

Дослідження опору повітря протипилових респіраторів при їх експлуатації на гірничорудних підприємствах

Встановлено теоретичні залежності, які дозволяють розрахувати зміну перепаду тиску на фільтрах найбільш поширених типів пилових респіраторів від тривалості накопичення рудникового пилового осаду, з урахуванням основних параметрів фільтрувального шару та усереднених умов їх використання. Визначено, що на опір повітряному потоку впливає товщина фільтрувальних волокон за рахунок накопичення пилового осаду зі зміною сектору їх осідання. Отримані результати дозволяють прогнозувати термін захисної дії протипилового респіратора за величиною допустимого опору дихання під час експлуатації на рудникових підприємствах. Ил. 6. Табл. 1. Библиогр.: 7 назв.

Ключові слова: протипиловий респіратор, перепад тиску, опір диханню, запиленість, дисперсний склад пилу

heoretical dependences, allowing to calculate the change in pressure drop across the filters of the most common types of dust respirators on the duration of the mine dust accumulation in respect with the main parameters of the filter layer and the average conditions of their use are stated. It is determined that air resistance affects the thickness of the filter fibers due to the accumulation of dust deposit with the change of sector of their precipitation. The results obtained allow to predict protective action term of anti-dust respirator largest allowable breathing resistance when operating on mine enterprises are obtained.

Keywords: dust mask, pressure drop, resistance breathing dust, dust particulate composition

Актуальність

Умови праці на рудникових підприємствах здебільшого визначаються пиловим фактором, тобто залежать від вмісту пилу в повітрі робочої зони, його викидів та пиловідкладення поблизу джерел пилу або у вентиляційних каналах, включаючи гірничі виробки. При цьому властивості пилу обумовлюють вибір відповідних заходів для боротьби з ним.

Процес запилення фільтрів занадто складний, щоб його описати простими рівняннями. Про це свідчить наявність великої кількості публікацій, присвячених вивченню закономірностей процесу накопичення пилових частинок на фільтрах [1-4]. Здебільшого автори вводять емпіричні коефіцієнти, щоб уточнити вплив структури фільтра, розмірів частинок пилу, їх фізичних і хімічних властивостей на формування осаду. Тому виникає задача в узагальненні відомих закономірностей з визначення перепаду тиску на респіраторах при накопиченні пилу. Результати цих досліджень дозволять уточнити теоретичні залежності для розрахунку опору фільтрів і термін їх експлуатації.

Метою роботи є знаходження теоретичної залежності зміни перепаду тиску на вискоєфективного поліпропіленового фільтра під час осідання рудникового пилу.

Основна частина

Розрізняють поверхнєве і об'ємне фільтрування. В першому випадку частинки пилу осідають на поверхні фільтра, де утворюють шар пилового осаду. Такий процес характерний для вискоєфективних фільтрів, пори яких швидко забиваються, зокрема при осіданні крупних частинок.

Більшість дослідників представляють перепад тиску на таких фільтрах як суму опорів повітряному потоку чистого фільтра і накопиченого пилового осаду.

$$\Delta p = \Delta p_{\phi} + \Delta p_{\pi} = K_1 v + K_2 v \frac{M}{F} \quad (1)$$

де Δp_{ϕ} - перепад тиску на чистому фільтрі, Па; Δp_{π} - перепад тиску на пиловому осаді, Па; K_1 - опір волокон фільтра респіратора повітряному потоку, кг/м²с; K_2 - відносний опір, що чинить повітряному потоку одиниця маси пилу, осілого на одиниці поверхні фільтра, по суті - швидкість накопичення пилового осаду на фільтрі, с⁻¹; v - швидкість фільтрування, м/с; M - маса пилу на фільтрі, кг; F - площа фільтрування, м².

Цілком зрозуміло, що дослідники зосередилися на теоретичному визначенні відносного опору повітряного потоку, накопиченого на волокнах пилового осаду, тобто K_2 . Базове рівняння для його визначення при ламінарній течії повітря запропоновано Козені-Карманом [1].

