

# КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИГНАЛУ КОМПАКТНОГО ПРИЗМАТИЧНОГО СЕНСОРА ДИФУЗНОГО ВІДБИВАННЯ СВІТЛА ДЛЯ АНАЛІЗУ ХАРАКТЕРИСТИК АЕРОЗОЛЬНИХ ВІДКЛАДЕЛЬ

I.B. Ivasiv

Фізико-механічний інститут  
НАН України  
м. Львів, вул. Наукова, 5  
E-mail: igreg@ukr.net

*Здійснено комп'ютерне моделювання сигналу компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для рівномірно розподілених по робочій поверхні аерозольних відкладень з врахуванням розмірів та хімічного складу частинок. Досліджено інформативні параметри змодельованого сигналу.*

**Вступ.** Данна робота продовжує розгляд проблеми створення компактного сенсора дифузного відбивання світла аерозольними відкладеннями, придатного для роботи в складі як прилаїв для неперервного моніторингу відкладення аерозольних частинок, так і для експрес-аналізаторів концентрації та дисперсного складу аерозольних відкладень на пластинах.

У зв'язку з тим, що для аерозолів з великим розкидом розмірів частинок, як наприклад, на рис.1 [1], площа резен



Рис. 1. Гістограма розподілу розмірів частинок аерозольного осаду на пластинці

тативної ділянки, яка адекватно відображає дисперсний склад досліджуваного аерозолю, може досягати декількох квадратних міліметрів [2], постає питання створення сенсора дифузного відбивання світла, який на відміну від скатерометрів та профілометрів відомих виробників, зокрема Schmitt Industries Inc.

[3, 4], Accent Optical Technologies, Chapman, Keyence і т.п., використовує достатньо широкий зондувальний пучок, що повністю охоплює згадану репрезентативну ділянку, а отже, не потребує сканування.

У ряді попередніх праць, зокрема [5], автором запропоновано півциліндричний сенсор дифузного відбивання світла для аналізатора дисперсного складу щільних полідисперсних середовищ. Цей сенсор забезпечує велику площину взаємодії зондувального пучка з поверхнею досліджуваного середовища, однак він не розрахований для аналізу аерозольних відкладень на пластинах в силу криволінійної геометрії робочої поверхні.

В [6, 7] автором запропоновано сенсор, в якому зондування здійснюється крізь прозору призматичну підкладку, скінні грані якої служать для вводу зондувального пучка та реєстрації дифузно відбитих променів, а основа є робочою поверхнею, що контактує з досліджуваним щільним дисперсним середовищем. При цьому, зондування здійснюється широким пучком, сфокусованим на вихідній грани (рис.2 [6]).

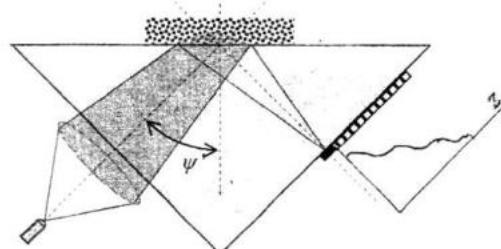


Рис. 2. Оптична конфігурація призматичного сенсора дифузного відбивання світла

Однак, застосування для зондування широкого пучка променів ускладнює аналіз сигналу сенсора, вимагаючи врахування багатьох факторів, пов'язаних як з формуванням та поширенням зондувального пучка всередині підкладки, так і формуванням дифузно відбитого світла та його проходженням крізь підкладку до сенсорної грани.

Зокрема, в [6] здійснено розрахунок розподілу інтенсивності зондувального пучка на робочій поверхні до взаємодії з досліджуваним середовищем та межі освітленої ділянки робочої поверхні для пучка, обмеженого круглою апертурою заданого діаметра. А в [7] розраховано

сигнал сенсора у вигляді розподілу інтегральної інтенсивності дифузного відбивання вздовж фотолінійки, розміщеної на сенсорній грані перпендикулярно до площини падіння зондувального пучка. При цьому приймалася модель однорідного і повністю дифузного відбивання світла на робочій поверхні з рівномірним розподілом інтенсивності в усіх напрямках.

