

**МОДЕЛЮВАННЯ ПОЧАТКОВОГО  
РОЗПОДІЛУ ІНТЕНСИВНОСТІ  
ЗОНДУВАЛЬНОГО ПУЧКА НА  
РОБОЧІЙ ПОВЕРХНІ  
НАПІВЦИЛІНДРИЧНОГО  
ОПТИЧНОГО СЕНСОРА  
ДИСПЕРСНОГО СКЛАДУ  
ОСАДІВ ПИЛУ**

*П.М.Сопрунюк, І.Б.Івасів,  
О.М.Семенюк*

Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка  
НАН України  
м. Львів, вул. Наукова, 5  
E-mail: dep26@ah.ipm.lviv.ua

*Пропонується новий оптичний рефлектометричний сенсор дисперсного складу осадів пилу, в якому зондування здійснюється крізь товсту прозору підкладку напівциліндричної форми. Розраховуються кути падіння та початкові інтенсивності зондувальних променів для заданих координат точки на напівциліндричній робочій поверхні та заданої діаграми напрямленості джерела променів.*

**Вступ.** Одним з поширених видів забруднень довкілля у промислових зонах є осадилу. Ці осадилу можуть наносити значну шкоду, посилюючи ерозію ландшафту та будівель, зменшуючи активну поверхню рослинного покриву. Але особливо небезпечними пилові осадилу є на підприємствах хімічної, харчової, вугільної промисловості, оскільки можуть спричинювати потужні вибухи. Тому експрес контроль або й неперервний контроль характеристик пилових осадів є актуальною задачею.

Основною характеристикою пилових осадів в усіх прикладних задачах є поверхнева концентрація запилення. Однак, для більш точної оцінки впливу на довкілля чи загрози вибуху [1] необхідно визначати їх дисперсний склад.

У випадках, коли процеси пиловідкладення характеризуються значною часовою динамікою, або коли необхідно здійснювати контроль важкодоступних місцях (наприклад, трубопроводах та вентиляційних каналах), доцільно застосовувати апаратуру для неперервного контролю характеристик пиловідкладення. Одними з найбільш придатних для створення такої апаратури є оптичні

методи, зокрема ті, що базуються на вимірюванні характеристик дифузного відбивання зондувальних променів, які потрапляють на шар пилу крізь прозору підкладку [2] (рис. 1). Ці методи відзначаються широким вибором характеристик (спектральні, кутові, поляризаційні) дифузно відбитих променів.

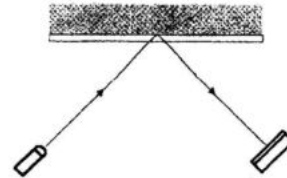


Рис. 1. Схема вимірювання дифузного відбивання променів осадом пилу крізь тонку прозору підкладку.

**Моделі характеристик дифузного відбивання для напівциліндричного сенсора.** В працях [2,3] запропоновано новий оптичний сенсор, в якому зондувальні промені, виходячи з квазіточкового джерела, потрапляють на шар пилу крізь товсту напівциліндричну підкладку (рис.2). Оскільки джерело променів розміщувалось на осі підкладки, всі зондувальні промені, відбиті від незапиленої робочої (циліндричної) поверхні, фокусувались на відрізку осі сенсора. За наявності пилу (а отже, і розсіювання світла на поверхні) промені відхилялись від цього відрізка. Така оптична конфігурація дозволила збільшити площу освітленої ділянки робочої поверхні та уникнути втрат частини світлової енергії, пов'язаних з обмеженою площею приймача світла.

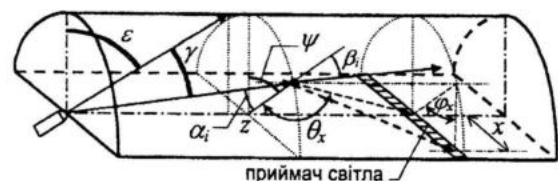


Рис. 2. Напівциліндричний сенсор та геометрія променів у підкладці.

Оцінка дисперсного складу здійснюється або за даними вимірювання спектральної характеристики дифузно-розсіяних променів [2,3], або за допомогою кутової характеристики дифузного відбивання [4].

