

УДК 614.89

© В.Ю. Фрундін, С.І. Чеберячко, Ю.І. Чеберячко, Д.І. Радчук

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТИПИЛОВИХ ФІЛЬТРІВ ДЛЯ УМОВ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

В статті досліджено зміну коефіцієнту проникнення запилених фільтрів в умовах гірничих підприємств.

В статье исследовано изменение коэффициента проникновения запыленных фильтров в условиях горных предприятий.

In the article the variation of penetration dust filters in conditions mining enterprises.

Вступ. Умови праці на вугільних підприємствах здебільшого визначаються пиловим фактором, тобто залежать від вмісту пилу в повітрі робочої зони, типу його утворення та пиловідкладення поблизу джерел пилу. При цьому властивості пилу обумовлюють вибір відповідних заходів для боротьби з ним.

Діючими нормативними документами з охорони праці встановлюється санітарно-гігієнічні норми, а при неможливості їх забезпечення – рівні пилового навантаження працюючих. Також для захисту гірників передбачено видачу засобів індивідуального захисту органів дихання. Вибір останніх регламентований декількома стандартами ДНАОП 0.00-1.04-07 та ДСТУ EN 529:2006. Вважається, що при правильному виборі фільтрувального респіратора він надійно захищає людину від захворювання на пневмоконіози і пилові бронхіти. Незважаючи на те, що використання індивідуальних засобів захисту є обов'язковим, кількість хворих на пилову етіологію з кожним роком збільшується. Тому, дослідження ефективності використання протипилових фільтрувальних респіраторів у виробничих умовах є досить актуальними.

Виділення невирішеної проблеми. Значної популярності для виготовлення фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання набули поліпропіленові матеріали, які характеризуються незначним початковим опором диханню, легкі у виготовленні та використанні, мають велику механічну міцність. Однак, їх захисні властивості значно залежать від наявності електростатичного заряду. Проведені дослідження показують, що при лінійних швидкостях фільтрування до 0,006 м/с ефективність електростатичного механізму уловлювання аерозольних частинок сягає 80 % від сумарної дії усіх механізмів [1]. Однак, він є нестабільним, а поведінка може бути непередбачувана, особливо під дією підвищеної температури та вологості повітря [2, 3]. Враховуючи, що гірничі виробки вугільних шахт характеризуються несприятливими кліматичними умовами, особливо високою вологістю повітря, виникає досить актуальна задача у дослідженні її впливу на

захисну ефективність фільтрів з поліпропіленових матеріалів для визначення терміну захисної дії.

Аналіз досліджень і публікацій. Публікації щодо оцінки впливу вологості повітря на ефективність уловлювання аерозолію електретними фільтрами значно різняться одна від одної. У деяких роботах показано погіршення захисних властивостей, яке пов'язане зі зменшенням величин зарядів частинок і волокон, що потрапляють в такі умови [2]. В інших, навпаки, спростовують наведений висновок. Наприклад, деякі автори [3] стверджують, що вологість повітря майже не впливає на коефіцієнт проникнення аерозольних частинок діаметром до 100 нм. Експерименти проводились при відносній вологості від 40 до 92 %. Однак, існують дослідження котрі показують, що при збільшенні вологості, уловлювання крупних частинок покращується, пояснюючи цей ефект зростанням капілярних сил, які збільшують їх прилипання до волокон матеріалу [4]. Є висновок, що у фільтрів, з нанесеним зарядом у полі коронного заряду, дійсно погіршуються захисні показники, тому що в такому разі електрони на поверхні волокна легко видаляються молекулами води. Інша річ електретні фільтри, які отримані методом електро-спінінгу, коли утворюється спеціальне покриття більш стійке до вологи [5]. А роботах [6, 7] була зроблена спроба розв'язати завдання зі збільшення терміну служби електрета за рахунок уведення в структуру фільтра різних композиційних добавок. Однак, у наведених дослідженнях не має чіткої відповіді стосовно здатності електретних фільтрів забезпечити достатню захисну ефективність протягом однієї робочої зміни в умовах підвищеної вологості.

Формулювання мети роботи. Дослідження взаємозв'язку між коефіцієнтом проникнення фільтрів поліпропіленових матеріалів та величиною електростатичного заряду на їх волокнах в умовах підвищеної вологості повітря для визначення терміну захисної дії респіраторів.

Матеріали та методи дослідження. Для дослідження були використанні три різні марки фільтрів до багаторазових респіраторів, які відповідали другому класу захисту за ДСТУ EN 143:2002 (підтверджувалось сертифікатами якості). Їх виготовили з поліпропіленового фільтрувального матеріалу із середнім діаметром волокон 2,5 мкм, товщиною фільтрувального шару 4 мм та поверхневою щільністю: перший – 55 г/м² (тип А); другий – 45 г/м² (тип Б); третій – 40 г/м² (тип В). Для зменшення похибки випробувань захисної ефективності респіраторів було попередньо визначено опір повітряному потоку фільтрів, щоб відібрати для експериментів тільки з однаковими показниками.

