

УДК 614.894.3:622.872

**Чеберячко С.І.**, д-р техн. наук, професор,  
**Яворська О.О.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Чеберячко Ю.І.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Столбченко О.В.**, канд. техн. наук, доцент  
(Державний ВНЗ «НГУ»)

### **РОЗРАХУНОК ДВОСТУПЕНЕВИХ ФІЛЬТРУВАЛЬНИХ СИСТЕМ ПРОТИПИЛОВИХ РЕСПІРАТОРІВ**

**Чеберячко С.И.**, д-р техн. наук, профессор,  
**Яворская Е.А.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Чеберячко Ю.И.**, канд. техн. наук, доцент,  
**Столбченко Е.В.**, канд. техн. наук, доцент  
(Государственное ВУЗ «НГУ»)

### **РАСЧЕТ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ФИЛЬТРОВАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОТИПЫЛЕВЫХ РЕСПИРАТОРОВ**

**Cheberyachko S.I.**, D.Sc.(Tech.), Professor,  
**Yavorska O.O.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**Cheberyachko Yu. I.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor,  
**Stolbchenko O.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor  
(State HEI «NMU»)

### **CALCULATION OF TWO-STAGE FILTRATION SYSTEMS IN THE DUST MASK**

**Анотація.** Розглянуто процес формування пилового осаду на багатошаровому фільтрі.

Запропоновано методику розрахунку багатошарових фільтрів, яка сприяє забезпеченню максимальної пиломісткості й мінімального перепаду тиску при варіюванні діаметрів волокон шарів та їх товщини. Згідно з результатами експериментальних досліджень із запилення, виготовлених двошарових зразків, максимальна кількість пилу осідає на фільтрах, щільність упакування яких міститься в діапазоні 0,03–0,06.

Розраховано параметри нової багатошарової фільтрувальної півмаски зі збільшеною пиломісткістю.

**Ключові слова:** респіратор, коефіцієнт захисту, СІЗОД, професійні захворювання, аерозольний фільтр, пиломісткість.

**Актуальність.** Високоєфективний аерозольний фільтр – це пристрій, у якому вдихуване повітря просочується крізь фільтрувальний матеріал, який затримує аерозольні частинки за допомогою декількох механізмів уловлювання і поступово накопичує їх осад у своєму об'ємі. Водночас перепад тиску аерозольних частинок зростає і при високих концентраціях пилу в робочій зоні фільтра його експлуатаційні властивості погіршуються і зростають енергозатрати гірників [1,2]. Тож збільшення тривалості захисної дії протипилових респіраторів в складних умовах експлуатації гірничих підприємств є актуальним завданням.

Проблема збільшення пиломісткості фільтрів, а отже, і тривалості їх захисної дії, виникла вже з появою перших пристроїв для захисту органів дихання. Нині важливого значення набуває завдання збільшення ресурсу високоефективних поліпропіленових фільтрів, що широко використовуються для виготовлення засобів індивідуального захисту органів дихання шахтарів.

**Постановка проблеми.** Загально визнаний шлях розв'язання цієї проблеми – виготовлення фільтрів з різною щільністю упакування волокон за товщиною. Це дає змогу мінімізувати зростання перепаду тиску під час уловлювання аерозолів. Якщо щільність упакування волокон однорідна за товщиною, то пиловий осад розподіляється нерівномірно. Найбільше пилу концентрується на зовнішньому шарі фільтра, унаслідок чого значно зменшується ресурс його використання. Змінюючи щільність упакування або радіус волокон, можна значно підвищити пиломісткість і строк експлуатації фільтра. Однак у методиках розрахунку багат шарових фільтрів умови їх експлуатації не враховуються [3–5]. Отже, постає завдання визначити основні характеристики поліпропіленових фільтрувальних шарів – радіус волокон, товщину фільтрувального шару, щільність упакування – для забезпечення рівномірного розподілу пилового осаду на багат шарових фільтрах.

Більшість дослідників, розраховуючи параметри фільтрувальних матеріалів, виходили тільки із зазначеної ефективності захисту, яку має забезпечити фільтр. Наприклад, у роботі [3] автори з формул для оцінки перепаду тиску зразка фільтрувального матеріалу й коефіцієнта проникнення виділили спільну частину, яку назвали сумарною поверхнею волокон фільтрувального матеріалу, і встановили зв'язок між цими двома величинами. Це й дало змогу отримати параметри фільтрувального шару. Інші вчені розраховували оптимальний радіус двошарових фільтрів для встановлення механізму осідання пилових частинок на волокні, що дало змогу врахувати їх вплив на коефіцієнт проникнення та опір диханню [4, 5]. Також є праці, у яких розглядаються питання підвищення пиломісткості фільтрів за збереження необхідної ефективності фільтрації. Деякі науковці пропонують змінювати щільність упакування волокон за товщиною фільтра [6], проте розрахунки ґрунтуються тільки на концентрації пилу в робочій зоні.

**Мета:** розробка двоступеневої фільтрувальної системи збільшеної пиломісткості для протипилових респіраторів.

**Результати досліджень.** Розглянемо метод розрахунку двошарових фільтрів (рис. 1). Сформулюємо завдання: знайти такі параметри фільтрувальних шарів, для яких кількість частинок, що осіли в системі, буде максимальною саме тоді, коли перепад тиску досягне гранично допустимого значення (за умови, що задано коефіцієнт захисту фільтра).

Уважатимемо, що площі двох фільтрів і швидкості фільтрування є однаковими; для забезпечення максимальної тривалості захисної дії можна змінювати радіуси чистих волокон, щільність їх упакування і товщину фільтрувального шару.

