

ры ругистрации акустического сигнала и програмно-вычислительного комплекса. Прогноз «опасно по внезапным выдавливаниям» выдавался, если текущее значение показателя было равно или превышало его критическую величину, установленную на стадии разведочных наблюдений не менее чем в 30 циклах подвигания забоя в неопасной по выдавливаниям зоне при отсутствии этих явлений и их предупредительных признаков.

4. При переходе полости выброса произошедшего в подготовительной выработке, после извлечения разрушенного угля и крепления части полости в пределах контура проведенной выработки, мероприятиями предусмотрено выполнение закладки (забутовки) и изоляции частей полости, оставшихся в боках выработки. Дальнейшее проведение выработки при отходе от полости на расстояние не менее 20 м осуществляется после выполнения мероприятий по предотвращению ГДЯ с контролем эффективности или буровзрывным способом в режиме сотрясательного взрыва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Руководство по применению способа контроля бурения и оценки эффективности опережающих скважин по параметрам акустического сигнала в условиях АП «Шахта им. А.Ф. Засядько / В.П. Коптиков, Б.В. Бокий, Г.И. Колчин [и др.] – Макеевка: МакНИИ, 2005. – 9 с.

2. СОУ 10.1.00174088.011-2005 Правила ведения горных работ на пластах, склонных к газодинамическим явлениям / В.П. Коптиков, Б.В. Бокий, И.В. Бабенко [и др.] – К., 2005. – 225 с.

УДК 536.2

Канд. техн. наук В.В. Біляєва

(Дніпропетровський національний університет)

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО ЗАБРУДНЕННЯ ПОВІТРЯ У ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

Предложена численная модель для экспресс-прогноза теплового загрязнения воздуха в рабочих помещениях. Модель основана на интегрировании двумерного уравнения энергии и уравнения для потенциала скорости. Для численного интегрирования используется неявная разностная схема расщепления и метод А. Самарского. Представлены результаты численного эксперимента.

NUMERICAL SIMULATION OF THE HEAT POLLUTION OF THE AIR IN THE INDUSTRIAL ROOMS

A numerical model to simulate the heat pollution of the air in the industrial rooms was developed. The model is based on the integration of the 2D equation of the energy conservation and equation for the velocity potential. The implicit difference schemes are used for numerical integration of the model equations. The results of numerical experiments are presented.

Вступ. Аварії у виробничих приміщеннях супроводжуються викидом нагрітих газів. Наслідком таких аварій можуть бути вибухи, утворення вогнених куль (струменів), що приводять до термічної поразки людей, руйнування устаткування, комунікацій. Одним з важливих завдань є прогнозування процесу поширення нагрітих газів у виробничих приміщеннях після аварії з метою оцінки масштабів можливих наслідків аварій. Інженерні методики, що викори-

стовуються на практиці для прогнозу рівня теплового забруднення повітряного середовища у виробничих приміщеннях, ґрунтуються, як правило, на аналітичному розв'язку одновимірного рівняння перенесення домішки або на вживанні балансового співвідношення для приміщення (нульмірна модель). Сфера застосування таких методик дуже обмежена, оскільки вони не дозволяють врахувати місце аварійного витoku в приміщенні, вплив положення припливно-витяжних отворів вентиляції, наявність устаткування на процес поширення зони теплового забруднення в приміщенні.

В зв'язку з цим особливої актуальності набуває розробка теоретичних методів прогнозування теплового забруднення у виробничих приміщеннях, що дозволяють врахувати ті істотні чинники, що впливають на даний процес. Вживання таких методів на практиці дозволить істотно підвищити якість прогнозів і може служити науковим обґрунтуванням для ухвалення інженерних рішень, направлених на мінімізацію збитку і наслідків аварій у виробничих приміщеннях хімічно небезпечних об'єктів. Метою даної роботи є створення чисельної моделі теплового забруднення повітря у робочих приміщеннях при викидах нагрітого газу.

Математична модель теплового забруднення виробничого приміщення.

Нехай у приміщенні стався викид нагрітого газу на протязі декількох секунд. Подача повітря в приміщення здійснюється через отвір, розташований на лівій стінці приміщення, а виток повітря з кімнати розташовується на правій стінці приміщення. Завданням є дослідження динаміки формування зони теплового забруднення в приміщенні.

Для розрахунку необхідно побудувати математичну модель процесу.

