

Ключові слова: залізорудний кар'єр, масовий вибух, екологічна безпека.

Abstract. Iron ore is mainly mined by opencast method with massive explosions in the quarries, which are accompanied by emissions of dust and harmful gases and significant degradation of environmental safety in the region.

Environmental hazard of mass explosions in quarries is estimated primarily by level of near-surface concentrations of contaminants including dust on the border with or outside of the sanitary protection zone of the quarries.

Impact of the borehole charge parameters on technological and environmental results of the explosions were studied by a mathematical model with taking into account methods of industrial experiments planning.

Keywords: iron-ore quarry, massive explosion, environmental safety.

Статья поступила в редакцию 30.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком

УДК 614.89

Чеберячко С.И., канд. техн. наук,
Яворская Е.А., канд. техн. наук
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

К ВОПРОСУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПЛОТНОСТИ УПАКОВКИ ФИЛЬТРА ПРОТИВОПЫЛЕВОГО РЕСПИРАТОРА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ПЫЛЕЕМКОСТИ

Чеберячко С. И., канд. техн. наук,
Яворська О.О., канд. техн. наук,
(Державний ВНЗ «НГУ»)

ДО ПИТАННЯ РОЗПОДІЛЕННЯ ЩІЛЬНОСТІ УПАКОВКИ ФІЛЬТРА ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПИРАТОРІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ПИЛОЄМНОСТІ

Cheberyachko S.I., PhD. (Tech.),
Yavorskaya Ye.A., PhD. (Tech.)
(State N E I «NMU»)

ON THE ISSUE OF DENSITY DISTRIBUTION IN THE FILTER PACKAGE OF DUST MASK FOR MAXIMUM DUST CAPACITY

Аннотация. В статье приведена методика расчета изменения плотности упаковки волокон по толщине противопылевого фильтра для условий горных предприятий. Установлены основные закономерности для определения их параметров, которые обеспечат минимальный перепад давления при максимальной пылеемкости. Определены условия существования оптимального распределения плотности упаковки волокон, для минимального роста перепада давления фильтровальных слоев. Доказано, что с увеличением времени запыления фильтров возникает необходимость в уменьшении плотности упаковки начальных слоев фильтрующего материала, а для обеспечения необходимой защитной эффективности - плотность упаковки волокон нижних слоев необходимо повышать.

Ключевые слова: Противопылевые респираторы, пылеемкость, противопылевой фильтр, аэрозоль, коэффициент проникновения.

Актуальность. Высокоэффективный аэрозольный фильтр представляет собой устройство, в котором очищаемый воздух, пропускается через слой фильтрующего материала, который задерживает аэрозольные частицы с помощью нескольких механизмов улавливания, и постепенно накапливает их осадок в своем объеме. При этом возрастает их перепад давления и ухудшаются эксплуатационные свойства. Особенно при высоких концентрациях пыли в рабочей зоне. Поэтому, повышение срока защитного действия противопылевых респираторов в условиях горных предприятий, которые характеризуются чрезвычайно сложными условиями эксплуатации последних, является актуальной задачей.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу о распределении плотности упаковки волокон $\beta(x)$ по толщине фильтровального элемента H , которое обеспечит минимальное сопротивление дыханию Δp в заданный конечный момент времени t_k при постоянном коэффициенте проникновения аэрозоля сквозь фильтр K_n .

В общем виде для одноразовых СИЗОД при изменяющейся скорости воздуха перепад давления можно выразить по формуле [1]

$$\Delta p(x, t) = \frac{4\mu H v_0 \cos(\omega t)}{a^2} \int_0^H \frac{\beta_1(x, t) dx}{F(\beta_1(x, t))} \quad (1)$$

где
$$F(\beta_1) = \frac{4\pi}{-0,5 \ln \beta_1 - 1,15} - 0,5 \omega \sin \omega t \sqrt{\omega \mu \rho \cos \omega t};$$

$$\beta_1(x, t) = \beta + n(x, t) \theta(t) A_1(x); \quad (2)$$

$$n(x, t) = n_0 \exp\left(-\int_0^H \gamma(x, t) dx\right), \quad (3)$$

где β – плотность упаковки волокон чистого фильтра; n_0 – начальная концентрация аэрозольных частичек в воздушной смеси, которая поступает в фильтр; мг/м³; ω – частота пульсации, 1/с; t – время запыления фильтра, с;

$$\theta(t) = \int_0^t v(t) dt; A_1(x) = \gamma(x, t) \exp\left(-\int_0^H \gamma(x, t) dx\right);$$

$\gamma(x, t)$ – коэффициент фильтрования; H – толщина фильтровального слоя; $v(t)$ – скорость воздушного потока, м/с.