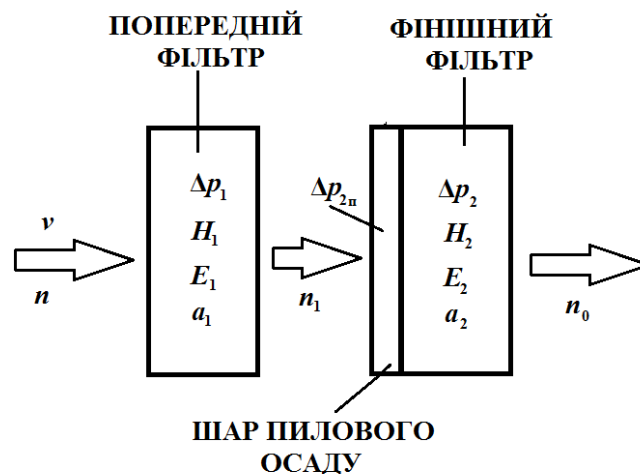


Рисунок 1 – Схема двошарового фільтра

Оскільки попередній фільтр характеризується більшою захисною ефективністю  $E_2$ , ніж фінішний, то на його лобовій поверхні швидко зростає шар пилового осаду. За таких умов об'ємне фільтрування відсутнє. Це дає змогу визначати перепад тиску на фінішному фільтрі як суму початкового перепаду тиску  $\Delta p_2$  і перепаду тиску на пиловому осаді, що формується на його поверхні  $\Delta p_{2п}$ . Тоді повний перепад тиску на двошаровому фільтрі можна визначити за формулою [7]

$$\Delta p_{\phi} = \begin{cases} \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_{2п}, t < t'; \\ \Delta p_1 + \Delta p_{1п} + \Delta p_2 + \Delta p_{2п}, t > t'. \end{cases} \quad (1)$$

де  $\Delta p_1$  – перепад тиску на попередньому фільтрі, Па;  $\Delta p_{1п}$  – перепад тиску шару пилового осаду, що утворюється на поверхні попереднього фільтра після закінчення об'ємного забивання пилом, Па;  $t$  – загальний час роботи, с;  $t'$  – час, коли на поверхні попереднього фільтра починає формуватися пиловий осад, с.

Перепад тиску на фінішному фільтрі розраховується за формулою [8]

$$\Delta p_2 = 4\mu\beta H v / [a^2 k_0(\beta)], \quad (2)$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, Па·с;  $\beta$  – щільність упакування волокон;  $H$  – товщина фільтрувального шару, м;  $a$  – середній радіус волокон у фільтрі, м;  $v$  – швидкість фільтрування, м/с;  $k_0(\beta)$  – коефіцієнт опору фільтрувального шару, який для поліпропіленових волокон розраховується за формулою [9]

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

Перепад тиску на пиловому осаді, що утворюється під час фільтрування, ви-

значаємо за формулою [8]

$$vH_{\Pi}(t)k_0(\beta_1)/(2\pi\rho_r\alpha_r^2) \quad (3)$$

де  $H_{\Pi}(t)$  – товщина пилового шару, м, що визначається як волокнистий еквівалент, у якому довжина волокон відповідає кількості частинок, що осіли на їх поверхні:

$$H_{\Pi}(t) = 2\eta\alpha_r^3 N(H,t)/\beta_2;$$

де  $\beta_2$  – щільність волокон з налиплим пилом:

$$\beta_1(x,t) = \beta + 8\pi\alpha_r^3 N(x,t),$$

Де  $N(x,t)$  – кількість частинок, що осіли за час  $t$  на одиниці об'єму фільтра на глибині  $x$ ;  $\alpha_r$  – середній радіус частинок, що осіли, м.

Перепад тиску на зовнішньому шарі з урахуванням накопичення пилового осаду визначається за формулою [8]

$$\Delta p_1(x,t) = 4\mu\nu\beta/(\pi d^2) \int_0^H F[\beta_1(x,t), N(x,t)] dx \quad , (4)$$

де  $d$  – діаметр волокон фільтра, м;  $F$  – сила, що діє на одиницю довжини волокна й залежить від часу  $t$  товщини фільтрувального шару  $x$ , кількості частинок  $N$ , що осіли на поверхні волокон, і щільності упакування волокон  $\beta_1$ .

Оскільки захисна ефективність усього фільтра визначається здебільшого внутрішнім шаром, то його радіус волокон можна визначити з рівняння [9]

$$\eta_2(\alpha_{\Pi})/(\pi\alpha_2) = - [\ln K_{\Pi}/(2\alpha_2 H)] \quad (5)$$

а параметри зовнішнього фільтра – ураховуючи значення перепаду тиску й незважаючи на значення захисної ефективності.

Повний об'єм частинок пилу, що осіли на деякій площі фільтра, можна визначити за формулою [10]

$$V = v_p n v t = \pi\beta_1 a_1 t. \quad (6)$$

Імовірну кількість пилу, що осідатиме на фільтрі респіратора за відомої запыленості повітря, розрахуємо за формулою [11]

$$P_{\phi} = C Q t / F \quad (7)$$

де  $P_{\phi}$  – пиломісткість, мг/м<sup>2</sup>;  $C$  – загальна концентрація пилу, мг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – об'єм легеневої вентиляції, м<sup>3</sup>/хв;  $t$  – тривалість робочої зміни, хв;  $F$  – площа фільтра.

Використовуючи ці формули, можна визначити радіуси волокон фільтрувальних матеріалів, що забезпечать мінімальний перепад тиску до кінця робочої зміни.

На рис. 2 зображені криві  $\Delta p(P_\phi)$ , розраховані для умов фільтрування вугільного пилу із середнім розміром частинок 10 мкм при швидкості повітряного потоку  $v = 1,5$  м/с зі щільністю упакування волокон  $\beta = 0,05$  і товщиною  $H = 6$  мм для різних діаметрів волокон ( $d = 2; 3,5$  і 5 мкм). Горизонтальні лінії відповідають заданим перепадам тиску в системі. Ділянки кривих 1, 2, 3 до перетину їх з горизонтальними лініями характеризують об'ємний процес фільтрування першого шару. Якщо ці криві збільшимо на значення  $\Delta p_{2п}$ , отримаємо повний перепад тиску системи.

