

tion mixture pre-treatment in the industry. The positive effect of pre-treatment by calcium-containing sludge and dispersing without further heating on the speed and dynamics of biogas discharge has been discovered. Its implementation allows reducing power consumption of industrial production process during the period from May to September.

**Keywords:** *anaerobic fermentation, biomineral mixture, dispersion, calcium-containing sludge*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.В. Зберовським. Дата надходження рукопису 02.04.13.*

УДК 614.89

**С.І. Чеберячко, канд. техн. наук, доц.**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: sihc@yandex.ru

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ДИХАННЮ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА НА ЦИКЛІЧНОМУ ПОТОЦІ ПОВІТРЯ

**S.I. Cheberiachko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor**

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sihc@yandex.ru

## THE STUDY OF THE FILTERING RESPIRATOR BREATHING RESISTANCE UNDER CYCLIC CURRENT OF AIR

**Мета.** Визначення теоретичної залежності для розрахунку перепаду тиску фільтрувальних одноразових протипилових респіраторів на пульсуючому потоці для встановлення основних параметрів, що впливають на ергономічні й захисні показники засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

**Методика.** До процесу дослідження ламінарного руху повітря в пористому середовищі використовувалися спрощені рівняння Нав'є-Стокса у формі Ейлера з урахуванням фіктивних масових сил опору Жуковського.

**Результати.** Розглянута теорія проходження циклічного ламінарного повітряного потоку через пористий матеріал на основі рівняння Нав'є-Стокса. Визначена залежність перепаду тиску на ЗІЗОД від циклічного руху повітря з урахуванням об'єму та частоти дихання людини, параметрів фільтру – коефіцієнта проникнення та пористості фільтрувального шару. Доведено, що зростання витрати повітря через півмаску призводить до нерівномірного повітряного навантаження на окремих її ділянках, що збільшує перепад тиску на респіраторі. Визначені основні параметри, якими можна зменшити опір диханню ЗІЗОД. Встановлена залежність між коефіцієнтом проникнення та пористістю фільтрувального шару, що дозволяє забезпечити максимальну захисну ефективність респіатора за рахунок рівномірного розподілу швидкості фільтрування за висотою одноразової півмаски при різній частоті дихання.

**Наукова новизна.** Досягнення рівномірного розподілу швидкості фільтрування за висотою одноразової фільтрувальної півмаски при збільшенні витрати повітря можливе за рахунок зменшення пористості фільтрувального шару при забезпеченні мінімального коефіцієнта проникнення респіатора.

**Практична значимість.** Визначені оптимальні показники пористості фільтрувального шару для забезпечення мінімального перепаду тиску для протипилового респіатора Лепесток.

**Ключеві слова:** *протипиловий респіратор, перепад тиску, опір диханню, частота дихання, глибина дихання, навантаження*

**Постановка проблеми.** Опір респіатора є важливою ергономічною характеристикою, від якої залежать додаткові затрати енергії організму людини при виконанні виробничих завдань. Для підтримки максимальної працездатності людини, яка користується протипиловим респіратором, на всьому проміжку робочої зміни, необхідно забезпечувати мінімальний додатковий опір диханню.

Величина опору повітряному потоку фільтрів залежить від режиму дихання та характеристик фільтрувального матеріалу: діаметру волокна, щільності упакування волокон, товщини фільтрувального шару.

На сьогодні відомі теоретичні залежності, що дозволяють визначити перепад тиску на протипилових респіаторах на постійному потоці повітря [1, 2]. Однак, процес дихання – це переміщення деякого об'єму повітря з атмосфери до легенів, а потім у зворотному напрямі. У першому наближенні можна вважати, що він здійснюється за законом гармонійних коливань. Ураховуючи те, що збільшення швидкості повітряного потоку може призвести до погіршення як ергономічних та і захисних властивостей засобів індивідуального захисту органів дихання, дослідження впливу на них циклічного потоку є актуальною задачею, вирішення якої дозволить покращити якість індивідуальних захисних засобів.

**Виділення невіршеної проблеми.** Публікацій з теоретичних досліджень опору повітряному потоку фільтрів є велика кількість, у той же час з оцінки опору дихання фільтрувальних засобів індивідуального захисту органів дихання – небагато. Основна причина – це складність вирішення нестационарної задачі руху повітря через фільтр респіратора. Важливим елементом якої є встановлення адекватної моделі пористого середовища для розрахунку поля течії поблизу волокон фільтрувального шару.