І в першому, і в другому випадку вимірювана характеристика є складним функціоналом від координат та характеристик розсіювання елементарної площі на робочій

поверхні, координат на реєструвальній (плоскій) поверхні, які відповідають приймачеві світла. Так, для схеми з вимірюванням спектральної характеристики сумарна інтенсивність усіх дифузно відбитих променів виражається функціоналом [3]:

$$I(\lambda) = \int_{R_r} \int_{R_a} i_0[\lambda, \gamma(\mathbf{r}_a, \varepsilon)] f(\mathbf{r}_a, \varepsilon) \times K[n(d), \lambda, \alpha_i(\mathbf{r}_a), \varphi_x(\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_r), \theta_x(\mathbf{r}_a, \mathbf{r}_r)] d\mathbf{r}_r d\mathbf{r}_a \quad (1)$$

де  $i_0(\lambda, \gamma)$  – характеристика джерела променів,  $\lambda$  – довжина хвилі,  $\gamma$  – просторовий параметр (кут у діаграмі направленості),  $\mathbf{r}_a \in R_a$  – координати точки на активній поверхні сенсора,  $\varepsilon$  – кут нахилу осі зондувального пучка (осі діаграми направленості),  $f(\mathbf{r}_a, \varepsilon)$  – “апаратна” функція, що визначається геометрією променів у сенсорі,  $K[\dots]$  – функціонал, що виражає залежність відношення інтенсивностей  $i_x(\varphi_x, \theta_x)/i_i(\varphi_i, \alpha_i)$  дифузно відбитих та зондувальних променів для заданої елементарної ділянки активної поверхні та заданих координат  $\mathbf{r}_r = (x, y) \in R_r$  точки на приймачеві променів, яким відповідає пара кутів дифузного відбивання  $\varphi_x, \theta_x$  (у площині, перпендикулярній до осі сенсора, та в площині, що проходить через вісь сенсора та задану точку на активній поверхні), від густини розподілу  $n(d)$  лічильної концентрації частинок пилу за їх розмірами ( $d$  – діаметр частинки) та довжини хвилі (див. рис.2). При цьому робиться припущення, що  $n(d)$  та  $K[\dots]$  інваріантні відносно координат  $\mathbf{r}_a$ . Очевидно також, що кожній точці активної поверхні відповідає пара кутів падіння  $\varphi_i = 0, \alpha_i$ .

Для схеми з вимірюванням кутової характеристики маємо функціонал, що зв’язує розподіл інтенсивності вздовж фотолінійки, розміщеної на реєструвальній поверхні перпендикулярно до осі підкладки, з кутом  $\varphi_x$  (див. рис.2):

$$I(x) = \int_0^{\varphi_{xm}} i(\varphi_x) W(x, \varphi_x) \frac{\cos^3(\varphi_x - \psi(x, \varphi_x))}{R \cdot \cos^2 \psi(x, \varphi_x)} \times \left( \frac{\cos \varphi_x}{\sqrt{(x^2/R^2) - \sin^2 \varphi_x}} + 1 \right) d\varphi_x \quad (2)$$

де

$$i(\varphi_x) = i(\varphi_x, \mathbf{r}_a, \varepsilon) = i_0[\lambda_0, \gamma(\mathbf{r}_a, \varepsilon)] f(\mathbf{r}_a, \varepsilon) \cdot d\sigma(\varphi_x) \quad (3)$$

– азимутальна кутова залежність дифузного відбивання елементарною ділянкою пилового осаду,  $d\sigma(\varphi_x)$  – диференціальний переріз розсіювання в напрямку кута  $\varphi_x$ ,

$$W(x, \varphi_x) = \begin{cases} 0, & \varphi_x < \varphi_{x1}(x, \psi_m), \\ 1, & \varphi_{x1}(x, \psi_m) \leq \varphi_x \leq \varphi_{x0}(x, 0), \\ 0, & \varphi_x > \varphi_{x0}(x, 0), \end{cases} \quad (4)$$

$$\varphi_{x1}(x, \psi_m) = -\psi_m + \arctg \frac{x/R + \sin \psi_m}{\cos \psi_m}, \quad (5)$$

$$\varphi_{x0}(x, \psi = 0) = \arctg(x/R), \quad (6)$$

$$\psi(x, \varphi_x) = -\frac{\pi}{2} + \varphi_x + \arcsin \frac{R \sin \varphi_x}{x}, \quad (7)$$

$\varphi_{xm}$  – максимальне значення кута  $\varphi_x$ ,  $\psi_m$  – гранично допустиме значення полярного кута,  $R$  – радіус кривизни робочої поверхні сенсора.

В обидвох випадках у вирази для оцінки дисперсного складу входить функціонал, який виражає співвідношення інтенсивностей падаючого променя та променя, розсіяного елементарною ділянкою запиленої робочої поверхні в заданому напрямку, тобто диференціальний переріз розсіювання. Для знаходження явного вигляду цього функціоналу необхідно записати вираз для диференціального перерізу розсіювання елементарного об’єму щільно упакованого полідисперсного середовища, а також співвідношення між системою координат, зв’язаною з цим елементарним об’ємом та системою координат, зв’язаною з геометрією поширення променів у напівциліндричній підкладці. Для розрахунку інтенсивності розсіяних елементарним об’ємом променів, які знову потрапляють у підкладку і далі – на приймачі світла, необхідно також знати інтенсивність та кут падіння променів, які, виходячи з напівциліндричної підкладки, безпосередньо потрапляють на шар пилу. При цьому, як видно з виразів (1)–(7), такий розрахунок необхідно здійснити для кожної елементарної ділянки освітленої робочої поверхні.