Все ж, проведені моделювання ще не дають змоги оцінити залежність сигналу

$$I_r(q) = \frac{1}{s_c} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} \int_{y_m(x)}^{y_m(x)} \sigma_s[\theta_{sr}(x, y, q), Q(x, y)] K_s(x, y, q) dx dy, \quad (1)$$

$$K_s(x, y, q) = i_s(x, y) f_s(x, y, q), \quad (2)$$

де  $q$  – лінійна координата світлочутливо-го елемента на фотолінійці,  $s_c$  – площа чутливого елемента,  $\sigma_s[\theta_{sr}, Q]$  – дифере-нціальний переріз дифузного відбивання світла в напрямку чутливого елемента з координатою  $q$  для заданої елементарної ділянки досліджуваного середовища з координатами  $(x, y)$ ,  $\theta_{sr}(x, y, q)$  – кут дифу-зного відбивання відносно падаючого променя,  $Q(x, y)$  – конфігураційний па-метр досліджуваного середовища (аero-зольного осаду) для елементарної ділян-ки,  $K_s(x, y, q)$  – незалежна від параметрів досліджуваного середовища апаратна функція сенсора, в яку входять “апарат-на” функція для дифузно відбитих про-менів  $f_s(x, y, q)$  та розподіл інтенсивності світла на активній ділянці робочої пове-рхні сенсора  $i_s(x, y)$ .

Також, у [6, 7] було виведено спів-відношення для розрахунку меж інтегру-вання в (1) і  $K_s(x, y, q)$ , а для  $\sigma_s[\theta_{sr}, Q]$  у [7] покладалося  $\sigma_s[x, y, q] \equiv 1$ .

Однак, оскільки у параметр  $\sigma_s[\theta_{sr}, Q]$  власне і закладена уся інформація про частинки та їх просторову конфігурацію на робочій поверхні сенсора, дослідимо детальніше його структуру і виведемо основні співвідношення для його розра-хунку.

Для щільноупакованих дисперсних середовищ, до яких в багатьох випадках можна віднести й аерозольні відкладення, кутову характеристику дифузного відбивання в спрошеному вигляді можна записати у вигляді [8]

сенсора від розмірів та хімічного складу частинок аерозольних відкладень. Тому здійснення моделювання, що враховує особливості розсіювання світла частин-ками різних розмірів та різного хімічно-го складу є актуальною задачею, яка ви-рішується в даній роботі.

**Основні співвідношення для моде-лювання.** У загальному випадку сигнал сенсора  $I_r(q)$  записувався [6, 7] за допо-могою функціонала

$$\sigma_s[\theta_{sr}, Q] = Q_{sca} s^{(3)} i_s(\theta_{sr}) S(\theta_{sr}, Q) \quad (3)$$

де  $Q_{sca}$  – фактор розсіювання ізольованої частинки,  $s^{(3)}$  – об’ємна концентрація площ поперечних перерізів частинок,  $i_s(\theta_{sr}) = i_s(\theta_{sr}; d, \tilde{n})$  – індикаторика розсію-вання ізольованої частинки, що залежить від її діаметра  $d$  та хімічного складу, за-кладеного в комплексний показник за-ломлення  $\tilde{n}$ ,  $S(\theta_{sr}, Q)$  – структурний фак-тор, що залежить від просторової конfi-гурації (взаємного розміщення) части-нок.

Структурний фактор зв’язаний з про-сторовою конфігурацією взаємного роз-міщення частинок через радіальну функ-цію розподілу  $g(r)$  [8, 9]

$$S(\mathbf{k}) = 1 + n^{(3)} \int [g(r) - 1] e^{-i\mathbf{kr}} d^3 r, \quad (4)$$

де  $\mathbf{k} = \mathbf{k}^{(s)} - \mathbf{k}^{(i)}$  ( $\mathbf{k}^{(i)}$ ,  $\mathbf{k}^{(s)}$  – хвильові век-тори падаючої та розсіяної хвиль, кут між якими рівний  $\theta_{sr}$ ),  $n^{(3)}$  – лічильна концентрація частинок,  $\mathbf{r}$  – координати відносно вибраної центральної частинки,  $r = |\mathbf{r}|$ .

В окремих випадках (розріджена упаковка частинок або дуже щільна упа-ковка сильно поглинальних частинок) можна нехтувати ефектами багаторазо-вого розсіювання і покласти  $S(\theta_{sr}, Q) = S_0 = \text{const}$  [8]. Тоді вираз (3) запишеться у вигляді

$$\sigma_s(\theta_{sr}) = s^{(3)} S_0 Q_{sca} i_s(\theta_{sr}) \quad (5)$$

Також приймалося, що між частин-ками і підкладкою є певний повітряний проміжок, а тому можна нехтувати ефек-тами взаємодії у близкій зоні розсію-

вання в системі “частинка-підкладка”.