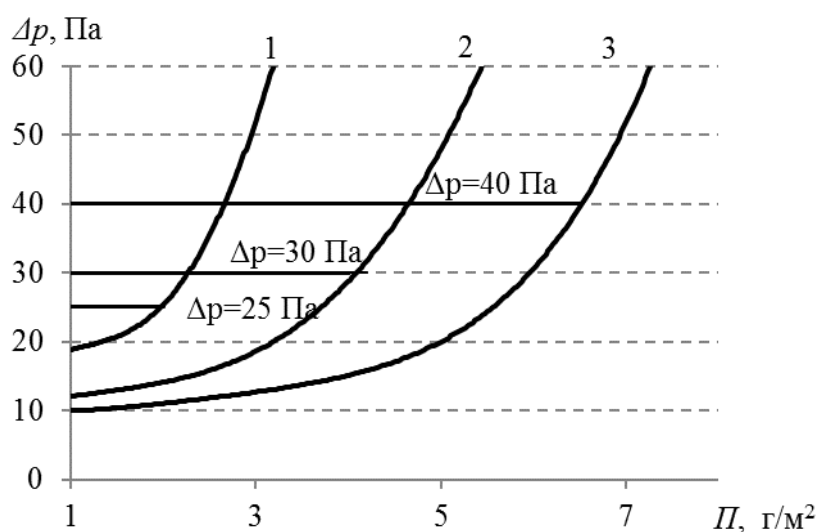


Рисунок 2 – Залежність перепаду тиску ( $\Delta p$ ) від пиломісткості ( $\Pi$ ) фільтра; криві розраховані при  $v = 1,5$  м/с;  $\gamma = 0,05$ ;  $H = 6$  мм; і діаметрів волокон  $d$ , мкм: 2 (1); 3,5 (2); 5 (3)

З рис. 2 випливає, що для заданого перепаду тиску існує таке значення радіуса волокон попереднього фільтра, за якого кількість пилу буде більшою ніж в інших системах. Точки перетину кривих відповідають початку формування шару пилу, що осідає на поверхні фільтра. Отже, попередній фільтр працює тільки в режимі об'ємного фільтрування. Збільшення розміру волокон зовнішнього шару призведе до швидкого зростання опору повітряного потоку внутрішнього шару внаслідок швидкого забивання поверхні крупними частинками. І навпаки, зменшення радіуса волокон попереднього фільтра призведе до швидкого зростання його опору через утворення на поверхні пилового шару.

На рис. 3 показано взаємозв'язок між радіусом волокон і очікуваною пиломісткістю фільтрувального шару, з урахуванням розміру аерозольних частинок, що осіли на поверхню фільтра. Знаючи потрібну пиломісткість і розміри частинок пилу, які вловлюються, можна вибрати волокна з оптимальним радіусом. Так, для одержання заданої кількості пилу, що осів на фільтрі, зі зростанням розмірів аерозолю треба збільшувати діаметр волокон. З іншого боку, радіус волокон попереднього фільтра має бути не менш як 6 мкм.

З рис. 4 видно, що в такому разі розміри аерозольних частинок на перепад

тиску впливають неістотно.

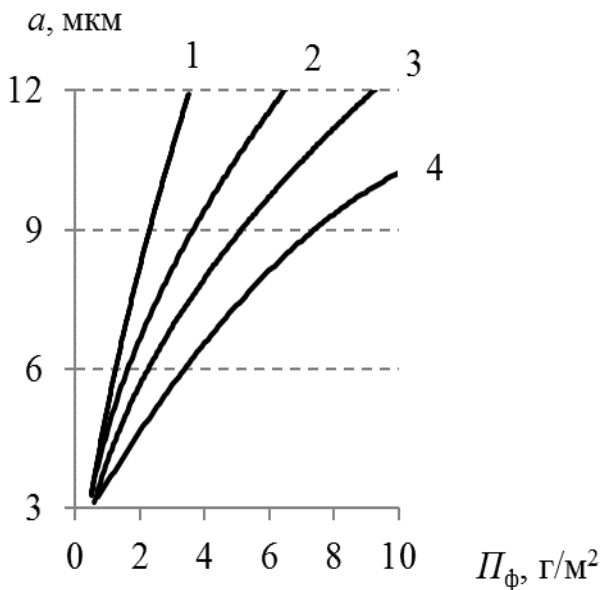


Рисунок 3 – Залежність радіуса волокон ( $a$ ) попереднього фільтра від його пиломісткості ( $P_{\phi}$ ) для різних розмірів осілих аерозольних частинок  $a_r$ , мкм: 5 (1); 2 (2); 1 (3); 0,5 (4)

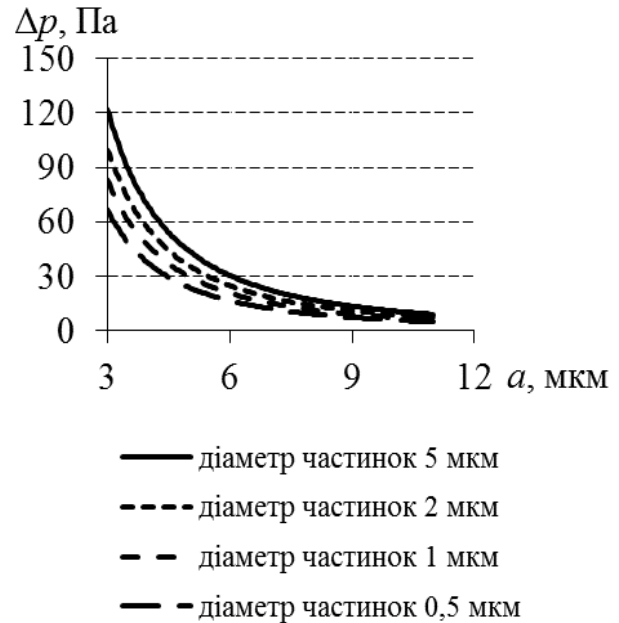


Рисунок 4 – Залежність перепаду тиску ( $\Delta p$ ) попереднього фільтра від радіуса волокон ( $a$ ) при осіданні аерозольних частинок

Після встановлення оптимального радіуса волокон попереднього фільтра оцінюємо його коефіцієнт захисту за формулою [12, 13]

$$K_3 = 100 / [\exp(-2\beta H \eta / \pi a)] \quad (8)$$

де  $\eta$  – сумарний коефіцієнт уловлювання аерозольних частинок.

Потім для розрахунку пиломісткості фінішного фільтра визначаємо концентрацію пилового аерозолю  $C_n$  після попереднього фільтра за формулою

$$C_1 = K_{1n} C, \quad (9)$$

де  $K_{1n}$  – коефіцієнт проникнення аерозолю через попередній фільтр.

Зазначимо, що концентрація пилу значно впливає на діаметр волокон фільтрувального матеріалу. Тому виконані розрахунки орієнтовані на типовий розподіл дисперсного складу вугільного пилу. Завдання полягає в тому, щоб визначити оптимальний розмір волокон для вловлювання передусім вугільного пилу й забезпечення максимального строку експлуатації фільтра на гірничих підприємствах.