У лабораторних умовах визначали:

- коефіцієнт проникнення фільтрів, який представляє відношення концентрації аерозолію «до» і «після» респіратора під час запилення за формулою [3]

$$K_n = \frac{C_1}{C_2} \cdot 100, \% \quad (1)$$

де C_1, C_2 – концентрація аерозолу в підмасковому просторі респіратора і у випробувальній камері, мг/м^3 відповідно;

- величину поверхневого заряду на поверхні фільтра за формулою

$$\sigma_{\text{эф}} = \varepsilon\varepsilon_2 V_e / S, \text{ Кл/м}^2 \quad (2)$$

де ε – діелектрична проникність повітря, ε_2 – діелектрична проникність матеріалу електрета; V_e – потенціал поверхні електрету, В; S – площа вимірювального електрода, м^2 ;

- перепад тиску на фільтрах при витраті повітря $95 \text{ дм}^3/\text{хв}$ за формулою

$$R = (n_i - n_0)K_1, \quad (3),$$

де n_i – відлік опору фільтрів за мікроманометром, Па; n_0 – початковий опір вимірювальної системи, Па; K_1 – поправковий коефіцієнт на температуру і атмосферний тиск..

Випробування проводились для визначення впливу відносної вологості і запиленості повітря на коефіцієнт проникнення та перепад тиску фільтрів у лабораторних умовах. Рівні відносної вологості були від 60% до 98%, а концентрація пилу в камері складала $250 - 300 \text{ мг/м}^3$. Кожне випробування продовжували до тих пір, поки перепад тиску на фільтрі не досягав 100 Па. Під час запилення через рівні проміжки часу (кожні 30 хв.) визначався коефіцієнт проникнення за тест-аерозолем хлорид натрію, що має дисперсний склад від 0,2 $\mu\text{м}$ до 2 $\mu\text{м}$. Перед початком і закінченням випробувань фільтр зважували, щоб визначити повну масу води і пилу на ньому. Також після закінчення досліджень фільтр залишали підсохнути при кімнатних умовах, протягом 24 годин. Після висихання його знову зважували, щоб отримати масу пилу, що осіла.

Запилення проводили на спеціальному стенді (рис. 1), що дає змогу імітувати реальний робочий процес з наявністю пилу в повітрі робочої зони. Продування запиленого повітря через фільтр проводили з витратою повітря $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$.

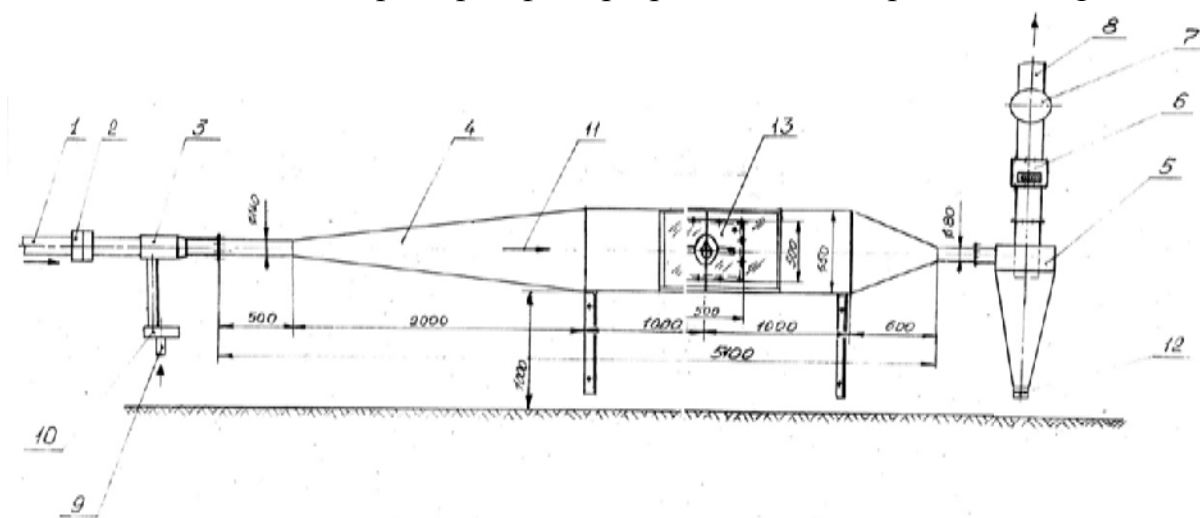


Рис. 1. Загальний вигляд випробувального стенду: 1, 9 – подача стисненого повітря; 2 – попередній фільтр очищення стисненого повітря; 3 – ежектор; 4 –

дифузор; 5 – циклон; 6 – витратомір; 7 – витяжний вентилятор; 8 – вихідний патрубок; 10 – генератор пилу; 11 – розподільувач пилу; 12 – заслінка; 13 – випробувальна камера

Стенд працює наступним чином. Пил, за допомогою ежектора, подають з генератора у випробувальну камеру. Дифузор в конструкції випробувальної камери забезпечує рівномірне розподілення пилу та повітряного потоку в камері, забезпечуючи його ламінарність.