Воно визначає залежність опору від пористості пилових відкладень $\varepsilon_{\text{п}}$, розмірів аерозольних частинок $r_{\text{п}}$, та густини речовини частинки пилу $\rho_{\text{ч}}$:

$$K_2 = \frac{36\mu k_1 (1-\varepsilon_{\text{п}})}{\rho_{\text{ч}} \varepsilon_{\text{п}}^2 r_{\text{п}}^2 C_k}, \quad (2)$$

де μ – динамічна в'язкість повітря, Н·с/м²; $\varepsilon_{\text{п}}$ – пористість шару пилу на фільтрі; $\rho_{\text{ч}}$ – густина речовини аерозольної частинки, кг/м³; $r_{\text{п}}$ – середній радіус осілих частинок, м; C_k – поправка Кеннінгемма на ковзання повітря, k_1 – емпіричний коефіцієнт (для сферичних частинок дорівнює 4,8).

Подальше уточнення цього рівняння виконувалось у напрямку врахування полідисперсності аерозольних частинок. Найбільш вдалим після низки експериментів з різними видами пилу було отримано Хаппелем та доповнене Анджеєм Гуптою [2]:

$$K_2 = \frac{18\mu}{\rho_{\text{ч}} r_{\text{п}}^2 C_k} \exp(-4\ln^2 \sigma) \frac{3+2(1-\varepsilon_{\text{п}})^{5/3}}{3-4,5(1-\varepsilon_{\text{п}})^{1/3}+4,5(1-\varepsilon_{\text{п}})^{5/3}-3(1-\varepsilon_{\text{п}})^2} \quad (3)$$

де σ – дисперсія діаметрів аерозольних частинок.

Кіршом А. А. запропоновано розглядати структуру пилового осаду на фільтрах Петрянова у вигляді системи ланцюжків із аерозольних частинок, що вважаються гладкими циліндрами з радіусом, який дорівнює радіусу частинок.

При такому припущенні для визначення опору фільтра з пиловим осадом, можна використати основні положення теорії фільтрування волокнистими фільтрами, згідно з якими

$$K_2 = \frac{3\mu k_0(\beta_2)}{2\pi\rho_{\text{ч}}r_{\text{п}}^2}, \quad (4)$$

де $k_0(\beta_2)$ – коефіцієнт, що залежить від щільності пилового осаду на фільтрі β_2 :

$$k_0(\beta_2) = \frac{4\pi}{0,5\ln\beta_2 - \lambda_1 + 0,64\beta_2 + 1,43(1-\beta_2)Kn}, \quad (5)$$

де λ_1 – експериментальний коефіцієнт, що залежить від властивостей аерозолі; Kn – число Кнудсена.

Для визначення кінетики осідання аерозольних частинок в об'ємі фільтра Радускевичем було отримано систему диференціальних рівнянь, за умови постійної швидкості фільтрування з початковими умовами $n(0, t) = n_0$, $N(x, t) = 0$

$$\begin{cases} \frac{\partial n_0}{\partial x} = -\gamma(x, t)n_0 \\ \frac{\partial N}{\partial t} = v\gamma(x, t)n_0 \end{cases} \quad (5)$$

де $N(x, t)$ – число осілих частинок за час t в одиниці об'єму фільтра на глибині x ; $\gamma(x, t)$ – коефіцієнт фільтрування.

Перше рівняння системи описує баланс кількості частинок аерозолі, а друге – кінетику утворення осаду на волокнах фільтра. Для розв'язання цієї системи необхідно знайти взаємозв'язок між коефіцієнтом фільтрування та кількістю осілих частинок, тобто представити процес забивання фільтрів пиловими частинками.