Все ж, запис виразу для кута дифузного відбивання  $\theta_{sr}$ , що входить у (5), для заданої точки  $A'$  на робочій площині з координатами  $(x, y)$  та заданої координати  $q$  елемента на фотолінійці, що залежить від розміщення самої фотолінійки на сенсорній грани, не є тривіальною задачею з огляду на необхідність врахування заломлення променів під час проходження через робочу грань призми (див. рис.3).

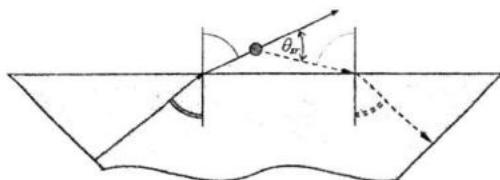


Рис. 3. До розрахунку кута дифузного відбивання

Для її розв'язання розглянемо детальніше конфігурацію зондувального пучка у призматичній підкладці сенсора (рис. 4).

Параметри зондувального променя (кути падіння на робочу поверхні та заломлення, косинус направляючого кута та інтенсивність), що падає на частин-

ку в точці  $A'(x, y)$  робочої поверхні, як відзначалося в [6], однозначно визначається цими координатами в силу геометрії формування зондувального променя.

Параметри ж променя, що розсіюється частинкою, входить у призму та реєструється елементом фотолінійки на сенсорній площині з лінійною координатою  $q(\chi', v')$  (див. рис.4) залежать вже від чотирьох координат:  $(x, y)$  та  $(\chi', v')$ .

Для знаходження виразу для кута необхідно в тривимірній системі координат  $(O'xyz)$  записати координати векторів, що відповідають падаючому на робочу грань в заданій точці  $A'(x, y)$  зондувальному променю у призмі та заломленому дифузно відбитому променю у призмі, що потрапляє з точки  $A'(\chi', v')$  робочої грани в точку  $A''(\chi', v')$  сенсорної грани. За отриманими векторами необхідно розрахувати вектори, що відповідають зондувальному променю, який виходить з призми і потрапляє на аерозольну частинку в точці  $(x, y)$ , та променю, розсіяному (дифузно відбитому) цією аерозольною частинкою.

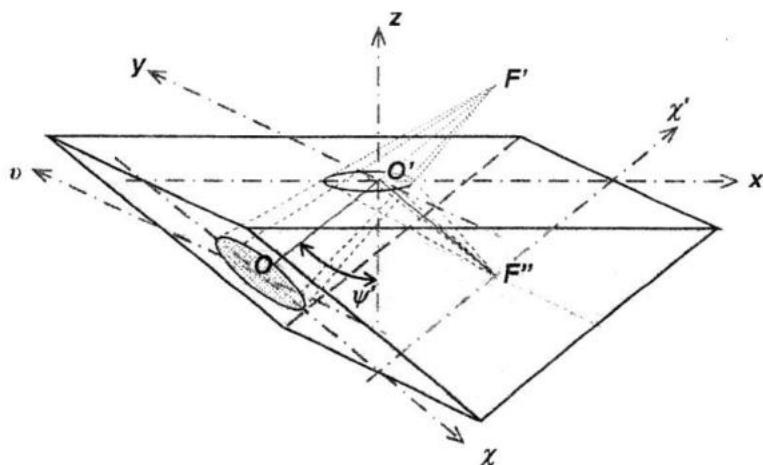


Рис. 4. Конфігурація зондувального пучка у призматичній підкладці сенсора

Кут між останніми двома векторами і буде кутом дифузного відбивання  $\theta_{sr}(x, y, \chi', v')$ .

Запишемо тепер координати вектора, який відповідає зондувальному променю, що падає в точку  $A'(x, y)$  робочої поверхні з відповідною точкою  $A(\chi, v)$  на вхідній грани, відповідно до геометрії зондувального пучка. Координати точки  $A'$  в тривимірній системі  $O'xyz$  запищуться

як  $(x, y, 0)$ . Координати точки  $A$  запищуться відповідно з перетворенням координат  $(\chi, v) \rightarrow (x, y)$ :

$$x_A = \chi_A \cos \psi' - 0,5 f' \sin \psi' \quad (6)$$

$$y_A = v_A \quad (7)$$

$$z_A = -\chi_A \sin \psi' - 0,5 f' \cos \psi' \quad (8)$$

$\psi'$  – кут падіння центрального променя зондувального пучка на робочу грань,

$f'$  – відстань, що проходить центральний промінь пучка від входної грані призми до точки фокусування на вихідній грані (див рис. 4).

