

**ОБМЕЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ  
НАПІВЦИЛІНДРИЧНОГО  
ОПТИЧНОГО СЕНСОРА  
АНАЛІЗАТОРА ДИСПЕРСНОГО  
СКЛАДУ ОСАДІВ ПИЛУ, ЗУМОВЛЕНІ  
ПОВНИМ ВНУТРІШНІМ  
ВІДБИВАННЯМ**

*П.М.Сопрунюк, І.Б.Івасів*

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

*Аналізуються обмеження на основні параметри оптичної схеми напівциліндричного сенсора аналізатора дисперсного складу відкладів пилу, зумовлені повним внутрішнім відбиванням і заломленням зондувальних променів у прозорій напівциліндричній підкладці. Зокрема, розраховуються межі активної ділянки робочої (циліндричної) поверхні та відповідні допустимі межі розміщення світлочутливих елементів під реєструвальною (плоскою) поверхнею підкладки.*

Важливою практичною задачею як контролю довкілля, так і контролю безпеки технологічних приміщень і ємностей є експрес-оцінка дисперсного складу осадів пилу. Ефективним інструментом для цього є аналізатор з оригінальним напівциліндричним оптичним сенсором, запропонований авторами в [1, 2], який реєструє промені, дифузно відбиті пиловим осадом на його робочій поверхні, і відрізняється простотою процедури вимірювання (без попередньої підготовки проб), ефективним використанням потужності джерела світла та найбільшою, порівняно з іншими оптичними сенсорами, площею робочої поверхні [3]. З іншого боку, такий сенсор характеризується складною конфігурацією променів всередині напівциліндричної прозорої підкладки (рис.1), що потребує уважного і акуратного розгляду процесу поширення променів і формування сигналу на всіх стадіях. Зокрема, не завжди тривіальною є задача визначення кутів падіння, відбивання, заломлення і розсіювання зондувальних променів, котрі реєструються деяким елементом матричного фотоприймального пристрою (фотолінійки). В ряді попередніх праць авторів розглядалися питання побудови функціоналів, що зв'язують спектральні характеристики та розподіл інтенсивності дифуз-

но відбитих променів вздовж фотолінійки з характеристиками дифузного відбивання на робочій поверхні сенсора [2, 4], окремих функцій, що входять у ці функціонали, і їх областей визначення. Наприклад, в [2] виведено вирази для визначення меж освітленої ділянки робочої поверхні, заданих лінійною апертурою з паралельними краями, а також залежність кута падіння зондувальних променів на робочу поверхню та кута діаграми направленості джерела світла від координат точки на робочій поверхні в площині, що проходить через вісь  $Oy$  і має кут нахилу до осі  $Ox$  рівний  $\epsilon$ . В [4] виведено співвідношення, що дозволяють розраховувати початковий розподіл інтенсивностей і кутів падіння променів, що виходять з підкладки в шар пилу, за відомою діаграмою направленості джерела променів і з врахуванням втрат енергії за рахунок дзеркального відбивання на границі "скло-повітря" та різних відстаней, які проходять промені від джерела світла до різних точок освітленої ділянки робочої поверхні. В [5] виведено співвідношення для кута розсіювання світла елементарною ділянкою пилу на робочій поверхні що відповідає довільній парі точок на робочій поверхні та фотолінійці.

Однак, нерозв'язаними залишаються питання побудови "апаратної" функції для дифузно відбитих променів, яка враховує різні відстані, що проходять промені від точок робочої поверхні до елементів фотолінійки, врахування кутової залежності коефіцієнта дзеркального відбивання та встановлення обмежень на кути падіння і дифузного відбивання, зумовлених повним внутрішнім відбиванням променів у напівциліндричній підкладці. Розв'язання цих задач дасть змогу повністю моделювати процес формування сигналу в запропонованому сенсорі для заданої кутової характеристики дифузного розсіювання елементарної ділянки.

В даній роботі виводяться вирази для означення меж освітленої ділянки робочої поверхні, заданих апертурою круглої форми, з врахуванням обмежень, зумовлених повним внутрішнім відбиванням променів у підкладці сенсора на поверхні розділу типу "скло-повітря".

Розглянемо більш детально конфігурацію променів у напівциліндричній підкладці (див. рис.1).