Існує три моделі вирішення цієї задачі: модель дендритів, модель стовщеного волокна і комп'ютерне моделювання пилового осаду. Дендритна модель базується на припущенні утворення на фільтрувальному шарі додаткових ланцюжків-дендритів з твердих частинок, радіус яких дорівнює радіусу осілого аерозолі, причому їх довжина в процесі роботи весь час збільшується. Для цієї моделі, виходячи з експериментальних даних, Стечкина І. Б. запропонувала лінійний взаємозв'язок між коефіцієнтом фільтрування та кількістю осілих частинок у вигляді рівняння

$$\gamma(x, t) = \gamma_0 + bn(x, t),$$

де b – коефіцієнт, що залежить від параметрів фільтра, механізму уловлювання частинок та їх розміру, м¹; γ_0 – коефіцієнт фільтрування чистого фільтра, м¹.

Коефіцієнт фільтрування для не запиленого волокнистого фільтра можна визначити за відомою формулою

$$\gamma_0 = \frac{2\eta\beta H}{\pi a^2},$$

де η – коефіцієнт захоплення аерозольних частинок волокнами фільтра; β – щільність упакування волокон; H – товщина фільтрувального шару, м; a – середній радіус волокон у фільтрі, м.

В такому випадку розв'язок системи (5) має вигляд:

$$n(x, t^*) = \frac{e^{-t^*}}{e^{-t^*} + e^x - 1}$$

$$N(x, t^*) = \frac{\gamma_0(1 - e^{-t^*})}{b(e^{-t^*} + e^x - 1)}$$

де $t^* = bvn_0t$

Відмітимо, що експериментальні дослідження Дзвіменого В. О. із запилення волокнистих фільтрів показали, що процес накопичення пилу проходить у два етапи. Спочатку пилові частинки утворюють на поверхні фільтра достатньо компактний шар, збільшуючи тим самим радіус волокон і підвищуючи щільність упакування. Потім у порах за фільтру зростає рихлий і проникливий для потоку повітря шар, який складається з самих пилових частинок.

Перепад тиску на першому етапі можна розрахувати за формулою

$$\Delta p_1(x, t) = \frac{4\mu v \beta}{\pi d^2(1 + \sigma)} \int_0^H F[\beta_1(x, t), N(x, t)] dx, \quad (6)$$

де d – діаметр волокон фільтра, m ; H – товщина фільтрувального шару, m ; F – сила, що діє на одиницю довжини волокна, та залежить від часу і товщини фільтрувального шару x , кількості осілих частинок N , і від щільності упакування волокон β .

Очевидно, що після налипання пилу на волокна їх реальний діаметр збільшується, отже щільність їх упакування змінюється. Ситуативну щільність волокон з налиплим пилом β_1 на відстані x оцінюють як

$$\beta_1(x, t) = \beta_0 + 4\pi d^3 N(x, t) .$$

Перепад тиску фільтрувального шару на другому етапі запилення складається з суми опору повітряному потоку, який утворився на першому етапі, і опору пухкого проникного осаду пилу, що поступово наростає на волокнах фільтра [3]:

$$\Delta p(t) = \begin{cases} \Delta p_1(t), & t < t^* \\ \Delta p_1(t^*) + \Delta p_2(t), & t > t^* \end{cases} , \quad (7)$$

де Δp_1 – перепад тиску на першому етапі, Па; Δp_2 – перепад тиску на другому етапі, Па; t^* – час, який відповідає формуванню рихлого пилового шару на волокнах фільтра, хв.

Перепад тиску на другому етапі пропонується знаходити за наступною формулою [3]:

$$\Delta p_2(t) = \frac{3\mu v H_n(t) k_0(\beta_2)}{2\pi r_n^2 r_n^2} , \quad (8)$$

де $H_n(t)$ – товщина пилового шару, m , що визначається як волокнистий еквівалент, в якому довжина волокон відповідає кількості осілих частинок:

$$H_n(t) = \frac{2\pi r_n^3 N(H, t)}{\beta_2} .$$

Визначити перепад тиску на другому етапі можна скориставшись формулою (1), якщо замінити величину опору чистого фільтра на показник запиленого при закінченні першого етапу (Δp_1). Складність такого розрахунку полягає у визначенні часу закінчення об'ємної стадії запилення фільтрувального шару.