Враховуючи що точки  $A$ ,  $A'$  взаємоз'язані через наступні співвідношення [6]

$$\chi_A = \frac{f' x_{A'} \cos \psi'}{0,5 f' - x_{A'} \sin \psi'}, \quad (9)$$

$$v_A = \frac{f' y_{A'}}{0,5 f' - x_{A'} \sin \psi'}, \quad (10)$$

отримаємо (опускаючи індекси біля координат точки  $A'$ ) наступні координати для точки  $A$

$$x_A = \frac{f' x \cos \psi'}{0,5 f' - x \sin \psi'} \cdot \cos \psi' - 0,5 f' \sin \psi' \quad (11)$$

$$y_A = \frac{f' y}{0,5 f' - x \sin \psi'} \quad (12)$$

$$z_A = -\frac{f' x \cos \psi'}{0,5 f' - x \sin \psi'} \cdot \sin \psi' - 0,5 f' \cos \psi' \quad (13)$$

Відповідно, для вектора  $\overrightarrow{AA'}$  отримаємо

$$(x - x_A, y - y_A, -z_A). \quad (14)$$

Кут падіння на робочу поверхню для вектора  $\overrightarrow{AA'}$  визначається із його скалярного добутку на одиничний вектор  $(0, 0, 1)$ , ортогональний до робочої площини

$$\beta_u(x, y) = \arccos \left( \frac{\overrightarrow{AA'} \cdot (0, 0, 1)}{|\overrightarrow{AA'}|} \right) \quad (15)$$

Кут заломлення для цього променя становить

$$\alpha_{ur}(x, y) = \arcsin(n \cdot \sin(\beta_u(x, y))) \quad (16)$$

Тоді для заломленого вектора  $\vec{V}_i$ , що падає на досліджуване середовище, отримаємо

$$x_{Vi} = 0,5 f' \sin \psi' - x, \quad (17)$$

$$y_{Vi} = -y, \quad (18)$$

$$z_{Vi} = \sqrt{x_{Vi}^2 + y_{Vi}^2} \cdot \tan(\pi/2 - \alpha_{ur}(x, y)). \quad (19)$$

Аналогічно, розраховуємо для дифузно відбитого променя, що потрапляє з

точки  $A'(x, y)$  в точку  $A''(\chi', v')$  сенсорної грані.

Перетворення координат  $(\chi', v') \rightarrow (x, y)$

$$x_{A''} = \chi'_{A''} \cos \psi' + 0,5 f' \sin \psi', \quad (20)$$

$$y_{A''} = v'_{A''}, \quad (21)$$

$$z_{A''} = \chi'_{A''} \sin \psi' - 0,5 f' \cos \psi'. \quad (22)$$

Тоді вектор  $\overrightarrow{A'A''}$ :

$$(x_{A''} - x, y_{A''} - y, z_{A''}). \quad (23)$$

Кут заломлення для дифузно відбитого променя, що входить у призму з точки  $A'$  і потрапляє в точку  $A''$ :

$$\beta_{sr}(x, y, \chi', v') = \arccos \left( \frac{\overrightarrow{A'A''} \cdot (0, 0, -1)}{|\overrightarrow{A'A''}|} \right) \quad (24)$$

Відповідно, кут падіння дифузно відбитого променя на робочу поверхню перед входом у призму:

$$\alpha_{si}(x, y, \chi', v') = \arcsin(n \cdot \sin \beta_{sr}) \quad (25)$$

Тоді для відповідного вектора  $\vec{V}_s$  променя, розсіяного досліджуваним середовищем:

$$x_{Vs} = \chi' \cos \psi' + 0,5 f' \sin \psi' - x, \quad (26)$$

$$y_{Vs} = v' - y, \quad (27)$$

$$z_{Vs} = -\sqrt{x_{Vs}^2 + y_{Vs}^2} \cdot \tan(\pi/2 - \alpha_{si}(x, y, \chi', v')) \quad (28)$$

Маючи вектори падаючого та дифузно відбитого променів  $\vec{V}_i$ ,  $\vec{V}_s$ , розраховуємо кут дифузного відбивання  $\theta_{sr}(x, y, \chi', v')$ :

$$\theta_{sr}(x, y, \chi', v') = \arccos \left( \frac{\vec{V}_i \cdot \vec{V}_s}{|\vec{V}_i| \cdot |\vec{V}_s|} \right) \quad (29)$$

Для визначеного таким чином значенням  $\theta_{sr}$  розраховуємо за формулами Mi фактор та індикатору розсіювання  $Q_{sca}$ ,  $i_s(\theta_{sr})$  для виразу (5). Для розрахунків використовувалась програма VHME [10].