Для більшості пористих фільтрів характерний режим в'язкого руху повітря, коли виконується основний лінійний закон фільтрування Дарсі, при відсутності масових сил, можна записати основне векторне співвідношення (Шейдеггер А.Е.)

$$u = -\frac{k}{\mu} \text{grad}p,$$

де  $k$  – проникність пористого середовища;  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря;  $p$  – перепад тиску;  $u$  – швидкість руху повітря.

Із рівняння (1) можна отримати для компонентів швидкості за осями  $x, y, z$  основні формули

$$u = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad v = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial y}; \quad w = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}.$$

Вихідні дані закону Дарсі використовують для дослідження опору фільтрувальних елементів за двома різними напрямками. У першому випадку фільтр представляють як пористе тіло з системою взаємопов'язаних каналів. Для розрахунку опору досліджується рух повітря в цих каналах і визначення розмірів пор, для чого вводиться поняття гідравлічного радіусу.

У другому випадку модель фільтра являє собою систему із відокремлених волокон. Тоді загальний опір дорівнює сумі опорів усіх волокон в об'ємі фільтрувального елемента. Вирішення цієї задачі базується на рівняннях Нав'є-Стокса.

Рух повітря крізь фільтр респіратора можна представити за гармонійним законом, що повинно бути враховано при розрахунку перепаду тиску на засобах індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД). Однак, майже всі існуючі моделі з визначення опору повітряному потоку різних фільтрувальних середовищ базуються на стаціонарному режимі течії повітряного середовища. Це призводить до різниці між експериментальними й теоретичними даними, яку заміщують введенням різних поправкових коефіцієнтів. Тому виникає задача у визначенні зміни перепаду тиску на респіраторі при циклічному русі повітряного потоку.

**Аналіз останніх досліджень.** Найбільш відомим виразом для визначення перепаду тиску на фільтрах, отриманим за першим підходом, є класичне рівняння Козені-Кармана, що пов'язує проникність і пористість фільтрувального шару

$$p = \frac{22\mu\beta^2Hu}{d_g^2\varepsilon(1-\beta)^3},$$

де  $\mu$  – динамічна в'язкість повітря, мПа·с;  $\beta$  – щільність упакування волокон;  $H$  – товщина фільтрувального шару;  $d$  – діаметр волокон;  $\varepsilon$  – пористість фільтра.

$$k = \frac{r^2\varepsilon}{KT^2(1-\varepsilon)},$$

де  $r$  – еквівалентний радіус пор;  $T$  – кривизна каналів пор;  $K$  – константа.

Необхідно зауважити, що існує безліч інших формул, які виражають пористість з параметрами фільтрувального шару. Наприклад, рівняння Девіса, для волокнистих фільтрів, поверхнева щільність яких знаходиться в діапазоні від 5 до 20 г/м<sup>2</sup>.

$$p = \frac{16\mu\mu H}{d^2\varepsilon} \beta^{1.5} (1 + 56\beta^3).$$

Однак, усі підходи об'єднують вирішення рівняння при постійному русі повітря та невисоких швидкостях, коли можна знехтувати інерційними складовими, тоді як для респіраторів характерний циклічний потік.

У роботі [3] запропоновано теоретичну залежність зміни опору фільтрувальних елементів  $R$  у часі для пульсуючого потоку повітря

$$R = \frac{R_0}{\omega^2 + k^2} (\omega^2 \cos \omega t + k\omega \sin \omega t + k^2 e^{kt}),$$

де  $R_0$  – початкове значення опору чистого фільтрувального матеріалу, кг/(м/с<sup>2</sup>);  $t$  – час заповнення фільтра, с;  $k$  – коефіцієнт, що характеризує інтенсивність засмічення фільтруючого елемента, 1/с;  $\omega$  – частота пульсацій, 1/с.

Даний вираз добре співпадає з експериментальними даними при незначній витраті повітря, але він не дозволяє оцінювати вплив циклічного потоку при різкій зміні об'ємів дихання, наприклад під час збільшення навантаження.

**Формулювання мети роботи.** Метою роботи є визначення теоретичних залежностей для розрахунку перепаду тиску фільтрувальних одноразових протилохових респіраторів на пульсуючому потоці для встановлення основних параметрів, що впливають на ергономічні й захисні показники ЗІЗОД.