Модель стовщеного волокна, яка запропонована Кішем В. А., базується на припущенні, що волокна з несиметричним осадом можна апроксимувати круговим циліндром з площею перетину, котра дорівнює площі міделевого перетину запиленого волокна (рис. 1) [4].

Товщина пилового шару зменшується з глибиною проникнення частинок у товщу фільтрувального матеріалу.

Таким чином, на відміну від дендритної моделі, враховується вплив осаду на гідродинаміку фільтрування. Тоді перепад тиску визначається за формулою [4]

$$\Delta p(t) = \mu v l \int_0^H F[a_n(x, t)] dx , \quad (9)$$

де $F[a_n(x, t)]$ – безрозмірна сила, що діє на одиницю довжини запиленого волокна радіуса $a_n(x, t)$ на глибині фільтра x за час t від початку запилення; $l = 4\beta / (\pi d^2)$ – довжина волокна на одиницю площі, $1/m^2$.

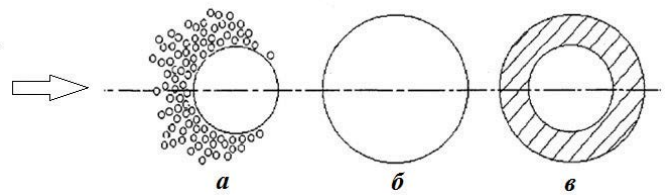


Рис. 1. Модель стовщеного волокна за Кіршем: а – характерна форма осаду на волокні; б – модель стовщеного волокна; в – модель циліндра з пористою оболонкою, утвореною осілим на волокно пилом

Зростання радіусів пористих оболонок на волокнах за глибиною фільтра в часі можна отримати при розв'язанні наведеної вище системи рівнянь (5)

$$\Delta p_1(t) = \frac{\mu v}{a} \int_{\rho_1}^{\rho_2} \frac{F(\rho) \rho d\rho}{\eta(\rho)(\rho^2 - 1)} . \quad (10)$$

На відміну від спрощеного припущення Кірша В. А., Даннетом і Клементом після низки досліджень було запропоновано розраховувати радіус волокна з пилом за наступною формулою, яка враховує товщину пилового осаду і сектор їх осідання [5]:

$$a_n = a [1 + \Pi(1 - \kappa \zeta^b)^\theta] , \quad (11)$$

де Π – відношення висоти осілого пилу на волокні до діаметра волокна без пилу; κ, b, θ – емпіричні коефіцієнти, які залежать від фізико-хімічних властивостей пилу, вологості повітря, форми частинок; ζ – кут, який утворюється пиловим осадом на волокні (рис. 2).

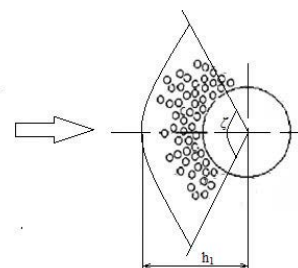


Рис. 2. Модель стовщеного волокна за Даннетом

В такому випадку кількість осілих частинок виражається наступним чином:

$$N(x, t) = \frac{\pi\beta_2(a_n - a)}{V_4 l} = \frac{M\zeta}{V_4 H\beta}, \quad (11)$$

де β_2 – щільність упакування осаду на поверхні фільтрувального волокна, кг/м³; $M = \beta_2 h_1$ – пиломісткість, кг/м²; h_1 – висота пилового осаду на фільтрувальному волокні, м; V_4 – об'єм частинки пилу, м³; $\zeta = (1 - \kappa\zeta^b)^\theta$.

При цьому перепад тиску, знову ж таки розв'язавши систему рівнянь (5), можна розрахувати за формулою

$$\Delta p_1(t) = \frac{\mu v}{a} \int_0^{m_2} \frac{F(m)\rho dm}{\eta a \zeta}. \quad (12)$$

Отже, отримано залежність перепаду тиску на фільтрі респіратора при збільшенні товщини фільтрувальних волокон за рахунок накопичення пилового осаду і зміни сектору їх осідання, який можна визначити за формулою Даннета (10).