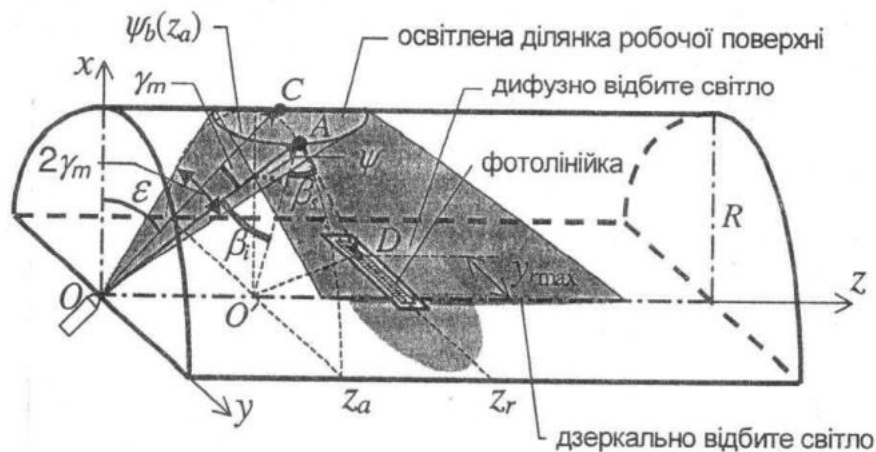


Рис. 1—Поширення зондувальних променів у напівциліндричному оптичному сенсорі.

Основні конструкційні параметри сенсора визначаються радіусом кривизни підкладки  $R$ , відстанню від початку координат (точка  $O$ ) до фотолінійки  $z_r$ , довжиною активної зони фотолінійки, апертурним кутом  $2\gamma_m$  та кутом нахилу  $\epsilon$  осі діаграми направленості джерела світла, розміщеного в точці  $O$ . На практиці, відстань  $z_r$  може бути обмежена деяким мінімальним значенням  $z_{r\min}$ , зумовленим конструкцією підкладки.

Положення точки на робочій поверхні задається циліндричними координатами  $z_a, \rho, \psi$  (для фіксованого  $\rho = R$  достатньо задати тільки  $z_a, \psi$ ). Положення чутливого елемента фотолінійки задається координатами  $(z_r, y_r)$ .

Освітлена ділянка на робочій поверхні повністю визначається параметрами  $R, \epsilon$  та  $2\gamma_m$ . Однак, реальна активна ділянка робочої поверхні сенсора обмежується ще й кутом повного внутрішнього відбивання

$$\beta_0 = \arcsin \frac{1}{n} \quad (1)$$

де  $n$  - показник заломлення матеріалу напівциліндричної підкладки.

При цьому, слід розглядати обмеження як для променів, що потрапляють із джерела на робочу поверхню, так і для дифузно відбитих променів, що потрапляють на світлочутливі елементи реєструвальної поверхні. Дійсно, промені, що падають на робочу поверхню під кутами  $\beta_i < \beta_0$ , не виходять із підкладки і не потрапляють на частинки, що лежать на робочій поверхні. Так само і промені, що виходять з робочої поверхні під кутами  $\beta_s < \beta_0$  і потрапляють (гіпотетично) на світлочутливі елементи, не можуть бути променями, розсіяними частинками на

робочій поверхні.

Тому, для заданих радіуса кривизни робочої поверхні сенсора, показника заломлення матеріалу підкладки та довжини активної зони фотолінійки необхідно так підбирати інші конструкційні параметри сенсора ( $z_r > z_{r\min}, \epsilon$  та  $\gamma_m$ ), щоб освітлена ділянка робочої поверхні не виходила за межі, визначені повним внутрішнім відбиванням.

З обмеження для падаючих променів, враховуючи, що для циліндра:

$$\beta_i = \arctg \frac{z_a}{R} \quad (2)$$

та 
$$\beta_{i\max} = \epsilon + \gamma_m \quad (3)$$

отримаємо

$$z_{a\max} = R \operatorname{tg} \left( \arcsin \frac{1}{n} \right) \quad (4)$$

і 
$$\gamma_m = \arcsin \frac{1}{n} - \epsilon \quad (5)$$

Для розсіяних променів, що потрапляють на світлочутливі елементи обмеження розраховуються дещо складніше. Для цього припустимо, що якщо для всіх крайніх точок освітленої ділянки робочої поверхні, що відповідають куту  $\gamma = \gamma_m$  діаграми направленості джерела світла виконується умова  $\beta_s < \beta_0$ , то й для внутрішніх точок освітленої ділянки ця умова буде виконуватись. Для знаходження координат точок робочої поверхні, для яких  $\gamma = \gamma_m$ , будувалась функція:

$$\psi = \psi_b(z_a, \gamma_m), \quad (6)$$

яка шукалась із розв'язку квадратного рівняння для  $\cos \psi$ , що виводилось із співвідношення для скалярного добутку векторів

$(\vec{OC} \cdot \vec{OA})$  (див. рис.1), а саме:

$$R^2 \cos^2 \psi + 2Rz_a \operatorname{tg} \varepsilon \cos \psi + z_a^2 \operatorname{tg}^2 \varepsilon - \cos^2 \gamma_m (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon) (R^2 + z_a^2) = 0 \quad (7)$$