**Викладення основного матеріалу.** До процесу дослідження ламінарного руху газу в пористому середовищі використовують основні рівняння Нав'є-Стокса. Однак, навіть у простому випадку при обтіканні безлічі циліндричних волокон, пряме інтегрування цих рівнянь, навіть при нехтуванні інерційними силами, неможливе. Тому деякими дослідниками було запропоновано використовувати рівняння гідродинаміки у формі Ейлера з урахуванням фіктивних масових сил опору Жуковського. Рівняння Ейлера при нехтуванні проєкціями абсолютного прискорення мають вигляд

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = X - X_0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = Y - Y_0 \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = Z - Z_0 \end{cases} \quad (1)$$

де  $\rho$  – щільність повітря, м<sup>3</sup>/кг;  $X, Y, Z$  – компоненти масової сили, під дією яких газ рухається;  $X_0, Y_0, Z_0$  – фіктивні сили опору руху газу.

Відповідно до гіпотези Жуковського, що фіктивні сили залежать від швидкості фільтрування  $u$ , динамічної в'язкості  $\mu$ , проникності пористого середовища  $k$ , і щільності газу  $\rho$  [4]

$$X_0 = \frac{\mu v}{k\rho}; \quad Y_0 = \frac{\mu u}{k\rho}; \quad Z_0 = \frac{\mu \varpi}{k\rho}.$$

Тоді рівняння будуть мати вигляд

$$\begin{cases} \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = X - \frac{\mu v}{k\rho} \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = Y - \frac{\mu u}{k\rho} \\ \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = Z - \frac{\mu \varpi}{k\rho} \end{cases} \quad (2)$$

Ці рівняння разом з рівнянням нерозривності дозволяють повністю описати процес руху газу через пористе середовище

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial \varpi}{\partial z} + \varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

За умови, що відома функція  $\rho = f(\phi)$ , яка пов'язує щільність газу з тиском, рівняння (2) представимо у вигляді

$$\begin{cases} v = \frac{k\rho}{\mu(X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x})} \\ u = \frac{k\rho}{\mu(Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y})} \\ \varpi = \frac{k\rho}{\mu(Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z})} \end{cases} \quad (4)$$

Вносячи до рівняння (3) вирази (4), отримаємо загальне рівняння ламінарного руху повітряного потоку в пористому середовищі

$$\nabla^2 \left( \frac{k\rho}{\mu} p \right) = \varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla^2 \left( \frac{k\rho^2}{\mu} F \right), \quad (5)$$

де  $F$  – вектор результуючої сили, що діє на газ.

Ураховуючи, що під час дихання повітря переміщується тільки по осі  $Y, X = 0; Z = 0$ , то рівняння (5) запишемо у вигляді

$$\frac{k\rho}{\mu} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = \varepsilon \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{k\rho^2}{\mu} Y.$$

Ураховуючи, що  $\rho = \text{const}, \mu = \text{const}$ , отримуємо вираз

$$k \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} = m \frac{\partial p}{\partial t} + kY. \quad (6)$$

Процес дихання в першому наближенні можна описати гармонійним законом, тоді формула для визначення горизонтальної сили, що змушує переміщати повітря через респіратор, має вигляд

$$Y = 0,5R_0V_{\text{д}}\omega \sin \omega t \quad \text{або} \quad Y = 0,5R_0V_{\text{д}}\omega e^{i\omega t},$$

де  $R_0$  – початкове значення опору чистого фільтрувального матеріалу, (Н·с)/м<sup>5</sup>;  $V_{\text{д}}$  – об'єм повітря при вдиханні або видиханні, м<sup>3</sup>;  $\omega$  – частота пульсацій, 1/с.

Рівняння (6) буде мати вигляд

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{k}{\varepsilon} \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} - 0,5kR_0V_{\text{д}}\omega e^{i\omega t}.$$

Граничні умови

$$p(x, 0) = 0; \quad 0 < x < l;$$

$$p(0, t) = 0; \quad p(l, t) = At; \quad 0 < t < \infty.$$

Рішенням цього рівняння, відповідно до Г. Лемба, є

$$p(y, t) = \frac{i0,5kR_0V_{\text{д}}}{\omega} \left[ 1 - \frac{ch(1+i)\kappa(l-y)}{ch(1+i)\kappa l} \right] e^{i\omega t},$$

де  $\lambda = \sqrt{\frac{\omega k}{2\varepsilon}}$  – параметр, що залежить від коефіцієнта проникнення фільтрувального шару та його пористості.