За концентрацією пилу в повітрі робочої зони визначально пиломісткість попереднього шару фільтра за час  $t$ . За рис. 3 і 4 установлюємо радіус волокна, який забезпечить найбільшу пиломісткість. Потім, визначившись із щільністю упакування і товщиною фільтрувального шару (для поліпропіленових фільтрів

$\beta = 0,05$ ;  $H = 6$  мм), розраховуємо ефективність фільтрації за формулою (8) і концентрацію пилового аерозолю після попереднього шару за формулою (9). За формулою (4) встановлюємо зміну перепаду тиску на зовнішньому шарі за обраний час  $t$ .

Радіус волокон фінішного фільтра розраховуємо, урахувавши задану ефективність фільтрації респіратору, за формулою (8) або за рис. 5. Потім розраховуємо пиломісткість фінішного фільтра за такий самий час  $t$  за формулою (7). Уточнивши радіус його волокон за формулою (8), встановлюємо приріст перепаду тиску, що створить на ньому осілий шар пилу. Порівнявши отримані значення з перепадом тиску на попередньому фільтрі, зробимо висновок щодо правильності розрахунків. Радіуси волокон попереднього і фінішного фільтрів мають бути такими, щоб перепад тиску на обох фільтрах збільшився однаково (рис. 6).

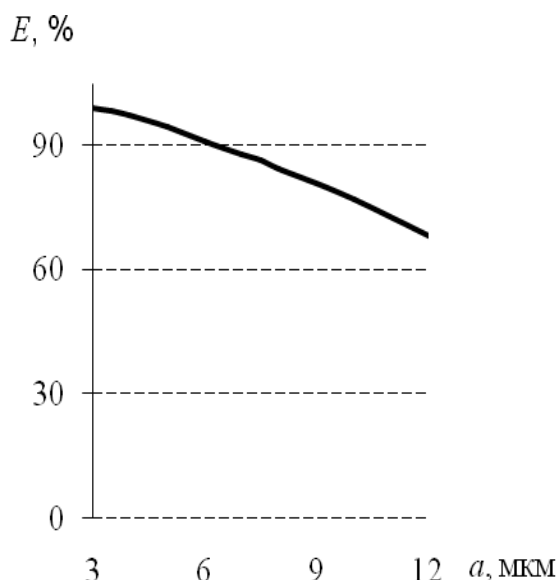


Рисунок 5 – Залежність ефективності фільтрації ( $E$ ) шару фільтруючого матеріалу від радіусу волокон ( $a$ )

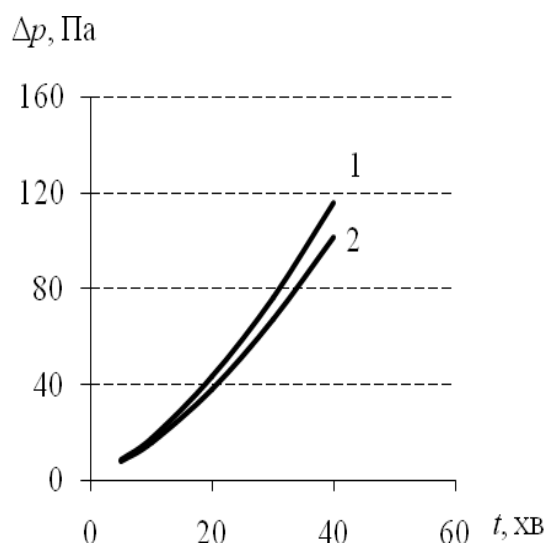


Рисунок 6 – Залежність перепаду тиску ( $\Delta p$ ) від часу ( $t$ ) у двошаровому фільтрі: 1 – попередній фільтр, 2 – основний фільтр

Для розрахунку параметрів двошарових поліпропіленових фільтрів із загальною площею фільтрації  $50 \text{ cm}^2$  при концентрації вугільного пилу  $100 \text{ mg/m}^3$ , для заданої ефективності фільтрації  $E = 99,99 \%$  використано такі вихідні дані в таблиці 1.

Результати розрахунків двошарових фільтрів наведено в табл. 2.

Для заданих умов отримали оптимальні радіуси волокон попереднього  $a = 6,5$  мкм і фінішного ( $a = 2,5$  мкм) фільтрів, що забезпечить найкращі характеристики фільтра за пиломісткістю.

Пиломісткість фільтрів або зразків фільтрувальних матеріалів вимірювали за тест-аерозолями вугільного пилу [14]. Кількість пилу, що осів, визначали гравіметричним методом. Загальний вигляд і схему установки наведено на рис. 7, методику проведення досліджень – у ДСТУ EN 149.