Якщо розглядається задача тепломасопереносу у виробничому приміщенні, то її розв'язок розбивається на два етапи:

1. Розрахунок гідродинаміки течії (тобто розрахунок поля швидкості повітря у приміщенні при роботі вентиляції).
2. Розрахунок процесу тепломасопереносу (визначення поля температур у виробничому приміщенні).

Для розрахунку поля температур у приміщенні будемо використовувати наступне рівняння [2, 3]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N q_i(t) \delta(r - r_i), \quad (1)$$

де T – температура, K ; t – час, c ; u, v – компоненти вектора швидкості повітря в приміщенні, m/c ; q_i – інтенсивність точкового джерела викиду теплового забруднення, Bm ; μ_x, μ_y – коефіцієнти температуропровідності, m^2/c ; $r_i = (x_i, y_i)$, x_i, y_i – координати джерела викиду нагрітого газу, m .

Розв'язок цього рівняння будемо визначати в області, що має форму прямокутника: $R = \{0 \leq x \leq X, 0 \leq y \leq Y\}$.

На бічних сторонах паралелепіпеду R для моментів часу $t > 0$ ставляться такі граничні умови. На частині границі Γ , де повітря втікає в розрахункову область, вва-

жаємо, що температура відома, тому:

$$T|_{\Gamma} = T_0, \text{ на частині границі } \Gamma, \text{ де } \vec{V} \cdot \vec{n} < 0.$$

На межі, де повітря виходить з розрахункової області R , гранична умова має вигляд [2, 3]:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \text{ на частині границі } \Gamma, \text{ де } \vec{V} \cdot \vec{n} \geq 0,$$

де $\vec{n}$ - одиничний вектор зовнішньої нормалі до границі Γ ;

$\vec{V}$ - вектор швидкості повітряного потоку.

На площині $y = 0$ (підлога) ставиться умова:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{y=0} = 0.$$

На верхній межі (стеля приміщення) $y = Y$ гранична умова має вигляд:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{y=Y} = 0.$$

Початкову умову для рівняння (1) поставимо у вигляді: при $t = 0$, $T = T_0$ в Ω , де T_0 – відоме значення температури у приміщенні, K .

Для моделювання теплового забруднення виробничого приміщення необхідно знати швидкість повітря у виробничому приміщенні при роботі вентиляції. Але потрібно відзначити, що швидкість повітряного потоку змінюється в різних зонах приміщення, тому що на нього впливає обладнання, що розташовується у приміщенні, а також положення отворів вентиляції та повітрообмін. Для розв'язку цієї задачі будемо використовувати модель потенційної течії. Тому для розв'язку потрібно проінтегрувати наступне рівняння для потенціалу швидкості P :

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Компоненти швидкості повітря розраховуються наступним чином:

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}. \quad (3)$$

Граничні умови для рівняння Лапласа мають вигляд:

- на твердих поверхнях: $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$, де n – одиничний вектор зовнішньої нормалі до твердої стінки;
- на границі входу повітря у приміщення $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$, де V_n – відоме значення швидкості потоку, м/с;
- на вихідній границі: $P = P_0 + \text{const}$ (умова Дирихле).

Чисельне інтегрування рівнянь моделі. Для чисельного інтегрування рівняння для потенціалу швидкості використовується поперемінно-трикутний метод А. А. Самарського [4]. Для використання цього методу, рівняння для потенціалу швидкості записується в «еволюційному» вигляді [1], а далі, апроксимується наступними залежностями:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1/2} - P_{i,j}^n}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^n - P_{i,j}^n}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^n - P_{i,j}^n}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}, \quad (4)$$

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1/2}}{0,5\Delta\eta} = \frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i-1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} + \frac{-P_{i,j}^{n+1/2} + P_{i,j-1}^{n+1/2}}{\Delta y^2}. \quad (5)$$

Як видно з даних виразів, чисельний розв'язок двовимірного рівняння для визначення потенціалу здійснюється в два кроки. На першому кроці із співвідношення (4) знаходиться «проміжне» значення потенціалу $P_{i,j}^{n+1/2}$ на часовому шарі « $n+1/2$ », а на другому кроці – із співвідношення (5) визначається «остаточне» значення потенціалу $P_{i,j}^{n+1}$ на часовому шарі « $n+1$ ». Невідоме значення $P_{i,j}$ на кожному кроці здійснюється по методу рахунку, що біжить.