Якщо відкинемо уявну частину, то отримаємо

$$p(y, t) = \frac{0,5kR_0V_{\text{д}}}{\omega} \sin \omega t + \frac{0,5kR_0V_{\text{д}}}{\omega} e^{-\kappa x} \sin(\omega t - \kappa y). \quad (7)$$

Результат розрахунків показує, що весь об'єм повітря, який коливаючись проходить через фільтр респіратора, можна представити як матеріальну точку, при цьому вплив в'язкості майже непомітний.

Швидкість фільтрування за висотою фільтра можна розрахувати за формулою

$$v(y, t) = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial p(y, t)}{\partial y} = \frac{\lambda^2 0,5kR_0V_{\text{д}}}{\mu \omega} e^{-\lambda y} \cos(\omega t - \lambda y).$$

**Результати.** В якості числового прикладу візьмемо респіратор „Лепесток“, розмір якого складає  $l = 200$  мм (координата  $y$ ). Виготовлений цей виріб із волокнистого фільтрувального матеріалу „Елефлен“, поверхнева щільність упакування волокон складає  $\beta = 45$  г/м<sup>2</sup>, середній діаметр волокон 2,5 мкм, товщина фільтрувального шару  $H = 0,005$  м. Пористість фільтрувального матеріалу, що виражає долю вільного від волокон об'єму, визначали за формулою [5]

$$\varepsilon = 1 - \frac{\beta}{H\rho_s}$$

де  $\rho_s$  – питома вага матеріалу, з якого виготовлений фільтрувальний шар, г/м<sup>3</sup>.

Витрату повітря через фільтрувальну півмаску визначали за формулою

$$Q = \pi V_d \sin \pi \omega t .$$

Початковий опір  $R_0$  повітряному потоку респіатора Лепесток, що відповідає витраті повітря 30 л/хв, складає 3620 (Н·с)/м<sup>5</sup>, а коефіцієнт проникнення за тест-аерозолем „вугільний пил“  $k = 0,05$ .

На рис. 1. наведена залежність перепаду тиску на респіраторі від часу дихання при різних витратах повітря  $Q$ , що відповідає легкій, помірній і важкій роботі. Зростання об'ємів повітря при вдиханні та видиханні призводить до збільшення амплітуди коливання перепаду тиску на респіраторі, що фіксується й при експериментальних дослідженнях.

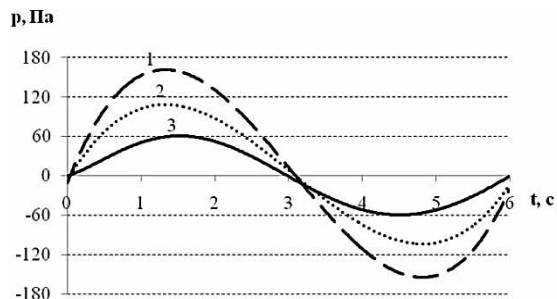


Рис. 1. Залежність перепаду тиску  $p$  на респіраторі від часу дихання  $t$  при витратах повітря  $Q$ : 1 – 90 л/хв; 2 – 60 л/хв; 3 – 30 л/хв

Аналіз формули (7) показав, що залежність перепаду тиску ЗІЗОД від витрати повітря, на відміну від відомого уявлення, є нелінійною (рис. 2), оскільки у другу складову цього виразу входить експонента, що відповідає за характер розподілу повітряного навантаження за висотою фільтрувальної півмаски та залежить від коефіцієнта проникнення та пористості матеріалу, з якого виготовлено фільтр. Зростання частоти дихання, відповідно, і витрати повітря, призводить до нерівномірного розподілу швидкості фільтрування на окремих ділянках півмаски (рис. 3), що збільшує нелінійність перепаду тиску півмаски в залежності від витрати повітря. На практиці таке явище дійсно має місце в одноразових протипилових респіаторах. При

вдиханні швидкість фільтрування на поверхні півмаски розподіляється нерівномірно. Тому деякі ділянки ЗІЗОД мають більшу кількість осілого пилу, ніж інші (рис. 4). Цей факт підтверджується експериментальними дослідженнями та даними з визначення ефективної площі фільтрів після запылення [6].