Таблиця 1 – Вихідні дані

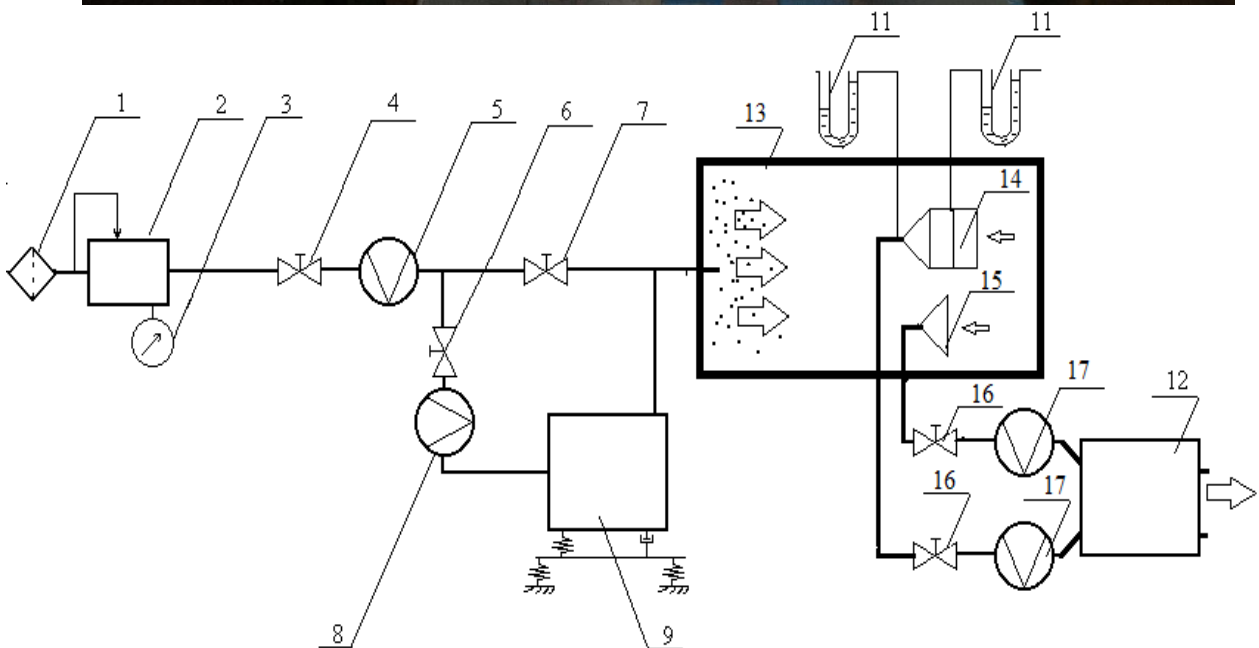
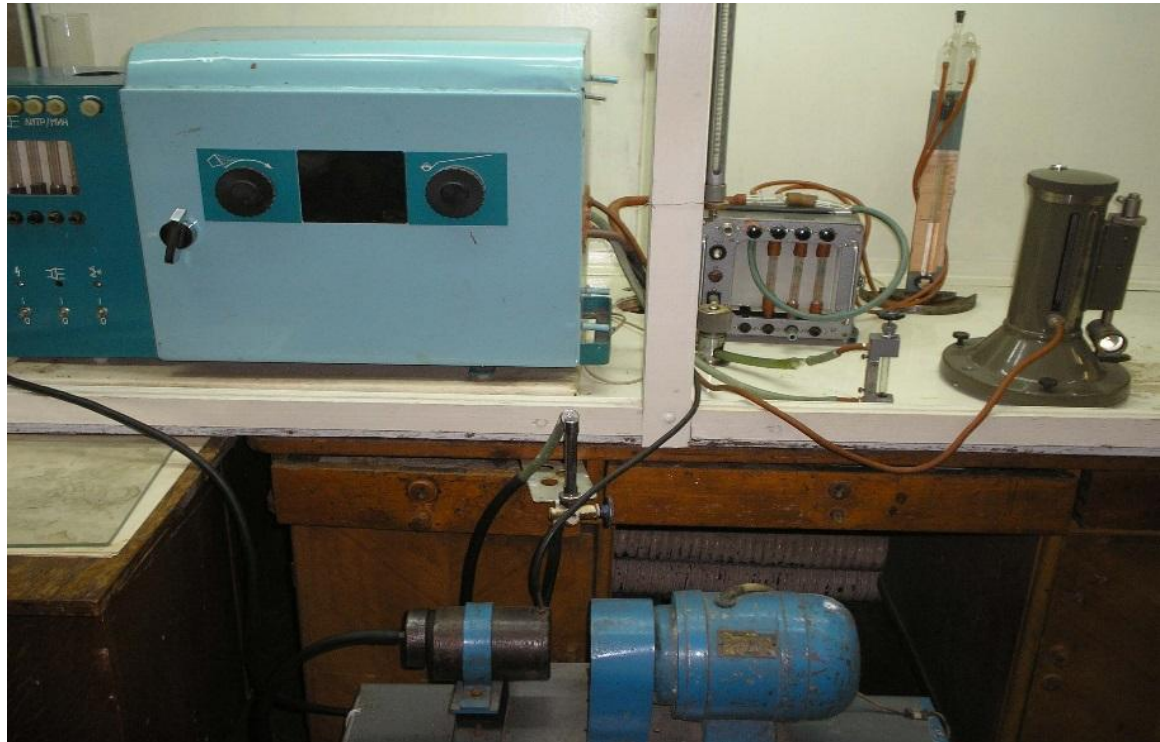
Діаметр аерозольних частинок $d_{\text{ч}}$ , мкм	3,0
Початкова щільність упакування волокон попереднього фільтрувального шару $v$	0,05
Початкова швидкість фільтрування $v_0$ , м/с	0,015
Товщина попереднього фільтрувального шару $H$ , мм	4
Початкова концентрація аерозольних частинок $n_0$ , мг/м <sup>3</sup>	100
Сумарний коефіцієнт уловлювання аерозольних частинок $\lambda$	$3,3 \cdot 10^{-2}$
Коефіцієнт проникнення аерозолю $K_{\text{п}}$	0,01
Час запилення, с	1800
Константа $b$ , м <sup>-1</sup>	42

Таблиця 2 – Результати розрахунків двошарових фільтрів

Час роботи фільтра $t$ , хв	Попередній шар			Фінішний фільтр			Сумарна пиломісткість фільтра, г/м <sup>2</sup>	Сумарний перепад тиску на фільтрі, Па
	радіус волокон, мкм	пиломісткість, г/м <sup>2</sup>	перепад тиску, Па	радіус волокон, мкм	пиломісткість, г/м <sup>2</sup>	перепад тиску, Па		
5	6	0,01	13,2	2,5	0,001	5,67	0,011	18,9
10		0,03	30,9		0,002	9,53	0,032	40,4
20		0,06	81,0		0,005	20,39	0,065	101,4
30		0,09	145,8		0,008	34,43	0,098	180,2
5	7,5	0,01	8,5	2,5	0,002	7,9	0,012	16,4
10		0,03	17,5		0,004	15,9	0,034	33,4
20		0,06	43,2		0,009	38,3	0,069	81,5
30		0,09	76,4		0,013	67,2	0,103	143,6
5	8	0,01	7,6	2,5	0,002	8,8	0,012	16,4
10		0,03	15,0		0,005	18,5	0,035	33,5
20		0,06	36,1		0,011	45,6	0,061	81,7
30		0,09	63,5		0,015	80,7	0,105	144,2
5	9	0,01	5,6	2,5	0,004	22,1	0,014	27,7
10		0,03	9,4		0,007	55,8	0,037	65,2
20		0,06	20,2		0,014	151,2	0,074	171,4
30		0,09	34,2		0,021	274,7	0,111	308,9

Випробувальний стенд працює так. Повітря під тиском від компресора через фільтр попереднього очищення 1 потрапляє на стабілізатор 2. Кількість повітря регулюють вентилем 4 і контролюють манометром 3, ураховуючи перепад тиску на каліброваній діафрагмі 6.