**Результати моделювання сигналу сенсора.** Комп’ютерне моделювання сигналу сенсора (розподілу інтенсивності світла вздовж фотолінійки) здійснювалося для наступних параметрів оптичної схеми:

- відстань, що проходить центральний промінь пучка від входної грані призми до точки фокусування на вихідній грані  $f'=50$  мм;
- кут падіння центрального променя пучка на робочу поверхню  $\psi=30^\circ$ ;
- діаметр апертурної діафрагми формувальної лінзи  $D=8$  мм;
- точкове джерело світла – інфрачервоний світлодіод SFH4301 (Infineon Technologies AG);
- показник заломлення матеріалу призми (оргскло)  $n=1,64$ ;
- довжина фотолінійки – 15 мм (фотолінійка HAMAMATSU S4111-16R).

Вказані модельні параметри відповідають реальним параметрам макета сенсора, виготовленого у Фізикомеханічному інституті ім. Г.В. Карпенка НАН України.

Межі інтегрування у виразі (1) розраховувалися відповідно до формул, виведених у [6]. Апаратна функція сенсора  $K_s(x,y,q)$  розраховувалася, як у [7]. Характеристики розсіювання  $Q_{sca}$ ,  $i_s(\theta_{sr})$  розраховувались окремо для кожного виду частинок за розмірами і хімічним складом. При цьому,  $i_s(\theta_{sr})$  виводилась у вигляді таблиці в діапазоні 0...180 з кроком 1°. Під час інтегрування ці дані інтерполювались за методом кубічних сплайнів.

Під час моделювання було виявлено, що для заданої конфігурації сенсора деяким координатам на сенсорній грані  $(x,y,\chi',v')$  відповідають кути заломлення  $\beta_{sr}$ , що перевищують кут повного внутрішнього відбивання, а отже, не можуть бути реалізованими фізично. Тому положення фотолінійки вибиралось, виходячи з цих обмежень. Було проведено моделювання для двох положень фотолінійки:

- в площині падіння центрального променя зондувального пучка ( $v'=0$ ,  $\chi'=-15\ldots 0$  мм) – схема 1;
- перпендикулярно до площині падіння центрального променя зондувального пучка ( $v'=0\ldots 15$  мм,  $\chi'=-7$  мм) – схема 2.

Моделювання здійснювалося для наступних частинок:

- кремнієві ( $\tilde{n}=1.446 - 0.0i$ ) з діаметрами 2, 30 і 40 мкм;
- вуглецеві ( $\tilde{n}=1.59 - 0.66i$ ) з діаметрами 2, 30, 40 і 200 мкм.

Результати такого чисельного моделювання показано на рис. 5 – 16.