Фільтр встановлюють на придатний адаптер у випробувальній камері. Концентрацію пилу вимірювали за допомогою пробовідбірника з фільтром АФА, який розміщували біля випробовуваного зразка. Концентрацію пилу визначали за формулою

$$C = \frac{10^3(m_2 - m_1)}{Qt}$$

де m_1 - маса фільтра АФА, мг; m_2 - маса фільтра АФА з пилом після відбору проби, мг; Q - витрата повітря, $\text{дм}^3/\text{хв.}$; t - час відбору проби повітря, хв.

Для розрахунку величини електростатичного заряду, експериментально визначали потенціал на поверхні фільтрів. Установка складається із двох блоків (вимірювального та індикації) (рис. 2). Вона дозволяє виміряти ефективну напругу на поверхні електрета до 1000 В. Принцип її дії заснований на використанні в якості нуль-індикатора електронно-променевого вобулятора, з відображенням компенсаційної напруги на цифровому вольтметрі. Перед початком випробувань фільтр розгортали та розміщували на ньому вимірювальний електрод на внутрішній його поверхні. Для відтворюваності експерименту місця розташування електроду позначали (рис. 3). Потім фільтр знову складали за допомогою матриці (рис. 4), і, вже після запилення, знову розгортали та визначали поверхневий потенціал на тих самих місцях.

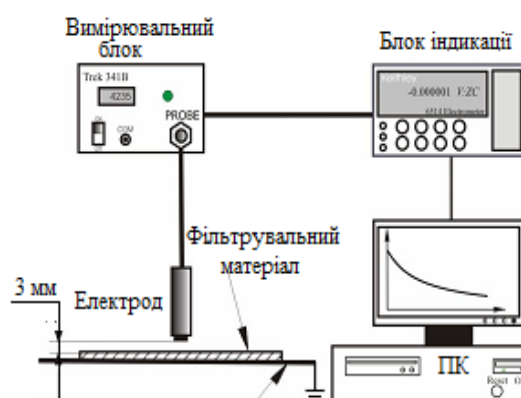


Рис. 2. Схема установки з вимірювання електростатичного потенціалу на поверхні фільтрувального матеріалу

Виробничі дослідження фільтрів проводили на шахтах Західного Донбасу. В експерименті приймали участь гірники наступних професій: машиніст, помічник машиніста, гірник. Їм видавалися респіратори типу РПА з фільтрами, які попередньо пройшли лабораторну перевірку. Відмітимо, що півмаски підбирались відповідно до розміру обличчя. Додаткових тренувань для навчання працівників, які приймають участь у дослідженнях, правильній експлуатації ЗІЗОД, крім тих, що передбачені програмою первинного інструктажу проведено не було. Тривалість експериментів становила 4 години. Під час вимірювань на кожному робочому місці контролювались вологість та температура повітря за допомогою аспірація МВ-4 і визначалась концентрація пилу за допомогою вимірювача запиленості ІЗША. Після проведення експерименту, фільтри акуратно вкладали в індивідуальні пакети для подальшого вимірювання їх ваги з пилом та визначення поверхневого електростатичного заряду і коефіцієнту проникнення у лабораторії.



Рис. 3. Точки розташування електроду для заміру електростатичного заряду на поверхні фільтрувального матеріалу



Рис. 4. Матриці для формування гофрованих фільтрів з конусних заготовок для респірація

Результати. У табл. 1 наведені результати вимірювань коефіцієнта проникнення, поверхневого потенціалу, маси та перепаду тиску фільтрів перед проведеними випробуваннями з їх запилення на відповідність їх вимогам ДСТУ EN 143.

Таблиця 1

Середні значення коефіцієнта проникнення фільтрів у лабораторних умовах

Позначення фільтра	Маса фільтра, г	Опір диханню, Па при витраті повітря 30 дм ³ /хв	Величина поверхневого потенціалу, В	Коефіцієнт проникнення за хлоридом натрію, %
Тип А	6,45	27	455	0,226
Тип Б	6,25	23	415	0,511
Тип В	6,55	17	376	0,806

В таблицях 2, 3 наведені результати експериментальних досліджень залежності перепаду тиску і коефіцієнта проникнення фільтрів проведених у лабораторії при різних умовах випробувань, які моделюють атмосферу гірничих виробок (відмічені на рисунку 5а за номерами від 1 до 5).