1 – фільтр попереднього очищення; 2 – стабілізатор тиску 3 – манометр; 4, 6, 16 – регулювальні вентиля; 5, 8, 17 – діафрагма з манометром; 9 – генератор пилу; 11 – мікроманометри; 12 – аспіратор; 13 – випробувальна камера; 14 - фільтрувальна коробка з фільтрами або зразками фільтрувального матеріалу; 15 – алонж з фільтром АФА

Рисунок 7 – Фото и схема установки для визначення пиломісткості фільтрів або зразків фільтрувальних матеріалів

Для утворення пилового аерозолі із заданим дисперсним складом у вібраційний генератор 7 подається 2–10 дм<sup>3</sup>/хв пилу. Вібраційний генератор пилу це сталевий стакан із впускним і випускним штуцерами, у який завантажують попередньо подрібнені куски вугілля загальною масою близько 100 г. Унаслідок

вібрації камери відбувається інтенсивне їх самоподрібнення до пилового стану. Для прискорення подрібнення передбачено завантаження в камеру генератора пилу сталевих шарів діаметром 10–15 мм. Потім пилова суміш подається у випробувальну камеру 9, де розміщено фільтр 11. Повітря, яке відбирається під фільтром за допомогою аспіратора 13 з витратою 95, 30 або 15  $\text{дм}^3/\text{хв}$ , що контролюється діафрагмою 6, відводиться через алонж з аналітичним фільтром АФА 14. Зміна перепаду тиску під час накопичення пилового осаду фіксується за показниками мікроманометра 12.

Концентрацію пилу в камері визначають за допомогою іншого аналітичного фільтра 10 і аспіратора 13 за формулою

$$C = 1000(M_1 - M_2) / (Qt), \quad (10)$$

де  $C$  – концентрація пилу в камері,  $\text{мг}/\text{м}^3$ ;  $M_1$  – маса запиленого аналітичного фільтра АФА,  $\text{мг}$ ;  $M_2$  – маса фільтра АФА,  $\text{мг}$ ;  $Q$  – витрата повітря через фільтр,  $\text{дм}^3/\text{хв}$ ;  $t$  – час запилення фільтра,  $\text{хв}$ .

Коли опір повітряному потоку досягне критичного значення, випробування припиняють шляхом вимкнення аспіратора і пилового генератора. Запилений фільтр або зразок фільтрувального матеріалу та аналітичний фільтр, який містився після респіратора, зважують для визначення маси накопиченого пилу. Коефіцієнт проникнення пилового аерозолі крізь фільтр визначають за формулою

$$K_{\text{п}} = (M_{1\text{ф}} - M_{2\text{ф}}) / (M_1 - M_2), \quad (11)$$

де  $M_{1\text{ф}}$  і  $M_{2\text{ф}}$  – маса запиленого і чистого фільтра АФА (відповідно) після зразків, що перевіряються,  $\text{мг}$ .

Для перевірки запропонованого способу розрахунку оптимальних діаметрів волокон двошарових фільтрувальних матеріалів виготовлено декілька експериментальних зразків з однаковою поверхневою щільністю –  $45 \text{ мг}/\text{м}^2$ . Фінішний фільтр усіх зразків мав однаковий середній радіус волокон 2,5  $\mu\text{м}$ , тоді як у попередніх фільтрах: – у першому випадку середній радіус волокон становив 3  $\mu\text{м}$ , у другому – 4  $\mu\text{м}$ , у третьому – 7  $\mu\text{м}$ , у четвертому – 11  $\mu\text{м}$ . Під час експерименту спостерігалось зростання перепаду тиску у виготовлених зразках двошарових фільтрувальних матеріалів при однаковій концентрації пилу (рис. 8).

Зростання опору і на першому і на другому фільтрах відбувається практично одночасно протягом двох годин. Після, зміна перепаду тиску на основному фільтрі, початок сповільняється, а на передфільтрі навпаки стало рости швидше. Це пояснюється утворенням на поверхні передфільтра саме шару пилу, що фільтрується, який збільшив його ефективність і тим самим зменшив надходження пилу на основний фільтр (рис. 9).

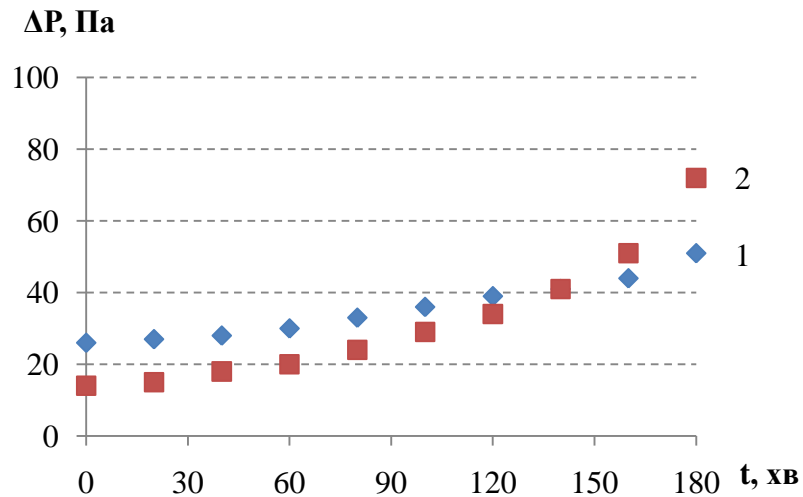


Рисунок 8 –Зміна перепаду тиску на основному фільтрі з щільністю  $55 \text{ г / см}^2$  (1) і передфільтрі з щільністю  $27 \text{ г / см}^2$  (2) при заповненні їх вугільним пилом з концентрацією  $300 \text{ мг / м}^3$



Рисунок 9 – Фільтри після заповнення: передфільтр (1) і основний фільтр (2)

Відзначимо, що сумарний опір фільтруючої системи було на 20% нижче, ніж у випадку з одним фільтром, що говорить про більшу пилоємність цієї системи. Наприклад, порівнюючи показники зміни перепаду тиску цієї фільтруючої системи з аналогічними показниками фільтра з щільністю  $55 \text{ г / см}^2$ , бачимо, що незважаючи на більш високі початковий опір у, двоступеневої системи ресурс терміну експлуатації більше на 25 %.