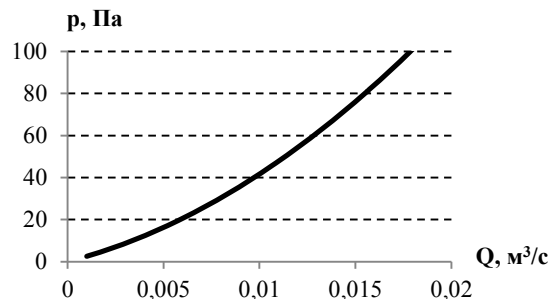


Рис. 2. Залежність перепаду тиску  $p$  на респіраторі від витрати повітря  $Q$

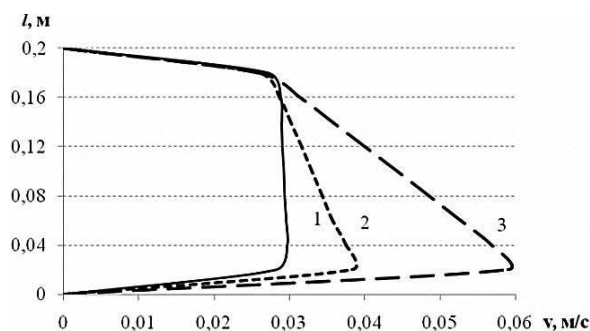


Рис. 3. Залежність швидкості фільтрування  $v$  за висотою півмаски  $l$  від витрати повітря  $Q$ : 1 – 90 л/хв; 2 – 60 л/хв; 3 – 30 л/хв



Рис. 4. Вигляд респіатора після запылення на циклічному потоці

Найбільший вплив на нерівномірність швидкості фільтрування на поверхні респіатора має параметр  $\lambda$  (рис. 5), що залежить від коефіцієнта проникнення фільтрувального матеріалу, частоти пульсацій та пористості фільтра. Для того, щоб компенсувати його збільшення за рахунок зростання частоти дихання, необхідно збільшувати пористість фільтра, або зменшувати його коефіцієнт проникнення (рис. 6).

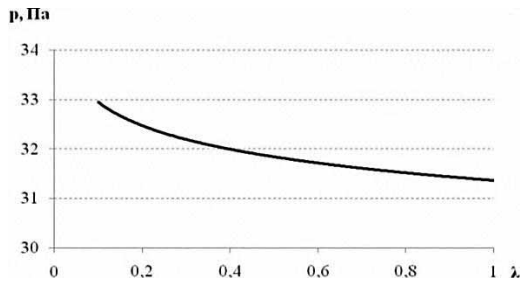


Рис. 5. Залежність перепаду тиску  $p$  від параметру  $\lambda$

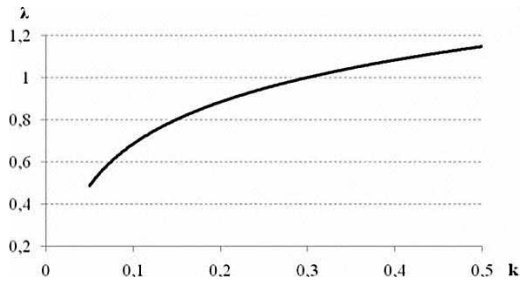


Рис. 6. Залежність параметру  $\lambda$  від коефіцієнта проникнення респіратору  $k$

Зменшити коефіцієнт проникнення респіраторів без погіршення захисних властивостей ЗІЗОД у цілому є складною задачею. Відомо, що на його величину впливають розміри діаметру волокон, щільності їх упакування та товщини фільтрувального шару, а також сумарний ефект від різних механізмів уловлювання аерозольних частинок. Тому єдиним параметром, яким можна варіювати – є пористість фільтра (рис. 7). Однак, її збільшення можливе за рахунок зменшення щільності упакування волокон, від якого залежить величина коефіцієнта проникнення (рис. 8). Тому існує певне оптимальне значення пористості фільтрувального шару, що забезпечить рівномірний розподіл перепаду тиску за висотою фільтра при мінімальному коефіцієнті проникнення респіратору. Необхідно зважити ці факти та ретельно підібрати параметри фільтрувального шару, щоб забезпечити рівномірне повітряне навантаження за висотою фільтра при максимальній захисній ефективності респіратору. Наприклад, для протипилового респіратору Лепесток, пористість фільтрувального шару повинна складати 0,4 – 0,5.

