полей. Было установлено, что в активной зоне действия факела эффективность подавления пыли определяется величиной вектора скорости капель жидкости. За пределами активной зоны эта эффективность определяется величиной скорости падения капель и электрическими силами. Показано, что результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: Среднегармонический диаметр частиц угля, взвешенная угольная пыль, коэффициент захвата частиц пыли, начальная концентрация пыли на входе в водяную завесу, начальная концентрация диспергированной воды.

У статті наведено результати досліджень процесу пилопопридушення завислого в повітрі вугільного пилу за допомогою розпорошеної води, з урахуванням дії гравітаційних і електростатичних полів. Було встановлено, що в активній зоні дії факела ефективність придушення пилу визначається величиною вектора швидкості крапель рідини. За межами активної зони ця ефективність визначається величиною швидкості падіння крапель і електричними силами. Показано, що результати розрахунків добре узгоджуються з експериментальними даними.

Ключові слова: середньогармонічний діаметр частинок вугілля, завислий вугільний пил, коефіцієнт захоплення частинок пилу, початкова концентрація пилу на вході в водяну завісу, початкова концентрація диспергованої води.

This paper presents results of research on dust suppression suspended in air coal dust by spraying water, taking into account the action of gravitational and electrostatic fields. It was found that in the active area of the flame suppression efficiency of dust is determined by the velocity vector of the liquid droplets. Outside the core of this efficiency is determined by the speed of drops and electrical forces. It is shown that the calculation results are in good agreement with the experimental data.

Key words: Srednegarmonicheskyy particle diameter of coal, coal dust weighted coefficient capture dust particles, the initial concentration of dust at the inlet of the water curtain, the initial concentration of the dispersed water.

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. Борьба с пылью является одним из важнейших направлений гуманизации труда в угольных шахтах, так как пыль не только ухудшает санитарно-гигиенические условия труда, но и при определенных условиях может взрываться. Взрывы газа и угольной пыли относятся к авариям с наиболее тяжкими последствиями в социальном и экономическом плане. Взрыв метановоздушной смеси и угольной пыли в шахте, сопровождающийся формированием и распространением по сети горных выработок ударных волн. очень опасный вид подземной аварии. Угрожая жизни и здоровью горнорабочих, взрыв всегда приводит к разрушению выработок и повреждению расположенного в них горного оборудования. При этом социальные, матери-

альные и финансовые потери могут достигать катастрофических размеров. Общее число аварий, связанных с пожарами, взрывами газа, пыли и внезапными выбросами в угольных шахтах составляет примерно 50% от общего числа всех аварий в шахтах. Решение проблемы предотвращения взрывов и пожаров и обеспечение безопасности труда в угольных шахтах относится к приоритетным по национальным масштабам проблемам.

Результаты анализа последних исследований и публикаций. В статье изложены результаты исследований динамики частиц пыли и капель жидкости, которые позволяют раскрыть механизм взаимодействия распылённой жидкости с угольной пылью в активной зоне факела. При описании процесса мы будем исходить, как и в ряде работ [1, 2, 3] из того, что взаимодействие возможно за счёт возникновения относительной скорости движения частиц пыли и капель жидкости. В результате этого взаимодействия происходит "прочёсывание" каплями воды облака взвешенной пыли. Этот эффект тем больше, чем время "прочёсывания" больше и чем больше концентрации капель жидкости и частиц пыли.

Постановка задачи исследований. Научная задача состоит в развитии исследований процесса пылеподавления взвешенной в воздухе угольной пыли с помощью распыленной воды, с учетом действия гравитационных и электростатических полей.