Моделювання початкового розподілу інтенсивності зондувального пучка на робочій поверхні сенсора. В даній роботі здійснювався вивід виразів для розрахунку розподілу на робочій поверхні підкладки

значень інтенсивності  $i_i(\mathbf{r}_a)$  та кутів  $\beta_i(\mathbf{r}_a)$ , під якими промені виходять з підкладки в шар пилу (див. рис.2). Розподіл кутів цілком очевидно залежить лише від координат точки на робочій поверхні з врахуванням заломлення променів на межі “підкладка–пиловий осад”. При цьому приймається така модель пилового осаду, в якій частинки пилу не прилягають щільно до поверхні підкладки, тобто промені з підкладки потрапляють спочатку в повітря, а потім розсіюються частинками пилу. Розподіл інтенсивності залежить від трьох чинників: діаграми направленості джерела променів, розміщеного на осі підкладки, різниці шляхів, які проходять промені в підкладці (але без врахування дуже незначного поглинання світла в оптичному склі), та дзеркального відбивання світла від поверхні підкладки. Для нього можна записати:

$$i_i(\mathbf{r}_a) = i_0(\gamma) \frac{l_0^2}{l^2(\mathbf{r}_a)} (1 - K_r), \quad (8)$$

де  $l_0$  – відстань яку проходить промінь світла від джерела до поверхні підкладки вздовж осі діаграми направленості,  $l(\mathbf{r}_a)$  – відстань яку проходить промінь світла від джерела до точки на поверхні підкладки з координатами  $\mathbf{r}_a$ ,  $K_r$  – коефіцієнт дзеркального відбивання від поверхні підкладки.

Задаючи положення точки на робочій поверхні сенсора циліндричними координатами  $z, \psi, R = \text{const}$ , легко розраховуємо кут падіння променів зсередини на поверхню підкладки та кут, під яким промінь виходить з підкладки:

$$\alpha_i = \arctg(z/R) \quad (9)$$

$$\beta_i = \arcsin(n \sin \alpha_i) = \arcsin \left( n \sin \left( \arctg \frac{z}{R} \right) \right) \quad (10)$$

Для заданої діаграми направленості  $i_0(\gamma)$  значення кута  $\gamma$  в точці робочої поверхні з координатами  $\mathbf{r}_a = (z, \psi)$  розраховуємо за допомогою формули для скалярного добутку двох векторів, що відповідають променю, який падає на робочу поверхню вздовж осі діаграми направленості, нахиленої під кутом  $\varepsilon$ , та променю, що потрапляє в точку робочої поверхні з координатами  $(z, \psi)$ :

$$\gamma = \arccos \frac{R \cos \varepsilon \cos \psi + z \sin \varepsilon}{\sqrt{R^2 + z^2}} \quad (11)$$

Відстані  $l_0, l(\mathbf{r}_a)$  розраховуємо із виразів

$$l_0 = \frac{R}{\cos \varepsilon}, \quad l(\mathbf{r}_a) = \sqrt{R^2 + z^2}, \quad (12)$$

а коефіцієнт дзеркального відбивання  $K_r$  – із відомої формули (вважаємо, що світло неполяризоване):

$$K_r = \left| \frac{n-1}{n+1} \right|^2, \quad (13)$$

де  $n$  – показник заломлення матеріалу підкладки в повітрі.

Порівнюючи (8) з (1), запишемо вираз для “апаратної” функції:

$$f(z, \psi) = (1 - K_r) \frac{R^2}{\cos^2 \varepsilon (R^2 + z^2)}. \quad (14)$$

Застосуємо наведені викладки для розрахунку розподілу інтенсивності зондувального пучка на робочій поверхні напівциліндричного сенсора. Для цього задамося наступними параметрами сенсора:

$$R = 3,5 \text{ см}; \quad \varepsilon = 30^\circ; \quad n = 1,5.$$

Діаграму направленості виберемо таку, як, наприклад, у інфрачервоного світлодіода SFH 4301 фірми Infineon Technologies AG [5] (рис.3).