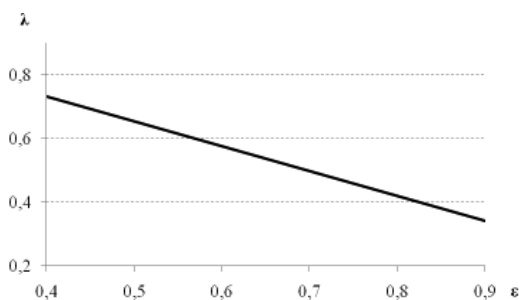


Рис. 7. Залежність параметру  $\lambda$  від пористості фільтра  $\epsilon$

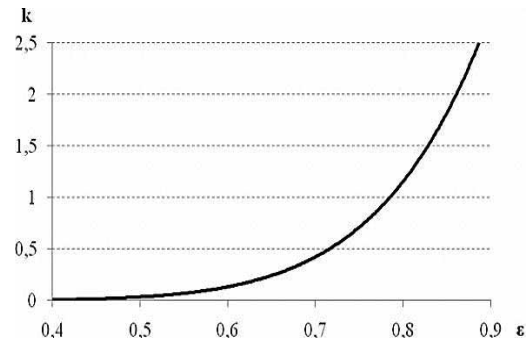


Рис. 8. Залежність коефіцієнта проникнення  $k$  респіратору від пористості фільтра  $\epsilon$

**Висновки.** Розглянута теорія проходження циклічного ламінарного повітряного потоку через пористий матеріал на основі рівняння Нав'є-Стокса. Визначена залежність перепаду тиску на ЗІЗОД від циклічного руху повітря з урахуванням об'єму та частоти дихання людини, параметрів фільтру – коефіцієнта проникнення та пористості фільтрувального шару. Доведено, що зростання витрати повітря через фільтрувальну півмаску призводить до нерівномірного розподілу швидкості фільтрування на окремих її ділянках, що збільшує перепад тиску на респіраторі. Визначені основні параметри, якими можна зменшити опір диханню, на прикладі респіратору Лепесток. Встановлена залежність між коефіцієнтом проникнення та пористістю фільтрувального шару, що дозволяє забезпечити максимальну захисну ефективність ЗІЗОД за рахунок рівномірного розподілу повітряного навантаження за висотою фільтрувальної півмаски при різній частоті дихання. Оптимальні показники пористості фільтрувального шару, для забезпечення мінімального перепаду тиску для протипилового респіратору Лепесток, знаходяться в діапазоні 0,4–0,5.

**Список літератури / References**

1. Средства индивидуальной защиты органов дыхания: справочное руководство / П.И. Басманов, С.Л. Каминский, А.В. Коробейников, М.Е. Трубицына – СПб.: ГИПП „Искусство России“, 2002. – 399 с.  
Basmanov, P.I., Kaminskiy, S.L., Korobeinikov, A.V. and Trubitsina, M.Ye. (2002), *Sredstva individualnoy zashchity organov dykhaniya: Spravochnoe rukovodstvo* [Respiratory Protective Devices: Manual], GIPP “Iskusstvo Rossii”, St. Petersburg, Russia.
2. Логачев Л.И. Аэродинамические основы аспирации: монография / Л.И. Логачев, К.И. Логачев – СПб: Химиздат. – 2005. – 659 с.  
Logachev, L.I. and Logachev, K.I. (2005), *Aerodinamicheskiye osnovy aspiratsii* [Aerodynamic Bases of Aspiration], monograph, Khimizdat, St. Petersburg, Russia.
3. Потапенко И.А. Гидродинамическое сопротивление фильтрующего элемента противопылевого респиратора / И.А. Потапенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – 2010. – № 47. – С. 133–141.

Potapenko, I.A. (2010), "Hydrodynamical resistance of the filtering element of dust respirator", *Gornospasatelnoye delo*, NIIGD, Donetsk, no. 47, pp. 133–141.

4. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Loytsyanskiy, L.G. (2003), *Mekhanika zhydkosti i gaza* [Fluid Mechanics], Drofa, Moscow, Russia.

5. Филатов Ю.Н. Электроформирование волокнистых материалов (ЭФВ-процесс) / Ю.Н. Филатов – М.: ГНЦ РФНИФХИ им. Л.Я. Карпова, 1997. – 297 с.