Результаты исследований. Для учёта взаимодействия капельной жидкости и угольной пыли, приводящего к осаждению последней в горной выработке, будем считать, что капли жидкости и частицы угольной пыли в потоке воздуха представляют собой полидисперсную среду со среднегармоническими диаметрами

$$d_k = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \gamma_i / d_i}; \quad d_q = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \gamma_j / d_j}, \quad (1)$$

где d_k – среднегармонический диаметр капель жидкости, м; d_q – среднегармонический диаметр частиц угольной пыли, м; i – i -тая фракция капель жидкости; j – j -тая фракция частиц пыли; d_i – диаметр i -той фракции капель жидкости или частиц пыли, м; d_j – диаметр j -той фракции частиц пыли, м; γ_i – доля i -той фракции капель жидкости; γ_j – доля j -той фракции частиц угля.

Среднегармонический диаметр частиц угля и капель жидкости выбирается для расчётов таким же образом, как и определение дробимости угля в лабораторных условиях. Такой подход позволяет значительно упростить расчёты вероятности пылеподавления в отличие от предложенной модели в работе [4], где требуются такие расчёты для каждой фракции.

Будем считать, что взвешенная угольная пыль вдали от источника её образования уже приобрела скорость, совпадающую со скоростью воздуха, и находится во взвешенном состоянии. Концентрация пыли при входе в зону действия водяной завесы будет изменяться согласно [4, 5] пропорционально самой концентрации пыли, относительной скорости движения частиц пыли и капель жидкости, а также суммарной эффективной площади миделева сечения частиц пыли и капель жидкости, в результате чего можно записать

$$V \frac{dC}{dt} = -e \frac{\pi}{4} (m d_q^2 + n d_k^2) \sqrt{(u \pm u_0)^2 + v^2} C, \quad (2)$$

где V – некоторый объём выработки, в котором осуществляется взаимодействие пылевого и капельного потоков, м³;

C – концентрация пыли в рассматриваемом объёме, кг/м³;

e – коэффициент захвата частиц пыли;

m – количество частиц пыли в рассматриваемом объёме;

n – количество капель жидкости в рассматриваемом объёме.

В уравнении (2) в отличие от работ [4, 5, 7, 8] учтена суммарная площадь частиц пыли и капель жидкости, загромаждающих сечение выработки, а не сумма их радиусов в квадрате, что лишено физического смысла. Кроме того, рассматривается абсолютная относительная скорость, как модуль или величина её вектора, а не только продольная составляющая скоро-

сти капель жидкости, поскольку вертикальная составляющая вносит свой весомый вклад, особенно при больших диаметрах капель, что ранее не принималось во внимание.

Представим выделенный объём выработки как произведение

$$V = V_k \frac{V}{V_k} = \rho \frac{\pi}{6} n d_k^3 / Z, \quad (3)$$

где Z – концентрация капель жидкости в рассматриваемом объёме, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Подставляя формулу (3) в уравнение (2), получим

$$\frac{dC}{dt} = -e \frac{3}{2\rho} \frac{m d_q^2 + n d_k^2}{n d_k^3} \sqrt{(u - u_0)^2 + v^2} CZ \quad (4)$$

Поскольку отношение площадей частиц и капель можно выразить через отношение их концентраций, то оно будет равно

$$\frac{m d_q^2}{n d_k^2} = \frac{\rho}{\rho_q} \frac{C}{Z} \frac{d_k}{d_q}, \quad (5)$$

где ρ_q – плотность частиц угля, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Так как $\rho/\rho_q = 1000/1300 = 0,77$, то уравнение (2.31) примет вид

$$\frac{dC}{dt} = -e \frac{3}{2\rho} \frac{d_q + 0,77 d_k C / Z}{d_q d_k} \sqrt{(u - u_0)^2 + v^2} CZ. \quad (6)$$

Линеаризуем полученное уравнение, полагая отношение концентраций пыли и капель жидкости приблизительно постоянным, и получим

$$\frac{dC}{dt} = -e \frac{3}{2\rho} \frac{d_q + 0,77 d_k C_0 / Z_0}{d_q d_k} \sqrt{(u - u_0)^2 + v^2} CZ, \quad (7)$$