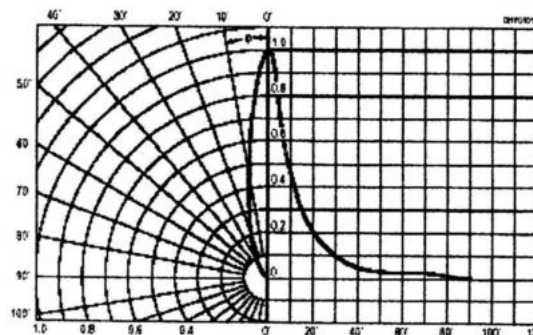


Рис. 3. Діаграма направленості інфрачервоного світлодіода SFH 4301 фірми Infineon Technologies AG

Ця діаграма направленості досить добре апроксимується наступною функцією:

$$i_0(\gamma) = \left[ S + S \cos^2(k_1 \gamma) \right] \times \left[ 0^{-k_2(\gamma-\gamma^*)} \chi(\gamma-\gamma^*) + \chi(\gamma^*-\gamma) \right] \quad (15)$$

де  $S=0,5$ ,  $k_1=2,57$ ,  $k_2=0,033$ ,  $\gamma^*=\pi/180$ , а  $\chi(\gamma)$  – функція Хевісайда.

Підставляючи вираз (15) у формулу (8) та враховуючи співвідношення (11)–(13) із

заданими параметрами  $R$ ,  $\varepsilon$ ,  $n$ , отримуємо вигляд розподілу інтенсивності зондуваль-

них променів на робочій поверхні:

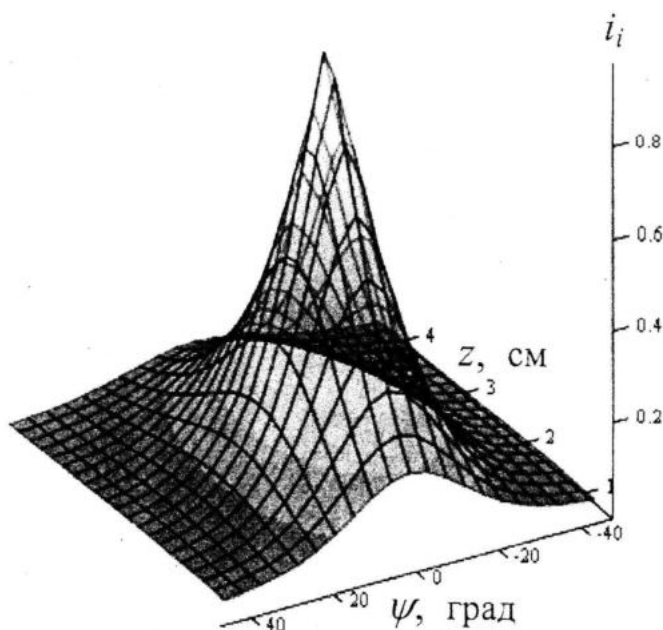


Рис. 4. Початковий розподіл інтенсивності зондувальних променів на робочій поверхні напівциліндричного сенсора

**Висновки.** В роботі отримали подальший розвиток ідеї авторів щодо використання напівциліндричної товстої прозорої підкладки в оптичному сенсорі для оцінки дисперсного складу осадів пилу за спектральними чи кутовими характеристиками дифузного відбивання світла. Зокрема, уточнено означення та уніфіковано позначення для кутів, що характеризують поширення зондувальних, дзеркально відбитих і розсіяних променів як всередині підкладки, так і в шарі пилу. В результаті більш акуратно записано функціонали, що зв'язують характеристики світлорозсіювання пилового осаду з кутовими та спектральними характеристиками променів всередині підкладки, а також виведено співвідношення, що дозволяють розраховувати початковий розподіл інтенсивностей та кутів падіння променів, що виходять з підкладки в шар пилу, за відомою діаграмою направленості джерела променів.

#### Л І Т Е Р А Т У Р А

1. Природные опасности в шахтах, способы их контроля и предотвращения / Е.Ф. Карпов, Ф.С. Клебанов, Б. Фирганек и др.

Под ред. Клебанова. – М.: Недра, 1981. – 471 с.

2. П.Сопрунюк, І.Івасів, О.Червінка, Л.Червінка. Оптичний сенсор для експрес-контролю дисперсного складу порошкових матеріалів //Комп'ютерні технології друкарства. Збірник наукових праць. – Львів: Фенікс, 2000. – №5. – С.189-195.

3. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Семенюк О.М. Рефлектометричний сенсор для оцінки дисперсного складу порошків // Матеріали ІХ науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". – Хмельницький: 2002. – С. 15-18.

4. Івасів І.Б., Сопрунюк П.М. Обернена задача відтворення індикатриси зворотного розсіювання для напівциліндричного рефлектометричного сенсора дисперсного складу порошків // Відбір і обробка інформації. – 2002. – Вип. 17(93). – С. 85-90.

5. <http://www.osram.convergy.de/upload/documents/bulkload/infrared/sfh4301.pdf>