Таблиця 2

Середні значення коефіцієнта проникнення і перепаду тиску фільтрів при різних умовах випробувань через 30 хв

Позначення фільтра	Умови випробувань, які характеризуються температурою у випробувальній камері, t, °С, вологістю, φ %, наявністю запилення, С ₂ , мг/м ₃				
	23 °С, 60 %	23 °С, 60 %, 200 мг/м ³	28 °С, 95 %	28 °С, 95 % 200 мг/м ³	37 °С, 95 % 200 мг/м ³
Тип А	0,25/27	1,2/55	4,3/29	6,2/55	8,6/61
Тип Б	0,5/23	3,8/45	5,5/25	9,1/46	13,2/52
Тип В	0,8/17	5,2/37	7,1/22	12,3/39	15,3/44

Примітка: у чисельнику наведено коефіцієнт проникнення у знаменнику перепад тиску.

Аналіз отриманих даних показав, що висока вологість повітря у взаємодії з вугільним пилом за певних умов може значно погіршити якість фільтрів. Бачимо, що всього через 30 хв їх експлуатаційні властивості значно погіршуються. Схожі результати були отримані у роботі. Однак, однозначно сказати, що перевірені фільтри не забезпечать належний захист у виробничих умовах не можна. Необхідні додаткові дослідження і, в першу чергу, пояснення, чому вологість повітря з пилом впливає на фільтрувальні властивості.

Якщо уважно вивчити отримані результати, видно, що у випадку зміни тільки кліматичних умов опір диханню майже не зростає (умови випробувань 1 і 3), при цьому коефіцієнт проникнення збільшився майже у десять раз. Таке погіршення фільтрувальних властивостей при постійній швидкості фільтрування і однаковому дисперсному складі частинок, можна пояснити саме зменшенням дії електростатичного механізму уловлювання частинок через стікання заряду. На рис. 6 наведено залежність коефіцієнта проникнення фільтрів від величини електростатичного заряду. Бачимо, що фільтри із зарядом меншим 2,5 нК/см² не будуть відповідати вимогам ДСТУ EN 143:2002. До факторів, які погіршують коефіцієнт проникнення, можна віднести збільшення температури повітря та вологості, а також осідання заряджених пилових частинок. Дослідження показують, що фільтрувальний поліпропіленовий матеріал з щільністю упакування меншим за 45 г/м² при існуючій системі

заряджання є не ефективними у виготовленні фільтрів, тому в подальших дослідженнях були використані тільки фільтри типу А.

Дійсно, результати експериментальних досліджень з визначення впливу вологості повітря на величину електричного потенціалу фільтрів підтверджують вище згадане твердження. У середньому процес стікання може складати від кількох днів до декількох місяців. Дослідження показують, що зменшення заряду на фільтрах з поліпропіленового матеріалу у звичайних умовах відбувається протягом одного-двох місяців, а потім він значний час тримається на одному рівні. В той же час, при збільшенні вологості повітря до 95 % процес стікання заряду з волокон дещо прискорюється (рис. 7). Рахується, що коли молекули води заповняють певну долю поверхні електрету утвориться електропровідний канал, який різко зменшить величину поверхневого потенціалу.

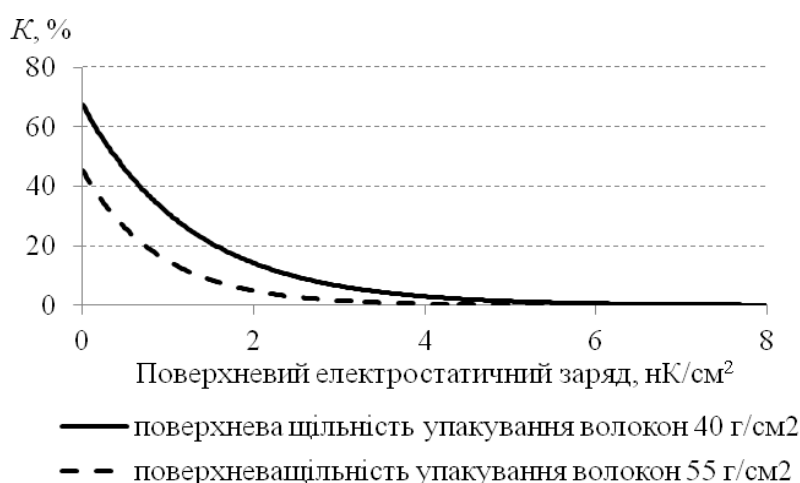


Рис. 6. Криві залежності коефіцієнта проникнення поліпропіленових фільтрів з різною щільністю упаковки волокон від величини поверхневого електростатичного заряду