где C_0 – начальная концентрация пыли на входе в водяную завесу, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Z_0 – начальная концентрация диспергированной воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Начальное условие для уравнения (7) будет

$$C(0) = C_0. \quad (8)$$

Решение уравнения (7) с начальным условием (8) можно представить в общем виде:

$$C(t) = C_0 \exp \left[- \frac{3}{2\rho} \frac{d_q + 0,77 d_k C_0 / Z_0}{d_q d_k} \int_0^t e \sqrt{(u - u_0)^2 + v^2} Z(\tau) d\tau \right] \quad (9)$$

Для вычисления интеграла, входящего в решение (9), используем ранее полученные формулы (1) и (7). Как показывают данные [4], коэффициент захвата e является сложной функцией, зависящей от диаметров частиц пыли и капель жидкости, а также скоростей их движения. Однако, без учёта электростатических сил, коэффициент захвата e находится в узком диапазоне 0,8 – 1,0 при относительной скорости движения капель жидкости более 1 м/с и диаметре частиц пыли 5 мкм и более [4, 35]. Таким образом, в активной зоне действия факела среднее значение коэффициента захвата $e = e_0 \approx 0,9$.

Неизвестной остаётся функция Z концентрации распылённой жидкости в вентиляционном потоке. Для её отыскания используем уравнение нестационарного переноса примеси с учётом ее потерь на стенках выработки и на почве под действием сил гравитации [4]:

$$\frac{dZ}{dt} = - \frac{k v_2}{h} Z - \frac{\gamma \Omega}{S} Z, \quad (10)$$

где k – коэффициент неравномерного распределения капель жидкости по высоте;

γ – коэффициент потерь капель жидкости на стенках выработки, м/с.

Начальное условие для уравнения (10) будет

$$Z(0) = Z_0, \quad (11)$$

где Z_0 – начальная концентрация диспергированной жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Решение уравнения (10) с начальным условием (11) представим в виде [4]:

$$Z(t) = Z_0 \exp\left[-\left(\frac{k\nu_2}{h} + \frac{\gamma\Omega}{S}\right)t\right] \quad (12)$$

Таким образом, подынтегральное выражение будет известной функцией, и сам интеграл может быть вычислен численными методами.

Для упрощения задачи выделим активную (турбулентную) зону действия факела, в которой будут преобладать динамические силы, а в остальной части – гравитационные и электростатические. Тогда в активной зоне дискриминанты приблизительно будут равны: $\Delta_x \approx \Delta_y \approx a_1^2$. В результате формулы для расчёта продольной и поперечной составляющих скорости вместо формул будем иметь

$$\begin{aligned} u(t) &= u_0 + \frac{(u_1 \cos \alpha_2 \pm u_0) \exp(-a_1 t)}{1 + \operatorname{Re}_x [1 - \exp(-a_1 t)] / 48}; \\ v(t) &= \frac{u_1 \sin \alpha_2 \exp(-a_1 t)}{1 + \operatorname{Re}_y [1 - \exp(-a_1 t)] / 48} \end{aligned} \quad (13)$$

Так как в активной зоне действия факела $u_1 \gg u_0$, то используя формулы (13), для определения величины абсолютной скорости движения капель жидкости во всех направлениях приближённо получим

$$U(t) = \sqrt{(u \pm u_0)^2 + v^2} \approx \frac{u_1 \exp(-a_1 t)}{1 + \operatorname{Re} [1 - \exp(-a_1 t)] / 48}, \quad (14)$$

где среднее число Рейнольдса во всех направлениях движения капель жидкости равно

$$\operatorname{Re} = \frac{u_1 d}{\nu} \quad (15)$$

Если границы факела не достигают стенок выработки, то потерь капель жидкости в активной зоне нет, однако здесь всё зависит от объёма V_ϕ , который займут капли жидкости, и объёма выработки V , в которой находится активная зона. Отношение этих объёмов будет равно

$$\frac{V_\phi}{V} = \frac{k_\phi S_\phi l}{Sl} = \frac{k_\phi S_\phi}{S}, \quad (16)$$

где k_ϕ – коэффициент заполнения диспергированной жидкостью объёма выработки в активной зоне действия факела [4, 35] (для конусной форсунки $k_\phi = 1/3$; для центробежной форсунки при полном раскрытии факела $k_\phi = 1$);

S_ϕ – площадь, перекрываемая потоком распылённой жидкости на конце длины факела, м^2 ; l – длина факела, м .