Компоненти вектора швидкості розраховуються по співвідношеннях:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x},$$

$$v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

Компоненти вектора швидкості розраховуються на гранях різницевих вічок (контрольних об'ємів), що дозволяє побудувати консервативну різницеву схему.

Чисельне інтегрування двовимірного рівняння перенесення температури у

виробничому приміщенні виконується на базі чотирьохшагової неявної схеми розщеплення [1]. Основні риси цієї схеми розглянуто нижче.

Похідну за часом апроксимуємо розділеною різницею «назад»:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t}.$$

Конвективні похідні запишемо у вигляді [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u T}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ T}{\partial x} + \frac{\partial u^- T}{\partial x}, \\ \frac{\partial v T}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ T}{\partial y} + \frac{\partial v^- T}{\partial y},\end{aligned}$$

$$\text{де } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, \quad u^- = \frac{u - |u|}{2}, \quad v^+ = \frac{v + |v|}{2}, \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Апроксимуємо конвективні похідні розділеними різницями «проти потоку» на верхньому часовому шарі таким чином [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u^+ T}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^+ T_{ij}^{n+1} - u_{ij}^+ T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ T^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- T}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j}^- T_{i+1,j}^{n+1} - u_{ij}^- T_{ij}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- T^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ T}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^+ T_{ij}^{n+1} - v_{ij}^+ T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ T^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- T}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1}^- T_{i,j+1}^{n+1} - v_{ij}^- T_{ij}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- T^{n+1},\end{aligned}$$

де $L_x^+, L_x^-, L_y^+, L_y^-$ – позначення різницевих операторів при апроксимації конвективних похідних.

Другі похідні апроксимуємо наступними виразами [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x}(\mu_x \frac{\partial T}{\partial x}) &\approx \mu_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{\Delta x^2} - \mu_x \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y}(\mu_y \frac{\partial T}{\partial y}) &\approx \mu_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{ij}^{n+1}}{\Delta y^2} - \mu_y \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1},\end{aligned}$$

де $M_{xx}^+, M_{xx}^-, M_{yy}^+, M_{yy}^-$ – позначення різницевих операторів при апроксимації других похідних. З врахуванням приведених вище позначень різницевих операторів запишемо різницевий аналог рівняння:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ij}^{n+1} - T_{ij}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^{n+1} + L_x^- T^{n+1} + L_y^+ T^{n+1} + L_y^- T^{n+1} + \sigma T_{ij}^{n+1} = \\ & = (M_{xx}^+ T^{n+1} + M_{xx}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1} + M_{yy}^- T^{n+1}) + q_{ij} \delta_{ij} \end{aligned}$$

Символ δ_{ij} позначає число "1" або "0", залежно від того, знаходиться чи ні в різницевій комірці "ij" джерело теплового забруднення. Величина q_{ij} дорівнює інтенсивності викиду q_k відповідного k -го джерела, що знаходиться в різницевій комірці "ij":

$$q_{ij} = q_k / \Delta x / \Delta y.$$

Розщепимо різницеве рівняння на чотири рівняння так, щоб на кожному кроці враховувався лише один напрям перенесення температури, обумовлений знаком при конвективних похідних. При апроксимації других похідних використовуватимемо два часових шару з метою здобуття на верхньому часовому шарі трикутного шаблону. Це дозволить здійснити вирішення кожного різницевого рівняння по методу рахунку, що біжить. В цьому випадку різницеві рівняння мають вигляд:

- на першому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^n}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ T^k + L_y^+ T^k) = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^+ T^k + M_{xx}^- T^k + M_{yy}^+ T^n + M_{yy}^- T^n) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

- на другому кроці розщеплення $k = n + \frac{1}{2}$; $c = n + \frac{1}{4}$:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- T^k + L_y^- T^k) = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- T^k + M_{xx}^+ T^c + M_{yy}^- T^k + M_{yy}^+ T^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

- на третьому кроці розщеплення $k = n + \frac{3}{4}$; $c = n + \frac{1}{2}$:

$$\begin{aligned} & \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^+ T^k + L_y^- T^k) = \\ & = \frac{1}{4}(M_{xx}^- T^c + M_{xx}^+ T^k + M_{yy}^- T^k + M_{yy}^+ T^c) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l; \end{aligned}$$