Поскольку выражение, которое находится под интегралом, для определения силы сопротивления волокна, не позволяет проводить интегрирование в аналитическом виде, то в дальнейшем используем простое выражение, предложенное И.Б. Стечкиной и дающее результаты, которые совпадают с точностью до 10 %

$$\frac{\beta_1(x,t)}{F(\beta_1(x,t))} = A(\beta_1(x,t))^q, \quad (4)$$

где $A = 58,5$, $q = 0,5$ при $0,02 < \beta_1 < 0,15$; $A = 230,7$, $q = 1,24$ при $0,15 < \beta_1 < 0,38$; $A = 1026$, $q = 2,8$ при $0,38 < \beta_1 < 0,5$.

Основная часть. Для решения поставленной задачи воспользуемся методикой предложенной И.Б. Стечкиной. Введем функцию, которая определяет изменение концентраций аэрозольных частиц по толщине фильтра

$$\chi(x) = H \int_0^x \gamma(x) dx. \quad (5)$$

Тогда в начальный момент, коэффициент проникновения можно представить

$$K_{\Pi} = \frac{n(x,0)}{n_0} = \exp(-\chi(x)). \quad (6)$$

Функция $\chi(t)$ удовлетворяет требованиям

$$\chi(0) = 0; \chi(1) = K_{\Pi}^0, \quad (7)$$

где $K_{\Pi}^0 = -\ln\left(\frac{n(1,0)}{n_0}\right)$ – величина коэффициента проникновения в начальный момент времени.

Будем считать, что коэффициент фильтрации зависит только от плотности упаковки волокон

$$\gamma(x) = \frac{2\eta\beta(x)H}{\pi a^2} = B H \beta(x), \quad (8)$$

тогда $\beta(x)$ можно выразить через $d\chi/dx$

$$\beta(x) = \frac{1}{B} \frac{d\chi}{dx}. \quad (9)$$

Перепад давления можно выразить через функционал $I(\chi, d\chi/dx; t_k)$ по формуле

$$\Delta p(t_k) = \frac{4\mu H v c \cos(\omega t)}{a^2} \frac{A}{B^q} I\left(\chi, \frac{d\chi}{dx}; t_k\right), \quad (10)$$

$$I\left(\chi, \frac{d\chi}{dx}; t_k\right) = \frac{B^q}{A} \int_0^1 F\left(\frac{d\chi}{dx}, n(\chi, t_k)\right) \frac{d\chi}{dx} dx. \quad (11)$$

Поставленную задачу можно рассматривать как нахождение минимума функционала $I(\chi, d\chi/dx; t_k)$, при этом функция $\chi(t)$ должна удовлетворять условиям (7).

Если в интеграле (11) перейдем к независимой переменной χ , получим

$$I\left(\chi, \frac{d\chi}{dx}; t_k\right) = \frac{B^q}{A} \int_0^{K_n^0} F\left(\frac{dx}{d\chi}, n(\chi, t_k)\right) d\chi. \quad (12)$$

Так как $F(d\chi/dx; n(\chi, t_k))$, в явном виде не зависит от x , то уравнение Эйлера для функции $x(\chi)$ имеет первый интеграл [2-4]

$$\frac{\partial}{\partial x'} F(x', n(\chi, t_k)) = c, \quad (13)$$

где $x' = dx/d\chi$; χ – рассматривается как независимая переменная; c – константа.

С учетом (2) и (3) функционал (13) запишем в виде

$$I\left(\chi, \frac{d\chi}{dx}; t_k\right) = \int_0^{K_n^0} (1 + \epsilon n(\chi, t_k))^q \left(\frac{dx}{d\chi}\right)^{-q} d\chi, \quad (14)$$

где $\epsilon = \theta(t)A_1B/A$

Первый интеграл (13) равен

$$(1 + \epsilon n(\chi, t_k))^{q/(q+1)} = G \frac{dx}{d\chi}, \quad (15)$$

где $G = \int_0^{K_n^0} (1 + \epsilon n(\chi, t_k))^{q/(q+1)} d\chi$.