Таким образом, в активной зоне действия одного факела средняя концентрация диспергированной жидкости будет равна

$$Z_0 = \frac{k_\phi S_\phi q_\phi}{3S Q_0}, \quad (17)$$

где q_ϕ – расход воды через одну форсунку, $\text{кг}/\text{м}^3$;

Q_0 – расход воздуха в выработке, $\text{м}^3/\text{с}$.

В этом случае при $e = e_0$ и $Z = Z_0$ интеграл, входящий в формулу (2.38) с учётом (2.43) будет равен

$$f(t) = \int_0^t e \sqrt{(u \pm u_0)^2 + v^2} Z dt = \frac{e_0 Z_0}{a_2} \ln \{1 + \operatorname{Re} [1 - \exp(-a_1 t)] / 48\}. \quad (18)$$

Очевидно, в конце зоны действия факела экспонентой в формуле (14) можно пренебречь, откуда получим

$$f_1 = \frac{e_0 Z_0}{a_2} \ln(1 + \operatorname{Re} / 48). \quad (19)$$

Подставляя предельное значение интеграла (19) в формулу (9), найдём вероятность того, что действие одного факела приведёт к снижению запылённости до уровня

$$P_1 = C_1 / C_0 = \exp \left[- \frac{3e_0 Z_0 / d_k + 0,77C_0 / d_c}{2\rho a_2} \ln(1 + \text{Re}/48) \right], \quad (20)$$

где C_1 – концентрация пыли в конце активной зоны факела, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Так как факелы действуют независимо друг от друга, то вероятность снижения запылённости в активной зоне при действии их всех будет равняться произведению вероятностей при действии каждого, в результате чего получим

$$P_1 = C_1 / C_0 = \exp \left[- \frac{3ne_0 Z_0 / d_k + 0,77C_0 / d_c}{2\rho a_2} \ln(1 + \text{Re}/48) \right], \quad (21)$$

где n – количество факелов.

Если факел не перекрывает всего сечения выработки, то их оптимальное количество выбирается из соображений того, чтобы сумма всех сечений факелов приближённо равнялась сечению выработки:

$$n_m \approx S / S_\phi = S / (\pi R^2), \quad (22)$$

где R – максимальный радиус сечения факела, м.

Максимальный радиус сечения конусного факела можно определить, если известны угол его раствора и длина факела. Длину факела найдём из формулы в неподвижном воздухе ($u_0 = 0$), полагая при этом экспоненту равной нулю:

$$l = \frac{1}{a_2} \ln(1 + \text{Re}/48). \quad (23)$$

Подставляя в формулу (23) выражения (16), получим

$$l = \frac{8\rho d_k}{3\rho_0} \ln[1 + u_1 d_k / (48\nu)]. \quad (24)$$

На рис. 1 представлена зависимость (24) длины активной зоны факела от диаметра капель жидкости при различной скорости их вылета из форсунки. Как видно из рис. 1, длина активной зоны факела при диаметре капель 200 мкм находится в пределах 0,5 – 1,0 м. За этой зоной начинается осаждение капель жидкости на почву выработки под действием сил гравитации.