- на четвертому кроці розщеплення $k = n + 1$; $c = n + \frac{3}{4}$:

$$\begin{aligned} \frac{T_{ij}^k - T_{ij}^c}{\Delta t} + \frac{1}{2}(L_x^- T^k + L_y^+ T^k) = \\ = \frac{1}{4}(M_{xx}^- T^k + M_{xx}^+ T^c + M_{yy}^- T^c + M_{yy}^+ T^k) + \sum_{l=1}^N \frac{\bar{q}_l}{4} \delta_l. \end{aligned}$$

З даних виразів можна отримати явні формули для визначення невідомого значення температури на кожному кроці розщеплення.

Результати моделювання. Розглядається наступний сценарій. У приміщенні стався викид нагрітого газу біля обладнання. Температура газу в зоні забруднення $T=373\text{ K}$. Розміри приміщення: довжина – 11 м, висота – 5,7 м. Швидкість вхідного потоку у приміщення 0,5 м/с, коефіцієнти температуро-провідності дорівнюють $0.7\text{ м}^2/\text{с}$ у кожному напрямку. Викид нагрітого газу відбувається на протязі 30 сек.

Результати моделювання наведені на рис 1, 2. На рисунках показано формування зони теплового забруднення у приміщенні для двох моментів часу після аварійного викиду газу. Бачимо, що зона теплового забруднення «захоплює» обладнання, що розташовано у приміщенні та витягується у напрямку виходу повітряного потоку з приміщення (тобто в напрямку вихідного отвору вентиляції).

Таким чином, за допомогою розробленого методу з'являється можливість визначити вплив параметрів провітрювання на динаміку формування зони теплового забруднення у приміщенні. На базі цієї інформації можна прогнозувати ризик вторинної аварії, що може відбутися у приміщенні, якщо в тій або іншій зоні приміщення з'являться зони підвищеної температури.

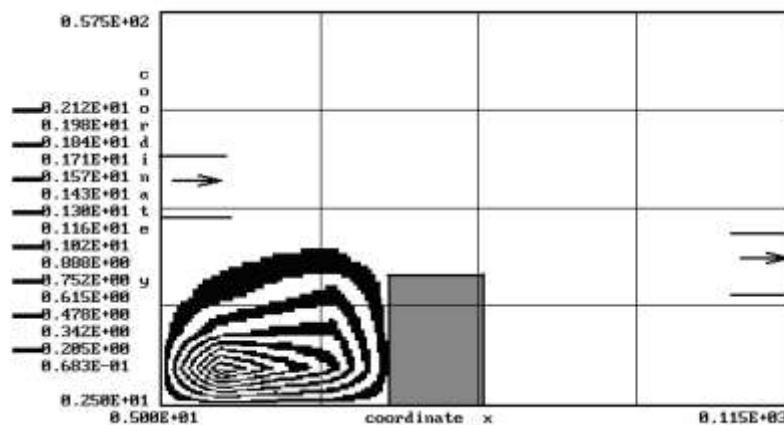


Рис. 1 – Зона теплового забруднення для моменту часу $t=5\text{с}$

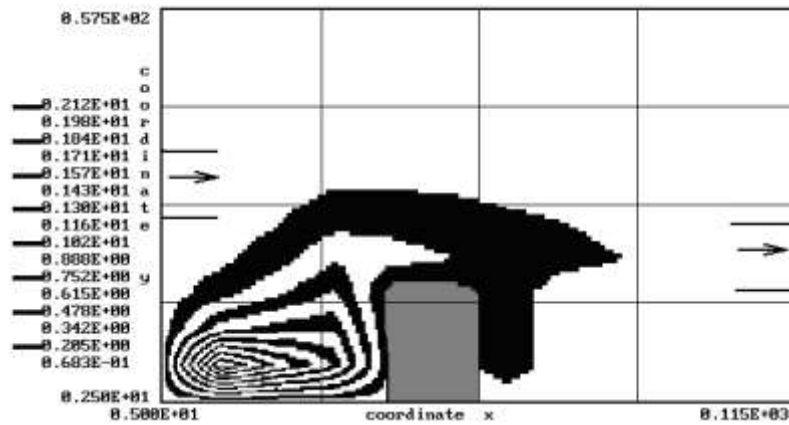


Рис. 2 – Зона теплового забруднення для моменту часу $t=25\text{с}$

Розрахунок даної задачі на ПК за допомогою розробленої чисельної моделі методу вимагає 15 секунд, що дозволяє оперативно прогнозувати тепловий режим у робочих приміщеннях при аварійних ситуаціях.