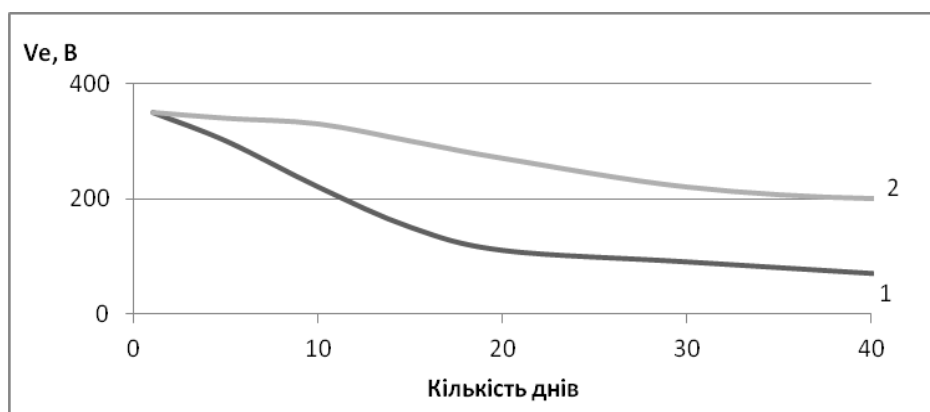


Рис. 7. Криві стікання електростатичного заряду при вологості повітря 95 % і температурі 26 °C (1) та відповідно 60 % і 23 °C (2) на поліпропіленових фільтрах

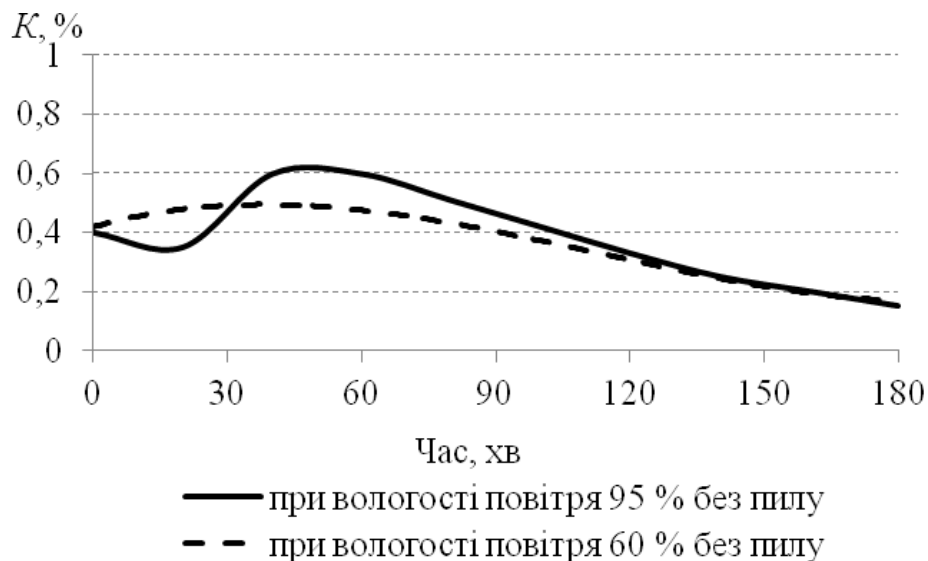


Рис. 8. Криві, які характеризують зміну коефіцієнта проникнення фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію в часі

Однак, цей процес через різні причини може значно затягнутися в часі і тим самим, на певному проміжку експлуатації фільтрів, можна отримати стабільний результат й при високій вологості повітря (рис. 8). Зокрема, на початковому етапі при низьких швидкостях фільтрування фіксується покращення захисних властивостей через виділення аерозольних частинок води на волокнах і зменшення пористості.

Майже до таких самих наслідків призведе і накопичення на волокнах фільтра вугільного пилового осаду. Це підтверджує зміна коефіцієнта проникнення фільтра при його запыленні (рис. 9). Відмітимо, також, що з часом захисна ефективність фільтрів буде покращуватись. Цьому сприяє і накопичення аерозолію і вологи, що зменшить пористість фільтрувального шару.

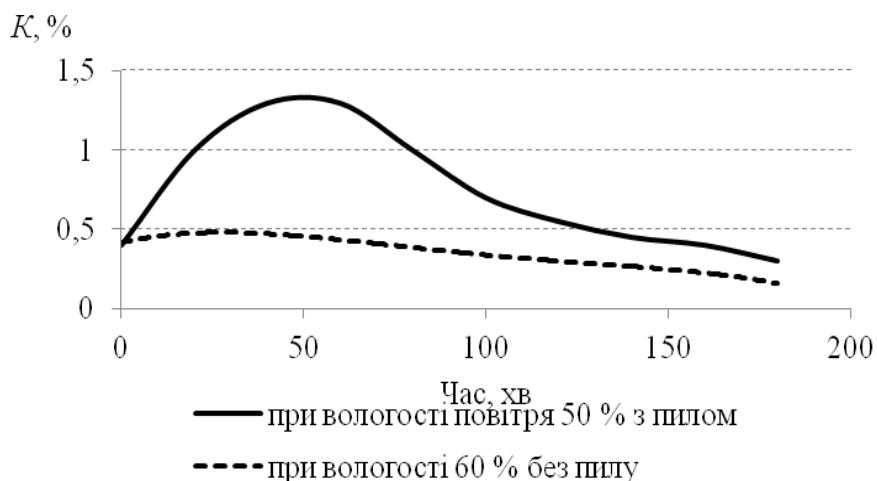


Рис. 9. Криві, які характеризують зміну коефіцієнта проникнення фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію в часі