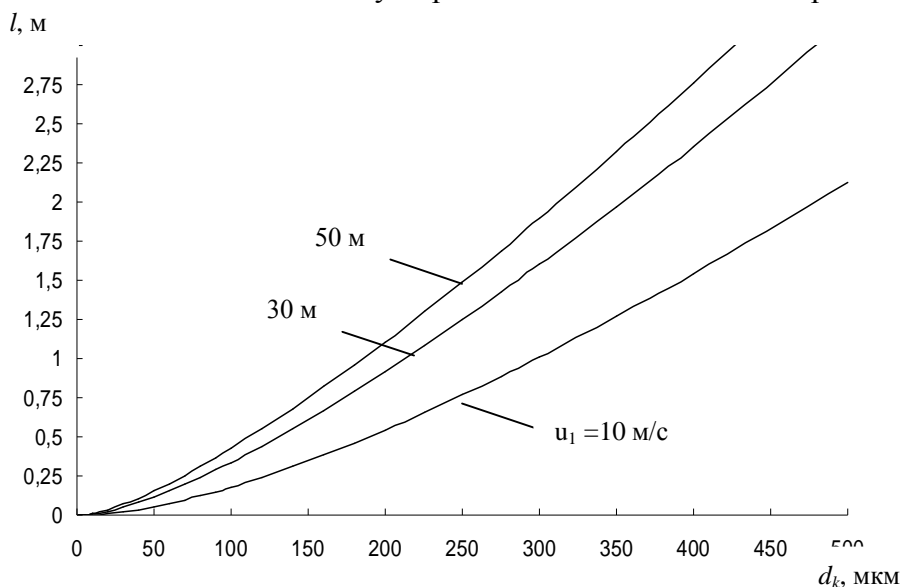


Рисунок 1 – Зависимость длины активной зоны факела от диаметра капель жидкости при разных скоростях их вылета из форсунки

Так как радиус факела конусной форсунки связан с углом раствора факела и его длиной, то он равен

$$R = l \operatorname{tg}(\varphi / 2), \quad (25)$$

где φ – угол раствора факела, град.

Используя формулу (25), можно определить максимальную площадь сечения факела

$$S_{\phi} = \pi R^2 = \pi l^2 \operatorname{tg}^2(\varphi / 2). \quad (26)$$

На рис. 2 представлена зависимость площади, перекрываемой потоком распылённой жидкости, от угла раствора факела и их количества. При расчётах принята скорость вылета капель жидкости $u_1 = 50$ м/с и их средний диаметр $d_k = 200$ мкм. Как показывают результаты расчёта (рис.2), при работе одной форсунки и углах раствора факела до 40° перекрывается потоком распылённой жидкости всего до $0,5$ м². В то же время можно перекрыть всё сечение выработки площадью $9 - 10$ м², если включить в работу 3 форсунки с углами раствора факела $80^\circ - 90^\circ$.

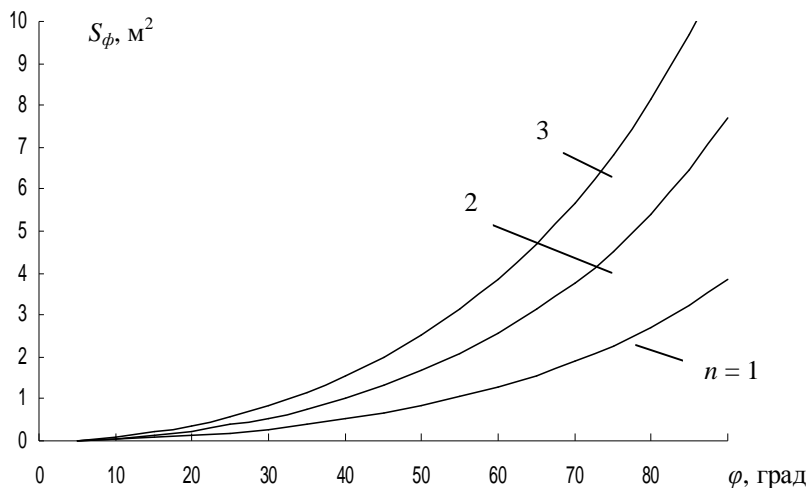


Рисунок 2 – Зависимость площади, перекрываемой потоком распылённой жидкости, от угла раствора факела и их количества

Ещё более лучшего результата можно достичь, "прочёсывая" капельной жидкостью весь объём активной зоны факела, расположив его у почвы выработки с углом раствора факела 90° , поскольку в этом случае $k_{\phi} = 1$.