Проинтегрировав (15) получаем

$$x = G^{-1} \int_0^x (1 + \epsilon n(\chi, t_k))^{q/(q+1)} d\chi. \quad (16)$$

Также из (16) можно найти распределение плотности упаковки волокон в параметрическом виде

$$\beta(x) = \frac{G}{BH} (1 + \epsilon n(\chi, t_k))^{-q/(q+1)}. \quad (17)$$

Перепад давления на фильтре с плотностью упаковки волокон $\beta(x)$, задаваемой выражением (17) в конечный момент времени t_k определяется зависимостью

$$\Delta p_{\min}(t_k) = \frac{4\mu H v \cos(\omega t)}{a^2} \int_0^{K_n^0} (1 + \epsilon n(\chi, t_k))^q G^q d\chi = \frac{4\mu H v \cos(\omega t)}{a^2} G^{q+1}. \quad (18)$$

Значение G зависит от коэффициента проникновения и времени эксплуатации фильтра.

Рассчитаем распределение плотности упаковки волокон по толщине для полипропиленового фильтрующего материала. Исходные данные для расчета приведены в таблице 1. Результаты расчетов для различных конечных моментов времени приведены на рис. 1, 2.

Таблица 1 - Исходящие данные для расчета двухслойных фильтров

Показатель	Величина
Диаметр аэрозольных частичек, d_c , мкм	3,0
Начальная плотность упаковки волокон предыдущего фильтровального слоя, β	0,05
Начальная скорость фильтрования, v_0 , м/с	0,015
Толщина предыдущего фильтровального слоя, H , мм	4
Начальная концентрация аэрозольных частичек, n_0 , мг/м ³	100
Суммарный коэффициент улавливания аэрозольных частичек, η	$3,3 \cdot 10^{-2}$
Коэффициент проникновения аэрозоля, K_p	0,01
Время запыления, с	1800
Константа, b , м ⁻¹	42

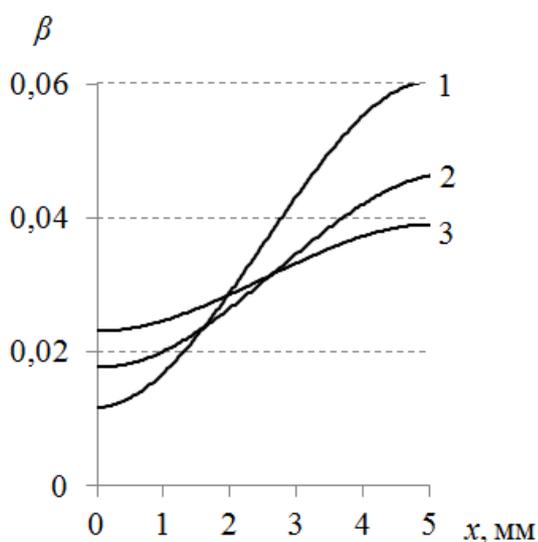


Рисунок 1 - Распределение плотности упаковки волокон (β) по толщине фильтровального слоя (x) для конечного времени запыления $t_k = 30$ мин; при $q = 0,5$ $\epsilon = 1,5$ (1); $q = 0,5$ $\epsilon = 1$ (2); $q = 0,5$ $\epsilon = 0,5$ (3)