Filatov, Yu.N. (1997), *Elektroformirovaniye voloknistykh materialov* [Electric Formation of Fibrous Materials] L.Ya. Karpov GNTs RFNIFKhI, Moscow, Russia.

6. Голинько В.И. Оценка влияния конструкции полумаски одноразовых респираторов на их основные показатели / В.И. Голинько, С.И. Чеберячко, В.В. Плахотник // Науковий вісник НГУ. – 2008. – № 7. – С. 69–73.

Golinko, V.I., Cheberiachko, S.I. and Plakhotnik, V.V. (2008), "Estimation of the influence of the half-mask disposable respirator design on its main characteristics", *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, no. 7, pp. 69–73.

**Цель.** Определение теоретической зависимости для расчета перепада давления фильтрующих одноразовых противопылевых респираторов на циклическом потоке воздуха для установления основных параметров, влияющих на эргономические и защитные показатели средств индивидуальной защиты органов дыхания (СИЗОД).

**Методика.** К процессу исследования ламинарного движения воздуха в пористой среде использовались упрощенные уравнения Навье-Стокса в форме Эйлера с учетом фиктивных массовых сил сопротивления Жуковского.

**Результаты.** Рассмотрена теория прохождения циклического ламинарного воздушного потока через пористый материал на основании уравнений Навье-Стокса. Определена зависимость перепада давления на СИЗОД от циклического потока воздуха с учетом объема и частоты дыхания человека, параметров фильтрующего слоя – коэффициента проникания и пористости фильтрующего слоя. Доказано, что рост расхода воздуха через полумаску приводит к неравномерной воздушной нагрузке на отдельных ее участках, что увеличивает перепад давления на респираторе. Определены основные параметры, которые уменьшают сопротивление дыханию СИЗОД. Получена зависимость коэффициента проникания от пористости фильтрующего слоя, с помощью которой можно обеспечить максимальную защитную эффективность респиратора за счет равномерного распределения скорости фильтрации по высоте одноразовой полумаски при разной частоте дыхания.

**Научная новизна.** Достижение равномерного распределения скорости фильтрации по высоте одноразовой фильтрующей полумаски, при увеличении расхода воздуха, возможно за счет уменьшения пористости фильтрующего слоя при обеспечении минимального коэффициента проникания респиратора.

**Практическая значимость.** Определены оптимальные значения пористости фильтрующего слоя для обеспечения минимального перепада давления для противопылевого респиратора Лепесток.

**Ключу слова:** противопылевой респиратор, перепад давления, сопротивление дыханию, частота дыхания, глубина дыхания, нагрузка

**Purpose.** Determination of the theoretical dependence for the calculation of the pressure drop in disposable dust respirators under the cyclic flow of air with the aim of establishing the basic parameters affecting the ergonomics and protective characteristics of personal respiratory equipment.

**Methodology.** To study the process of laminar air flow in porous media we have used the simplified Navier-Stokes equations in the form of Euler with the fictitious mass forces of the Zhukovsky resistance.

**Findings.** We have considered the theory of the cyclical passage of the laminar air flow through the porous material on the basis of the Navier-Stokes equations. We have determined the dependence of the pressure drop in personal respiratory equipment on the cyclical flow of air taking into account the volume and frequency of person's breathing, and the filter layer parameters, the coefficient of penetration and porosity of the filter layer. We have proved that the growth of air consumption through the respirator leads to uneven air pressure on its parts. This increases the pressure drop of respirator. We have determined the main parameters reducing the breathing resistance of personal respiratory equipment. We have obtained the dependence of the penetration rate on the porosity of filter layer. It can be used to maximize the effectiveness of protection respirator due to uniform distribution of the filtration rate on the height of the disposable half-mask respirator with different frequency of breathing.

**Originality.** The achievement of the uniform distribution of the filtration rate on height of the disposable filter half-mask while increase of air consumption is possible by the way of reducing the porosity of the filter layer, while ensuring the minimum rate of penetration of the respirator.

**Practical value.** We have determined the optimal values of porosity of the filter layer to ensure minimum pressure drop for dust mask Lepestok.

**Keywords:** dust mask, differential pressure, breathing resistance, respiratory rate, depth of breathing, load

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Голіньком. Дата надходження рукопису 12.03.13.*