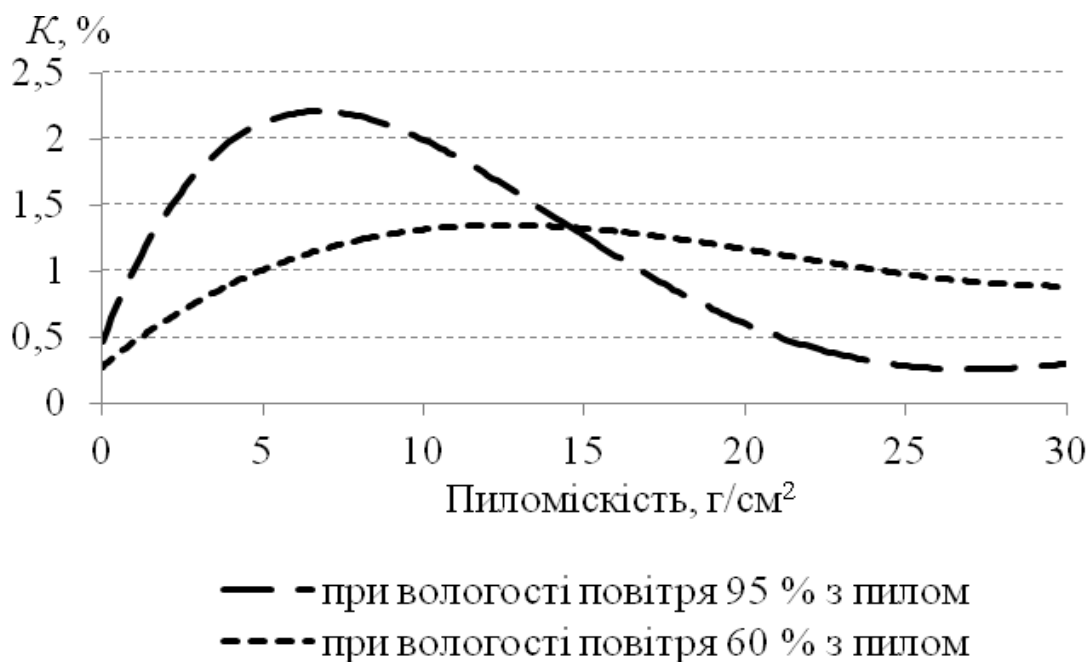


Рис. 10. Залежність зміни коефіцієнта проникнення фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію від пиломісності

Якщо порівняти залежність коефіцієнта проникнення фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію від кількості накопиченого пилу з кривими зміни перепаду тиску при осіданні пилу, то можна стверджувати, що покращення захисних властивостей відбудеться тільки після того, як закінчиться об'ємна фаза накопичення пилу (рис. 10, 11). Вона характеризується нелінійністю, що пояснюється осіданням частинок пилу в фільтрувальному шарі. При цьому збільшення вологості повітря якраз зменшує тривання цієї фази (рис.11).

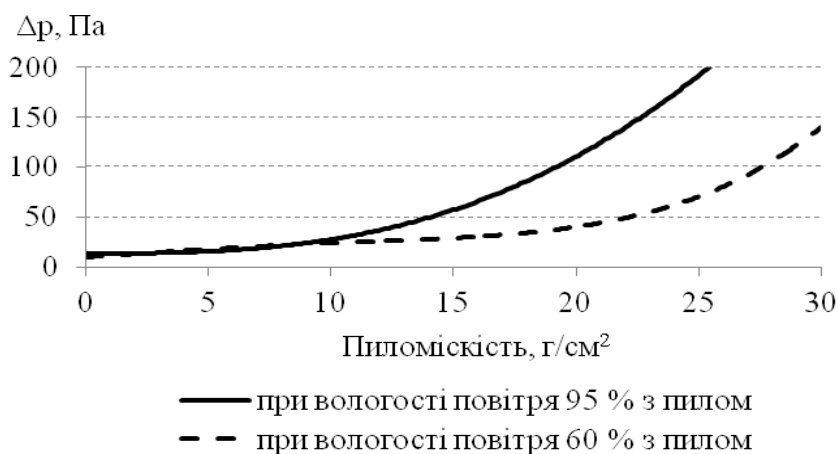


Рис. 11. Криві залежності перепаду тиску від пиломісності при різній вологості повітря отримані при швидкості фільтрування $30 \text{ дм}^3/\text{хв}$