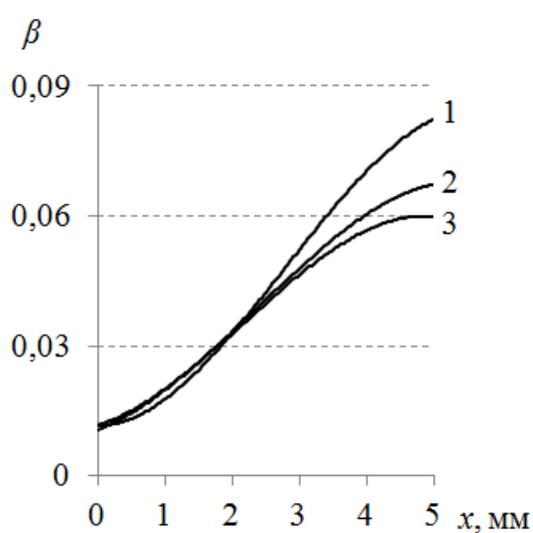
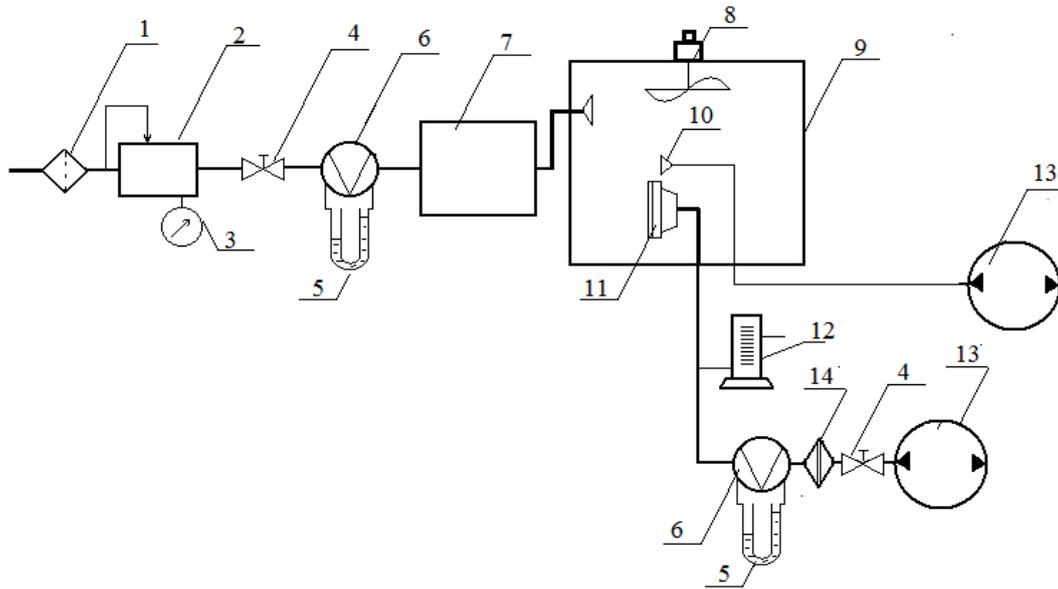


Рисунок 2 - Распределение плотности упаковки волокон (β) по толщине фильтровального слоя (x) для конечного времени запыления $t_k = 60$ мин; при $q = 0,5$ $\epsilon = 1,5$ (1); $q = 0,5$ $\epsilon = 1$ (2); $q = 0,5$ $\epsilon = 0,5$ (3)

С увеличением времени запыления фильтров возникает необходимость в уменьшении плотности упаковки начальных слоев фильтрующего материала, а для обеспечения необходимой защитной эффективности - плотность упаковки волокон нижних слоев необходимо повышать.

Экспериментальная проверка предложенных решений. Измерение пылеемкости фильтров проводили с использованием тест-аэрозоля угольная пыль.

Определение количества осевшей пыли основано на гравиметрическом методе. Общий вид и схема установки приведена на рис. 3.



1 – фильтр предварительной очистки; 2 – стабилизатор давления; 3 – манометр; 4 – регулирующие вентили; 5,6 – диафрагма с манометром; 7 – генератор пыли; 8 – вентилятор; 9 – испытательная камера; 10,14 – аллонж с фильтром АФА; 11 – фильтровальная коробка с фильтром или образцом фильтровального материала; 12 – микроманометр; 13 – аспиратор

Рисунок 3 - Схема установки для определения пылеемкости фильтров или образцов фильтровальных материалов:

Испытательный стенд работает следующим образом [5,6]. Под давлением, воздух от компрессора попадает через фильтр предварительной очистки 1 на стабилизатор 2. Количество воздуха регулируется вентилем 4 и контролируется манометром 3, исходя из перепада давления на калиброванной диафрагме 6. Для образования пылевого аэрозоля с заданным дисперсным составом в вибрационный генератор пыли 7 подается от 2 до 10 $\text{дм}^3/\text{мин}$ чистого воздуха (табл. 4.4). Вибрационный генератор пыли, представляет собой, стальной стакан с впускным и выпускным штуцерами, в который загружаются предварительно раздробленные куски угля общей массой около 100 г. В результате вибрации камеры, происходит интенсивное самоизмельчения этих кусочков в пылевое состояние. Для ускорения измельчения предусмотрены загрузки в камеру генератора стальных слоев диаметром 10-15 мм. Затем пылевая смесь подается в испытательную камеру 9 с размещенным в ней фильтром 11. Воздух из фильтра с расходом 95, 30 или 15 $\text{дм}^3/\text{мин}$, который контролируется диафрагмой 6 и отводится через аллонж с фильтром АФА 14 с помощью аспиратора 13. Накопление пыли на защитном устройстве контролируется благодаря росту аэродинамического сопротивления, которое определяется по показаниям микроманометра 12.

Концентрацию пыли в камере определяют с помощью другого аналитического фильтра 10 и аспиратора 13 по формуле

$$C = 1000 \frac{M_1 - M_2}{Qt}, \text{ мг/м}^3 \quad (19)$$

где M_1 – масса запыленного аналитического фильтра АФА, мг; M_2 – масса фильтра АФА, мг; Q – расход воздуха через фильтр, $\text{дм}^3/\text{мин.}$; t – время запыления фильтра, мин.

Сопrotивление воздушному потоку фильтра или образцов фильтровального материала определяем по формуле

$$R_e = \frac{9,81(n_i - n_0)K}{Q}, \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^5} \quad (20)$$

где n_i – отсчет сопротивления по микроманометру, мм. вод. ст.; n_0 – собственное сопротивление микроманометра, мм. вод. ст.; K_1 – поправочный коэффициент на температуру и атмосферное давление; Q – расход воздуха через респиратор или фильтр, $\text{м}^3/\text{с}$.

После достижения сопротивления фильтра заданного значения (например $1000 \text{ (Н} \cdot \text{с)/м}^5$) испытания прекращают с помощью отключения аспиратора и пылевого генератора. Запыленный фильтр респиратора и аналитический фильтр, взвешивают на весах для определения массы накопленной пыли. Коэффициент проникновения пылевого аэрозоля через фильтр определяем по формуле

$$K_{\Pi} = \frac{M_{1\phi} - M_{2\phi}}{M_1 - M_2} \quad (21)$$

где $M_{1\phi}$ и $M_{2\phi}$ – масса запыленного и чистого фильтра АФА (соответственно) после образцов, которые проверяются, мг.

Для проверки методики по расчету оптимального распределения плотности упаковки волокон по толщине фильтра, подготовили несколько образцов фильтров, параметры которых приведены в табл. 2, рассчитанных по формуле (17). Из них компоновали двухслойные модели. В качестве финишных фильтров использовались материалы с плотностью упаковки волокон в диапазоне 0,04 - 0,06, тогда как для предварительного – 0,02 - 0,040.

В результате исследования процесса накопления пыли во времени, определили, что наименьший прирост перепада давления имела комбинация из образцов 2 и 5, и образцов 2 и 6 (рис. 4). Худшими выявились показатели комбинаций образцов 1 и 6, 3 и 4 – поскольку вся пыль в первом случае проходила сквозь предыдущий слой и полностью забивала поры финишного фильтра (рис. 5 - 2), тогда как во втором случае вся пыль оседала на внешнем фильтре (рис. 5 - 1).

Таблица 2 - Основные параметры экспериментальных образцов фильтровальных материалов

Номер образца	Плотность упаковки волокон, β ,	Начальный перепад давления при постоянном потоке воздуха со скоростью 1 см/с., Па	Радиус волокон а, мкм
Образец 1	0,02	1,8	6-8
Образец 2	0,03	2,4	6-8
Образец 3	0,04	2,9	6-8
Образец 4	0,04	3,2	2-4
Образец 5	0,05	3,8	2-4
Образец 6	0,06	4,4	2-4