Используя формулу (24) и подставляя её в (21), получим упрощённую зависимость вероятности обеспыливания в активной зоне факела

$$P_1 = C_1 / C_0 = \exp \left[- \frac{3ne_0 l}{2\rho} (Z_0 / d_k + 0.77C_0 / d_c) \right]. \quad (27)$$

Формула (27) ещё более упрощается, если пренебречь с некоторым "запасом" площадью, заполненной пылью по сравнению с площадью, заполненной диспергированной жидкостью, в результате чего получим

$$P_1 = C_1 / C_0 = \exp \left[- \frac{3ne_0 k_{\phi} S_{\phi} l}{2\rho S d_k} \frac{q_{\phi}}{Q_{00}} \right]. \quad (28)$$

Принимая для расчётов среднее значение диаметра капель жидкости $d_k = 250$ мкм, рассмотрим, как меняется вероятность пылеулавливания от концентрации распылённой жидкости. На рис. 3 представлена зависимость вероятности пылеподавления от концентрации распылённой жидкости при действии 6-ти форсунок.

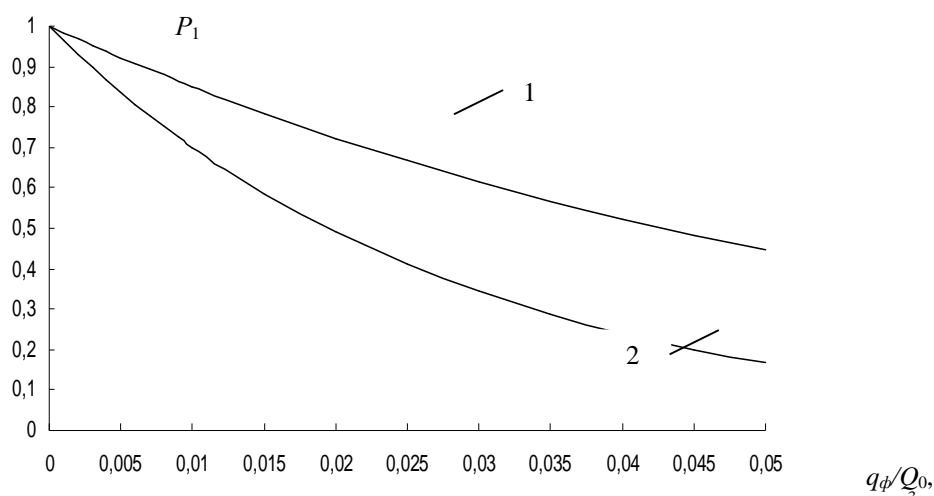


Рисунок 3 – Вероятность пылеподавления в активной зоне факела в зависимости от удельного расхода распылённой жидкости при действии 6-ти конусных форсунок в центре выработки и (2) при угле раствора факела 90° (1) и 180° (2)

Расчёты производились при следующих данных: $l = 1,5$ м; $S_{\phi}/S = 1$; $\rho = 1000$ кг/м³; $e_0 = 0,9$. Коэффициент заполнения объёма активной зоны принимался равным $k_{\phi} = 1$ для форсунки с углом раствора факела 90° и $k_{\phi} = 1/3$ – для форсунки с углом раствора факела $\phi = 90^{\circ}$. Как показывают расчёты, оптимальные длина и относительная площадь орошения сечения выработки могут иметь место согласно (25) и (26) при скорости истечения капель жидкости $u_1 = 50$ м/с, угле раствора форсунки $\phi = 90^{\circ}$ и площади поперечного сечения выработки $S = 7$ м².