За даними проведених досліджень виготовлено фільтрувальний респіратор Шахтар з двома фільтрами (рис. 10), які виконані з поліпропіленового фільтрувального матеріалу з різними параметрами (діаметром волокон і щільністю упакування) При використанні даного респіратора попередній фільтр, уловлює крупну фракцію пилу, тим самим збільшує ресурс основного фільтра. Крім то-

го, присутність додаткового клапану видиху та розташування їх по боках півмаски дозволяє зменшити опір при видиху та підвищити вентиляцію підмасочного простору.

Запропонована модель успішно пройшла випробування у спеціалізованій випробувальній лабораторії, де були отримані значення коефіцієнта проникання і опору диханню на випробувачах (табл. 3.). Також представлені зразки отримали позитивні відгуки при виробничих випробуваннях на вугільних шахтах. В таблиці 4 представлені результати цих випробувань і зазначена його область безпечного використання.

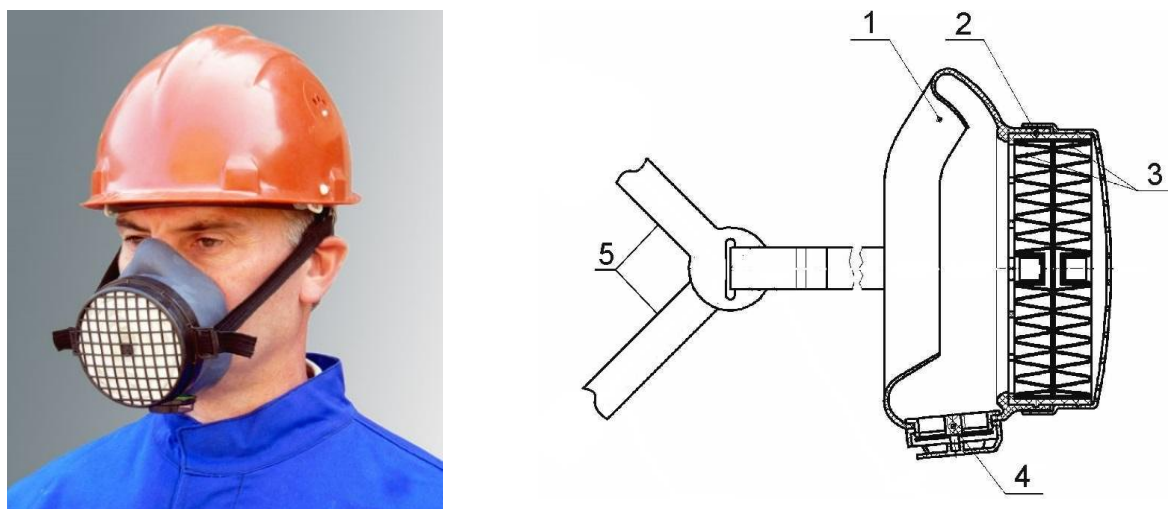


Рисунок 10 – Загальний вигляд респіратора «Шахтар» 1 – гумова півмаска; 2 – протипиловий патрон; 3 – фільтруючі елементи; 4 – вузол клапана видиху; 5 – наголів'я

Таблиця 3 – Результати випробування респіратора шахтар

Тип фільтра	Початковий опір респіратора постійному повітряному потоку з витратою 95 л/хв, Па	Середній коефіцієнт проникнення за тест-аерозолем хлориду натрію, на випробувачах, %	Коефіцієнт проникнення тест-аерозолу NaCl при повітряному потоці з витратою 95 л/хв для фільтрів FFP2, % (за ДСТУ EN 143:2002)
FM	48	0,9	6

Таблиця 4 – Результати виробничих досліджень

Тип респіратора	Кількість вимірів, шт	Коефіцієнт проникнення пилового аерозолу	Коефіцієнт захисту	Номінальний коефіцієнт захисту до другого класу FFP2 за ДСТУ EN 526
Шахтар	30	5,1	15,6	12

Виходячи з отриманих даних можна рекомендувати даний респіратор використовувати для захисту органів дихання на гірничорудних і вугільних підприємствах до 12 ПДК.

**Висновки.** Аналіз сучасних підходів до збільшення пилоємності й строку експлуатації фільтрів і фільтрувальних півмасок показав, що найперспективнішим є виготовлення багатошарових фільтрів зі змінною поверхневою щільністю. Запропоновано методику розрахунку багатошарових фільтрів спрямовано на забезпечення максимальної пилоємності й мінімального перепаду тиску при варіюванні діаметрів волокон шарів та їх товщини. Експериментальні дослідження із запылення виготовлених двошарових зразків засвідчили, що максимальна кількість пилу осіла на фільтрах, при діаметрі волокон основного фільтра 3 мкм, а попереднього 11 мкм.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шевченко, В.Г. К количественной оценке трудозатрат рабочих урановых шахт / В.Г. Шевченко, Ю.И. Кияшко // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2012. - Вып. 99. - С. 250-256.
2. Шевченко, В.Г. Исследование особенностей изменения показателей труда горняков при выполнении различных технологических операций / В.Г. Шевченко, Р.А. Дякун, Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. - Вып. 115. - С. 86-93.
3. Кальнин, Ю. В. Разработка метода расчета иглопробивных фильтрующих материалов / Ю.В. Кальнин, Н. С. Канусин // Тр. ЦНИПП. – 1992. – Вып. 6. – С. 28–31.
4. Стечкина, И. Б. Оптимизация параметров фильтров в многоступенчатой системе тонкой очистки газов / И. Б. Стечкина, В. А. Кирш // Теоретические основы химической технологии. – 2003. – Т. 37, № 3. – С. 238–245.
5. Кирш, В. А. Кинетика забивки и оптимизация префильтров в двухступенчатой системе очистки воздуха / В. А. Кирш, И. Б. Стечкина // Теоретические основы химической технологии. – 2010. – Т. 44, № 1. – С. 78–87.
6. Лебедев, М. Н. Метод расчета срока службы высокоэффективного аэрозольного фильтра / М.Н. Лебедев // Коллоидный журнал – 1998. – Т. 60, № 1. – С. 46–54.
7. Колесник, В. Е. Дослідження опору повітря протипилових респіраторів при їх експлуатації на гірничорудних підприємствах / В. Е. Колесник, С. І. Чеберячко, Ю. І. Чеберячко // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 118–123.
8. Кирш, В. А. Метод расчета роста перепада давления в аэрозольном фильтре при забивке твердыми частицами / В. А. Кирш // Коллоидный журнал – 1998. – Т. 60, № 4. – С. 480–484.
9. Чеберячко, С. И. Исследование сопротивления воздушному потоку фильтрующих материалов с полипропиленовых волокон / С. И. Чеберячко // Вісник ЖІТІ. – 2002. – № 18. – С. 183–185.
10. Двухименный, В. А. Изменение эффективности и перепада давления аэрозольных фильтров при накоплении на волокнах осадка твердых частиц / В. А. Двухименный, А. А. Кирш, И. Б. Стечкина, Е. Н. Ушакова // Теоретические основы химической технологии. - 1985. – Т.19, № 5. – С. 649–654.
11. Стечкина, И. Б. К вопросу о выборе параметров фильтрующего материала для тонкой очистки газов / И. Б. Стечкина, А. А. Кирш // Теоретические основы химической технологии. – 1991. – Т. 15, № 1. – С. 79 – 83.