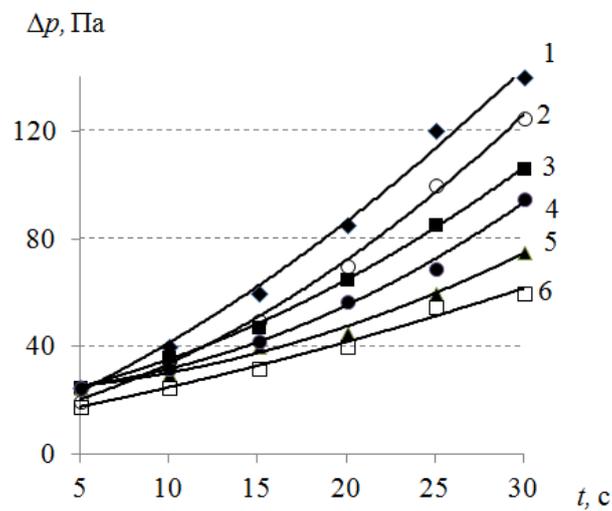


Рисунок 4 - Зависимость перепада давления (Δp) в двухслойных фильтровальных материалах с разной плотностью упаковки волокон: образцы 1 и 6 (1); 3 и 4 (2); 1 и 5 (3); 1 и 4 (4); 2 и 5 (5); 2 и 6 (6) от времени запыления (t) при концентрации пыли в испытательной камере 300 мг/м^3

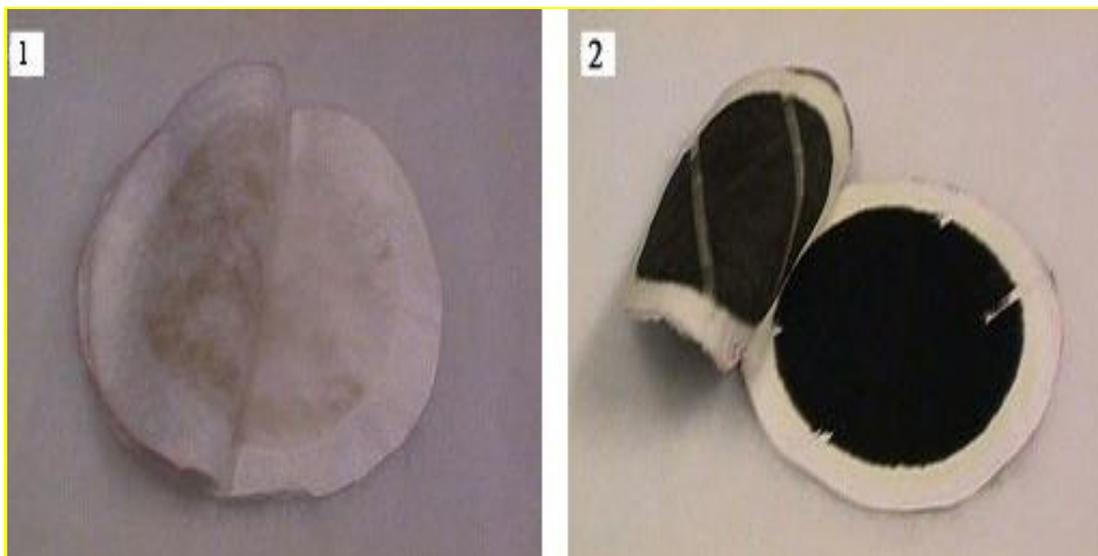


Рисунок 5 - Образцы двухслойных фильтровальных материалов после запыления

Выводы.

1. Разработана математическая модель расчета изменения плотности упаковки волокон по толщине противопылевого фильтра с изменением скорости фильтрации.

2. Определены условия существования оптимального распределения плотности упаковки волокон для минимального роста перепада давления в фильтровальных слоях.

3. Доказано, что с увеличением времени запыления фильтров возникает необходимость в уменьшении плотности упаковки начальных слоев фильтрующего материала, а для обеспечения необходимой защитной эффективности - плотность упаковки волокон нижних слоев необходимо повышать.