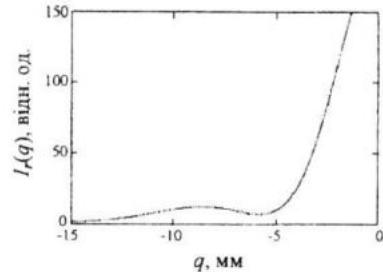


Рис. 5. Сигнал сенсора (схема 1) для кремнієвих частинок з діаметром 2 мкм

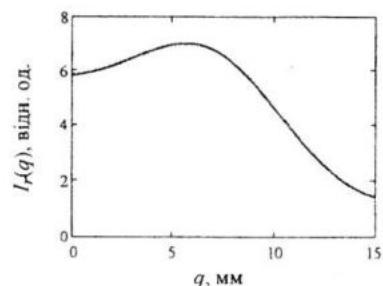


Рис. 6. Сигнал сенсора (схема 2) для кремнієвих частинок з діаметром 2 мкм

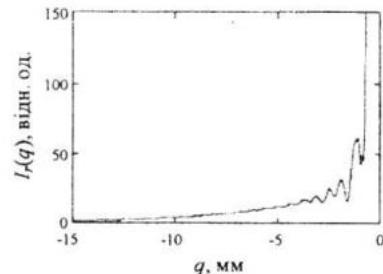


Рис. 7. Сигнал сенсора (схема 1) для кремнієвих частинок з діаметром 30 мкм

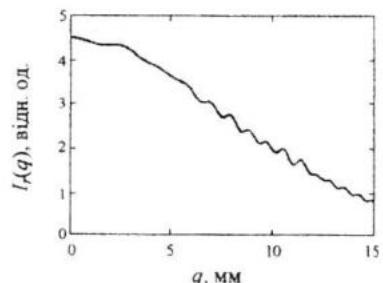


Рис. 8. Сигнал сенсора (схема 2) для кремнієвих частинок з діаметром 30 мкм

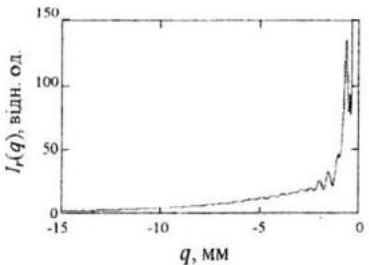


Рис. 9. Сигнал сенсора (схема 1) для кремнієвих частинок з діаметром 40 мкм

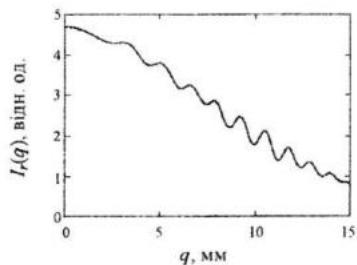


Рис. 10. Сигнал сенсора (схема 2) для кремнієвих частинок з діаметром 40 мкм

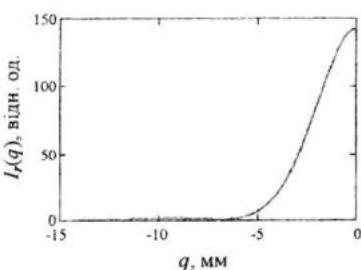


Рис. 11. Сигнал сенсора (схема 1) для вуглецевих частинок з діаметром 2 мкм

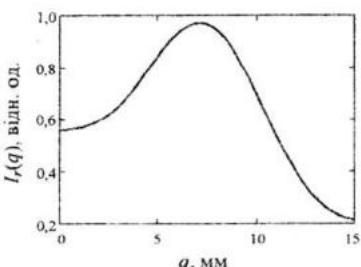


Рис. 12. Сигнал сенсора (схема 2) для вуглецевих частинок з діаметром 2 мкм

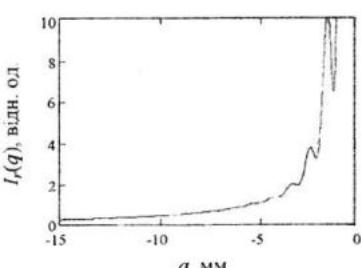


Рис. 13. Сигнал сенсора (схема 1) для вуглецевих частинок з діаметром 40 мкм

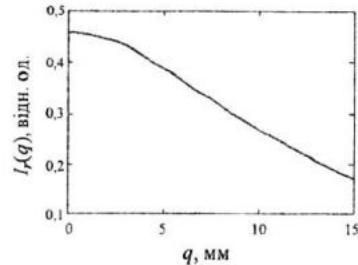


Рис. 14. Сигнал сенсора (схема 2) для вуглецевих частинок з діаметром 40 мкм

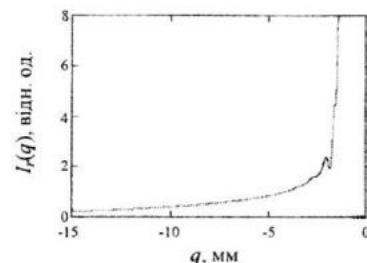


Рис. 15. Сигнал сенсора (схема 1) для вуглецевих частинок з діаметром 200 мкм

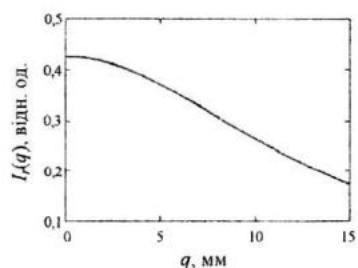


Рис. 16. Сигнал сенсора (схема 2) для вуглецевих частинок з діаметром 200 мкм

**Висновки.** В роботі здійснено повне комп’ютерне моделювання сигналу компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для аналізу характеристик аерозольних відкладень, включаючи розрахунок апаратної функції сенсора, моделювання кутової характеристики дифузного відбивання світла на робочій поверхні сенсора та інтегрування в межах розрахованої освітленої ділянки робочої поверхні.