#### REFERENCES

1. Shevchenko, V.G. and Kiyashko, Y.I. (2012), “To quantify labor working uranium mines”, *Geo-Technical Mechanics*, vol. 99, pp. 250-256.
2. Shevchenko, V.G., Dyakun, R.A and Svetlichniy, V.N. (2014), “Study features of change indicators miners while performing different technological operations”, *Geo-Technical Mechanics*, vol. 115, pp.86-93.
3. Kalinin, Yu.V. and Kanusin, N.S. (1992), “Development of a method of calculation of needle-punched filtering materials”, *Trudy TSNIPP*, no. 6, pp. 28–31.
4. Stechkina, I.B. and Kirsh, V.A. (2003), “Optimizing filter parameters in a multi-stage gas cleaning system fine”, *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, vol. 37, no.3, pp. 238–245.
5. Stechkina, I.B. and Kirsh, V.A. (2010), “Kinetics and optimization of driving pre-filter in a two-stage air purification system”, *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, vol. 44, no.1, pp. 238–245.
6. Lebedev, M.N. (1998), “The method of calculating the period of service highly efficient aerosol filter”, *Colloidnyi Zhurnak*, vol. 60, no. 1, pp. 46–54.

7. Kolesnik, V.E., Cheberyachko, S. I. and Cheberyachko, Yu.I. (2014), "The study of air resistance dust mask during their operation in mining enterprises", *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, no.4, pp. 118–123.
8. Kirsch, V.A. (1998), "The method for calculating the pressure drop in the growth of the aerosol filter at a pile of particulate matter", *Colloidnyi Zhurnal*, vol. 60, no.4, pp. 480-484.
9. Cheberyachko, S.I. (2002), "Investigation of the airflow resistance of filter material of polypropylene fibers", *Visnyk ZhITI*, no. 60, pp. 183-185.
10. Dvuhimenny, B. A., Kirsch, A. A., Stechkin, I. B. and Ushakova, E.N. (1985), "Changing the efficiency and aerosol filters differential pressure in the accumulation of fibers on the solids sludge", *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, vol. 19, no. 5 pp. 649-654.
11. Stechkina, I.B and Kirsch, A.A.(1991), "On the selection of the filter material parameters to fine scrubbing", *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, vol. 15, no. 1 pp. 79-83.

---

### Про авторів

**Чеберячко Сергій Іванович**, доктор технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (Державний ВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, [sihc@yandex.ru](mailto:sihc@yandex.ru).

**Яворська Олена Олександрівна**, кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (Державний ВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, [lenayavorskay@mail.ru](mailto:lenayavorskay@mail.ru).

**Чеберячко Юрій Іванович**, кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (Державний ВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, [intruder@hotbox.ru](mailto:intruder@hotbox.ru).

**Столбченко Олена Володимирівна**, кандидат технічних наук, доцент, Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет» (Державний ВНЗ «НГУ»), Дніпро, Україна, [elena\\_aot@ukr.net](mailto:elena_aot@ukr.net).

### About the authors

**Cheberyachko Sergiy Ivanovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Associate Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (State HEI «NMU»), Dnipro, Ukraine, [sihc@yandex.ru](mailto:sihc@yandex.ru).

**Yavors'ka Olena Oleksandrivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (State HEI «NMU»), Dnipro, Ukraine, [lenayavorskay@mail.ru](mailto:lenayavorskay@mail.ru).

**Cheberyachko Yuriy Ivanovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (State HEI «NMU»), Dnipro, Ukraine, [intruder@hotbox.ru](mailto:intruder@hotbox.ru).

**Stolbchenko Olena Volodymyrivna**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, State Higher Education Institution «National Mining University» (State HEI «NMU»), Dnipro, Ukraine, [elena\\_aot@ukr.net](mailto:elena_aot@ukr.net).

---

**Анотация.** Рассмотрен процесс формирования пылевого осадка на многослойном фильтре.

Предложена методика расчета многослойных фильтров, которая способствует обеспечению максимальной пылеемкости и минимального перепада давления при варьировании диаметров волокон слоев и их толщины. Согласно результатам экспериментальных исследований по опылению, изготовленных двухслойных образцов, максимальное количество пыли оседает на фильтрах, плотность упаковки которых содержится в диапазоне 0,03-0,06.

Рассчитаны параметры новой многослойной фильтровальной полумаски с увеличенным пылевмещением.

**Ключевые слова:** респиратор, коэффициент защиты, СИЗОД, профессиональные заболевания, аэрозольный фильтр, пылеемкость.

**Abstract.** A process of formation of dust deposition in the multi-layer filter is considered.

A method of calculating the multilayer filter is proposed, which helps ensuring maximum dust depositing and minimum pressure drop at varying diameter and thickness of the fiber layers. According to the experimental study of the dust content in the two-layer samples, maximal amount of dust is deposited on the filters, packing density of which is within the range of 0.03-0.06.

Parameters were calculated for the new multi-layer filtering half-mask with increased volume for deposition of dust.

**Key words:** respirator, protection factor, RPE, occupational diseases, aerosol filter, deposition of dust.

*Статья поступила в редакцию 11.10.2016*

*Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Шевченко В.Г.*