Матеріали і методи дослідження

Для вирішення поставленої задачі, спробуємо розрахувати зміну перепаду тиску при утворенні пилового осаду рудникового пилу на поліпропіленових фільтрувальних елементах другого і третього класу захисту (P2, P3 – за європейським стандартами; P95, P100 – за американським стандартом) та порівняти отримані результати з експериментальними даними, що опубліковані у роботах О. С. Іщенко [6] (вітчизняні респіратори РПА), і Д. Д. Немула (респіратори North та Safety) [7].

Діаметр волокон фільтрувального матеріалу, з якого виготовлені поліпропіленові фільтри, знаходиться в межах 1-7 мкм; (середній еквівалентний діаметр складає 2,5 мкм), товщина фільтрувального шару – 5 мм; щільність упакування волокон – 0,08.

У початковий момент роботи фільтра перепад тиску на ньому визначаємо за формулою

$$\Delta p_\Phi = \frac{4\mu\beta H v}{a^2 k_0(\beta)}, \quad (13)$$

де $k_0(\beta)$ – коефіцієнт опору фільтрувального шару, що для поліпропіленових волокон розраховується за формулою:

$$k_0(\beta) = \frac{4\pi}{-0,5 \ln \beta - 1,15}.$$

Експериментальні показники були отримані при використанні рудникового пилу і пилу з Аризони. У першому випадку дисперсний розподіл частинок знаходився у межах 0,7-20 мкм (середній медіанний діаметр частинок – 5 мкм). Концентрація у пиловій випробувальній камері складала близько 300 мг/м³. Пил з Аризони, відповідав американському стандарту ISO 12103-1,

складається з частинок SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Na₂O, CaO, MgO, TiO₂, і K₂O. Концентрація такого пилу в камері становила близько 90 мг/м³ (при випробуваннях фільтрів P100) та – 70 мг/м³ для фільтрів N95. Розмір частинок знаходився у діапазоні 1-80 мкм при середньому медіанному діаметрі 10 мкм. Витрата повітря через фільтри респіраторів складала 95 дм³/хв. і 85 дм³/хв., відповідно. У респіраторах з двома фільтрами або картриджами при розрахунку швидкості фільтрування витрату повітря зменшували у двічі.

У таблиці наведена поверхнева площа фільтрувальних елементів, які запилювались при експериментах.

Таблиця. Характеристики перевірених фільтрів

Тип фільтрів	Перепад тиску, Па, при витратах повітря		Площа фільтра, м ²
	95 дм ³ /хв.	85 дм ³ /хв.	
North серії 7580 (P100)	-	140	0,03
Safety серії 152 (N95)	-	90	0,04
РПА із ФПП 15-1,5*	65	-	0,05
РПА із елефлен*	45	-	0,05

Дослідження з визначення зміни перепаду тиску на респіраторах при запиленні проводились у відповідності до стандартів ДСТУ EN 149-2008 та Test Dust: ISO 12103-1.

Масу пилу, що осіла на волокнах фільтрів за час експериментальної перевірки визначали за формулою

$$M = 10^3 C Q t, \quad \text{г}$$

де C – концентрація пилу у випробувальній камері, мг/м³; Q – витрата повітря через фільтр, м³/с; t – час запилення, с.

Результати і обговорення

Оскільки у фільтрувальних елементах респіраторів, як правило, спостерігається одночасно об'ємне і поверхневе фільтрування, то для визначення зміни перепаду тиску на фільтрах у часі, згідно з (7), обрано декілька варіантів комбінування формул відповідно до розглянутих моделей фільтрування.

Результати розрахунків залежностей перепаду тиску на фільтрах від тривалості накопичення в них пилового осаду за різними формулами та отримані точкові експериментальні дані наведені на рис. 3-6.