4. Экспериментальные исследования по запылению изготовленных двухслойных образцов показали, что максимальное количество пыли осела на фильтрах плотность упаковки которых, соответствует теоретическим расчетам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чеберячко, С.И. Теоретические исследования перепада давления фильтровальных респираторов / С.И. Чеберячко // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – № 111. – С. 147 - 153
2. Миронов, Л.А. Значение подсоса загрязненного воздуха в подмасочное пространство фильтрующих респираторов и методы его обнаружения / Л.А. Миронов // Рабочая одежда. – 2002. – № 3(15). – С. 33 - 35.
3. Анализ современных представлений о трещиновато-пористой структуре угля / К.К. Софийский, Д.П. Силин, В.И. Гаврилов [и др.] // Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. – № 105. – С. 105 – 112.
4. Алексидзе, М.А. Фундаментальные функции в приближенных решениях граничных задач. /М.А. Алексидзе. - М.: Наука, 1991. - 352 с.
5. Разработка установки для испытаний средств пылезащиты и контроля запыленности. / В.И.Голинько, В.Е.Колесник, А.С.Ищенко, [и др.] / Научный вестник НГАУ. – 2001. - № 3. – С. 51-55.
6. Fred, N. Kissell. Handbook for Dust Control in Mining. - DHHS (NIOSH), 2003. - Publication No. 2003-147. - pp. 122-124. - 131 p.

REFERENCES

1. Cheberyachko, S.I. (2013), “Theoretical studies of the pressure drop of the filter respirators”. *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 111, pp. 147 – 153.
2. Mironov, L.A. (2002), “The value of suction air pollution in under mask space filtering respirators and methods of its detection”, *Rabochaya odezhd*a, no. 3(15). – pp. 33 - 35.
3. Sofiyskiy, K.K., Silin, D.P., Gavrilov, V.I., Petuh, A.P., Agaev, R.A., Vlasenko, V.V. and Moskovskiy, O.V. (2012), “Analysis of modern conceptions of fissure-porous structure of coal” *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no. 105, pp. 105 – 112.
4. Aleksidze, M.A. (1991), *Fyndamentalnye funktsii v priblizhennykh resheniyakh granichnykh zadach* [Fundamental functions in approximate solutions of boundary value problems], Nauka, Moscow, Russia.
5. Golinko, V.I., Koleshik V.E., Ishchenko, A.S. and Cheberyachko, S.I. (2001), “Development system for dust testing and control”, *Nauchnyy vestnik NGAU*, vol. 3, pp. 51-55.
6. Fred N. Kissell (2003), “Handbook for Dust Control in Mining”, *DHHS (NIOSH)*, Publication no. 2003-147, pp. 122-124.

Об авторах

Чеберячко Сергей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрологии и охраны труда Государственного ВУЗ «Национальный горный университет» (ГБУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, sihc@yandex.ua.

Яворская Елена Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры аэрологии и охраны труда Государственного ВУЗ «Национальный горный университет» (ГВУЗ «НГУ»), Днепропетровск, Украина, lenayavorskay@mail.ru.

About the authors

Cheberyachko Sergey Ivanovich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the aerology and labor protection department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, sihc@yandex.ua.

Yavorskaya Elena Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor of the aerology and labor protection department, State Higher Education Institution «National Mining University» (SHEI «NMU»), Dnepropetrovsk, Ukraine, lenayavorskay@mail.ru.

Анотація. У статті наведено методику розрахунку зміни щільності упаковки волокон по товщині протипилового фільтра для умов гірничих підприємств. Встановлено основні закономірності для визначення їх параметрів, які забезпечать мінімальний перепад тиску при максимальній пилоємності. Визначено умови існування оптимального розподілу щільності упаковки волокон, для мінімального зростання перепаду тиску фільтрувальних шарів. Доведено, що зі збільшенням часу запилення фільтрів виникає необхідність у зменшенні щільності упаковки початкових шарів фільтруючого матеріалу, а для забезпечення необхідної захисної ефективності - щільність упаковки волокон нижніх шарів необхідно підвищувати.

Ключові слова: Противопилові респіратори, пилоємність, протипиловий фільтр, аерозоль.

Abstract. The article describes method of calculating changes in the fiber packing density by thickness of the dust filter for the conditions of the mining enterprises. Basic laws have been established to determine fiber parameters, which could ensure minimal pressure drop at maximum dust capacity. Conditions are specified for obtaining optimal distribution of the fiber packing density with minimal pressure drop in the filter layers. It is proved that the longer filter is exposed to dust the lighter should be packing density in initial layers of filtering material, and in order to provide the needed protective efficacy, the fiber packing density should be increased in the lower layer.

Keywords: dust mask, dust capacity, dust filter, aerosol, penetration factor.

Статья поступила в редакцию 30.09.2014

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук М.С. Четвериком