Виходячи з фізичних міркувань, і позначаючи:

$$\begin{aligned} a_0(z_a, \gamma_m) &= z_a^2 \operatorname{tg}^2 \varepsilon - \cos^2 \gamma_m (1 + \operatorname{tg}^2 \varepsilon) (R^2 + z_a^2), \\ a_1(z_a) &= 2Rz_a \operatorname{tg} \varepsilon, \\ a_0 &= R^2, \end{aligned} \quad (8)$$

отримуємо:

$$\begin{aligned} \psi_b(z_a, \gamma_m) &= \\ &= \arccos \frac{-a_1(z_a) + \sqrt{a_1^2(z_a) - 4a_2a_0(z_a, \gamma_m)}}{2a_2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Обмеження на кут  $\gamma_m$  шукаються, виходячи із співвідношення для кута повного внутрішнього відбивання

$$\sin \beta_s < \frac{1}{n} \quad (10)$$

або 
$$\cos^2 \beta_s > 1 - \frac{1}{n^2} \quad (10')$$

та виразу для скалярного добутку векторів  $(\vec{AO}' \cdot \vec{AD})$ , беручи найгірший випадок  $y_r = y_{r \max}$ , де  $y_{r \max}$  - відстань найвіддаленішого світлочутливого елемента від осі сенсора (див. рис.1):

$$\begin{aligned} \cos^2 \beta_s &= \\ &= \frac{(R + y_{r \max} \sin \psi)^2}{R^2 + y_{r \max}^2 + 2Ry_{r \max} \sin \psi + (z_r - z_a)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Звідси отримуємо нерівність:

$$\begin{aligned} y_{r \max}^2 \sin^2 \psi + \frac{2Ry_{r \max}}{n^2} \sin \psi + R^2 - \\ - \frac{n^2 - 1}{n^2} (R^2 + y_{r \max}^2 + (z_r - z_a)^2) > 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Підставляючи в ліву частину (12) вирази (6), (8), (9) і позначаючи її  $A(z_a, z_r, \gamma_m)$ , вибираємо  $\gamma_m$  таким, щоб нерівність (12), тобто  $A(z_a, z_r, \gamma_m) > 0$ , виконувалась всюди в області  $z_r \in [z_{r \min}, z_{r \max}]$  і  $z_a \in [z_{a \min}, z_{a \max}]$ , причому

$$z_{a \min} = R \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon - \gamma_m), \quad z_{a \max} = R \cdot \operatorname{tg}(\varepsilon + \gamma_m), \quad (13)$$

де  $z_{r \min}, z_{r \max}$  задаються, виходячи з конструкції напівциліндричного сенсора.

Далі завдання полягає в тому, щоб вибрати максимальне значення  $\gamma_m$  (а отже, і максимальну площу активної ділянки робочої поверхні), для якого ще виконується (12). На практиці це можна зробити, будуючи графік функції  $A(z_a, z_r, \gamma_m)$ , де  $\gamma_{m0}$  - деяке фіксоване значення  $\gamma_m$  (рис.2), і підбираючи таке  $\gamma_{m0}$ , щоб

$$A(z_a, z_r, \gamma_m) \xrightarrow{\gamma_m \rightarrow \gamma_{m0}} +0, \quad (14)$$

Однак, можна запропонувати і більш точний метод оцінки максимального значення  $\gamma_m$  для заданої області  $[z_{r \min}, z_{r \max}]$ . З рис.2 видно, що мінімальне значення виразу  $A(z_a, z_r, \gamma_m)$  досягається для будь якого  $z_r$  в точці  $z_a = z_{a \min}(\gamma_m)$ . Тоді, шукаючи корені рівняння

$$A(z_r; z_{a \min}(\gamma_m), \gamma_m) = \xi, \quad (15)$$

де  $\xi > 0$  - близьке до нуля число, для фіксованих значень  $z_r \in [z_{r \min}, z_{r \max}]$ , отримуємо

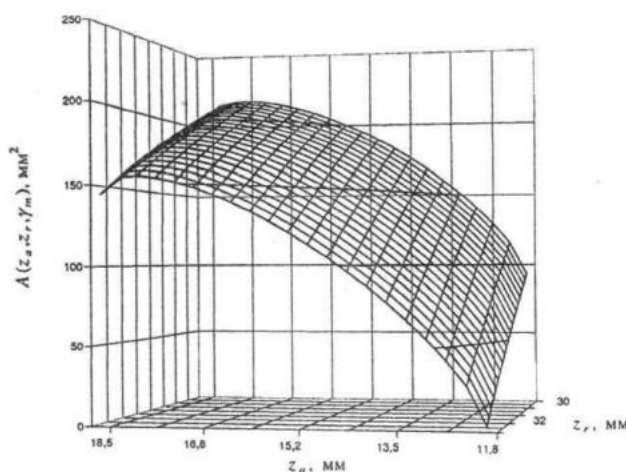


Рис. 2—Графік функції  $A(z_a, z_r, \gamma_{m0})$  для фіксованого значення  $\gamma_m$ .