Зіставлення розрахункових залежностей перепаду тиску на елефленовому фільтрі респіратора РПА (рис. 3) з експериментальними даними показало високу збіжність при використанні формул (16) і (8).

Ця ж комбінація формул може бути використана й для розрахунку перепаду тиску від пилового осаду на фільтрі з матеріалу ФПП 15-1,5 для того ж респіратора РПА (рис. 4), проте результат матиме дещо більшу дисперсію, ніж у попередньому випадку.

Для фільтра респіратора North N95 (рис. 5) експериментальні результати більше тяжіють до розрахункової формулами (6) і (8), проте вони дещо вищі, отже теоретична залежність потребує коригування, наприклад, множенням на постійний коефіцієнт 1,4-1,6.

Для фільтра респіратора North P100 (рис. 5) експериментальні результати тяжіють переважно до розрахункової формули (7) і (2), котра потребує внесення неоднозначної змінної поправки, залежно від часу накопичення пилового осаду. Як альтернативу неоднозначній поправці, можна додати до формули її погрішність у вигляді середньоквадратичного відхилення розрахункових результатів від тих, що спостерігатимуться на практиці. Її величина не перевищить 10-12 %.

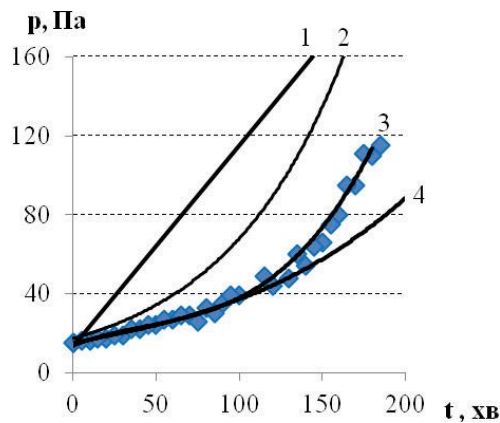


Рис. 3. Залежності перепаду тиску на фільтрі з елефлену, встановленому у респіратор РПА, від тривалості накопичення пилового осаду: суцільні лінії побудовані за формулами 1 – (13) і (2); 2 – (13) і (3); 3 – (13) і (8); 4 – (9) і (8); ♦ – експериментальні дані

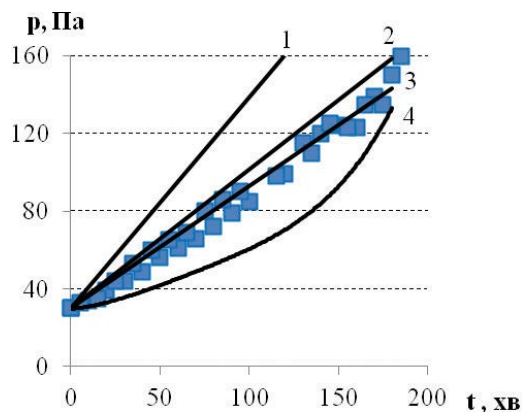


Рис. 4. Залежності перепаду тиску на фільтрі з ФПП 15-1,5, встановленому у респіратор РПА, від тривалості накопичення пилового осаду: суцільні лінії побудовані за формулами 1 – (13) і (2); 2 – (13) і (3); 3 – (13) і (8); 4 – (12) і (8); ♦ – експериментальні дані

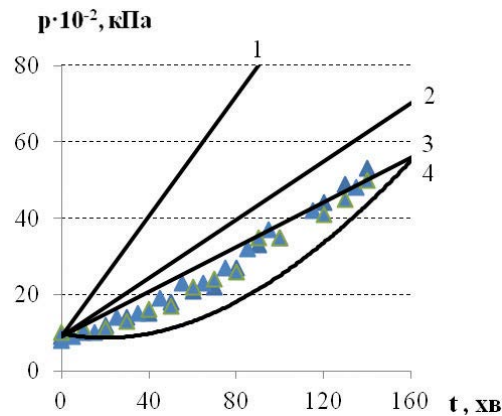


Рис. 5. Залежності перепаду тиску на фільтрі респіратора NorthN95 від тривалості накопичення пилового осаду: суцільні лінії побудовані за формулами 1 – (16) і (2); 2 – (16) і (3); 3 – (16) і (8)*; 4 – (12) і (8); ▲ – експериментальні дані