Моделювання кутової характеристики здійснювалось для моделі однорідного по робочій поверхні дифузного відбивання у припущені одноразового розсіювання окремими дисперсними частинками, що розраховується згідно з теорією  $M_i$ , та відсутності взаємодії у більшій зоні системи “частинка-підкладка”.

Рекомендується встановлення двох фотолінійок на сенсорній грані: 1) в площині падіння центрального променя зондувального пучка ( $\nu = 0$ ) в межах – 15...0 мм відносно точки фокусування пучка; 2) перпендикулярно до площини падіння центрального променя зондувального пучка на відстані –7 мм відносно точки фокусування вздовж поздовжньої осі симетрії грані з розміщенням першого елемента на цій осі. Також рекомендується застосування фотолінійок з високою роздільчою здатністю.

Встановлено, що розміщені таким чином фотолінійки дозволяють достатньо чітко розрізняти частинки за розмірами та хімічним складом на основі відмінностей в кількості, висоті, ширині та положеннях максимумів розподілів інтенсивності дифузно відбитого світла на цих фотолінійках.

Подальші дослідження слід спрямувати на експериментальну перевірку отриманих результатів, на розроблення алгоритмів відтворення дисперсного складу аерозольних відкладень за отриманими сигналами та на введення в модель дифузного відбивання механізмів багаторазового розсіювання, конфігураційних ефектів, а також врахування взаємодії у близькій зоні в системах “частинка-частинка” та “частинка-підкладка”

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сопрунюк П., Івасів І., Семенюк О. та ін. Дослідження аерозольних викидів автотранспорту у Шацькому національному природному парку // Фізичні методи в екології, біології та медицині. Праці 3-ї Міжнар. конф., Львів – Шацьк, 9–12 вересня 2010 – Львів: Вид-во ЛНУ ім. І. Франка, 2010. – С. 164 – 167.
2. Сопрунюк П., Івасів І. Моделювання однорядного щільного полідисперсного шару частинок // Комп’ютерна інженерія та інформаційні технології. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – Львів: Вид. НУ “Львівська політехніка”, 2004. – № 521. – С. 92 – 98.
3. SCHMITT Industries, Inc. Products & Services. Measurement Systems – <http://www.schmitt-ind.com/products-services-measurement-systems.shtml>
4. SCHMITT Industries, Inc. LASER-CHECK SURFACE MEASUREMENTS /OPTICAL DIMENSIONS. Lasercheck®Surface Roughness Measurement Gage. Products – [http://www.opticaldimensions.com/-index\\_files/Page2728.htm](http://www.opticaldimensions.com/-index_files/Page2728.htm)
5. Сопрунюк П.М., Івасів І.Б. та ін. Дослідження характеристик півциліндричного оптичного сенсора аналізатора дисперсного складу щільних полідисперсних середовищ // Відбір і обробка інформації. – 2004. – Вип. 20 (96). – С. 50 – 57.
6. Івасів І.Б. Розподіл параметрів зондувального пучка на робочій поверхні компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для аналізу характеристик аерозольних відкладень // Системы контроля окружающей среды: Сб. науч. тр. / НАН України. МГІ: – Севастополь, 2010. – С. 12 – 18.
7. Івасів І.Б. Формування сигналу компактного призматичного сенсора дифузного відбивання світла для контролю якості порошкових матеріалів і заготовок // Електромагнітні та акустичні методи неруйнівного контролю матеріалів та виробів. Праці XVI між нар. наук.-тех. конф. ЛЕОТЕСТ-2011, Славське Львівської обл., 21–26 лютого 2011 – Львів: Леотест-Медіум, 2011. – С. 186 – 189.
8. Іванов А.П., Лойко В.А., Дик В.П. Распространение света в плотноупакованных дисперсных средах.– Минск: Наука и техника, 1988. – 191 с.
9. Yuste S.B., Santos A., de Haro M.L. Structure of multi-component hard-sphere mixtures // J. Chem. Phys. – 1998. – v.108, N9. – P. 3683 – 3693.
10. Борен К., Хафмен Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. – Москва: Мир, 1986. – 660 с.