залежність (рис.3а):

$$\gamma_m = \gamma_m(z_r), \quad (16)$$

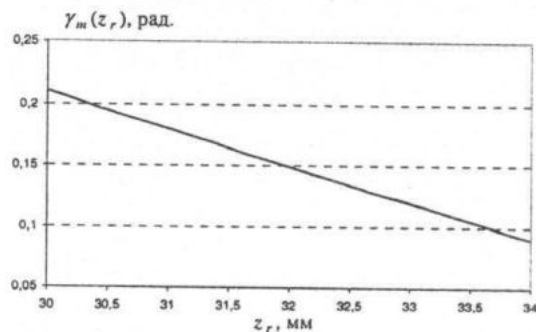
та, враховуючи (13), залежності (рис.3б):

$$z_{amin} = z_{amin}(z_r), \quad z_{amax} = z_{amax}(z_r) \quad (17)$$

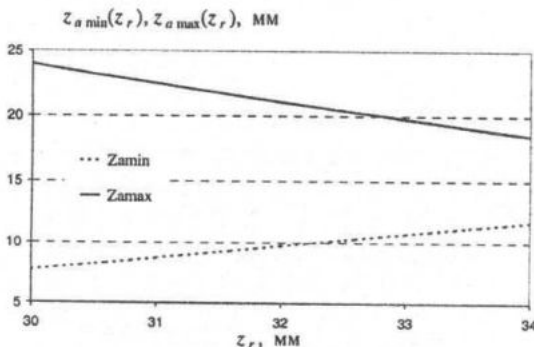
З (16) випливає і обмеження на  $z_r$ :

$$\gamma_m(z_{rmax}) = 0 \quad (18)$$

Оскільки обмеження на апертурний кут виводяться як для розсіяних променів, так і для падаючих (вираз (5)), то з двох значень  $\gamma_m$ , визначених в (5) і (16) вибирається найменше, яке й забезпечує знаходження освітленої ділянки робочої поверхні сенсора в зоні без повного внутрішнього відбивання.



а)



б)

Рис. 3—Залежність максимального апертурного кута (а) та границь освітленої ділянки робочої поверхні сенсора (б), для яких ще немає повного внутрішнього відбивання, від положення фотолінійки при заданих  $R$ ,  $n$ ,  $u_{rmax}$  та  $\epsilon$ .

**Висновки.** Таким чином, створюючи напівциліндричний сенсор дисперсного складу порошоків, необхідно враховувати ряд обмежень, зумовлених повним внутрішнім відбиванням оптичних променів. Зокрема, в залежності від радіуса  $R$  напівциліндричної підкладки, кута нахилу  $\epsilon$  діагра-

ми направленості джерела світла та довжини світлочутливої лінійки, отримуємо обмеження на розміщення самої світлочутливої лінійки (параметр  $z_r$ ), а також, в залежності від  $z_r$ , на розміри активної ділянки робочої поверхні, що визначаються обмеженнями на апертурний кут джерела світла. В даній роботі виведено вирази для побудови цих обмежень. Це дозволяє не тільки оптимізувати параметри сенсора, а й обґрунтовано означити межі інтегрування в функціоналі, що описує формування сигналу. В свою чергу, це відкриває перспективу для коректного формування і розв'язування оберненої задачі відтворення кутової характеристики дифузного розсіювання світла і оцінки дисперсного складу осадів пилу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. 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.
2. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б., Семенюк О.М. Рефлектометричний сенсор для оцінки дисперсного складу порошоків // Матеріали ІХ науково-технічної конференції "Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах". — Хмельницький: 2002. — С. 15-18.
3. Soprunyuk P., Ivasiv I. Optical sensor for estimation of disperse composition of dust sediments //Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. — 2002. — Elektrotechnika, z.24, Nr.200. — S. 137-142.
4. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б.,Семенюк О.М. Моделирование початкового розподілу інтенсивності зондувального пучка на робочій поверхні напівциліндричного оптичного сенсора дисперсного складу осадів пилу // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. /НАН Украины. МГІ: — Севастополь, 2003. — С. 83-86.
5. Ivasiv I. Modelling of intensity distribution of bistatic polydisperse light scattering in the semicylindrical optical sensor of powder materials' characteristics // ARGESIM Report no.24. Proc. 4th MATHMOD Vienna, February 2003, 1, P.305.