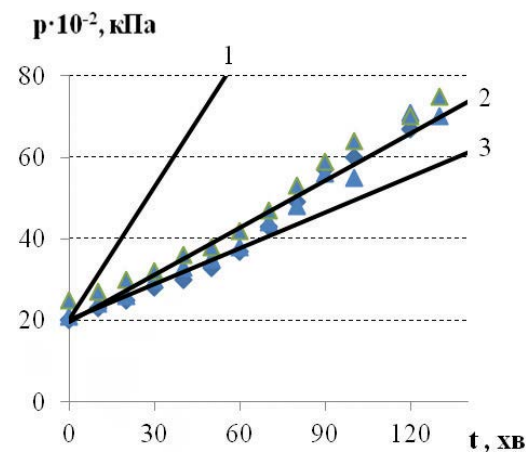


Рис. 6. Залежності перепаду тиску на фільтрі респіратора North P100 від тривалості накопичення пилового осаду: суцільні лінії побудовані за формулами 1 – (13) і (2); 2 – (13) і (3); 3 – (13) і (8); ▲ – експериментальні дані

Висновки

1. Проаналізовано теоретичні залежності зміни перепаду тиску на респіраторах при різних фазах фільтрування аерозолі. Розглянуто вплив різних моделей накопичення пилового осаду на фільтрах та встановлено умови їх використання для прогнозування терміну захисної дії ЗІЗОД.

2. Встановлено теоретичні залежності, які дозволяють розрахувати зміну перепаду тиску на фільтрах найбільш поширених типів пилових респіраторів від тривалості накопичення рудникового пилового осаду, з урахуванням основних параметрів фільтрувального шару та усереднених умов їх використання.

3. Отримано залежність перепаду тиску на фільтрі респіратора при збільшенні товщини фільтрувальних волокон за рахунок накопичення пилового осаду і зміни сектору їх осідання на гідродинаміку процесу фільтрування.

Бібліографічний список

1. Dennis R., Klemm H. A., and Battye W. (1979). Fabric Filter Model Sensitivity Analysis. / GCAJ Technology Division, EPA-600/7-79-043c, P. 40-51
2. Gupta A., Novick V. J., Biswas P., and Monson P. R. (1993). Effect of Humidity and Particle Hygroscopicity on the Mass Loading Capacity of High Efficiency Particulate Air Filters, / Aemsol Sci. and Technol. – № 19. – P. 94-107.
3. Кирш В. А. Метод расчета роста перепада давления в аэрозольном фильтре при забивке твердыми частицами. / Коллоидный журнал. – 1998. – Т. 60. – № 4. – С. 480-484.
4. Dynnet S. J., Clement C. F. A numerical study of the effect of loading from diffusive deposition on the efficiency of fibrous filters. // J. Aerosol Science. – 2006. – V. 37. – № 9. – P. 1116-1139.
5. Ищенко А. С., Чеберячко С. И. Полипропиленовые фильтрующие элементы к противодыльным респираторам многократного использования. // Сб. науч. трудов НГУ. – 2004. – № 19. – Т. 3. – С. 156-159.
6. Newnum J. D., 2010, The effects of relative humidity on respirator performance.» Masters thesis, University of Iowa, – <http://ir.uiowa.edu/etd/861>.
7. Лепесток (Легкие респираторы) / И. В. Петрянов, В. С. Кошечев, П. И. Басманов и др. – М.: Наука, 1984. – 218 с.

Поступила 16.05.2014

METAL JOURNAL

www.metaljournal.com.ua