Зменшити величину коефіцієнта проникнення респіраторів на початковому етапі роботи можна за рахунок розміщення перед фільтрувальною коробкою попереднього фільтра із спеціального гідрофільного матеріалу з низькою щільністю упакування волокон, наприклад СММС (рис. 12). Перевірка показала, що більша частина вологи і крупно дисперсна фракція пилу осідає саме на ньому, про що свідчить різке збільшення його маси по відношенню до основного фільтра (табл. 4). Це дозволяє не тільки покращити ресурс респілятора, а й зменшити стікання електростатичного заряду на фільтрах, тим самим підвищити захисні властивості півмасок в цілому (рис. 13). Тобто використання таких додаткових попередніх фільтрів дозволить підвищити термін експлуатації респіраторів.

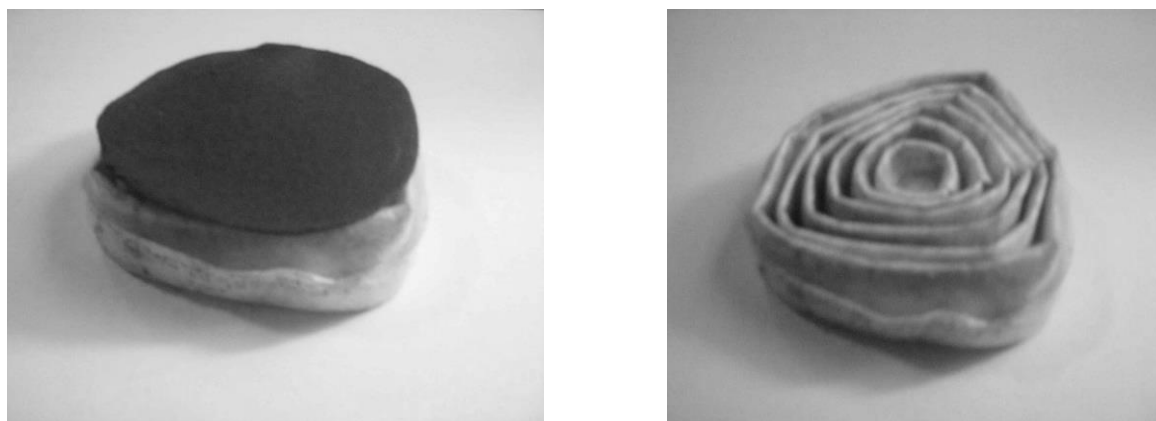


Рис. 12. Попередній фільтр, який встановлюється на фільтрувальну коробку респілятора

Таблиця 4

Середні значення коефіцієнта проникнення фільтра з установленим попереднім фільтром

Показники	Умови випробувань, які характеризуються температурою у випробувальній камері, t, °C, вологістю, φ %, наявністю запилення, C ₂ , мг/м ³		
	23 °C, 60 %, 200 мг/м ³	28 °C, 95 % 200 мг/м ³	37 °C, 95 % 200 мг/м ³
Початкова маса основного фільтра, г	6,33	6,27	6,24
Початкова маса попереднього фільтра, г	1,51	1,43	1,62
Загальний коефіцієнт проникнення, %	0,35	1,12	3,63
Маса основного фільтра з пилом і вологою, г	6,58	6,48	6,49
Маса попереднього фільтра з пилом і вологою, г	1,86	2,01	2,04

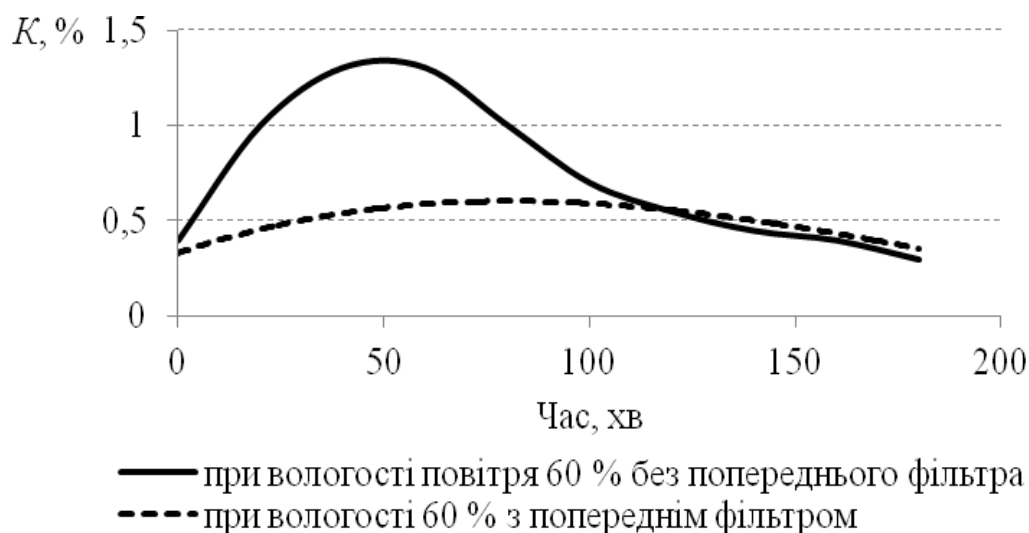


Рис. 13. Криві, які характеризують зміну коефіцієнта проникнення фільтрів за тест-аерозолем хлориду натрію в часі при запиленні