Висновки. Побудована чисельна модель теплового забруднення повітряного середовища в виробничому приміщенні. На основі розробленої чисельної моделі виконано розрахунок теплового забруднення повітряного середовища в робочому приміщенні при аварійній ситуації, що супроводжується викидом нагрітого газу. Подальший розвиток моделі необхідно вести у напрямку розробки її 3D варіанта.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Антошкина Л.И. Математическое моделирование загрязнения воздушной среды в производственных помещениях химически опасных объектов/ Л.И. Антошкина, Н.Н. Беляев, В.В. Никульникова. - Белгород: Роснауучкнига, 2007.- 168с.
2. Крейт Ф. Основы теплопередачи. / Крейт Ф., Блэк У. - М.: Мир, 1983. -512 с.
3. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Г.И. Марчук – М.: Наука, 1982. - 320 с.
4. Самарский А. А. Теория разностных схем / А.А. Самарский - М.: Наука, 1983. –616 с.

**РОЗРОБКА УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИПРОБУВАНЬ ПРОТИПИЛОВИХ
ЗАСОБІВ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАХИСТУ ОРГАНІВ ДИХАННЯ У
ВІДПОВІДНОСТІ ДО ГАРМОНІЗОВАНИХ СТАНДАРТІВ**

В работе исследовано влияние дисперсного состава угольной пыли на процесс запыления фильтрующих элементов. Проанализированы существующие модели установок по запылению фильтров и разработана новая конструкция, которая отвечает требованиям гармонизированных европейских стандартов ДСТУ EN. Проведен анализ работы стенда с разными режимами запыления, результатом чего стало определение массы пыли на фильтрующем элементе. Предложена методика по определению пылеемкости и сопротивления фильтров.

**DEVELOPMENT OF PLANTS FOR TESTING AGAINST DUST
PERSONAL PROTECTION RESPIRATORY ACCORDING TO
HARMONIZED STANDARDS**

The influence of the coal dust disperse consistency to the dusting of the filtering elements is researched. Analyzed the existing equipment models for dusting of the filters and designed the new model that meet to requirements of the harmonized European standards DSTU EN. The stand with different dusting conditions is analyzed and result of it is determination of the dust mass on the filtering element. Proposed the method for determination of the dust holding capacity and breath resistance.

На усіх підприємствах, де в процесі роботи подрібнюються матеріали існує загроза з виникнення перевищення ГДК пилу різного типу. Дана загроза стосується як гірничорудних підприємств, так і будівельних майданчиків, харчових виробництв. Проте використання засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД) значно зменшує ризик виникнення професійних легеневих захворювань, які можуть негативно сказатись на здоров'ї працівника та його нащадках.

Багато властивостей пилу, в тому числі її патологічний вплив, визначаються дисперсним складом пилу. Відповідно до класифікації [5], пил – це аерозольна система з розмірами частинок від 1 до 100 мкм. Слід зазначити, що частки малих розмірів (менше 2 мкм.) складають незначну частину в загальній масі пилу, більша частина яких видихається і не загрожує захворюваннями [1]. Це ж стосується і частинок великих розмірів (більше 60...70 мкм), їх роль у розвитку професійних захворювань теж істотно зменшується через інтенсивне затримання цієї фракції в носоглотці. Ці фракції пилу мають високу швидкість осідання в повітрі, і в значній кількості присутні лише безпосередньо біля джерел пилоутворення. Тому, дисперсний склад промислового пилу, тобто розмір частинок, можна вважати таким, що змінюється в діапазоні від 2 до 60 мкм. Саме цей діапазон слід брати до уваги при випробуваннях засобів індивідуального захисту органів дихання робітників (ЗІЗОД), призначених, зокрема, для гірничорудних підприємств і вугільних шахт, будівництва [2].

Виходячи з вище сказаного, логічно досліджувати якість протипилових респіраторів за пиловим аерозолем. Крім того, такі випробування ЗІЗОД є обов'язковими за гармонізованими стандартами ДСТУ EN 143:2002 та ДСТУ