Концентрация капельной жидкости при действии одной форсунки, как и принято ранее, представляет собой отношение её расхода к расходу воздуха

$$Z_0 = q_{\phi} / Q_0, \quad (29)$$

где q_{ϕ} – расход капельной жидкости через одну форсунку, кг/с;

Q_0 – расход воздуха, м³/с.

Выводы. Как показывают результаты расчёта (рис.3), при применении 6-ти конусных форсунок с расходом каждая $q_{\phi} = 0,25$ кг/с можно снизить запылённость воздуха на 60% в активной зоне действия факела при угле его раствора 180° , если расход воздуха $Q_0 = 10$ м³/с. В то же время применение тех же 6-ти форсунок, расположенных в центре выработки позволит снизить концентрацию пыли всего на 37% при угле раствора факела 90° . Это объясняется тем, что форсунка с полным раствором факела "прочёсывает" сразу весь объём активной зоны, в то время как форсунка, образующая конус, – всего 1/3 этого объёма.

Список литературы

1. Ножкин Н. В. Режимы внедрения жидкости в угольный пласт / Ножкин Н. В. // Технология добычи угля подземным способом. – М.: ЦНИИЭИуголь, 1987. – №2. – С.99-106.
2. Гого В. Б. Развитие теории и совершенствование средств гидрообеспыливания для улучшения условий труда шахтеров по пылевому фактору / В. Б. Гого // автореф. докт. дис. – Макеевка-Донецк. – 2009. – 38с.
3. Смачивание пыли и контроль запылённости воздуха в шахтах / Р.Р. Кудряшов, Л.Д. Воронина, М.К. Шуринова, Ю.В. Воронина, В.А. Большаков. – М.: Наука, 1979. – 196 с.
4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Лойцянский Л. Г. – М.: Наука, 1970. – 914 с.
5. Физико-химические основы гидрообеспыливания и предупреждения взрывов угольной пыли / В.И. Саранчук, В.Н. Качан, В.В. Рекун и др. – Киев: Наук. Думка, 1984. – 216 с.

6. Медников Е.П. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – М.: Наука, 1980. – 176 с.
7. Ищук И. Г. Средства комплексного обеспыливания горных предприятий: справочник / И. Г. Ищук, Г. А. Поздняков. – М.: Недра, 1991. – 223 с.
8. Петрухин П.М. и др. Борьба с угольной и породной пылью в шахтах. – М.: Недра, 1981. – 271 с.

References

1. Nozhkin N.V. Modes of introduction of fluid into the coal seam // Technology underground coal mining sposobom. M: TsNIIIEIugol, 1987. – №2. – S.99-106.
2. Gogo V.B. Development of the theory and perfection of means gidroobespylivaniya to improve working conditions for miners dust factor. Abstract. Doctor. dis. – МАКЕЕВКА-Donetsk. – 2009. – 38с.
3. Wetting dust control and dusty air in the mines / R.R. Kudryashov, L.D. Voronin, M.K. Shurina, Y. Voronin, V.A. Bolshakov. – М.: Nauka, 1979 – 196 p.
4. L.G. Loitsiansky. Fluid Mechanics. – М.: Nauka, 1970 – 914 p.
5. Physical and chemical bases gidroobespylivaniya and prevent coal dust explosions / V.I. Locust, V.N. Kachan, V. Rekun et al. – Kiev: Science. Dumka, 1984. – 216 p.
6. Mednikov E.P. Turbulent transport and deposition of aerosols. – М.: Nauka, 1980 – 176 p.
7. Ishchuk I.G., Pozdnyakov G.A. Tools integrated dust removal mining enterprises. Directory. – М.: Nedra, 1991. – 223 p.
8. Petruhin P.M. and others. The fight against coal and rock dust in mines. – М.: Nedra, 1981. – 271 p.