Перевірка фільтрів у виробничих умовах, протягом однієї зміни, показала, що саме збільшення концентрації пилу у повітрі робочої зони у поєднанні з високою вологістю і витратою повітря у кінцевому результаті призводить до підвищення захисних показників фільтрів (табл. 5).

Аналіз отриманих даних показав, що збільшення коефіцієнта проникнення тест-аерозолію фільтрів не є критичним. Навіть у найгіршому випадку вони будуть забезпечувати достатній рівень захисту.

Таблиця 5

Значення параметрів фільтрів після перевірки у виробничих умовах

Показники групи фільтрів, які були на гірниках	Концентрація пилу, мг/м ³	Маса осілого пилу на фільтрі, г	Перепад тиску, після запилення, Па	Коефіцієнт проникнення, K, %
Машиніст комбайну	320±6,4	0,92±0,24	65±1,6	0,78±0,05
Помічник машиніста	175 ±5,1	0,52±0,31	52±1,3	3,85 ± 0,11
Гірник	53 ± 3,4	0,09±0,16	45±1,4	5,7±0,31

Висновки. У результаті проведених досліджень було встановлено наступне. Респіратори з поліпропіленовими фільтрами забезпечують достатньо ефективний захист працівників протягом робочої зміни (з коефіцієнтом проникнення, що не перевищує 6,0 % та перепадом тиску до 70 Па). Однак,

захисні властивості поліпропіленових фільтрів не є постійною величиною і залежать від умов експлуатації; так, в умовах підвищеної вологості і температури їх показники з часом погіршуються за рахунок зменшення величини поверхневого електростатичного заряду. Встановлено, що коефіцієнт проникнення запиленних фільтрів зі збільшенням вологості при фазі об'ємного фільтрування погіршується, тоді як при досягненні фази поверхневого накопичення пилового осаду покращується, за рахунок зменшення пористості поверхні фільтра. Доведено, що збільшення концентрації пилу в повітрі робочої зони за наявності вологості повітря і високої швидкості фільтрування на початковій фазі навпаки сприяє покращенню захисних показників, такий ефект зумовлений відсутністю фази об'ємного фільтрування. Показано, що розташування на фільтрувальній коробці попереднього фільтра із спеціального гідрофільного матеріалу з низькою щільністю упакування волокон, збільшує ресурс основного фільтра, за рахунок зменшення стікання поверхневого потенціалу і пилового навантаження.

Проведені дослідження вимагають подальшого уточнення залежності коефіцієнта проникнення від поверхневого електростатичного заряду.

Список літератури

1. Басманов П.И. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: Справ. рук-во / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейников, М.Е. Трубицына. – С.Пб.: ГИПП «Искусство России», 2002. – 399 с.
2. Kuzmin Yu.I., Pshchelko N.S., Sokolova I.M., Zakrzhevskiy V.I. The percolation behaviour of electret at presence of water condensation. In: Proc. of the 8th Int. Symp. on Electrets, Ed. by J. Lewiner, D. Morisseau, C. Alqui'e, ESPCI, IEEE. 1994, Paris, France. P. 124-129.
3. Romay, F.J. Experimental study of electrostatic capture mechanisms in commercial electret filters, *Aerosol Science and Technology*, Vol. 28 (1998) Nr 3, pp. 224-234.
4. Ackley, M.W., Degradation of electrostatic filters at elevated temperature and humidity, *Filtration and Separation*, Vol. 22 (1992) Nr 4, pp. 239-242.
5. Moyer, E. S. & Stevens, G. A., Worst Case aerosol testing parameters: II. Efficiency dependence of commercial respirator filters on humidity pretreatment. *American Industrial Hygiene Association Journal*, Vol. 50 (1989), pp. 265-270.
6. Chen C.C., M. Lehtimaki and K. Willeke: Aerosol penetration through filtering facepieces and cartridges. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 53: 566–574 (1992)
7. Schmidt, F.; Breidenbach, A.; Däuber, E.; Ergebnisse der RLT-Filterprüfung nach EN 779 im Vergleich zu Messungen an Filtern aus dem Betrieb; *Chem. Ing. Techn.*; 84, No. 6, 808-812 (2012)

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Колесником В.Є.
Надійшла до редакції 17.02.2015*